

*Escuela Técnica Superior de
Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*

TÉCNICAS PARAMÉTRICAS EN EL DISEÑO DE ARCOS PARA PUENTES. APLICACIÓN AL CASO DEL PUENTE DE SAN IGNACIO

Trabajo realizado por:

Roberto Cerdán del Amo

Dirigido:

David García Sánchez

Álvaro Gaute Alonso

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, septiembre de 2025



Roberto Cerdán del Amo

TFM





Roberto Cerdán del Amo

TFM



A mi abuela



Roberto Cerdán del Amo

TFM





AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia, por apoyarme de manera incondicional a lo largo de estos seis años alejado de casa, y a mis compañeros de clase y amigos, por hacerme sentir como si estuviera en ella. Gracias también a mis tutores, Álvaro y David, por su incesante ayuda durante todo el proceso de elaboración de este trabajo.



Roberto Cerdán del Amo

TFM





RESUMEN

Título del TFM: Técnicas Paramétricas en el diseño de Arcos para Puentes.
Aplicación al Caso del Puente de San Ignacio

Autor: Roberto Cerdán del Amo

Directores: David García Sánchez y Álvaro Gaute Alonso

Convocatoria: septiembre de 2025

Palabras clave: arco, puente, parametrización, Grasshopper, Midas Civil NX, optimización

Resumen:

El objetivo de este trabajo es analizar la aplicación de programas paramétricos, en este caso Grasshopper, a estructuras de tipo arco. Para ello, en el presente Trabajo de Fin de Máster se ha profundizado en el estudio del concepto de arco, así como la definición y concepción de un modelo paramétrico para el estudio del caso concreto del Puente de San Ignacio, situado sobre la Ría de Bilbao. Se ha realizado un modelo paramétrico tanto del puente existente, de tablero intermedio, como de una nueva propuesta de tablero inferior. Este trabajo guarda relación con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, entre los que destacan los relativos a infraestructuras resilientes, acción por el clima y ciudades sostenibles.

El arco es uno de los elementos estructurales más antiguos y simbólicos. Sus orígenes datan del año 4000 a.C., y numerosas civilizaciones lo han utilizado a lo largo de la historia. Un ejemplo de esto es la civilización romana para numerosos puentes, acueductos y edificaciones, convirtiéndose así en un icono de solidez y estética. Durante siglos, pensadores y arquitectos como Alberti, Palladio o Leonardo Da Vinci han tratado de estudiar la forma y definición del arco.

El arco trabaja principalmente por axil, canalizando las cargas a los apoyos o al tablero dependiendo de su geometría. Las tipologías de arco varían en función de su forma (medio punto, apuntado, parabólico), material (piedra, hormigón, acero), posición del tablero (superior, intermedio, inferior) y condiciones de apoyo. Su razón de ser reside en que la forma geométrica guía el flujo de cargas, minimizando los esfuerzos de flexión.

El caso de estudio se centra en el Puente de San Ignacio, en Bilbao. Esta estructura conecta el barrio de Deusto con la isla de Zorrotzaurre. Se trata de un puente de arco con tablero intermedio, donde los apoyos se encuentran empotrados y soportan importantes esfuerzos horizontales. La propuesta de este TFM consiste en sustituir esta tipología por un arco con tablero inferior. En esta configuración, el tablero actúa como tirante que recoge los esfuerzos horizontales, transmitiendo a los apoyos únicamente cargas verticales. La intervención busca optimizar la cantidad de material necesaria para la construcción del puente y el proceso constructivo, además de garantizar la movilidad multimodal: tráfico rodado, transporte público, bicicletas y peatones.



El modelado paramétrico es una metodología que permite definir geometrías mediante parámetros modificables, creando modelos dinámicos y adaptables. En este trabajo se ha empleado Grasshopper, conectado a Rhinoceros 3D, para generar la geometría paramétrica del puente. El modelo se ha vinculado con el software Midas Civil NX, especializado en cálculo estructural, lo que ha permitido iterar configuraciones de forma casi automática. Se han seleccionado algunos parámetros para ser modificados en la geometría: la flecha del arco, las dimensiones de vigas y arco, y el número de péndolas y de vigas transversales. Esta metodología permitió integrar diseño y cálculo en un flujo de trabajo unificado, garantizando un análisis eficiente de cada iteración. Se ha descrito en detalle el proceso creativo de esta parametrización.

Para comprobar la validez del modelo, se han fijado algunos parámetros para realizar unos cálculos sencillos a mano, que se han comparado con los resultados obtenidos para el modelo aplicando estos mismos valores, obteniendo resultados con un error muy bajo. De esta forma, la calibración del modelo ha resultado adecuada.

Se han realizado un total de nueve iteraciones de la nueva propuesta hasta hallar la geometría adecuada. El diseño se ha establecido con una limitación de tensiones de 0,9 veces el módulo de elasticidad del material en servicio. Las tensiones se han obtenido como la suma de las tensiones máximas en cada elemento para diferentes casos de carga: peso propio de la estructura aplicado a la parte metálica, sobrecarga de uso a tiempo inicial y carga permanente a tiempo infinito.

Las primeras iteraciones mostraban secciones sobredimensionadas y poco optimizadas. A medida que estas avanzaron, se ajustaron los parámetros utilizados, hasta hallar un equilibrio entre resistencia y material necesario.

La iteración final se ha definido con un arco de 20,0 metros de flecha y 1,6 metros de diámetro, con vigas longitudinales de 1,2 x 1,6 m y 21 péndolas por lado, con las respectivas vigas transversales en cada par de estas. Los resultados confirmaron la validez estructural, con tensiones dentro de los límites, comprobaciones a pandeo superadas y una reducción notable de esfuerzos en los estribos.

Se han comparado los diagramas de axiles, cortantes y momentos del modelo del puente existente y de la propuesta final, así como las tensiones y reacciones. La comparación ha reflejado una importante mejora: en el puente actual los estribos soportan grandes esfuerzos horizontales, mientras que en la propuesta dichos esfuerzos no han de ser soportados por los apoyos. Este cambio se logra disminuyendo la cantidad de acero en la estructura del puente y aumentando la de hormigón. Sin embargo, la principal diferencia radica en las propias cimentaciones, en las que la reducción de material requerido para su construcción resulta sustancial, generando un ahorro económico, mayor sencillez constructiva y una disminución de la huella de carbono.

Estructuralmente, se han logrado varias conclusiones, tales como el aumento del axil del tablero inferior y del arco de forma inversamente proporcional a la flecha del arco, la reducción de tensiones con el aumento de las secciones, la diferencia entre las reacciones necesarias en cada solución o las comparativas de comportamiento estructural y material necesario entre el modelo del puente existente y la iteración final del modelo de tablero inferior.



Este TFM permite concluir que el arco con tablero inferior representa una solución más eficiente que el diseño actual del puente de San Ignacio. La geometría del arco es determinante en la distribución de esfuerzos, y el uso de modelado paramétrico conectado con programas de cálculo ofrece una herramienta potente para explorar alternativas y optimizar estructuras. Las iteraciones realizadas demostraron que es posible reducir significativamente el consumo de materiales. En términos de sostenibilidad, la propuesta se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, al reducir la huella de carbono y mejorar la integración urbana. Este trabajo constituye un ejemplo de cómo la innovación tecnológica puede aplicarse al diseño de infraestructuras modernas y resilientes.



Roberto Cerdán del Amo

TFM





ABSTRACT

Title: Parametric Techniques in the Design of Arch Bridges. Application to the San Ignacio Bridge

Author: Roberto Cerdán del Amo

Directors: David García Sánchez and Álvaro Gaute Alonso

Submission period: September 2025

Keywords: arch, bridge, parametrization, Grasshopper, Midas Civil NX, optimization

Abstract:

The objective of this work is to analyze the application of parametric software – specifically Grasshopper – to arch-type structures. To this end, the present work explores the study of the concept of the arch, as well as the definition and conception of a parametric model for the specific case of the San Ignacio Bridge, located over the Bilbao estuary. A parametric model has been developed both for the existing bridge, with a mid-span deck, and for a new proposal with a lower deck. This work is aligned with several Sustainable Development Goals, particularly those related to resilient infrastructure, climate action, and sustainable cities.

The arch is one of the oldest and most symbolic structural elements. Its origins date back to 4000 B.C., and it has been used by numerous civilizations throughout history. The Romans, for example, employed it in countless bridges, aqueducts, and buildings, making it an icon of solidity and aesthetics. Over the centuries, thinkers and architects such as Alberti, Palladio, and Leonardo Da Vinci studied the form and definition of the arch.

The arch primarily works in compression, channeling loads to the supports or the deck depending on its geometry. Arch typologies vary according to their shape (semicircular, pointed, parabolic), material (stone, concrete, steel), deck position (upper, mid-span, lower), and support conditions. Its essence lies in how its geometric form guides the load flow, minimizing bending stresses.

The case study focuses on the San Ignacio Bridge in Bilbao. This structure connects the Deusto district with Zorrotzaurre island. It is a mid-span deck arch bridge, with fixed supports that resist significant horizontal forces. The proposal of this thesis consists of replacing this typology with a lower-deck arch. In this configuration, the deck acts as a tie that absorbs the horizontal forces, transmitting only vertical loads to the supports. The proposal's aim is to optimize material consumption for the bridge's construction and its building process, while also ensuring multimodal mobility: road traffic, public transport, bicycles, and pedestrians.

Parametric modeling is a methodology that allows geometries to be defined through adjustable parameters, generating dynamic and adaptable models. In this work, Grasshopper, linked to Rhinoceros 3D, was used to generate the bridge's parametric geometry. The model was connected with Midas Civil NX, specialized structural analysis software, which enabled automated iterations of different configurations. Some



parameters were selected for variation in the geometry: arch rise, beam and arch dimensions, number of hangers, and number of crossbeams. This methodology integrated design and structural analysis in a unified workflow, ensuring efficient evaluation of each iteration. The creative process of this parametrization is described in detail.

To validate the model, some parameters were fixed to perform simple hand calculations, which were then compared with the results of the model using the same values. The results showed very low error, confirming that the model calibration was appropriate.

A total of nine iterations of the new proposal were carried out until the appropriate geometry was found. The design was defined with a stress limitation of 0.9 times the elastic modulus of the material in service. Stresses were calculated as the sum of the maximum stresses in each element for different load cases: self-weight applied to the steel part, initial service live loads, and permanent long-term loads.

The first iterations showed oversized, inefficient sections. As the process advanced, the parameters were adjusted until a balance between strength and material use was achieved.

The final iteration was defined with an arch of 20.0 meters rise and 1.6 meters diameter, longitudinal beams of 1.2 x 1.6 m, and 21 hangers per side, with corresponding crossbeams at each pair of hangers. The results confirmed structural validity, with stresses within limits, buckling checks passed, and a significant reduction of forces on the supports.

Axial, shear, and bending moment diagrams of both the existing bridge and the final proposal were compared, along with stresses and reactions. The comparison reflected substantial improvements: in the current bridge, supports resist large horizontal forces, while in the proposed design these are minimized. This reduction was achieved by decreasing the amount of steel in the bridge structure and increasing concrete use. However, the main difference lies in the foundations, where the material required for construction was substantially reduced, resulting in economic savings, simpler construction, and a decreased carbon footprint.

Structurally, several conclusions were reached, such as the increase in axial forces in both the lower deck and the arch inversely proportional to the arch rise, the reduction of stresses with increasing section sizes, the differences in required reactions in each solution, and the structural behavior and material demand comparisons between the existing bridge model and the final lower-deck model.

This thesis concludes that the lower-deck arch represents a more efficient solution than the current design of the San Ignacio Bridge. The geometry of the arch is determinant in the distribution of forces, and the use of parametric modeling connected to structural analysis software provides a powerful tool to explore alternatives and optimize structures. The iterations carried out demonstrated that it is possible to significantly reduce material consumption. In terms of sustainability, the proposal aligns with the Sustainable Development Goals by reducing the carbon footprint and enhancing urban integration. This work illustrates how technological innovation can be applied to the design of modern and resilient infrastructure.



Roberto Cerdán del Amo

TFM





CONTENIDO

CONTENIDO.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	14
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS.....	17
1 INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 Motivación y objetivos.....	19
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.3 Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	20
2 EL ARCO COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL.....	21
2.1 Breve historia del arco.....	21
2.2 Búsqueda de la definición del concepto de arco.....	23
2.3 Razón de ser del arco.....	24
2.4 Tipologías de arco y comportamiento estructural.....	29
2.4.1 Según la presencia de enjutas.....	29
2.4.2 Según el material.....	30
2.4.3 Según su forma.....	31
2.4.4 Según la posición del tablero.....	32
2.4.5 Según las condiciones de los apoyos.....	33
2.4.6 Según su sección.....	33
2.4.7 Según la directriz.....	33
3 PUENTE ARCO SAN IGNACIO.....	34
3.1 Localización.....	34
3.2 Características.....	34
3.2.1 Condicionantes.....	34
3.2.2 Esquema resistente.....	34
3.2.3 Materiales.....	35
3.2.4 Equipamientos.....	36
3.2.5 Compatibilidad con el régimen de avenidas de la ría.....	36
3.2.6 Proceso constructivo.....	36
4 MODELADO PARAMÉTRICO.....	37
4.1 Introducción al modelado paramétrico.....	37
4.1.1 Origen.....	37
4.1.2 Modelos analógicos.....	37



4.1.3	Transición al entorno digital	38
4.1.4	Modelos digitales	39
4.1.5	Tendencias actuales	39
4.2	Tendencias de diseño: hacia dónde avanza el mercado	39
4.2.1	Contrucciones resilientes preparadas para el cambio	40
4.2.2	2. Simular antes de construir	40
4.2.3	3. Sostenibilidad diseñada desde el plano	40
4.3	Introducción al programa utilizado	40
5	MIDAS CIVIL	42
5.1	Descripción del software	42
5.2	Justificación de su elección	42
6	CONEXIÓN ENTRE PROGRAMAS	43
7	ELECCIÓN DE PARÁMETROS A ITERAR	45
7.1	Flecha del arco	45
7.2	sección del arco y de la viga longitudinal	45
7.3	Número de péndolas	45
8	CÁLCULO DE LA NUEVA PROPUESTA	46
8.1	Geometría	46
8.1.1	Variación del modelo	46
8.1.2	Condiciones de contorno	46
8.2	Acciones consideradas	46
8.2.1	Peso propio	46
8.2.2	Carga permanente	47
8.2.3	Sobrecarga de uso	48
8.3	Elaboración del modelo	50
8.3.1	Generación de las vigas longitudinales y doble T	50
8.3.2	Generación de los arcos	54
8.3.3	Generación de las vigas transversales	58
8.3.4	Generación de los cables	64
8.3.5	Generación de las secciones	66
8.3.6	Generación de los apoyos	68
8.3.7	Generación del ancho eficaz	69
8.3.8	Cálculo de volúmenes	74
9	CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO PREVIO	79
9.1	Programa de cálculo utilizado	79
9.2	Geometría	79



9.2.1	Simplificaciones realizadas	79
9.2.2	Condiciones de contorno	79
9.3	Acciones consideradas.....	79
9.3.1	Peso propio.....	79
9.3.2	Carga permanente	80
9.3.3	Sobrecarga de uso	80
9.4	Elaboración del modelo	81
9.4.1	Generación de las vigas longitudinales rectangulares	81
9.4.2	Generación de las vigas longitudinales doble T	82
9.4.3	Generación de la directriz del arco	84
9.4.4	Generación de las vigas transversales	86
9.4.5	Generación de los cables	88
9.4.6	Generación de las secciones	91
9.4.7	Generación de los apoyos	92
9.4.8	Generación del ancho eficaz	94
9.4.9	Cálculo de volúmenes	94
10	CÓDIGO COMPLETO UTILIZADO	97
11	CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	99
11.1	Metodología utilizada	99
11.2	Simplificaciones realizadas y modelo analizado.....	101
11.3	Resolución a mano.....	101
11.4	Resultados del modelo de GH y Midas Civil NX	104
12	RESULTADOS.....	107
12.1	Resultados del puente existente	107
12.1.1	Fase metálica.....	107
12.1.2	Sobrecarga.....	110
12.1.3	Carga permanente	113
12.1.4	Cantidades de material	115
12.1.5	Resumen y combinación de cargas	115
12.2	Resultados de las iteraciones del puente propuesto	117
12.2.1	Iteración final	117
13	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	126
13.1	Comparación de flechas	126
13.2	Comparación de número de vigas transversales y péndolas	126
13.3	Comparación de secciones transversales.....	127
13.4	Comparación de modelos.....	128



13.4.1	Comparación de reacciones	128
13.4.2	Comparación de axiles	129
13.4.3	Comparación de cortantes	130
13.4.4	Comparación de momentos	131
13.4.5	Ahorro de material	133
14	CONCLUSIONES	134
14.1	Conclusiones relativas al arco	134
14.2	Conclusiones relativas a la parametrización de estructuras	134
14.3	Conclusiones sobre el caso de estudio	135
14.3.1	Arco	135
14.3.2	Viga longitudinal	135
14.3.3	Péndolas y vigas transversales	135
14.3.4	Reacciones	136
14.3.5	Ahorro de material	136
15	ANEXO DE RESULTADOS	137
15.1.1	Iteración 1	137
15.1.2	Iteración 2	145
15.1.3	Iteración 3	153
15.1.4	Iteración 4	161
15.1.5	Iteración 5	169
15.1.6	Iteración 6	177
15.1.7	Iteración 7	185
15.1.8	Iteración 8	193
16	REFERENCIAS.....	204



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. ODS relacionados con el presente TFM	20
Figura 2. Puerta de los Leones. Micenas, Grecia	21
Figura 3. Iwán de la mezquita del Profeta. Qazvin (Irán), s. XVI [1]	22
Figura 4. Puente medieval de Cangas de Onís. Asturias, España	22
Figura 5. Concepto de radián.....	25
Figura 6. Carga sobre un arco	25
Figura 7. Relación entre fuerzas en un arco	26
Figura 8. Representación para la búsqueda de la curvatura de un arco	26
Figura 9. Línea de presión para una viga con carga repartida.....	27
Figura 10. Momento flector en centro luz para la viga con carga repartida	27
Figura 11. Puente de Salginatobel [11]. Graubünden, Suiza	28
Figura 12. Puente de Alcántara [12]. Cáceres, España.....	29
Figura 13. Puente arco sobre el Tajo [13]. Extremadura, España	29
Figura 14. Puente de Triana. Sevilla, España.....	31
Figura 15. Puente Myke O'Callaghan, junto a la presa Hoover. Arizona, Estados Unidos ..	32
Figura 16. Puente de la Barqueta. Sevilla, España	32
Figura 17. Localización del puente de Zorrotzaurre [14].....	34
Figura 18. Sección transversal del tablero del puente existente	35
Figura 19. Sección transversal resistente del tablero	35
Figura 20. Sección del arco en los jabalcones (izquierda) y en el tramo central (derecha) ..	35
Figura 21. Perfil longitudinal del puente existente	35
Figura 22. Sistema de cadenas suspendidas con pesos utilizado por Gaudí [17]	37
Figura 23. Resultado de un experimento con pompas de jabón de Frei Otto [18].....	38
Figura 24. Ivan Sutherland operando Sketchpad y algunos de los diagramas del software (1963) [19].....	38
Figura 25. Ejemplo de la interfaz de GH	41
Figura 26. Conexión a Midas.....	43
Figura 27. Parámetros solicitados por el comando de conexión con el programa Midas Civil NX desde GH	43
Figura 28. Pantalla de inicio en Midas Civil NX.....	44
Figura 29. Forma de aplicación de la carga permanente	47
Figura 30. Número y anchura de carriles nominales, de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21]	48
Figura 31. Aplicación de la sobrecarga uniforme sobre la luz del puente	49
Figura 32. Punto de aplicación de la sobrecarga puntual	49
Figura 33. Caso de carga de la sobrecarga en la nueva propuesta del puente	50
Figura 34. Líneas generadas inicialmente	50
Figura 35. Segmento de longitud igual a la distancia entre los perfiles rectangulares dividido en dos partes iguales.....	51
Figura 36. Segmento transversal orientado	51
Figura 37. En verde, nuevos puntos generados tras el movimiento	52
Figura 38. En verde, directrices de las vigas longitudinales generadas	52
Figura 39. División de las curvas	52
Figura 40. Elementos de la viga rectangular subdivididos	53



Figura 41. Directrices de las vigas longitudinales	53
Figura 42. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (1 de 3).....	53
Figura 43. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (2 de 3).....	54
Figura 44. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (3 de 3).....	54
Figura 45. En verde, puntos en los que se han dividido las directrices de las secciones rectangulares	54
Figura 46. En verde, los vértices de las claves de los arcos	55
Figura 47. En verde, directrices de los arcos generadas	55
Figura 48. Proceso de generación de las directrices de los arcos	55
Figura 49. División de la línea central para obtener el número de elementos en los que se va a dividir el arco	56
Figura 50. En verde, proyección de los puntos en los que se ha dividido la viga de longitud igual a la luz en las directrices de los arcos.....	56
Figura 51. En verde, líneas que conforman los elementos de los arcos	57
Figura 52. Directrices generadas hasta el momento.....	57
Figura 53. Código utilizado para la generación de los segmentos del arco (1 de 2)	57
Figura 54. Código utilizado para la generación de los segmentos del arco (2 de 2)	58
Figura 55. En verde, los planos perpendiculares generados antes de eliminar el inicial y el final para un número de vigas transversales y péndolas igual a 25.....	58
Figura 56. En verde, planos perpendiculares generados tras la eliminación del plano inicial y el final para un valor de 25 péndolas	59
Figura 57. En verde, puntos por los que pasarán las vigas transversales	59
Figura 58. En verde, la línea de longitud igual a la base de las vigas rectangulares orientada junto a la de longitud igual a la distancia entre vigas rectangulares	60
Figura 59. En verde, directrices de la parte central de las vigas transversales generadas ..	60
Figura 60. En verde, directrices orientadas del centro de las vigas transversales.....	60
Figura 61. Modelo actualizado con la parte central de las vigas transversales	61
Figura 62. Proceso seguido para la generación de la parte central de las vigas transversales	61
Figura 63. En verde, punto inicial y final de los segmentos que representan la parte central de las vigas transversales	62
Figura 64. En verde, las directrices de las costillas de uno de los laterales	62
Figura 65. En verde, línea del tamaño de la mitad de la base de la sección de la viga rectangular generada	63
Figura 66. En verde, costillas generadas en el otro lado del puente.....	63
Figura 67. Modelo actualizado con las directrices de las costillas	63
Figura 68. Proceso generativo de las directrices de las costillas (1 de 2)	64
Figura 69. Proceso generativo de las directrices de las costillas (2 de 2)	64
Figura 70. En verde, puntos iniciales de los cables en el arco	64
Figura 71. En verde, puntos iniciales de los cables.....	65
Figura 72. Modelo actualizado con las directrices de los cables	65
Figura 73. Proceso generativo de los cables	65
Figura 74. Parámetros para la viga doble T	66
Figura 75. Elección de material acero S355.....	66
Figura 76. Proceso de generación de la sección de canto variable de las costillas	67



Figura 77. Generación de las secciones del arco y de la viga rectangular	67
Figura 78. Generación y aplicación de las secciones (1 de 3)	68
Figura 79. Generación y aplicación de las secciones (2 de 3)	68
Figura 80. Generación y aplicación de las secciones (3 de 3)	68
Figura 81. Generación de apoyos (1 de 2).....	69
Figura 82. Generación de apoyos (2 de 2).....	69
Figura 83. Longitud eficaz en vigas continuas y distribución de la anchura eficaz, según el Eurocódigo 4 [22]	70
Figura 84. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo inicial (1 de 2)	71
Figura 85. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo inicial (2 de 2)	71
Figura 86. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo inicial (1 de 2)	71
Figura 87. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo inicial (2 de 2)	71
Figura 88. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo inicial (1 de 2).....	72
Figura 89. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo inicial (2 de 2).....	72
Figura 90. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo infinito (1 de 2)	72
Figura 91. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo infinito (2 de 2)	72
Figura 92. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo infinito (1 de 2)	73
Figura 93. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo infinito (2 de 2)	73
Figura 94. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo infinito (1 de 2)	73
Figura 95. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo infinito (2 de 2)	73
Figura 96. Obtención del volumen de las vigas transversales	74
Figura 97. Código utilizado para la obtención de los volúmenes de vigas rectangulares ..	75
Figura 98. Código utilizado para la obtención de los volúmenes del arco	75
Figura 99. Código utilizado para la obtención del volumen de cables	76
Figura 100. En verde, las vigas longitudinales en su nueva posición.....	76
Figura 101. Superficie total de losa	77
Figura 102. Código utilizado para la obtención del volumen de losa	77
Figura 103. Código utilizado para la obtención de la superficie total de losa.....	77
Figura 104. Código utilizado para la obtención de volúmenes. Los valores que aparecen se han obtenido con unas dimensiones de ejemplo.....	78
Figura 105. Aplicación de la carga permanente en la solución existente	80
Figura 106. Aplicación de la sobrecarga de uso en la solución existente	81
Figura 107. Vigas longitudinales rectangulares generadas	81
Figura 108. Puntos obtenidos al dividir el segmento transversal en 4 partes iguales	82
Figura 109. Directrices de las vigas doble T longitudinales.....	82
Figura 110. División de vigas doble T longitudinales	83



Figura 111. Directrices de las vigas longitudinales creadas	83
Figura 112. Proceso constructivo de las directrices de las vigas longitudinales (1 de 2) ...	83
Figura 113. Proceso constructivo de las directrices de las vigas longitudinales (2 de 2) ...	84
Figura 114. En verde, directrices iniciales de los arcos	84
Figura 115. En verde, nueva posición de las directrices de los arcos	84
Figura 116. Modelo del puente existente actualizado con las directrices los elementos de los arcos	85
Figura 117. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (1 de 4) ...	85
Figura 118. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (2 de 4) ...	85
Figura 119. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (3 de 4) ...	86
Figura 120. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (4 de 4) ...	86
Figura 121. En verde, centro de las vigas transversales, dividido en cuatro elementos por cada viga.....	87
Figura 122. Modelo del puente existente, actualizado con las directrices de las vigas transversales	87
Figura 123. Código utilizado para la generación del centro de las vigas transversales (1 de 2).....	87
Figura 124. Código utilizado para la generación del centro de las vigas transversales (2 de 2).....	88
Figura 125. Código utilizado para la generación de las costillas de las vigas transversales (1 de 2)	88
Figura 126. Código utilizado para la generación de las costillas de las vigas transversales (2 de 2)	88
Figura 127. En verde, conjunto de puntos iniciales para la obtención de los puntos iniciales de los cables	89
Figura 128. En verde, puntos iniciales de los cables.....	89
Figura 129. En verde, puntos finales de los cables	90
Figura 130. En verde, directrices de los cables del puente actual	90
Figura 131. Modelo actualizado del puente con las directrices de los cables	91
Figura 132. Código utilizado para la generación de las directrices de los cables	91
Figura 133. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (1 de 3)	92
Figura 134. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (2 de 3)	92
Figura 135. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (3 de 3)	92
Figura 136. Proceso generativo de los apoyos del caso de tablero intermedio (1 de 2)	93
Figura 137. Proceso generativo de los apoyos del caso de tablero intermedio (2 de 2)	93
Figura 138. Código para la generación del ancho eficaz (1 de 2)	94
Figura 139. Código para la generación del ancho eficaz (2 de 2)	94
Figura 140. Código utilizado para la obtención del volumen de doble T.....	95
Figura 141. Código utilizado para la obtención del volumen de vigas rectangulares	95
Figura 142. Código utilizado para la obtención de los volúmenes del arco	95
Figura 143. Código utilizado para la obtención del volumen de cables.....	96
Figura 144. Código para la obtención de la superficie total de losa.....	96
Figura 145. Código utilizado para la obtención del volumen de losa	96
Figura 146. Código utilizado para la obtención de los volúmenes totales	96
Figura 147. Código utilizado para la generación del modelo (1 de 3)	97



Figura 148. Código utilizado para la generación del modelo (2 de 3)	98
Figura 149. Código utilizado para la generación del modelo (3 de 3)	98
Figura 150. Línea de presión para una viga con carga repartida	99
Figura 151. Representación para la búsqueda de la curvatura de un arco	100
Figura 152. Modelo de puente para el cálculo a mano	101
Figura 153. Criterio de signos utilizado	102
Figura 154. Obtención de fuerzas actuantes sobre la estructura analizada a mano	102
Figura 155. Obtención de las reacciones de la estructura analizada a mano	103
Figura 156. Obtención del axil de las vigas longitudinales de la estructura analizada a mano	103
Figura 157. Geometría utilizada para obtener el ángulo de arranque.....	104
Figura 158. Axil en los arranques del arco en la resolución a mano	104
Figura 159. Axil en los cables en la resolución a mano	104
Figura 160. Reacciones obtenidas en el modelo de GH y Midas Civil NX para el modelo de calibración	105
Figura 161. Axiles obtenidos en el modelo de GH y Midas Civil NX para el modelo de calibración	105
Figura 162. Axiles obtenidos en centro luz en el modelo de GH y Midas Civil NX	105
Figura 163. Axiles obtenidos en el arranque en el modelo de calibración de GH y Midas Civil NX	106
Figura 164. Modelo del puente existente analizado, sin losa	107
Figura 165. Reacciones en el modelo del puente existente para la fase metálica	107
Figura 166. Momentos en los empotramientos del modelo del puente existente en la fase metálica.....	108
Figura 167. Diagrama de axiles del modelo del puente existente en la fase metálica	108
Figura 168. Diagrama de cortantes en el modelo del puente existente para la fase metálica	109
Figura 169. Diagrama de momentos en el modelo del puente existente para la fase metálica	109
Figura 170. Tensiones en el modelo del puente existente para la fase metálica.....	109
Figura 171. Reacciones en los apoyos del puente existente para la sobrecarga de uso ..	110
Figura 172. Momentos en los apoyos del puente existente para la sobrecarga de uso ...	110
Figura 173. Diagrama de axiles en el puente existente para la sobrecarga de uso	111
Figura 174. Diagrama de cortantes en el puente existente para la sobrecarga de uso	111
Figura 175. Diagrama de momentos en el puente existente para la sobrecarga de uso ..	112
Figura 176. Tensiones en el puente existente para la sobrecarga de uso.....	112
Figura 177. Reacciones en los empotramientos del puente existente para la carga permanente.....	113
Figura 178. Momentos en los empotramientos para la carga permanente	113
Figura 179. Diagrama de axiles en el puente existente para la carga permanente	114
Figura 180. Diagrama de cortantes en el puente existente para la carga permanente	114
Figura 181. Diagrama de momentos en el puente existente para la carga permanente ..	114
Figura 182. Tensiones en el puente existente para la carga permanente	115
Figura 183. Geometría de la iteración final sin losa	117
Figura 184. Reacciones en la fase metálica para la iteración final	118
Figura 185. Axiles obtenidos en la fase metálica para la iteración final.....	118
Figura 186. Cortantes obtenidos en la fase metálica para la iteración final.....	118
Figura 187. Momentos obtenidos en la fase metálica para la iteración final.....	119



Figura 188. Tensiones obtenidas en la fase metálica para la iteración final.....	119
Figura 189. Reacciones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final	120
Figura 190. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final ..	120
Figura 191. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final	120
Figura 192. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final	121
Figura 193. Tensiones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final	121
Figura 194. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración final	122
Figura 195. Axiles obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final.....	122
Figura 196. Cortantes obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final	122
Figura 197. Momentos obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final	123
Figura 198. Tensiones obtenidas en el caso de carga permanente para la iteración final	123
Figura 199. Comparación de diagramas de axiles de la iteración final (superior) y del caso del puente existente (inferior).....	130
Figura 200. Comparación del diagrama de cortante de la iteración final (superior) y el modelo del puente existente (inferior) en la fase metálica	131
Figura 201. Comparación del diagrama de momentos de la iteración final (superior) y el modelo del puente existente (inferior)	132
Figura 204. Estructura metálica en la iteración 1	137
Figura 205. Reacciones en la fase metálica para la iteración 1	138
Figura 206. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 1	138
Figura 207. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 1	138
Figura 208. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 1.....	139
Figura 209. Tensiones en fase metálica para la iteración 1	139
Figura 210. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1	140
Figura 211. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1	140
Figura 212. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1 .	141
Figura 213. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1	141
Figura 214. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1	141
Figura 215. Reacciones para el caso de carga permanente en la iteración 1	142
Figura 216. Diagrama de axiles en el caso de carga permanente para la iteración 1	143
Figura 217. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 1 .	143
Figura 218. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 1	143
Figura 219. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 1.....	144
Figura 220. Estructura metálica en la iteración 2	146
Figura 221. Reacciones en la fase metálica para la iteración 2	146
Figura 222. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 2	147
Figura 223. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 2	147
Figura 224. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 2.....	147
Figura 225. Tensiones en fase metálica para la iteración 2	148
Figura 226. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2	148
Figura 227. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2	149
Figura 228. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2 .	149



Figura 229. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2	149
Figura 230. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2	150
Figura 231. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 2	150
Figura 232. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 2.....	151
Figura 233. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 2 .	151
Figura 234. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 2	151
Figura 235. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 2.....	152
Figura 236. Estructura metálica en la iteración 3	154
Figura 237. Reacciones en la fase metálica para la iteración 3	154
Figura 238. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 3	155
Figura 239. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 3	155
Figura 240. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 3.....	155
Figura 241. Tensiones en fase metálica para la iteración 3	156
Figura 242. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3	156
Figura 243. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3	157
Figura 244. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3 .	157
Figura 245. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3	157
Figura 246. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3	158
Figura 247. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 3	158
Figura 248. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 3.....	159
Figura 249. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 3 .	159
Figura 250. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 3	159
Figura 251. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 3.....	160
Figura 252. Estructura metálica en la iteración 4	162
Figura 253. Reacciones en la fase metálica para la iteración 4	162
Figura 254. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 4	163
Figura 255. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 4	163
Figura 256. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 4.....	163
Figura 257. Tensiones en fase metálica para la iteración 4	164
Figura 258. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4	164
Figura 259. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4	165
Figura 260. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4 .	165
Figura 261. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4	165
Figura 262. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4	166
Figura 263. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 4	166
Figura 264. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 4.....	167
Figura 265. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 4 .	167
Figura 266. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 4	167
Figura 267. Estructura metálica en la iteración 5	170
Figura 268. Reacciones en la fase metálica para la iteración 5	170
Figura 269. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración	171
Figura 270. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 5	171
Figura 271. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 5.....	171
Figura 272. Tensiones en fase metálica para la iteración 5	172
Figura 273. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5	172



Figura 274. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5	173
Figura 275. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5 .	173
Figura 276. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5	173
Figura 277. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5	174
Figura 278. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 5	174
Figura 279. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 5.....	175
Figura 280. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 5 .	175
Figura 281. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 5	175
Figura 282. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 5.....	176
Figura 283. Estructura metálica en la iteración 6	178
Figura 284. Reacciones en la fase metálica para la iteración 6	178
Figura 285. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 6	179
Figura 286. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 6	179
Figura 287. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 6.....	179
Figura 288. Tensiones en fase metálica para la iteración 6	180
Figura 289. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6	180
Figura 290. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6	181
Figura 291. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6 .	181
Figura 292. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6	181
Figura 293. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6	182
Figura 294. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 6	182
Figura 295. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 6.....	183
Figura 296. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 6 .	183
Figura 297. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 6	183
Figura 298. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 6.....	184
Figura 299. Estructura metálica en la iteración 7	186
Figura 300. Reacciones en la fase metálica para la iteración 7	186
Figura 301. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 7	187
Figura 302. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 7	187
Figura 303. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 7.....	187
Figura 304. Tensiones en fase metálica para la iteración 7	188
Figura 305. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7	188
Figura 306. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7	189
Figura 307. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7 .	189
Figura 308. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7	189
Figura 309. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7	190
Figura 310. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 7	190
Figura 311. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 7.....	191
Figura 312. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 8 .	191
Figura 313. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 7	191
Figura 314. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 7.....	192
Figura 315. Estructura metálica en la iteración 8	194
Figura 316. Reacciones en la fase metálica para la iteración 8	194
Figura 317. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 8	195
Figura 318. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 8	195



Figura 319. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 8.....	195
Figura 320. Tensiones en fase metálica para la iteración 8	196
Figura 321. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8	196
Figura 322. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8	197
Figura 323. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8 .	197
Figura 324. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8	197
Figura 325. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8	198
Figura 326. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 8	198
Figura 327. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 8.....	199
Figura 328. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 8 .	199
Figura 329. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 8	199
Figura 330. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 8.....	200
Figura 331. Axiles en el caso de arco metálico.....	202



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor de las sobrecargas debidas al tráfico de vehículos en la nueva propuesta .	49
Tabla 2. Valor de las sobrecargas debidas al tráfico de vehículos en la propuesta existente	80
Tabla 3. Valores máximos y mínimos en cada elemento del puente existente para la fase metálica.....	110
Tabla 4. Valores máximos y mínimos en el puente existente para la sobrecarga de uso .	112
Tabla 5. Valores máximos y mínimos hallados en el puente existente para la carga permanente.....	115
Tabla 6. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para el modelo del puente existente	115
Tabla 7. Reacciones en el puente existente para los diferentes casos de carga	116
Tabla 8. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para el puente existente	116
Tabla 9. Parámetros utilizados en la iteración final.....	117
Tabla 10. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la iteración final	119
Tabla 11. Valores máximos y mínimos para el caso de sobrecarga de uso	121
Tabla 12. Valores máximos y mínimos en el caso de carga permanente para la iteración final	123
Tabla 13. Cantidad de material necesaria para la iteración final	124
Tabla 14. Reacciones obtenidas en la iteración final	124
Tabla 15. Valores máximos y mínimos obtenidos y combinación de cargas	124
Tabla 16. Comparación de axiles de las iteraciones 1 y 2	126
Tabla 17. Comparación de tensiones de las iteraciones 2 y 3	127
Tabla 18. Valores de los parámetros utilizados en las iteraciones 8 y final	127
Tabla 19. Comparación de tensiones de las iteraciones 8 y final	127
Tabla 20. Comparación de axiles de las iteraciones 8 y final	128
Tabla 21. Reacciones en la iteración final y en el caso existente	128
Tabla 22. Valor de los axiles obtenidos en la iteración final y en el caso del puente existente	129
Tabla 23. Comparación de tensiones en el arco y en las vigas longitudinales para la fase metálica de la iteración final y el caso existente	129
Tabla 24. Material necesario para realizar la iteración final y el modelo del puente existente	133
Tabla 25. Parámetros de la iteración 1	137
Tabla 26. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 1.....	139
Tabla 27. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 1	142
Tabla 28. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 1.....	144
Tabla 29. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 1	144
Tabla 30. Reacciones totales en la iteración 1	145
Tabla 31. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 1 ...	145
Tabla 32. Parámetros utilizados para la iteración 2	145



Tabla 33. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 2.....	148
Tabla 34. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 2	150
Tabla 35. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 2.....	152
Tabla 36. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 2	152
Tabla 37. Reacciones totales en la iteración 2	153
Tabla 38. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 2 ...	153
Tabla 39. Parámetros utilizados en la iteración 3	153
Tabla 40. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 3.....	156
Tabla 41. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 3	158
Tabla 42. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 3.....	160
Tabla 43. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 3	160
Tabla 44. Reacciones totales en la iteración 3	161
Tabla 45. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 3 ...	161
Tabla 46. Parámetros utilizados en la iteración 4	162
Tabla 47. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 4.....	164
Tabla 48. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 4	166
Tabla 49. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 4.....	168
Tabla 50. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 4	168
Tabla 51. Reacciones totales en la iteración 4	169
Tabla 52. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 4 ...	169
Tabla 53. Parámetros utilizados en la iteración 5	169
Tabla 54. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 5.....	172
Tabla 55. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 5	174
Tabla 56. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 5.....	176
Tabla 57. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 5	176
Tabla 58. Reacciones totales en la iteración 5	177
Tabla 59. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 5 ...	177
Tabla 60. Parámetros utilizados en la iteración 6	177
Tabla 61. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 6.....	180
Tabla 62. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 6	182
Tabla 63. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 6.....	184
Tabla 64. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 6	184
Tabla 65. Reacciones totales en la iteración 6	185



Tabla 66. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 6 ...	185
Tabla 67. Parámetros utilizados en la iteración 7	185
Tabla 68. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 7.....	188
Tabla 69. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 7	190
Tabla 70. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 7.....	192
Tabla 71. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 7	192
Tabla 72. Reacciones obtenidas en la iteración 7.....	193
Tabla 73. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 7 ...	193
Tabla 74. Parámetros utilizados en la iteración final.....	193
Tabla 75. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 8.....	196
Tabla 76. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 8	198
Tabla 77. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 8.....	200
Tabla 78. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 8	200
Tabla 79. Reacciones totales en la iteración 8	201
Tabla 80. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 8 ...	201



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

GH	Grasshopper
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
RHINO	Rhinoceros 3D
TFM	Trabajo de Fin de Máster



Roberto Cerdán del Amo

TFM





1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El objeto de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) es el análisis de la aplicación de programas paramétricos a estructuras de tipo arco. Sin embargo, independientemente del estado de la técnica, se considera necesario comprender con anterioridad la razón de ser de la técnica que se va a utilizar. Por lo tanto, en el presente TFM se ha realizado también un ejercicio de recopilación de información acerca del arco, de acuerdo con las obras de algunos de los ingenieros más importantes. Para ello, se ha añadido en el trabajo un apartado teórico, donde se ha analizado el concepto de arco, su evolución a lo largo de la historia, sus tipologías y su comportamiento estructural.

Por otro lado, la ingeniería es un campo que destaca por la necesidad de aprendizaje e innovación constante. La aparición de nuevas tecnologías que permiten la optimización de estructuras hace que la necesidad de aprendizaje y mejora continua sea una condición inherente a la ingeniería.

Es por ello por lo que en este trabajo se ha analizado la utilización de un programa de parametrización conectado con un programa de cálculo de estructuras. De esta forma, se ha tratado de lograr adquirir conocimientos sobre estos programas, las interconexiones entre ellos, y la forma en la que se pueden adaptar al mundo de la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Para aplicar este modelo, se han analizado distintos arcos con tablero inferior como posible alternativa al actual puente de San Ignacio, en Zorrotzaurre (Bizkaia). Para ello, se han planteado distintas técnicas paramétricas de cara a optimizar su geometría y reducir el uso de material, ajustando selectivamente los parámetros estructurales relevantes.

En resumen, en el presente TFM se ha profundizado en el estudio del concepto del arco, así como la definición y concepción de un modelo paramétrico para el estudio de un caso concreto, con todos los elementos interconectados y con relaciones de dependencia entre ellos, para así conseguir un modelo fácilmente modificable según las necesidades del diseño.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El puente de San Ignacio une Deusto con la isla de Zorrotzaurre en Bizkaia. Este puente es de tipo arco con tablero intermedio, lo que hace que se generen importantes esfuerzos horizontales en los apoyos, que están empotrados.

Mediante una solución de tipo arco con tablero inferior, como la que se plantea en el presente TFM, se logra que los esfuerzos sean meramente verticales en los estribos, ya que el tablero es el que recoge todos los esfuerzos horizontales. Para tratar este problema, en este trabajo se ha realizado un modelo de cálculo aplicado al puente de San Ignacio, que incluye la parametrización y la obtención de resultados estructurales de dicho puente. De esta forma, se han comparado ambas soluciones para tratar de optimizar el diseño.

1.3 RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

La parametrización de estructuras es una herramienta muy potente en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). A continuación, se listan los ODS más relevantes en relación con el presente TFM.

- ODS 12: Producción y consumo responsables: el modelado paramétrico permite un uso más eficiente de recursos, tales como acero y hormigón, así como la reducción de residuos en obra gracias a un diseño más ajustado.
- ODS 8: La construcción de un puente en la ría de Bilbao permite crear puestos de trabajo directa e indirectamente, además de suponer un crecimiento económico para la ciudad gracias a las nuevas conexiones realizadas.
- ODS 13: Acción por el clima: optimizar el puente implica reducir materiales, emisiones y huella de carbono durante la construcción y el ciclo de vida.
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: el TFM está directamente relacionado con el diseño de infraestructuras resilientes y sostenibles, aportando metodologías innovadoras como la parametrización para diseñar puentes de manera más eficiente.
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: el puente es parte de la movilidad urbana de Bilbao. Favorece la conectividad entre barrios integrando tráfico rodado, transporte público, carril bici y aceras peatonales. Se relaciona con la planificación de una ciudad más accesible, inclusiva y cohesionada.
- ODS 6: Agua limpia y saneamiento: este TFM permite buscar una alternativa que altere y contamine en menor medida la ría de Bilbao en su proceso constructivo.
- ODS 14: Vida submarina: al igual que en el caso anterior, una alternativa que afecte en menor medida a la ría afectará en menor medida a la vida submarina que habita en ella.



Figura 1. ODS relacionados con el presente TFM

2 EL ARCO COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

2.1 BREVE HISTORIA DEL ARCO

El arco ha sido objeto de uso a lo largo de muchas civilizaciones en la historia. Sin embargo, no siempre su estética e ingeniería han sido alabadas, pues durante mucho tiempo su invención fue achacada al diablo. Pese a ello, el arco ha sido mayoritariamente símbolo de grandeza y estética. Prueba de ello es su elección como monumento para proclamar la victoria.

El uso del arco en la arquitectura se remonta al año 4000 a.C., cuando se construía con ladrillos al sol. Este elemento permitía abrir huecos en los muros o realizar construcciones subterráneas, siendo esta última su principal utilidad de la época.

No es hasta el 2000 a.C. que aparecen los primeros arcos en casas o templos, tales como el desenterrado en la puerta de una casa de adobe en Tell Taya, Irak. Las civilizaciones micénicas también utilizaron los arcos en sus construcciones, tal como se puede comprobar hoy en día en la Puerta de los Leones (ver Figura 2) o en la bóveda del Tesoro de Atreo del yacimiento arqueológico de Micenas.

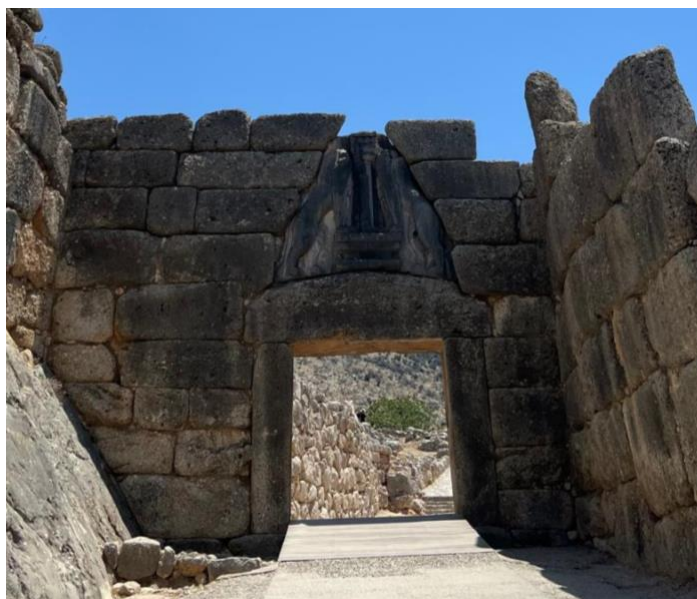


Figura 2. Puerta de los Leones. Micenas, Grecia

En el siglo VI a.C., aparece en Persia el *iwan* (ver Figura 3), un porche bajo un arco con tres de sus caras cerradas. Con el tiempo, este se convirtió en una seña de identidad de la cultura islámica.



Figura 3. Iwán de la mezquita del Profeta. Qazvin (Irán), s. XVI [1]

Los romanos fueron los primeros en apreciar las posibilidades arquitectónicas del arco en: puertas, puentes, acueductos... incluso el ya mencionado arco del triunfo. Sin embargo, no hay constancia de que estos trataran de comprender la física que hay detrás de los arcos. Vitruvio, en su obra *Los diez libros de la arquitectura* [2], dice que para abrir un hueco en un muro o una puerta debemos “descargar los muros por medio de arcos compuestos de dovelas cuyas juntas converjan hacia su centro”, pero no menciona nada más relevante en relación con este tema en su obra.



Figura 4. Puente medieval de Cangas de Onís. Asturias, España

El primero en tratar de comprender con gran dedicación el funcionamiento de los arcos fue Leonardo Da Vinci (1452 – 1519) y, desde entonces, establecer la forma y el grosor ideal del arco resultó objeto de estudio para científicos y arquitectos a lo largo de los siglos [3].



2.2 BÚSQUEDA DE LA DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE ARCO

A lo largo de la historia, la construcción de arcos y la experiencia obtenida en base a ello ha ido modificando la definición del concepto de arco. En este apartado, se ha analizado la evolución de este concepto hasta los finales de la Edad Moderna. Para ello, se ha utilizado como apoyo el libro de Carlos Fernández Casado titulado *La Arquitectura del Ingeniero* [4].

Varron (116 – 27 a.C.), de acuerdo con una referencia de León Bautista Alberti [5], ofrece una primera definición al concepto de arco. Este señala que “en una estructura de arco tanto está soportada la parte derecha sobre la izquierda, como esta sobre aquella”.

Años después, aparece una nueva definición del concepto conocida en nuestros días, que se encuentra grabada en la inscripción del puente de Alcántara (104 – 106 d.C.), obra del ingeniero Caius Julius Lácer – o, al menos, eso indica una inscripción en el monumento, pese a que hoy en día se duda de la existencia de este ingeniero–, donde se indica lo siguiente: *ars¹ urbi materia vincitur ipsa sua* que, traducido, significa que se trata de un “artificio mediante el cual la materia se vence a ella misma”.

Como se ha mencionado con anterioridad, Vitruvio no teorizó sobre el arco, probablemente debido a que toma de fuentes griegas sus teorías y estos no se interesaron en gran medida por esta forma.

Muchos años pasaron hasta encontrar una nueva definición de arco en el Renacimiento. En esta época, casi todos los tratadistas de Arquitectura ofrecen su propia definición de forma más o menos explícita. A continuación, se van a repasar ahora algunas de ellas.

León Bautista Alberti (1404 – 1472), da en el decimotercer capítulo de su libro *De re aedificatoria* [5] su explicación del concepto de arco. En él, el autor parte de dos vigas rectas de madera idénticas apareadas, cuyas cabezas se juntan y cuyos pies se afirman, de forma que se consigue el equilibrio (*ut mutuo: innexu paribusque contra se ponderi subsisterent*). Si la luz que se desea cubrir es mayor, dos vigas resultan insuficientes, por lo que habría que introducir una tercera viga formando un trapecio. Si se continúa realizando este ejercicio de aumento de luz y de vigas, se llega finalmente a un perfil poligonal de cuñas, similar al concepto de arco como asociación de dovelas donde, según el autor y haciendo referencia al esqueleto humano, las más bajas son “cabezas firmes” que soportan todo el arco, las intermedias son una “espinas dorsal” y las centrales son las “costillas”. Una vez ajustadas las piezas entre sí, dice, ninguna de ellas puede expulsar a las inmediatas debido a los pesos de estas.

Antonio Filarete (c. 1400 – c. 1469) plantea el problema del arco debido a las puertas de una edificación en el *Tratatto di Architettura* [6]. En él, se recogen algunas conversaciones entre el príncipe y su arquitecto, entre las cuales este segundo le asegura que el arco de medio punto es más bello que el apuntado, puesto que “Es indudable que una cosa que pone obstáculos a la visión no es tan bella como la que guía al ojo sin cortar su movimiento”.

¹ Del griego *tekné*. Artificio o disposición técnicas.



El anteriormente mencionado Leonardo Da Vinci (1452 – 1519), da también su definición del arco en el *Códice A* del Instituto de Francia [7], concretamente en el epígrafe *Che cosa è arco*:

Arco non è altro che una forteza causata da due debolezze, imperoché l'arco negli edifizii è composto di 2 quarti di círculo, i quali quarti circuli e ciascuno debolísimo per se desidera cadere e oponen dosi allá ruina l'uno dell altro, le due debolezze si con vertano in única fortaleza.

Con esta afirmación, Leonardo Da Vinci trata de explicar su teoría sobre el arco hablando de este como una fuerza causada por dos debilidades, que son dos cuartos de círculo que quieren caer y, al oponerse el uno al otro, se convierten en una sola fuerza. En sus teorizaciones sobre el concepto del arco, Da Vinci es el primero en hablar sobre una entidad física conocida hoy en día como esfuerzo, donde menciona que existe una actuación de acciones y reacciones equilibradas canalizados a lo largo del arco sin dejarlos escapar del espacio que materializa.

Para Andrea Palladio (1508 – 1580), el arco aparece a propósito de los puentes en el tercer libro de *I quattro libri della Architettura* [8]. En él, se indica que “todas las dovelas que están delimitadas por los montantes serán concéntricas, lo que hará la obra fortísima”. Habla también del paso de puentes de madera a los de piedra, y más concretamente de su forma, pues considera “fortísimos los que se hacen de medio punto”, aunque si se debe rebajar el arco, será necesario que los cimientos “sean fortísimos”. Los estribos, de acuerdo con el libro, deben ser “firmísimos”, puesto que “no solo sirven para sostener la carga de los arcos, sino que además han de mantener unido todo el puente sin permitir que los arcos se abran”.

2.3 RAZÓN DE SER DEL ARCO

Tal y como afirma Eduardo Torroja en su libro *Razón y Ser de los Tipos Estructurales* [9]:

“Todo proyectista que descuide el conocimiento de sus principios está expuesto a graves fracasos”.

Es en base a esta afirmación que se considera necesario tratar de explicar, en este apartado, la razón de ser de los arcos como elemento estructural, pues resulta imperativo conocer la esencia del razonamiento estructural para defender la lógica de la idea. Con objeto de realizar esta explicación junto con la evolución de los hechos que llevaron a los conocimientos que se tienen sobre la esencia del arco en la actualidad, se va a tratar de relacionar los diferentes avances a lo largo de la historia de la Teoría de las Estructuras con la simplificación de los arcos hasta lo que conocemos en nuestros días.

Pese a que el arco es un elemento estructural ampliamente utilizado desde hace mucho tiempo, no ha sido hasta hace relativamente poco que se ha comprendido verdaderamente su esencia. Para comprender de forma adecuada la razón de ser de los arcos es necesario, en primer lugar, conocer qué es estrictamente un arco. Para ello, se debe comenzar por entender una forma más sencilla, como lo es un círculo, y recorrer la evolución histórica que ha llevado a la simplificación de los modelos actuales.

Según describe Javier Torres en su artículo *Una visión de las estructuras a partir de sus enseñanzas. De cómo hacer las cosas sencillas* [10], los primeros pasos en la historia sobre la Teoría de las Estructuras los dan los británicos, con Hooke, Newton y Young entre

otros. En lo relativo a la historia del arco, cabe destacar en esta época la definición del concepto de radián: arco de circunferencia de longitud igual a su radio. Gracias a esta simplificación, se sustituye el concepto de grados de un arco por un concepto físico, lo que hace que el uso de las circunferencias en la matemática se simplifique.

Tras esto son los alemanes, con Euler a la cabeza, los que dan con una ecuación capaz de expresar los descubrimientos anteriores. Para llegar a esta ecuación es necesario realizar antes un proceso de comprensión de los conceptos básicos de un círculo.

Se puede definir la curvatura como la cantidad de giro por unidad de longitud de una alineación. Con este concepto y la definición de radián, se observa que la cantidad de giro por unidad de longitud es igual al ángulo girado: 1 radián entre el arco es igual a un radio.

$$\kappa = \frac{d\theta}{dl} = \frac{1}{R}$$

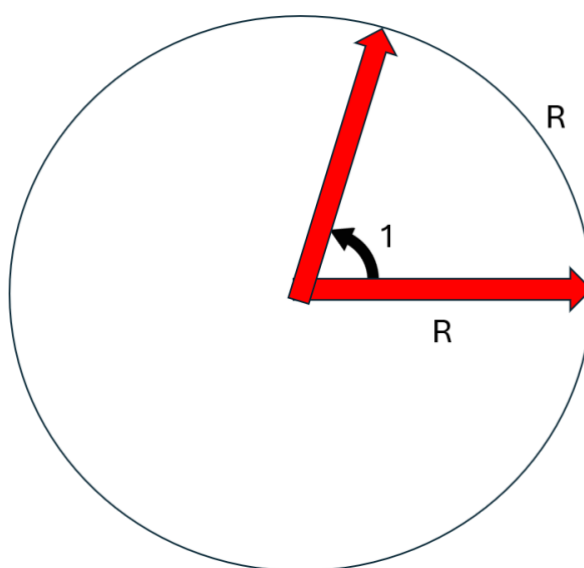


Figura 5. Concepto de radián

En el caso de los arcos, la carga orienta la resultante del esfuerzo de acuerdo con la directriz del arco. De esta manera, el arco trabaja por forma, fundamentalmente a esfuerzo axial. Es por ello por lo que se define coloquialmente el concepto de arco como un “tubo de fuerzas”.

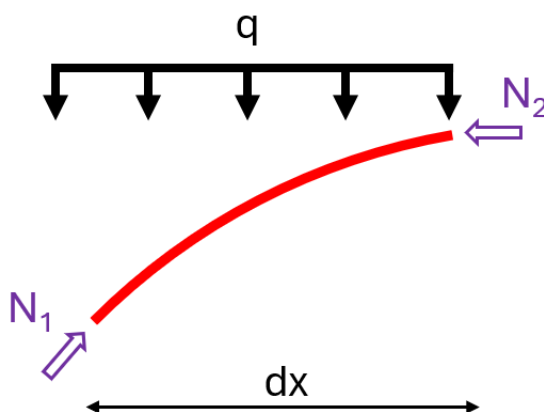


Figura 6. Carga sobre un arco

Al ser la longitud L mucho mayor que la altura h , la tangente de un ángulo se puede asimilar al valor de dicho ángulo:

$$L \gg h \rightarrow \tan(\theta) \sim \sin(\theta) \sim \theta$$

Teniendo esto en cuenta, de acuerdo con la Figura 7, se obtiene:

$$d\theta = \frac{P * dx}{H} \rightarrow H = \frac{P}{\frac{d\theta}{dx}} = \frac{P}{x}$$

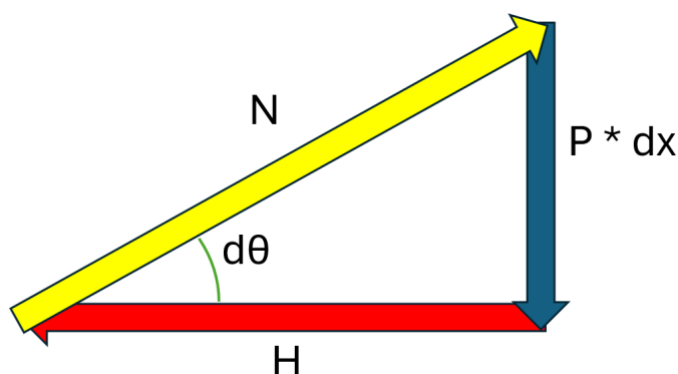


Figura 7. Relación entre fuerzas en un arco

El siguiente paso consiste en asimilar el arco a una parábola de segundo grado. Si se traza una tangente a la directriz del arco en sus arranques, la cota que alcanza en el centro de luz del arco es equivalente al doble de su flecha o canto. De esta forma, se puede obtener la curvatura de un arco como el ángulo girado desde el arranque hasta el centro de luz, dividido entre la mitad de la luz del arco (ver Figura 8):

$$x = \frac{d\theta}{dx} = \frac{\frac{2h}{L/2}}{L/2} = \frac{8h}{L^2}$$

donde

- x curvatura del arco
- L luz del arco
- h flecha del arco

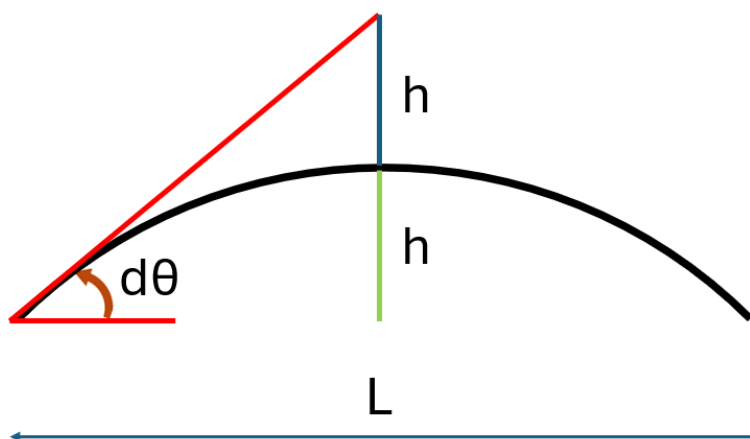


Figura 8. Representación para la búsqueda de la curvatura de un arco

A continuación, se muestra la resolución de la línea de presión para vigas con carga repartida (ver Figura 9) para ejemplificar este concepto.

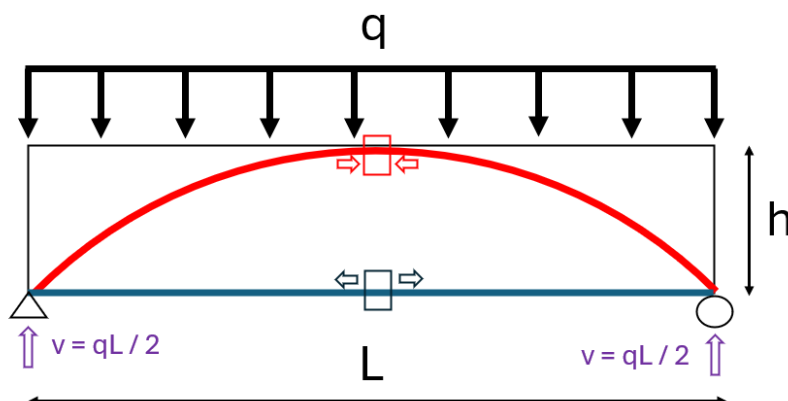


Figura 9. Línea de presión para una viga con carga repartida

Debido a la simetría, tanto de la estructura como del estado estructural, cada apoyo se lleva la mitad de la carga repartida. El esfuerzo en el tirante inferior H es inversamente proporcional a la curvatura del arco encargado de transmitir la carga vertical a los apoyos, por lo tanto:

$$v = \frac{qL}{2} \rightarrow H = \frac{q}{x} = \frac{qL^2}{8h}$$

donde

- v reacción en los apoyos
- q carga repartida
- L longitud de la viga
- H esfuerzo en el tirante inferior
- x curvatura
- h altura de la viga

De esta forma, si se realiza un corte en el centro de luz de la viga, se encuentra la situación que se muestra en la Figura 10, en la que la línea de compresiones se encuentra en el punto superior de la viga, mientras que el punto de la línea de tracciones se encuentra en el punto más bajo. Estos están, por tanto, separados una distancia h igual a la altura de la viga.

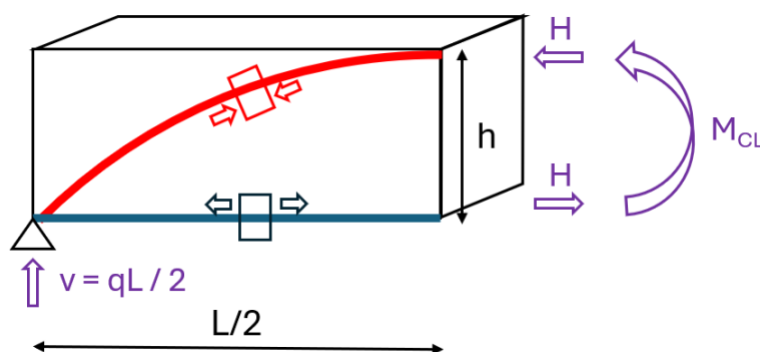


Figura 10. Momento flector en centro luz para la viga con carga repartida

Con esto, se concluye que el momento flector en el centro de luz es igual a la fuerza H multiplicada por la distancia h igual a la altura resultando, por tanto:

$$M_{CL} = H * h = \frac{qL^2}{8h} * h = \frac{qL^2}{8}$$

donde

- H fuerza horizontal en el centro de luz de la viga
- h altura de la viga
- q carga repartida
- L longitud de la viga

Continuando con el proceso de comprensión de la idea de arco en la sociedad, si se avanza hasta la historia algo más reciente, fue el suizo Robert Maillart el que revolucionó la ingeniería estructural y la arquitectura, mediante la aplicación de estos conceptos en puentes como el Salginatobel (1930) o el de Schwandbach (1933). De esta forma, cambió la estética de los puentes y el uso de hormigón armado.



Figura 11. Puente de Salginatobel [11]. Graubünden, Suiza

Finalmente, Cross y Torroja realizaron una labor de estudio y comprensión del arco y, especialmente, de la cúpula. Este último concepto no es el objeto de estudio en este TFM.

2.4 TIPOLOGÍAS DE ARCO Y COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Para la explicación de este apartado, se ha hecho uso de algunas de las clasificaciones propuestas en el libro *Razón y Ser de los Tipos Estructurales* [9] de Eduardo Torroja.

Para construir un arco, es necesario tener los medios adecuados para poner los sillares uno después de otro y sostener todas sus dovelas hasta la colocación de la clave. Es solo a partir de este momento que el arco entra en carga, posiblemente uno de los hechos que le otorga a este tanta mística y belleza.

2.4.1 SEGÚN LA PRESENCIA DE ENJUTAS

Existen dos clases de arco en función de la presencia o ausencia de enjutas: el arco enjutado (ver Figura 12) o el arco exento (ver Figura 13).



Figura 12. Puente de Alcántara [12]. Cáceres, España



Figura 13. Puente arco sobre el Tajo [13]. Extremadura, España



En el primero de ellos, la flexión del arco está impedida por el material acompañante, y puede tomar la forma de una arquivolta. En el medievo y en el arte clásico se utilizaban este tipo de arcos.

Por otro lado, el arco exento, desde el punto de vista tensional, debe considerarse como un arco puro. Si un arco es exento y debe aprovechar bien su resistencia a flexión, este pide seguir la forma del funicular de las cargas. Si esta carga fuese exclusivamente su peso propio y su espesor fuese constante, la forma adecuada resultaría en la catenaria. Si se extiende uniformemente por la horizontal del tablero, esta forma sería una parábola de segundo grado, y si es la combinación de peso propio más tablero y tímpano, se suele tomar una parábola de sexto grado como solución suficientemente aproximada a la ley teórica del coseno hiperbólico según Strassner.

El arco exento, además, puede sufrir problemas de pandeo, aunque si están los extremos fijos, suele tomar una forma de pandeo más resistente que si se tratara de simples soportes. Si se trata de un arco estrecho, este también puede pandear por torsión o flexión transversal debida a la acción del viento.

Pese a estas desventajas, el arco exento es utilizado mayoritariamente en el mundo de los puentes. El hormigón – uno de los principales materiales utilizados en la ingeniería de puentes en nuestros días – presentaría importantes agrietamientos debido a deformaciones térmicas en arcos enjutados, fruto de la falta de deformabilidad de la estructura. Es por ello – además de la evidente razón del aumento considerable de costes – por lo que no se utilizan para este tipo de arcos, y una tipología más deformable, como los arcos exentos, es más adecuada para este tipo de material. De forma similar ocurre con el acero, aunque los miembros son mucho más esbeltos que en el caso del hormigón.

2.4.2 SEGÚN EL MATERIAL

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el arco trabaja principalmente a compresión. Con esta premisa, los arcos de materiales pétreos son adecuados para su construcción, concretamente en arcos enjutados. El arco exento, por otro lado, resulta más adecuado el uso de hormigón armado o acero.

El arco exento de piedra o ladrillo requeriría de importantes espesores para evitar las tracciones por flexión bajo la acción de sobrecargas móviles. En luces bajas puede ser suficiente con el peso de la piedra, pero para luces más altas resulta del todo inviable el uso de este material. Además, los puentes de piedra requieren de unas importantes cimentaciones como consecuencia de esto, lo que hace que, en el cómputo global, este tipo de arcos no sean utilizados en las nuevas construcciones de hoy en día por el consecuente coste económico y ambiental

El hormigón es un material muy utilizado en los puentes. En él, se deben tener en cuenta los efectos de retracción y fluencia.

En cuanto al acero, pese a tener un menor coeficiente económico-resistente en compresión que el hormigón, soporta mucho mejor que este las flexiones y tiene un peso mucho menor a igualdad de resistencia por lo que resulta más apto, especialmente, para luces grandes.

Además, en términos económicos, el acero supera ampliamente al hormigón armado debido a que este último requiere de cimbras, mientras que el acero posibilita otros métodos constructivos menos costosos.

Los arcos metálicos se utilizan durante el proceso constructivo, resistiendo exclusivamente su peso propio. Posteriormente, se rellenan de hormigón para soportar el peso propio, las cargas permanentes no resistentes y la sobrecarga de uso.

Existen también los arcos de madera, que se utilizan esencialmente para cimbras o pasarelas peatonales.

2.4.3 SEGÚN SU FORMA

La parábola del arco del puente es una línea de curvatura decreciente desde clave hacia el arranque. En arcos rebajados (ver Figura 14), esta variación de curvatura es menor, provocando un efecto más satisfactorio. En arcos peraltados, por otro lado, ocurre todo lo contrario, dando un resultado menos agradable, especialmente si estos se encuentran apoyados sobre pilas intermedias, pues la propia forma parece pedir que los arcos “bajen” a buscar sus arranques al terreno.



Figura 14. Puente de Triana. Sevilla, España

Sin embargo, lo que verdaderamente dota de carácter a un puente son su directriz y la ley de espesores a lo largo de esta. El cálculo solicita un mayor canto en los arranques que en la clave en arcos biempotrados y, de forma corriente, esta variación se realiza en función del coseno del ángulo de la directriz con la cuerda. En arcos biarticulados, esta ley de espesores es decreciente desde los riñones a las rótulas, hecho que resulta mucho menos estético que el anterior.

De cualquier forma, las curvas resultantes de la expresión matemática resultan complicadas, y ante la falta de necesidad del afinamiento de estas, se suelen tomar leyes parabólicas o exponenciales para estas.

La acción de la sobrecarga de uso y de los efectos locales de empotramiento sobre el estribo aconsejan aumentar el espesor del arco junto al arranque.

Con todo esto, se puede concluir que las curvas mecánicamente definidas no siempre son estéticas, y es el ingeniero el que debe adaptarlas para cumplir con este importante requisito.

2.4.4 SEGÚN LA POSICIÓN DEL TABLERO

Dependiendo de la posición del tablero, en las cimentaciones del arco, se pueden producir importantes esfuerzos horizontales, que son del entorno del cociente de la luz entre la flecha del arco. Estos empujes son algo menores en arcos empotrados debido a la flexión, pero la diferencia no es muy relevante.

Según la posición del tablero, existen tres tipos de puentes arco: Arco con tablero superior (ver Figura 15), con tablero intermedio o con tablero inferior (ver Figura 16). En las dos primeras tipologías se producen estos empujes horizontales en las cimentaciones. En la tercera, sin embargo, si se atiranta el tablero al arco, los empujes que este produce sobre el terreno son exclusivamente verticales, pues es el tablero el que actúa como tirante.



Figura 15. Puente Myke O'Callaghan, junto a la presa Hoover. Arizona, Estados Unidos



Figura 16. Puente de la Barqueta. Sevilla, España



2.4.5 SEGÚN LAS CONDICIONES DE LOS APOYOS

Los arcos pueden ser empotrados o articulados y, dentro de este segundo grupo, pueden tener una, dos o tres articulaciones. De todos ellos, el triarticulado es el más sencillo, ya que se trata de un modelo isostático y, por lo tanto, no produce esfuerzos por variaciones térmicas ni por fluencia. En la zona cercana a las articulaciones, los esfuerzos de flexión son menores y se concentran en las zonas intermedias.

El arco biarticulado y articulado presentan ventajas e inconvenientes similares al anterior: son más deformables que el empotrado y, a igualdad de tensiones admisibles, pueden rebajar las térmicas.

2.4.6 SEGÚN SU SECCIÓN

La sección más utilizada en arcos de fábrica es la rectangular, cuyo ancho se impone según el criterio de pandeo y se suele mantener constante. El canto, por otro lado, se puede mantener constante o variable aumentando en los empotramientos.

En arcos de acero, por otro lado, es más común buscar secciones algo más elaboradas, aunque esto también se realiza habitualmente en secciones de hormigón.

2.4.7 SEGÚN LA DIRECTRIZ

El rebajamiento del arco es libre dentro de unos límites, y cuanto mayor es el rebajamiento mayor es la compresión en el arco y el empuje sobre los estribos.

La resolución de este rebajamiento se suele dar por tanteos, siempre dentro de unos márgenes del entorno del cuarto y el sexto de luz.

3 PUENTE ARCO SAN IGNACIO

3.1 LOCALIZACIÓN

El puente San Ignacio-Zorrotzaurre conecta el barrio de San Ignacio con la isla de Zorrotzaurre, atravesando el canal de Deusto y dando continuidad a la calle Islas Baleares en Bizkaia.



Figura 17. Localización del puente de Zorrotzaurre [14]

Este puente salva una distancia de 82 metros sin apoyos intermedios, con un tablero de 30 metros de ancho.

3.2 CARACTERÍSTICAS

3.2.1 CONDICIONANTES

En primer lugar, se presentan los condicionantes principales que se exigieron a la hora de seleccionar un puente para esta localización:

- Debe salvar la luz de 82 metros sin apoyos intermedios en el cauce.
- El material de su composición debe ser principalmente acero en referencia a la tradición siderúrgica de Bilbao.
- Debe ser un puente elegante y fluido en las formas, que no suponga una barrera visual.

3.2.2 ESQUEMA RESISTENTE

El esquema resistente principal de este puente lo forman dos arcos simétricos, que arrancan desde el cauce bajo tablero hasta elevarse 3 metros sobre este en el centro y un tablero mixto compuesto por 5 vigas longitudinales, 2 vigas principales sección cajón alineadas con los arcos, 3 vigas secundarias tipo doble T, vigas transversales cada 1,5 metros, encargadas del reparto transversal de las cargas y de la transmisión de estas a las péndolas, y una losa superior de hormigón pretensado.

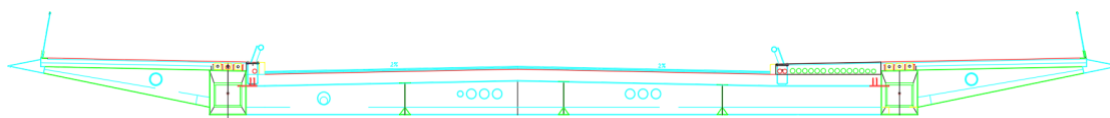


Figura 18. Sección transversal del tablero del puente existente



Figura 19. Sección transversal resistente del tablero

Los arcos presentan una sección cajón triangular en su tramo central, y una sección cajón rectangular en sus extremos, en el tramo comprendido entre el empotramiento de los arcos en los estribos y su intersección con el tablero.

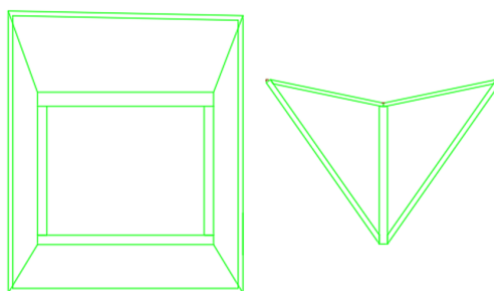


Figura 20. Sección del arco en los jabalcones (izquierda) y en el tramo central (derecha)

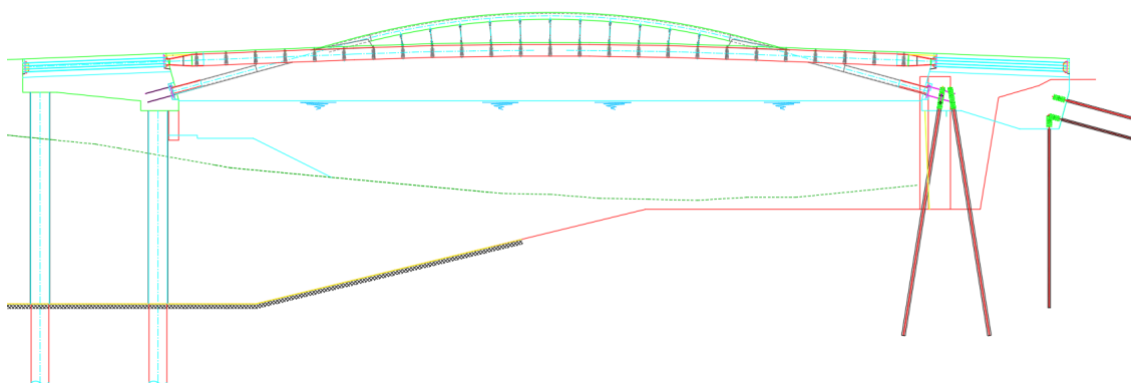


Figura 21. Perfil longitudinal del puente existente

3.2.3 MATERIALES

Los arcos presentan una solución mixta, compuesta por cajones metálicos de acero rellenos de hormigón estructural, mientras que el tablero se resuelve mediante una solución mixta de emparrillado, compuesta por vigas longitudinales y transversales de acero y una losa superior de hormigón pretensado. En la zona central del tablero, éste se cuelga de los arcos mediante la disposición de péndolas de acero de alto límite elástico.



Las aceras presentan un pavimento de madera sintética, que es una combinación de fibras de madera y resina. La calzada está formada por una mezcla bituminosa, y el carril bici se distingue mediante un microaglomerado rojo.

3.2.4 EQUIPAMIENTOS

El puente cuenta con tecnología LED en todos sus sistemas de iluminación.

La iluminación funcional está compuesta por dos columnas de 12,00 metros de altura (una a cada margen) equipadas con tres proyectores orientados hacia el tablero.

La iluminación ornamental se resuelve mediante focos encastrados en el pavimento, ubicados entre péndolas, justo bajo los arcos, y dirigidos hacia arriba con el objetivo de resaltar el trazado de estos. Además, los jabalcones son iluminados por proyectores situados en los estribos.

La barandilla está compuesta por paneles de vidrio templado tipo securit, sin montantes, coronados por un pasamanos de acero inoxidable con un diseño ondulado con objeto de favorecer el descanso visual y físico del peatón. La ausencia de elementos verticales busca ofrecer una sensación de transparencia y ligereza, reforzando la percepción del puente como una estructura liviana que reposa sobre los estribos de hormigón armado.

3.2.5 COMPATIBILIDAD CON EL RÉGIMEN DE AVENIDAS DE LA RÍA

El puente se diseñó para permitir el paso de la avenida máxima estimada de la ría para un período de retorno de 500 años. Esta situación se sitúa en la cota +4,47, y se ha previsto un resguardo vertical mínimo de 1,00 metro por debajo del tablero, en un tramo central de 40 metros de anchura, con el fin de garantizar el desagüe [14].

3.2.6 PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo del puente de San Ignacio fue muy complejo. En primer lugar, se realizó el montaje de los tramos en ménsula, constituidos por los arranques del arco y del tablero, en voladizo desde los estribos.

Tras esto, se procedió al ensamblaje de la parte central del puente en uno de los márgenes del canal. Este sistema se desplazó sobre unos sistemas de SPMTs², que lo recogen en sus extremos y lo posicionan sobre barcasas.

Finalmente, se posiciona el tramo central en pleamar. A medida que la marea baja, la estructura desciende hasta apoyarse sobre los arranques a través de cuatro elementos auxiliares instalados en los extremos de estos.

² Self-Propelled Modular Transporter, o Transportador Modular Autopropulsado. Se trata de un vehículo de plataforma pesado, con un gran número de ruedas, utilizado para transportar objetos que son demasiado grandes para ser movidos por camiones o grúas convencionales

4 MODELADO PARAMÉTRICO

4.1 INTRODUCCIÓN AL MODELADO PARAMÉTRICO

Un modelo paramétrico es un sistema de ecuaciones explícitas dependientes de parámetros. Esta metodología permite modificar de manera sencilla y automática una geometría.

4.1.1 ORIGEN

Los primeros antecedentes del diseño paramétrico datan de 1837, cuando James Dana publicó un trabajo sobre el corte óptimo de diamantes mediante el uso de planos paramétricos [15]. Tras unos pocos años, en 1842 Samuel Earnshaw aplicó superficies hiperbólicas paramétricas como base para desarrollar el teorema que lleva su nombre [16]. Estas primeras aplicaciones tenían un propósito meramente demostrativo, sin un enfoque práctico.

4.1.2 MODELOS ANALÓGICOS

El uso práctico de modelos paramétricos comenzó con Antoni Gaudí, quien a finales del siglo XIX y principios del XX desarrolló un sistema físico para generar formas antifuniculares en obras como la Capilla de la Colonia Güell y la Sagrada Familia. Su método consistía en cadenas suspendidas con pesos variables, lo que permitía formar curvas estructurales eficientes (ver Figura 22). Este sistema, basado en principios físicos básicos y parámetros como la longitud de las cadenas y el peso aplicado, es considerado uno de los primeros modelos paramétricos con aplicaciones reales.

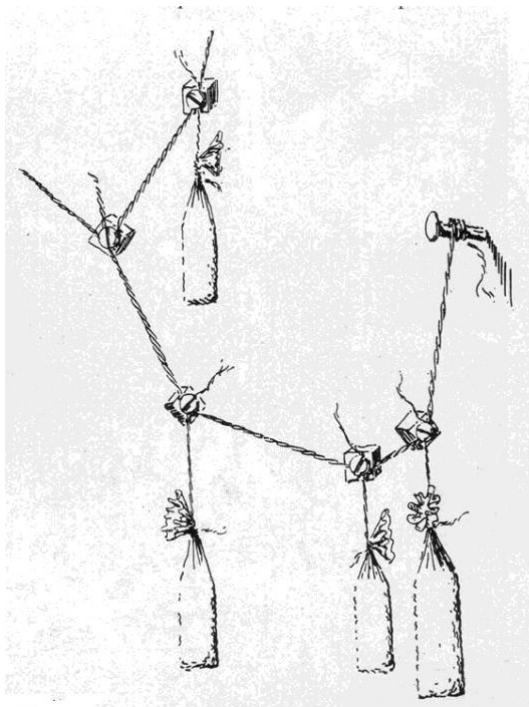


Figura 22. Sistema de cadenas suspendidas con pesos utilizado por Gaudí [17]

Inspirados en su trabajo, arquitectos como Frei Otto también exploraron modelos físicos paramétricos. Otto utilizó películas de jabón para diseñar superficies mínimas, que utilizaba en estructuras de membrana (ver Figura 23).

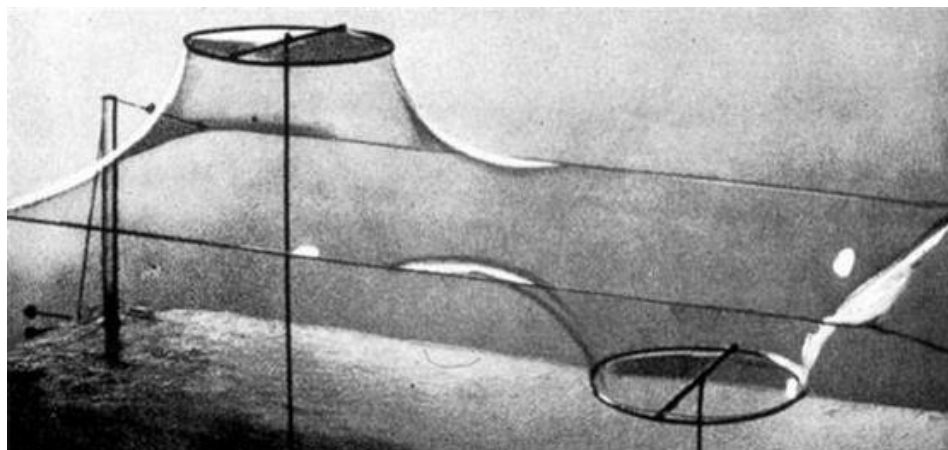


Figura 23. Resultado de un experimento con pompas de jabón de Frei Otto [18]

Durante los años 60, surgió un enfoque alternativo centrado en parámetros arquitectónicos o ingenieriles. Luigi Moretti presentó este enfoque en la XII Trienal de Milán (1960), proponiendo optimizaciones en estadios según criterios como la visibilidad del público o el ahorro de materiales.

4.1.3 TRANSICIÓN AL ENTORNO DIGITAL

El salto del diseño paramétrico al entorno digital se dio con el desarrollo de Sketchpad en 1963 por Ivan Sutherland. Este software, creado como parte de una tesis en el MIT, marcó el inicio de los programas CAD modernos. Sketchpad incluía innovaciones como una interfaz gráfica, zoom dinámico, cuadrículas adaptables y la representación de geometrías básicas en 2D. Además, incorporaba restricciones geométricas (paralelismo, perpendicularidad, etc.) que se mantenían al modificar los parámetros, lo que lo convierte también en el primer software paramétrico conocido (ver Figura 24). A pesar de su potencial, Sketchpad no fue identificado en su momento como una herramienta paramétrica por su propio creador ni por la industria.

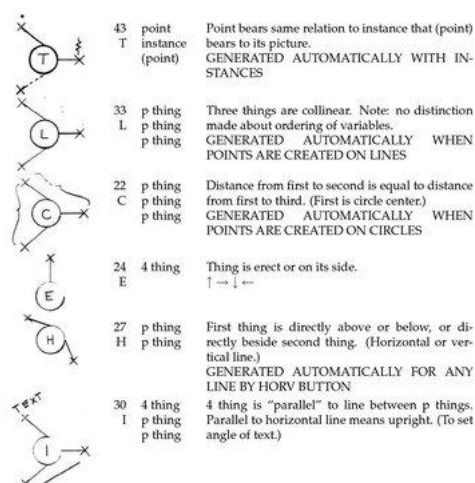


Figura 24. Ivan Sutherland operando Sketchpad y algunos de los diagramas del software (1963) [19]



4.1.4 MODELOS DIGITALES

Con el avance de la informática – especialmente tras la aparición de los ordenadores personales en los años 80 – los sistemas CAD vivieron un gran desarrollo. Programas como Pro/Engineer (1987), diseñado para la ingeniería mecánica, ofrecían un entorno totalmente paramétrico. Le siguieron otras herramientas como CATIA (desde su versión 4.0 en 1993) o Digital Project (desarrollado en los años 90 para el estudio de Frank Gehry).

Estos softwares se caracterizan por:

- Amplia capacidad para representar geometría compleja, incluyendo sólidos 3D.
- Control de parámetros sin necesidad de que el usuario introduzca directamente las ecuaciones.
- Introducción de programación orientada a objetos dentro del entorno CAD, aunque sin la inmediatez propia de los sistemas puramente paramétricos.

4.1.5 TENDENCIAS ACTUALES

En años recientes, el diseño paramétrico ha ampliado su presencia en diversos sectores. Se han seguido dos caminos principales:

- Incorporación de sistemas de restricciones geométricas en programas CAD tradicionales, como AutoCAD (desde 2010).
- Desarrollo de herramientas basadas en programación visual, especialmente útiles en entornos BIM.

Entre estas últimas destacan:

- Generative Components (2003), pionero en este tipo de software y base para desarrollos posteriores.
- Dynamo (2006), integrado en Revit desde 2013.
- Grasshopper (2008), complementario a Rhinoceros3D.

Estas herramientas permiten construir geometría mediante nodos y conexiones que definen un algoritmo visual continuo. Algunas de sus características más destacadas son:

- Eliminación del dibujo tradicional; basta con modificar el algoritmo para actualizar el modelo.
- Posibilidad de incorporar complementos de terceros, como análisis estructurales integrados.
- Alta compatibilidad con otros programas y facilidad de exportación, lo que las hace ideales para entornos BIM o fabricación digital (impresión 3D) [20].

4.2 TENDENCIAS DE DISEÑO: HACIA DÓNDE AVANZA EL MERCADO

El diseño paramétrico en la actualidad vive una auténtica revolución. La irrupción de nuevas tecnologías, la presión por reducir el impacto ambiental y la demanda de



ambientes centrados en el bienestar obligan a repensar cada decisión, desde el primer boceto hasta la última instalación. Estas son las tres grandes corrientes que a día de hoy marcan la diferencia en el mundo de la construcción:

4.2.1 CONTRUCCIONES RESILIENTES PREPARADAS PARA EL CAMBIO

La velocidad con la que evolucionan los modelos de negocio hace inviable un layout “rígido” que quede obsoleto en poco tiempo. El diseño paramétrico resuelve esta necesidad permitiendo proyectar estructuras modulares, flexibles y desmontables pensando en todo el ciclo de vida. El resultado es un entorno cambiante que crece, se contrae o se reorganiza, y se reutiliza.

4.2.22. SIMULAR ANTES DE CONSTRUIR

Las suposiciones han pasado a la historia. Las herramientas de análisis digital ofrecen datos muy concretos antes de la obra. Al detectar puntos críticos, zonas de sombra o cuellos de botella de circulación, el equipo de proyecto corrige errores sobre plano y llega a obra con un plan optimizado, reduciendo imprevistos y acortando plazos.

4.2.33. SOSTENIBILIDAD DISEÑADA DESDE EL PLANO

La eficiencia ya no se añade al final del proyecto, se integra desde la primera línea mediante simulaciones y se seleccionan materiales con baja huella de carbono. De esta forma, la construcción impacta menos desde el punto de vista de la energía.

4.3 INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA UTILIZADO

El programa utilizado para la elaboración del presente TFM es Grasshopper, integrado en Rhinoceros 3D. Las razones de la elección de este programa se listan a continuación:

- Se trata de un programa cada año más utilizado en el gremio de las estructuras, con una clara línea de tendencia positiva en su expansión.
- Posee una interfaz intuitiva y sencilla.
- Permite la conexión con otros programas de manera sencilla.
- Tiene una licencia gratuita accesible.

Por lo tanto, se ha considerado que el programa ofrece una experiencia muy adecuada para el objetivo del presente TFM.

Grasshopper (GH) es un lenguaje de programación visual que se utiliza para el diseño paramétrico dentro del software Rhinoceros 3D (Rhino), muy utilizado para el diseño en arquitectura e ingeniería. A continuación, se listan algunas de sus principales características:

- Programación visual: el programa no consiste en una interfaz de escritura de código, sino que utiliza bloques que se conectan entre sí mediante líneas o cables.
- Diseño paramétrico: permite definir relaciones entre elementos del modelo. De esta forma, al cambiar un valor, todo el modelo se regenera automáticamente.

- Actualización en tiempo real: los cambios se reflejan de manera inmediata en el modelo 3D, facilitando de esta manera la experimentación con diferentes parámetros.

En cuanto a su interfaz, esta consiste en un lienzo donde se colocan y conectan los componentes. Estos componentes representan funciones, tales como operaciones matemáticas, creación de geometría, manipulación de datos, etc. Los cables permiten la conexión entre estos elementos, definiendo de esta manera los flujos de datos.

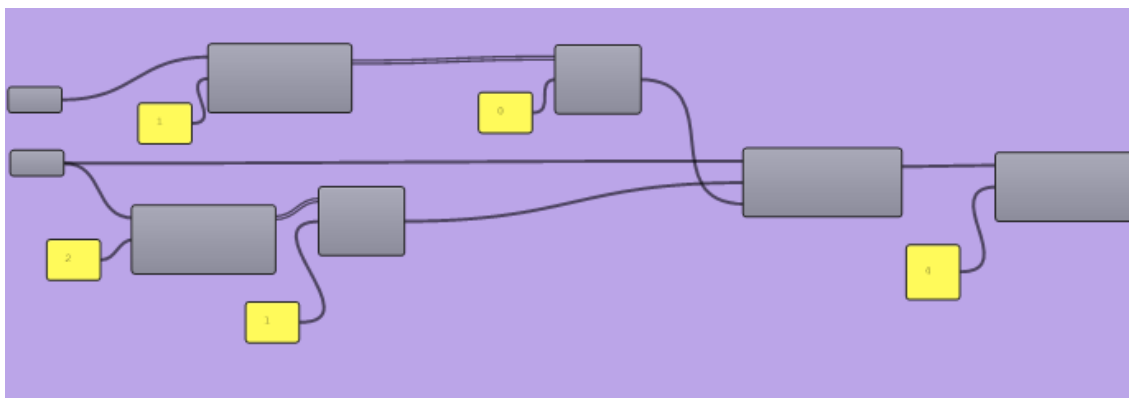


Figura 25. Ejemplo de la interfaz de GH

GH se utiliza comúnmente en arquitectura para la creación de formas complejas, dinámicas o repetitivas, en ingeniería para simulaciones físicas o análisis estructurales, en el diseño de productos para generar formas adaptables o en la fabricación digital, al permitir su integración con herramientas de corte láser o impresión 3D.

Se trata de una herramienta que permite la automatización o control de modelos 3D, adecuada para todo aquel que esté interesado en diseño generativo, geometría computacional o fabricación avanzada.



5 MIDAS CIVIL

5.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Midas Civil es un software avanzado de ingeniería estructural, especialmente desarrollado para el análisis y diseño de puentes y otras estructuras civiles. Ofrece herramientas especializadas para modelar, analizar y diseñar diversos tipos de puentes: de hormigón armado, prefabricado, de acero, atirantados y colgantes.

El programa tiene precargadas más de 20 normativas para definir materiales, así como más de 50 posibles secciones transversales para los elementos del puente. Incluye la posibilidad de realizar el modelado de cimentaciones o elementos de hormigón, acero, vigas pretensadas y postensadas o secciones compuestas. El software permite, además, análisis completos, incluyendo el cálculo de las diferentes etapas de construcción, pandeo o carga móvil.

En lo relativo a los arcos, los puentes en arco se pueden modelar fácilmente utilizando varios tipos de elementos, funciones de generación de secciones, diversas condiciones de contorno y funciones de entrada de carga. Una vez completado el modelado del puente, el usuario puede realizar análisis de la etapa de construcción, análisis de cargas móviles y análisis estático. También se puede realizar un análisis no lineal para una revisión más detallada del modelo analítico. Después de completar el análisis, las secciones se pueden revisar con la función de diseño de acero. Para puentes de arco de cable, el usuario puede ajustar fácilmente la fuerza de tensión del cable utilizando el factor de carga desconocido y las funciones de ajuste de la fuerza del cable.

5.2 JUSTIFICACIÓN DE SU ELECCIÓN

La elección de este software de cálculo se ha debido, principalmente, a la sencillez de uso y claridad de resultados que ofrece el programa. Además, se permite el acceso a una licencia del programa a los alumnos de la Universidad de Cantabria. Con todo esto, Midas Civil es una solución que se considera adecuada para realizar un análisis de la estructura y comprender los resultados.

Por ello, para este TFM se ha propuesto una conexión entre el programa Midas Civil y Grasshopper para minimizar los tiempos de obtención de resultados para diferentes geometrías del arco.

6 CONEXIÓN ENTRE PROGRAMAS

La conexión entre programas se realiza a través de una API³ de Midas denominada Midas Civil NX. Gracias a ella, se pueden utilizar, a priori, todas las funciones disponibles en Midas desde GH. De esta manera, se puede parametrizar el modelo en GH y conectarlo a Midas para obtener una solución directamente.

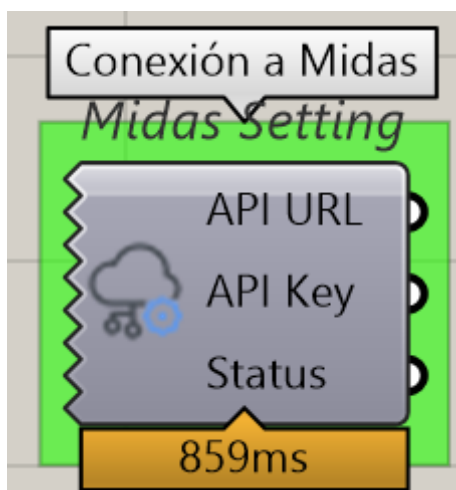


Figura 26. Conexión a Midas

Físicamente, la conexión se realiza de manera sencilla a través de un comando denominado Midas API Settings (ver Figura 26). Basta con incluirlo en el modelo de GH y añadir los parámetros que se muestran en la Figura 27.

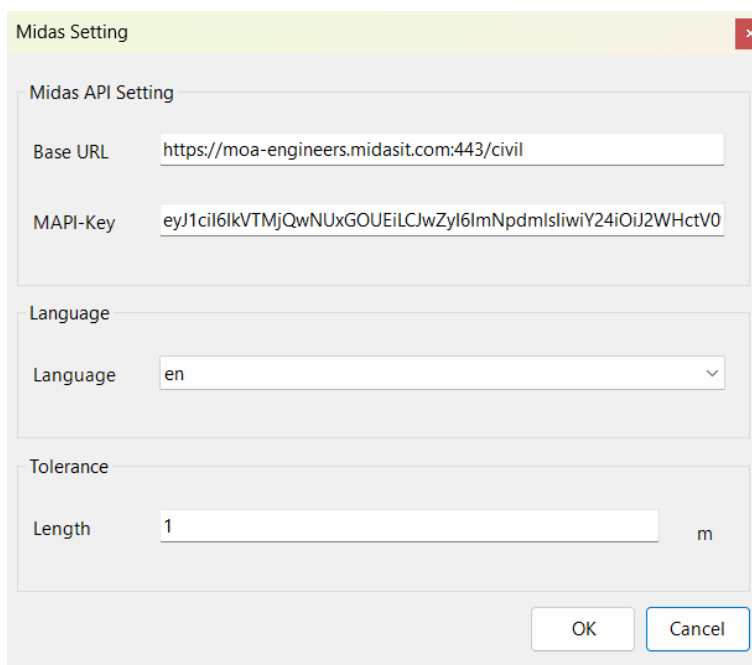


Figura 27. Parámetros solicitados por el comando de conexión con el programa Midas Civil NX desde GH

³ API (del inglés Application Programming Interface, o Interfaz de Programación de Aplicaciones) es un conjunto de reglas y definiciones que permite que dos programas o sistemas diferentes se comuniquen entre sí.



La interfaz del programa Midas Civil NX es muy similar a la del Midas Civil, tal y como se muestra en la Figura 28.

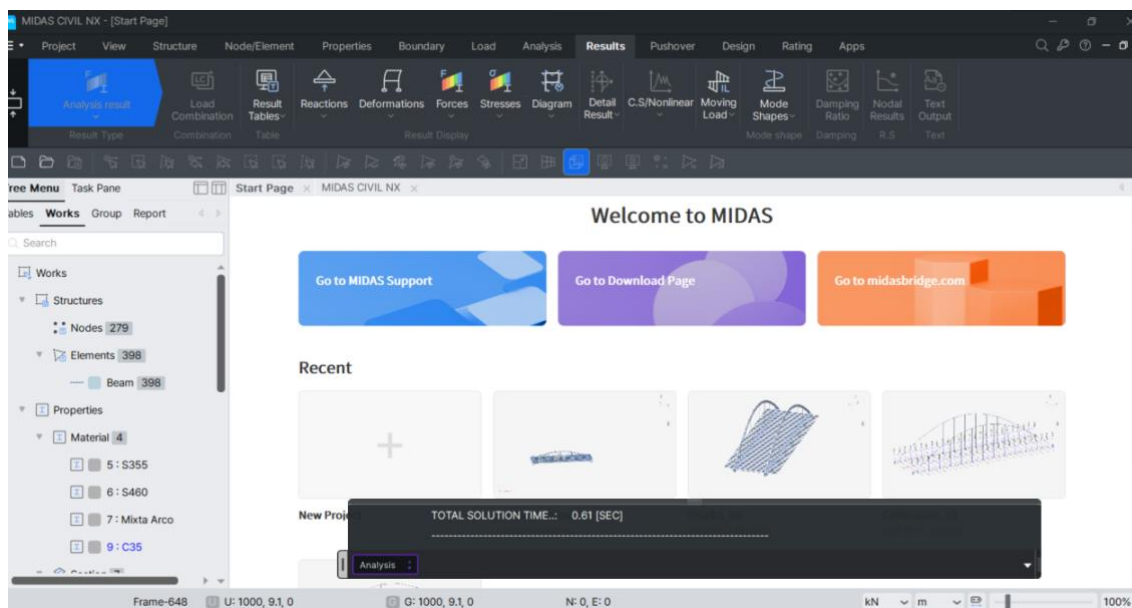


Figura 28. Pantalla de inicio en Midas Civil NX



7 ELECCIÓN DE PARÁMETROS A ITERAR

Para la optimización del modelo del puente de San Ignacio, se han seleccionado cinco parámetros diferentes para iterar. Cabe destacar que, pese a que se han seleccionado estos tres, gracias al modelo realizado en Grasshopper cualquier parámetro del puente es fácilmente editable. Estos son: la flecha del arco, el diámetro de la sección del arco, las dimensiones de base y altura de las vigas longitudinales y el número de péndolas y vigas transversales.

7.1 FLECHA DEL ARCO

El primer parámetro que iterar es la flecha que presenta el arco. Como se ha mencionado en el apartado teórico del presente TFM, para que este valor resulte adecuado, debe estar entre $L/4$ y $L/6$. En el caso del puente de San Ignacio, la luz a salvar es de 82 metros, por lo que el valor debe oscilar entre los 13,6 y los 20,5 metros. Para trabajar con números enteros, la flecha del arco tomará valores entre los 14,0 y los 20,0 metros en el modelo paramétrico.

7.2 SECCIÓN DEL ARCO Y DE LA VIGA LONGITUDINAL

El siguiente elemento que se ha ido modificando en el análisis es el diámetro de la sección transversal del arco, así como la base y la altura de la viga rectangular longitudinal sobre la que se apoya.

7.3 NÚMERO DE PÉNDOLAS

Por último, el número de péndolas ha sido iterado a lo largo del análisis del modelo paramétrico del puente. Además, al haber una viga transversal en el inicio de cada par de péndolas, la cantidad de vigas transversales también ha variado con cada modificación del número de cables.

8 CÁLCULO DE LA NUEVA PROPUESTA

8.1 GEOMETRÍA

8.1.1 VARIACIÓN DEL MODELO

Para la obtención de la geometría de la nueva propuesta se han realizado algunos cambios en el modelo. Esta nueva propuesta se realiza con el objetivo de comprobar si una propuesta de puente arco con tablero inferior supondría un ahorro en los costes del material o es más adecuada la solución existente con arco intermedio.

En primer lugar, el cambio más importante consiste en la variación de la posición de los arcos, de manera que pasa de ser una estructura con tablero intermedio a una con tablero inferior. De esta forma, los esfuerzos horizontales son soportados por el tablero, reduciendo así considerablemente los esfuerzos horizontales transmitidos al terreno.

El segundo cambio consiste en la eliminación de las tres vigas longitudinales de sección doble T que se encuentran en la parte central de la sección transversal del puente. De esta manera, serán las vigas longitudinales rectangulares y los arcos los que trabajen en el sentido longitudinal.

Además, se han realizado otras simplificaciones menores con respecto a la geometría original:

- Se han considerado todas las secciones constantes a excepción de las costillas, que se han mantenido con el canto variable.
- Se han eliminado todos los aligeramientos existentes en las vigas transversales.
- Se ha aumentado el canto de las vigas transversales, de forma que tienen el mismo espesor que las vigas longitudinales, para paliar el efecto de aumento de tensiones debido a la eliminación de las vigas doble T longitudinales.

Por último, para el modelo de análisis se han seleccionado exclusivamente las vigas longitudinales rectangulares, los arcos, las vigas transversales y los cables, ya que son estos los elementos que deberán de soportar la carga.

El hormigón utilizado se ha fijado como HA-35 y el acero como S355 J2, excepto para los cables, que se ha considerado S460.

8.1.2 CONDICIONES DE CONTORNO

El modelo de puente con arco superior se encuentra simplemente apoyado, con el apoyo oeste fijo y el apoyo este permitiendo el movimiento en la dirección horizontal.

8.2 ACCIONES CONSIDERADAS

A continuación, se muestran las cargas que debe soportar el puente y el proceso que se ha seguido para su obtención.

8.2.1 PESO PROPIO

De acuerdo con el Eurocódigo 1 [21], se ha utilizado como valor para el peso específico del hormigón 24 kN/m^3 . Para los elementos de acero, por otro lado, se ha considerado un peso específico de $78,5 \text{ kN/m}^3$.

Considerando una losa de 30 cm de hormigón bajo el pavimento, el peso propio del hormigón resulta en

$$Q_{pp,hormigón} = 2 * 6,00 \text{ m} + 18,2 \text{ m}) * 0,30 \text{ m} * 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 226,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Este valor se aplicará sobre las vigas transversales en el modelo.

El resto de los pesos propios se obtienen directamente del programa. El peso propio del hormigón se ha calculado aparte porque durante la fase metálica, es la estructura metálica la que debe soportar todo el peso de la estructura, ya que se considera que el hormigón aún no ha endurecido y, por tanto, no tiene capacidad estructural.

8.2.2 CARGA PERMANENTE

Además de la carga producida por el peso propio del arco y el tablero, es necesario añadir las cargas del resto de elementos que existen sobre la estructura. Los pesos propios se han obtenido de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21]. Los elementos que se han tenido en cuenta se listan a continuación:

- Pavimento: 2 calzadas de 6,85 metros cada una, con un espesor de 8 cm.

$$Q_p = 2 * 6,85 \text{ m} * 0,08 \text{ m} * 23,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 25,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Bordillo separador calzada – acera: dos bordillos de 0,15 por 0,32 metros.

$$Q_b = 2 * 0,15 \text{ m} * 0,32 \text{ m} * 25,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Barandilla:

$$Q_l = 1,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 2 \text{ barandillas} = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Acera: una acera de 6,00 metros a un lado y otra de 8,50 metros al otro.

$$Q_a = (6,00 + 8,50) \text{ m} * 3,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 43,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Con todo esto, el valor de la carga permanente total es:

$$Q_P = Q_p + Q_l + Q_b + Q_a = 25,2 + 2,4 + 2,0 + 43,5 = 73,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

La carga permanente se aplica de forma repartida a lo largo de toda la luz del puente.

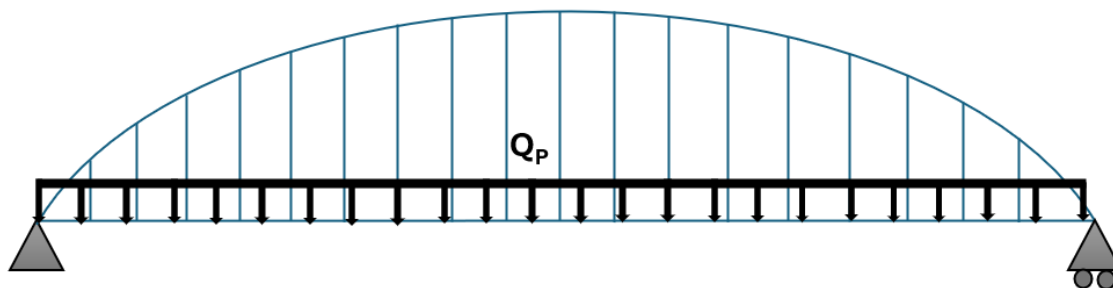


Figura 29. Forma de aplicación de la carga permanente

La carga permanente se aplica considerando un tiempo final t_{inf} , en el que la relación entre el módulo de elasticidad del acero y del hormigón es igual a 21. Por ello, la carga permanente se analizará incluyendo en el programa la estructura de acero completa y el ancho eficaz de la losa de hormigón correspondiente a esta relación.

8.2.3 SOBRECARGA DE USO

Además de las cargas permanentes, en el puente existe otra acción: las sobrecargas de uso debidas al tráfico. Pese a que estas cargas son de naturaleza dinámica, se suponen aplicadas estáticamente al incluir en su valor característico el factor de amplificación necesario para pasar del efecto dinámico al estático, de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21].

En el Midas Civil NX, existe la posibilidad de calcular estas sobrecargas como cargas móviles, y de esta forma se va a realizar el cálculo. Sin embargo, se ha explicado en este apartado el proceso completo de obtención de las cargas puntuales y repartidas para tener conocimiento de sus valores.

En primer lugar, es necesario dividir la plataforma en carriles virtuales. La plataforma tiene un ancho total de 14,00 metros, con barreras de 1' (es decir, 0,3048 metros) por lo que el número de carriles de 3,00 metros en los que se va a dividir es 4, con una anchura remanente de 1,39 metros.

Anchura de la calzada w	Número de carriles nominales	Anchura de carril nominal w_l	Anchura del área restante
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Ent}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$
NOTA Por ejemplo, para una calzada de anchura de 11 m, $n_1 = \text{Ent}\left(\frac{11}{3}\right) = 3$ y la anchura del área restante es $11 - 3 \times 3 = 2 \text{ m}$.			

Figura 30. Número y anchura de carriles nominales, de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21]

Una vez obtenido el número de carriles virtuales y de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21], es necesario establecer las fuerzas verticales que estos producen. Para ello, se debe considerado la acción simultánea de las siguientes cargas;

- Uno o más vehículos pesados, en función del número de carriles virtuales. En este caso, se ha supuesto la acción de tres vehículos pesados que actúan sobre los dos carriles exteriores y uno de los centrales.
- Una sobrecarga uniforme, que actúa sobre los cuatro carriles virtuales y el área remanente.

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos para cada una de las cargas:

Tabla 1. Valor de las sobrecargas debidas al tráfico de vehículos en la nueva propuesta

	Veh. Pesado [kN]	Sobrecarga uniforme [kN/m]
Carril Virtual 1	$2 * 300 = 600$	$9 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 27,0$
Carril Virtual 2	$2 * 200 = 400$	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Carril Virtual 3	$2 * 100 = 200$	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Otros Carriles Virt.	0	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Área remanente (q_{re})	0	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 1,39 \text{ m} = 3,5$
Total (para el análisis)	1200	53,0

Además de esta carga debida al tráfico, se debe añadir una sobrecarga en las zonas peatonales. En este caso, en el puente existen dos aceras y una zona habilitada para carril bici. Para ello, se ha utilizado un valor de $5 \text{ kN} / \text{m}^2$, de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21]. Por lo tanto, el valor de la sobrecarga repartida en las aceras es el siguiente:

$$Q_{su,acera} = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * (6 + 8,5) \text{ m} = 72,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Finalmente, el valor de la sobrecarga repartida total resulta en:

$$Q_{su} = Q_{su,tráfico} + Q_{su,acera} = 53,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 72,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 125,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Esta sobrecarga se debería aplicar sobre la estructura a lo largo de toda su luz junto a la sobrecarga puntual, al menos, en el centro luz para el análisis de la estructura.

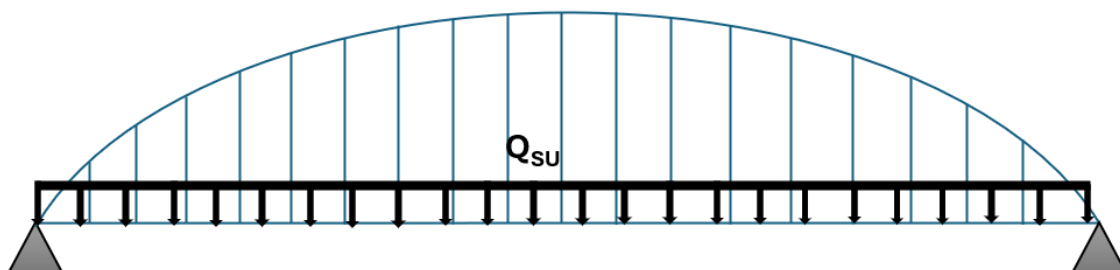


Figura 31. Aplicación de la sobrecarga uniforme sobre la luz del puente

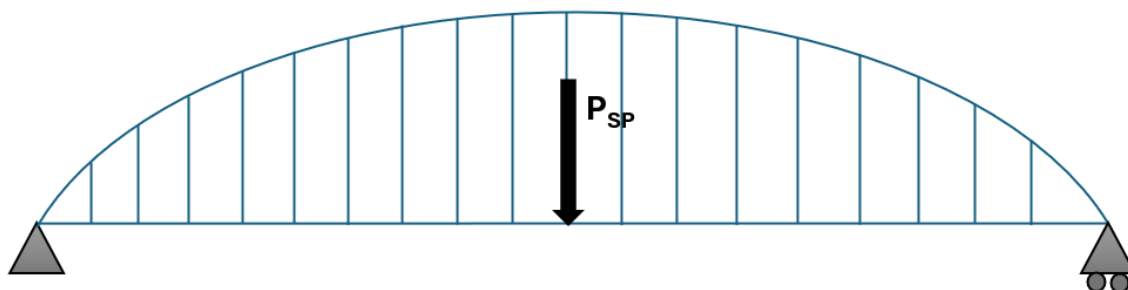


Figura 32. Punto de aplicación de la sobrecarga puntual

La sobrecarga puntual y la uniforme se deben aplicar conjuntamente en caso de realizar el análisis con cargas estáticas, resultando en una carga repartida a lo largo de toda la luz y

una carga puntual en centro luz debida al paso de vehículos pesados, tal y como se muestra en la Figura 33.

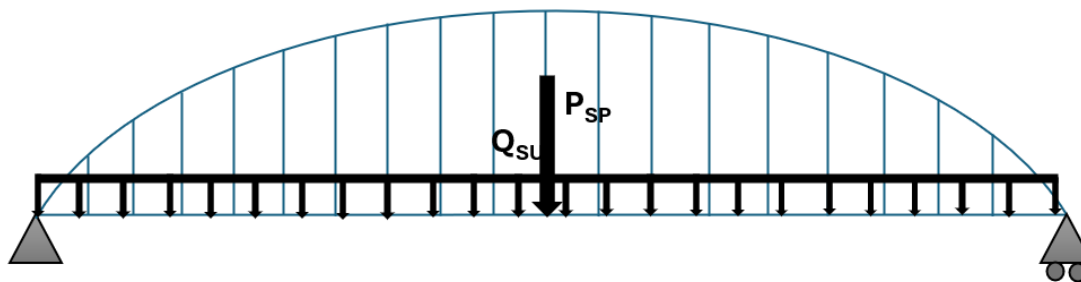


Figura 33. Caso de carga de la sobrecarga en la nueva propuesta del puente

En el caso de estudio, como ya se ha mencionado, Midas Civil NX da la opción de obtenerlos esfuerzos a través de cargas en movimiento, por lo que se ha aplicado de esta manera al modelo.

Para ello, se han creado los 4 carriles virtuales y el área remanente en la zona dedicada a la calzada del puente, y se han creado los casos de carga viva para obtener las envolventes de esfuerzos.

Esta carga se calcula cuando el hormigón ya ha endurecido, para un tiempo inicial t_0 en el que la relación entre el módulo de elasticidad del acero y el del hormigón es igual a 7. Por ello, en el modelo de análisis se incluye la geometría correspondiente al acero y a la losa de hormigón con el ancho eficaz que corresponde a esta relación.

8.3 ELABORACIÓN DEL MODELO

En este apartado, se han detallado los pasos seguidos para la construcción de un modelo paramétrico del puente. Para la elaboración de la geometría de las secciones, se ha partido de las utilizadas en el proyecto original, tanto para las dos vigas longitudinales rectangulares como para el entramado metálico, con alguna ligera simplificación, y se ha utilizado una sección tubular para el arco.

8.3.1 GENERACIÓN DE LAS VIGAS LONGITUDINALES Y DOBLE T

En primer lugar, se ha dibujado una línea del tamaño de la luz exigida para el caso de estudio, es decir, 82 metros. Esta línea constituirá el eje central del modelo. Además, se ha dibujado al lado una línea de tamaño igual a la distancia inicial entre vigas de 17,2 metros.

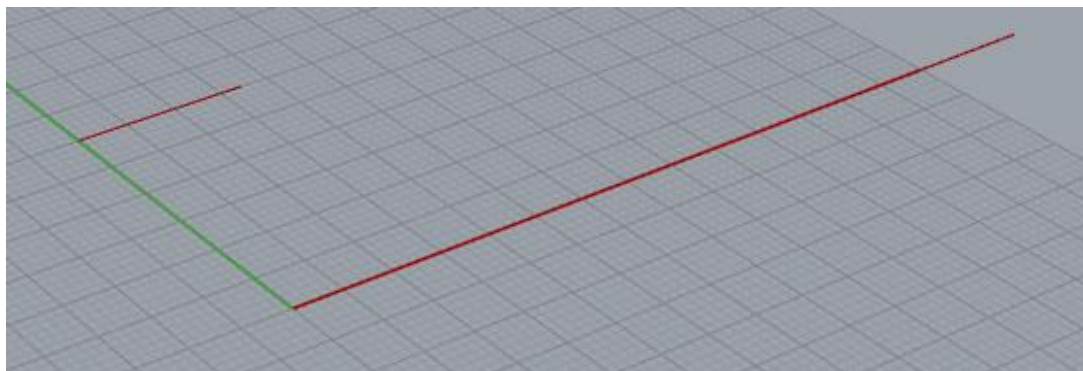


Figura 34. Líneas generadas inicialmente

Una vez realizados estos planos, se ha dividido la línea de 17,2 metros en dos tramos iguales mediante el comando *Divide Curve*, con el objetivo de encontrar el centro del segmento, que se selecciona mediante un *List Item* igual a 1⁴.



Figura 35. Segmento de longitud igual a la distancia entre los perfiles rectangulares dividido en dos partes iguales

Tras esto, se ha orientado esta línea en dirección perpendicular a la mediante el comando *Orient*. Conectando el punto central en *Source* y la línea de 82 metros de largo como *Target*.

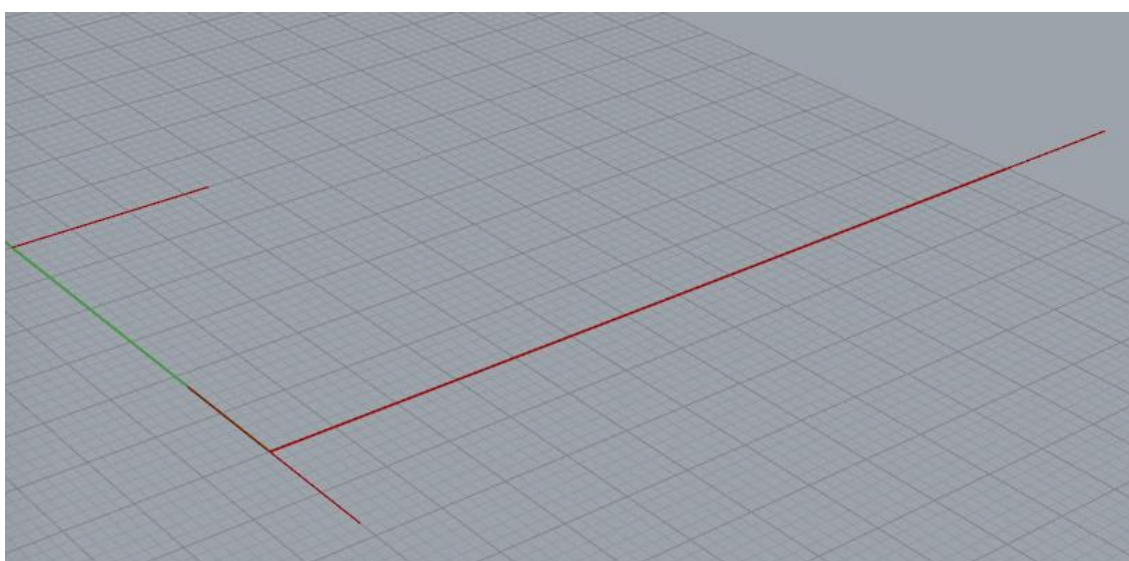


Figura 36. Segmento transversal orientado

Una vez orientado, a este segmento se le debe añadir la mitad de la base de las vigas longitudinales rectangulares a cada lado. Para ello, en primer lugar, se debe obtener su punto inicial y final mediante el comando *End Points*. Posteriormente, para mover los puntos, se utiliza el comando *Move* junto a un *Number* que va conectado al *Number Slider* que se explicará en el apartado 8.3.5., que indica el valor de la base de la mencionada viga. Este comando *Number* llevará integrada una función igual a $X/2$ para reflejar la mitad de dicho valor. Además, para uno de los lados, este movimiento será en la dirección negativa, pues si no se obtendría el nuevo punto en el interior de la distancia entre las vigas.

⁴ En Grasshopper, el primer valor de las listas corresponde al ítem 0. Por lo tanto, si se escoge el ítem 1, se está eligiendo el segundo valor de la lista.



Figura 37. En verde, nuevos puntos generados tras el movimiento

Finalmente, se ha orientado la línea de longitud igual a la luz en los dos nuevos puntos generados. De esta manera, se han obtenido las directrices de las vigas longitudinales.



Figura 38. En verde, directrices de las vigas longitudinales generadas

Para que el modelo no de problemas una vez esté conectado a Midas Civil NX, es necesario que las vigas cuenten con todos los nodos por los que pasarán posteriormente las vigas transversales ya que, en caso contrario, el Midas puede interpretar que no se encuentran unidos y mostrar soluciones erróneas.

El siguiente paso, por tanto, es dividir las líneas en un número de puntos igual al número de vigas transversales más uno. Esto es debido a que al principio y al final del modelo no hay vigas transversales (por lo que habría que sumar dos nudos, o un elemento más).

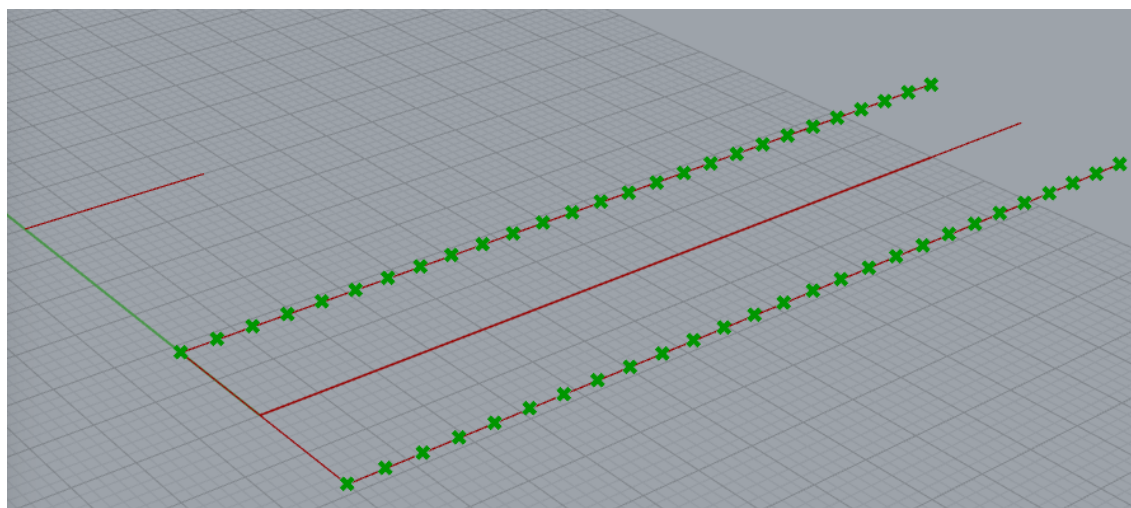


Figura 39. División de las curvas

Finalmente, para lograr unir los puntos entre sí, se han hecho dos listas. En la primera, se ha eliminado el último punto y, en la segunda, el primero. Posteriormente, en un comando Line, se ha conectado la primera lista como punto inicial y la segunda como punto final y, de esta manera, se han generado las subdivisiones de la viga.

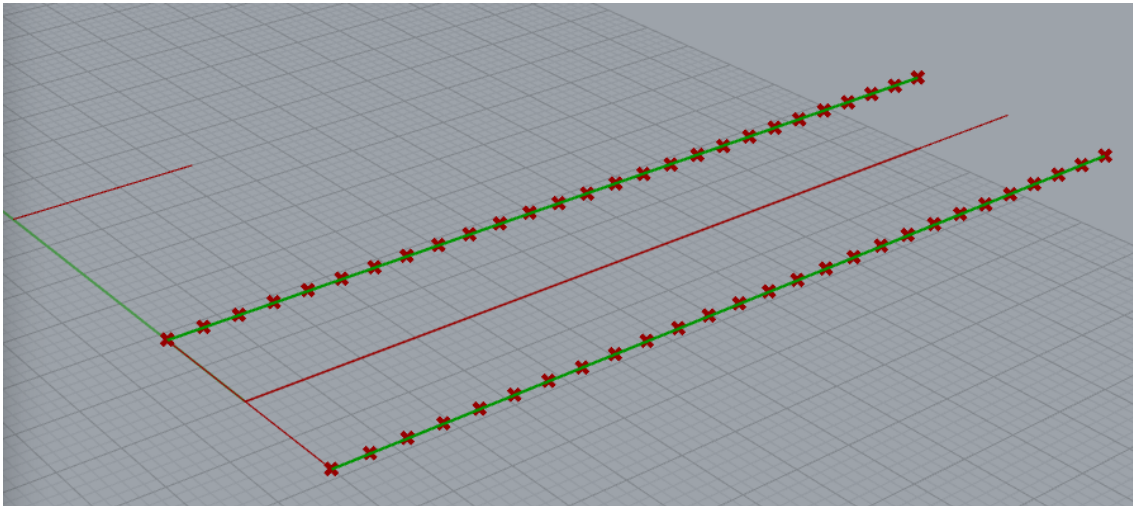


Figura 40. Elementos de la viga rectangular subdivididos

Antes de continuar con el siguiente paso en la generación del modelo, se han ocultado los pasos intermedios que han servido para la generación de estas directrices.

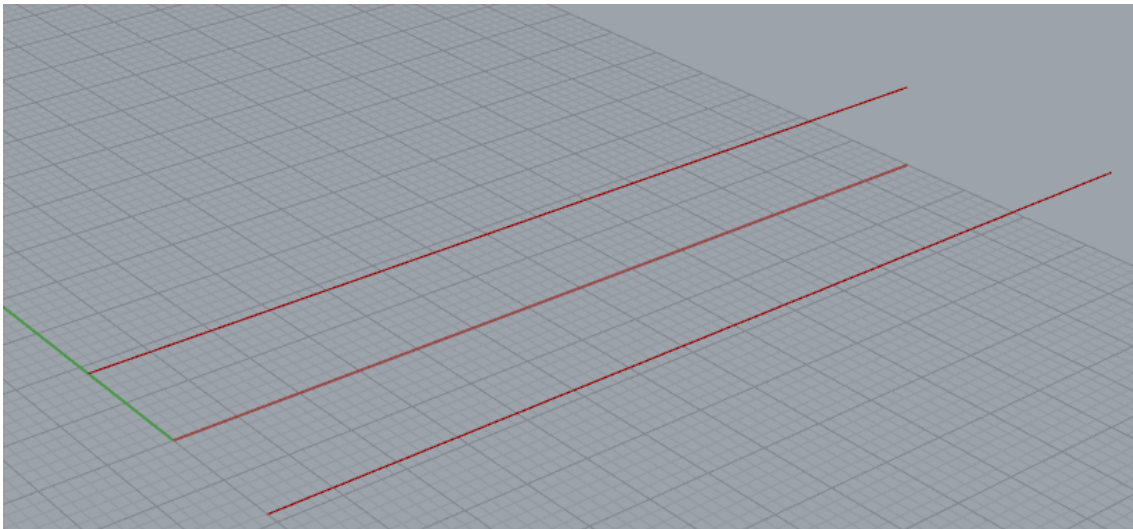


Figura 41. Directrices de las vigas longitudinales

Se muestra en la Figura 42 y la Figura 43 el código utilizado para la generación de estas directrices.

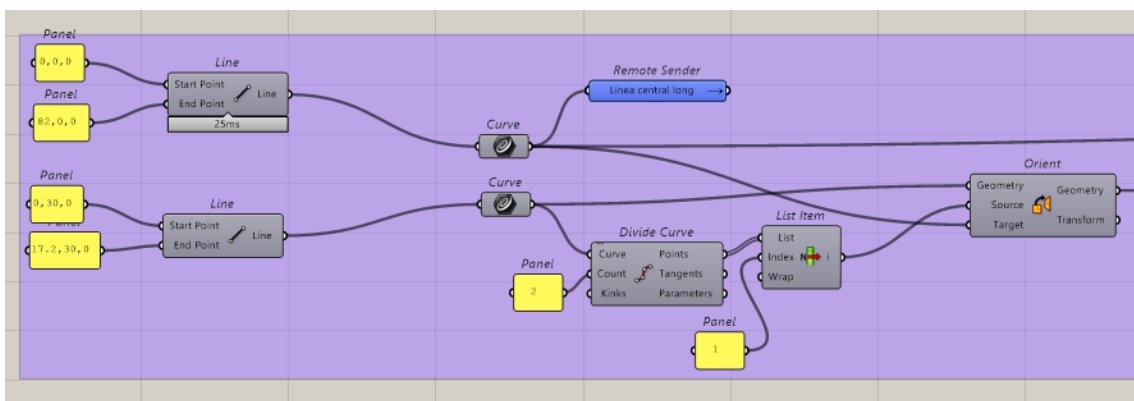


Figura 42. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (1 de 3)

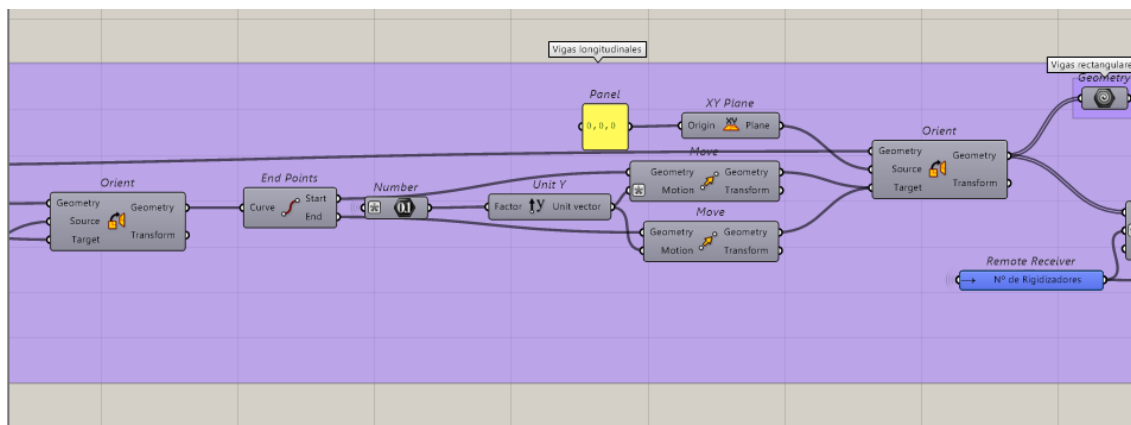


Figura 43. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (2 de 3)

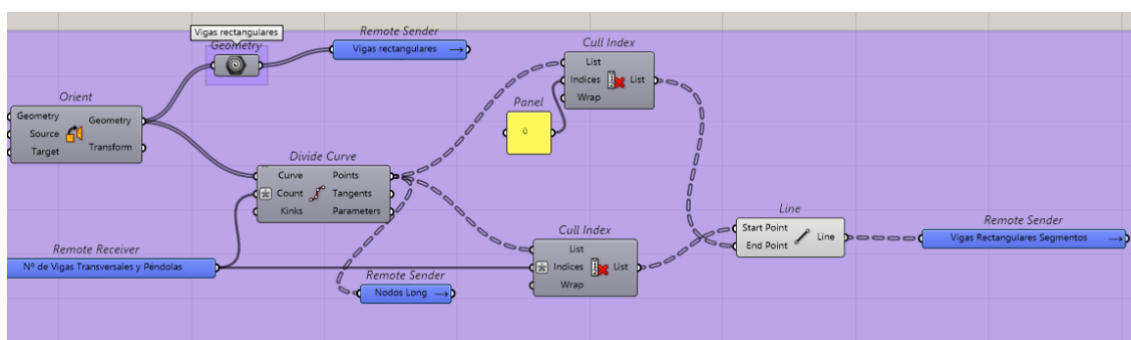


Figura 44. Código utilizado para la generación de las directrices de las vigas longitudinales (3 de 3)

8.3.2 GENERACIÓN DE LOS ARCOS

El siguiente elemento generado ha sido el arco. Para elaborar el arco, este se realizará con una flecha de entre $L/4$ y $L/6$, como se ha mencionado con anterioridad en el apartado teórico del trabajo. Esto quiere decir, para una luz de 82 metros, que el arco tendrá una flecha entre 20,5 y 13,7 metros o, de manera más simplificada, entre 20 y 14 metros.

Para comenzar, se ha partido de la directriz de las vigas rectangulares longitudinales creada en el anterior apartado, ya que los arcos tienen su inicio y final en los puntos inicial y final de estos segmentos. Se han dividido estas directrices en dos segmentos de igual longitud mediante el comando Divide Curve. De esta forma, se ha obtenido el centro de la línea y los dos extremos.

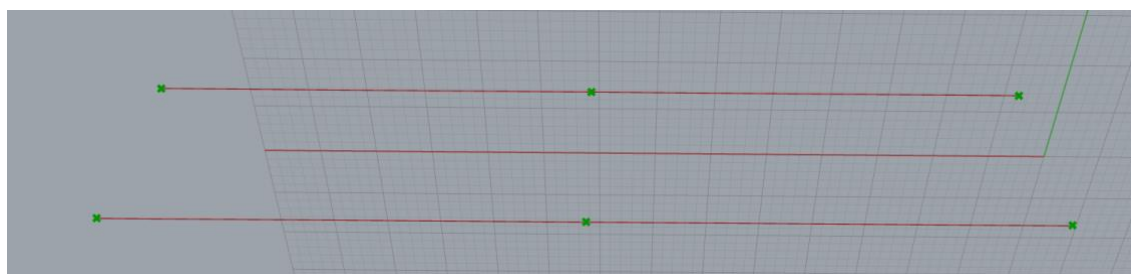


Figura 45. En verde, puntos en los que se han dividido las directrices de las secciones rectangulares

Una vez obtenidos estos puntos, se ha seleccionado el punto central con un *List Item*. Se ha originado también un comando de vector unidad en la dirección Y conectado a un *Number Slider*. Este parámetro representa la flecha del arco, y es uno de los parámetros a

iterar en el presente TFM, con unos valores que oscilan entre los 14 y 20 metros. Se han conectado estos dos parámetros en un comando de movimiento *Move* y se ha obtenido de esta forma la clave del arco.

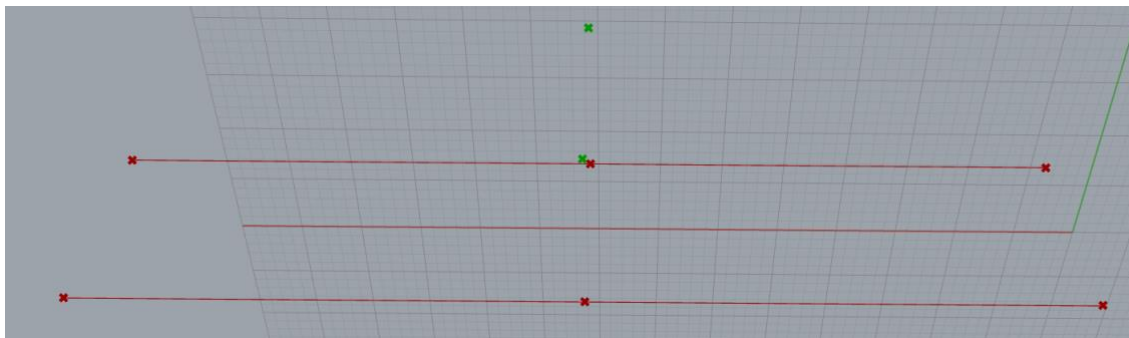


Figura 46. En verde, los vértices de las claves de los arcos

Tras esto, se han conectado el vértice inicial, central y final de los arcos a un comando de interpolación *Interpolate*, junto a un *Number Slider* que indica el grado de la parábola que sigue el arco y que permite realizar arcos con parábolas desde grado 1 hasta grado 6.

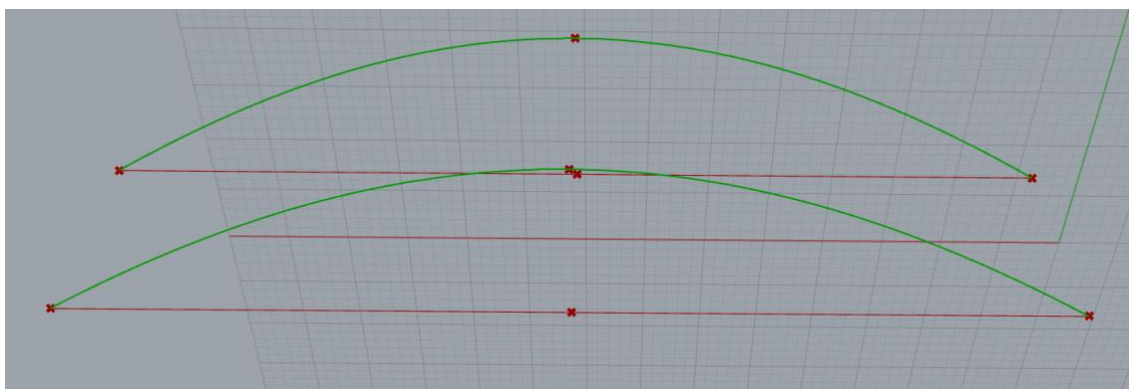


Figura 47. En verde, directrices de los arcos generadas

Se detalla en la Figura 48 la construcción de las directrices de los arcos.

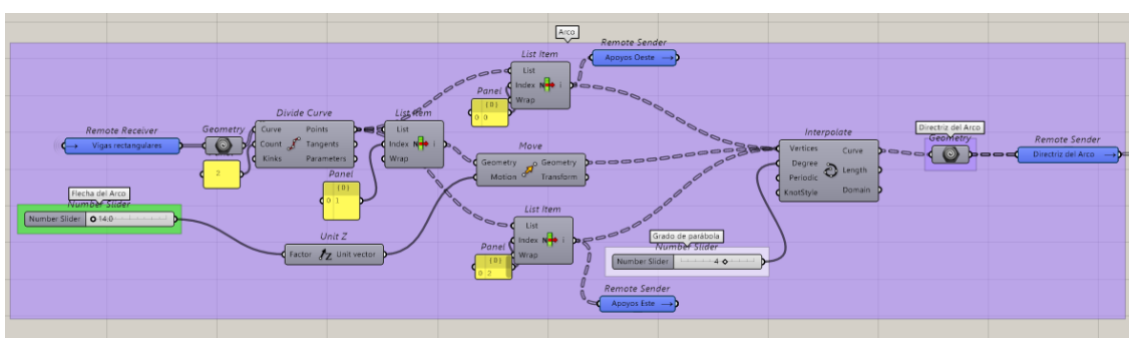


Figura 48. Proceso de generación de las directrices de los arcos

La generación del arco, sin embargo, no termina aquí. Para introducirlo en Midas Civil NX, es necesario hacerlo como elementos tipo viga recta. Es por ello por lo que es necesario dividir el arco en pequeños tramos rectos. En este caso, se ha optado por dividir el arco en dos segmentos entre cada cable. Esta división se ha hecho proyectada desde el tablero, para que se obtengan los puntos de conexión de las péndolas en el arco como puntos finales de los elementos de arco y asegurar una adecuada conexión en el modelo de Midas.

En primer lugar, se ha dividido la línea generada inicialmente de longitud igual a la luz entre el número de vigas transversales + 1, multiplicado por dos ($[X+1]*2$) para generar el número de elementos mencionado.

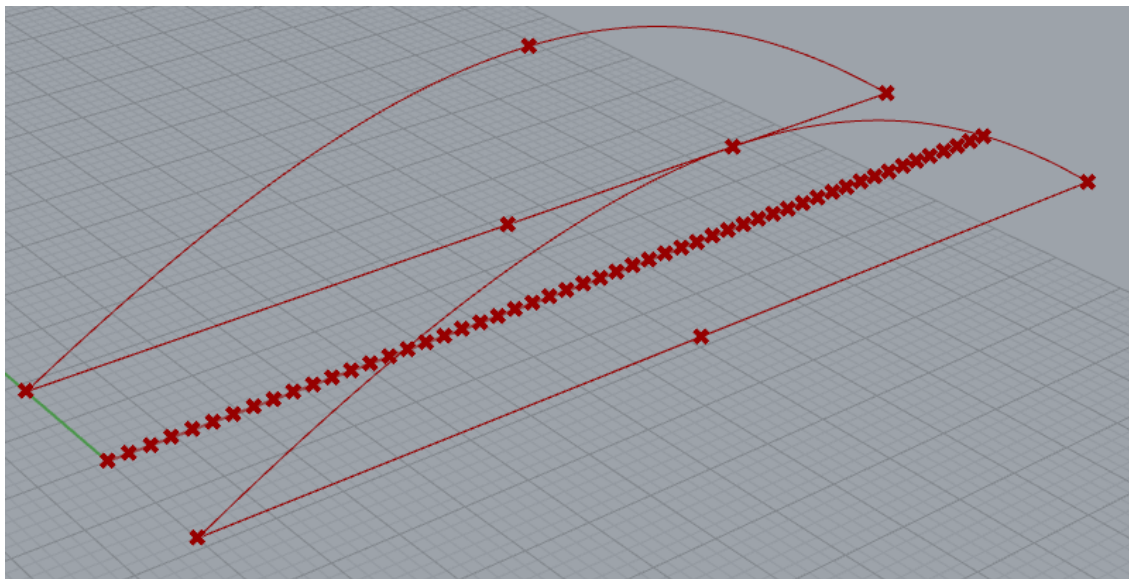


Figura 49. División de la línea central para obtener el número de elementos en los que se va a dividir el arco

Una vez encontrados estos puntos, se han obtenido planos en dirección YZ que pasan por ellos y se ha realizado una intersección con la curva que muestra la directriz del arco mediante el comando *Curve / Plane*.

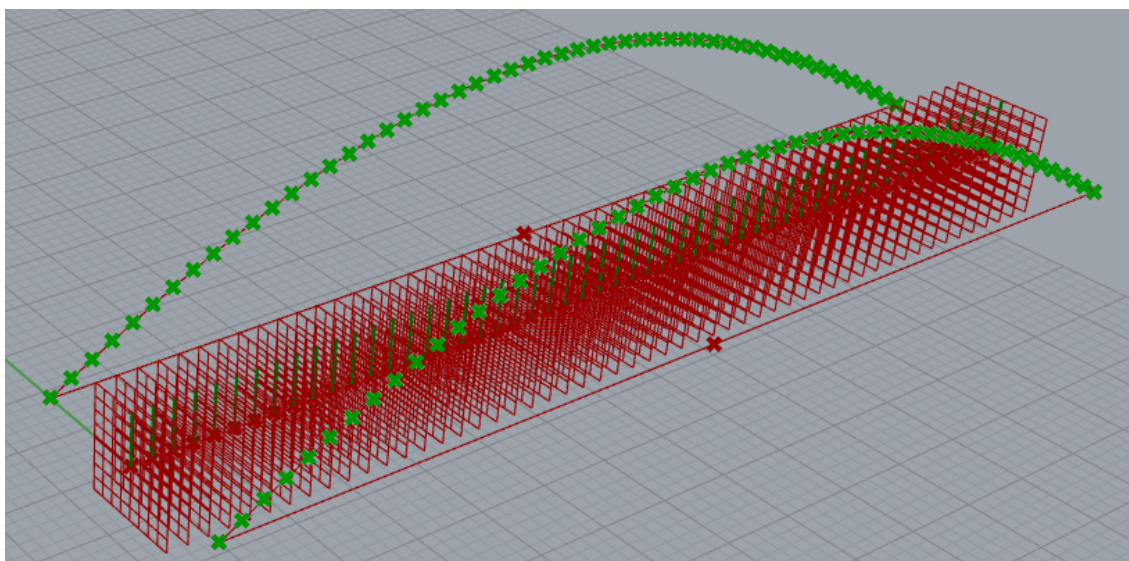


Figura 50. En verde, proyección de los puntos en los que se ha dividido la viga de longitud igual a la luz en las directrices de los arcos

Posteriormente, se han conectado estos puntos a un *Trim Tree* para que se guarden en dos sublistas (una por directriz). Finalmente, tal y como se ha hecho en el caso de las vigas rectangulares, se ha hecho una lista con todos los puntos menos los últimos y otra con todos menos los primeros, y se ha conectado una en *Start Point* y otra en *End Point* de un *Line* para obtener los elementos que forman el arco.

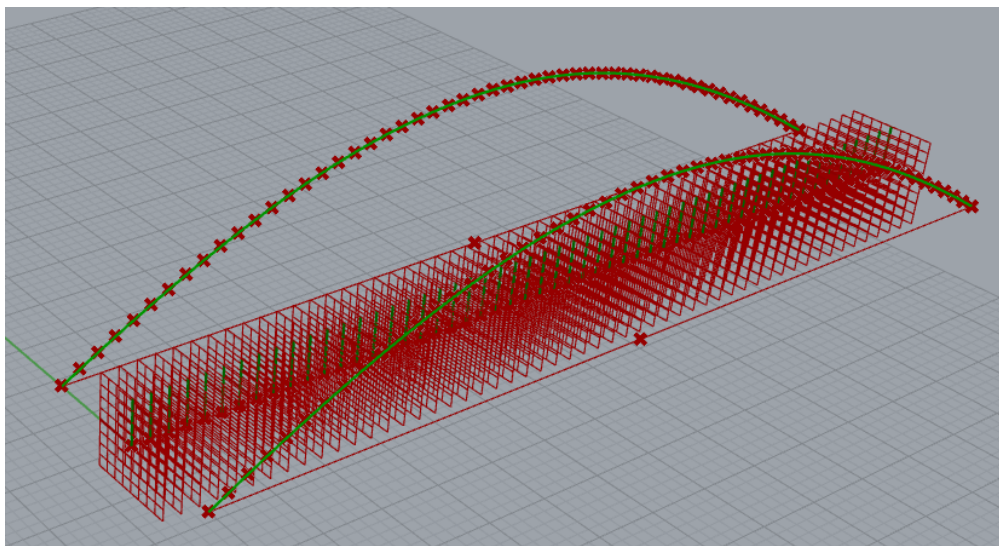


Figura 51. En verde, líneas que conforman los elementos de los arcos

Por último, se han dejado visibles solo aquellas geometrías que representan el modelo.

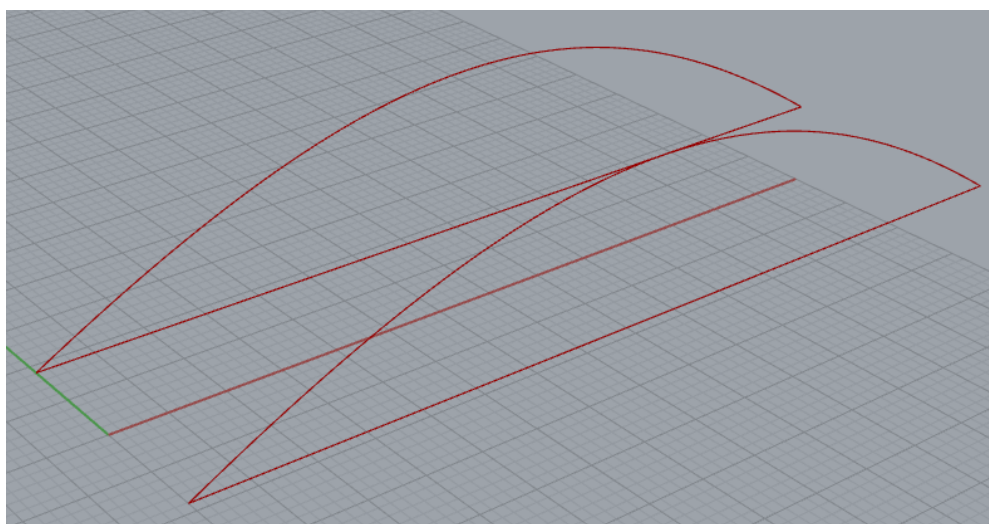


Figura 52. Directrices generadas hasta el momento

A continuación, se muestra el código utilizado para la generación de los segmentos del arco.

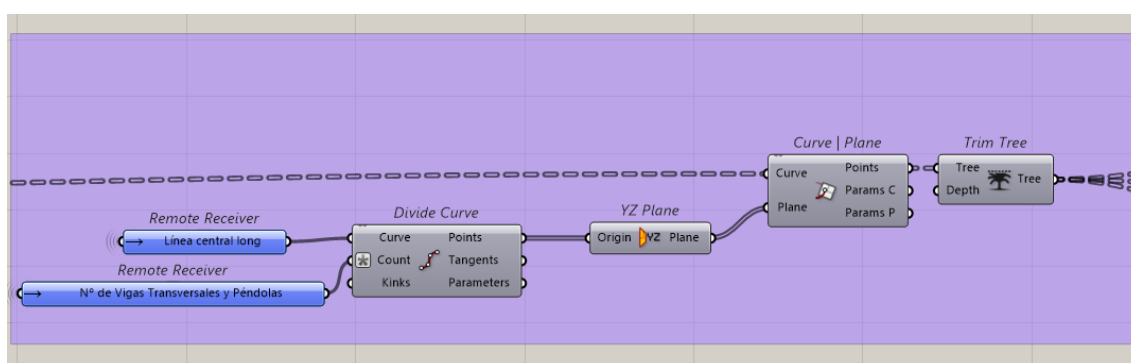


Figura 53. Código utilizado para la generación de los segmentos del arco (1 de 2)

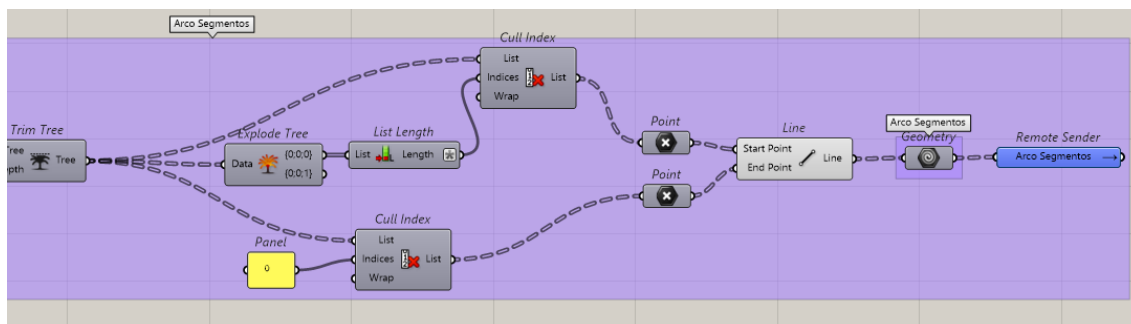


Figura 54. Código utilizado para la generación de los segmentos del arco (2 de 2)

8.3.3 GENERACIÓN DE LAS VIGAS TRANSVERSALES

El siguiente paso en la elaboración del modelo paramétrico del Puente de San Ignacio con arco superior ha sido la construcción de las directrices de las vigas transversales.

En primer lugar, se ha conectado la línea que se ha dibujado inicialmente de longitud igual a la luz a un comando de *Perp Frames*, junto con un *Number Slider* que indica el número de vigas transversales y péndolas que tiene el modelo, uno de los parámetros a iterar.

Para que este valor refleje correctamente el número de vigas transversales y péndolas del puente, es necesario añadir una expresión en la conexión *Count*, que es la que indica el número de planos perpendiculares equidistantes. Esta expresión es $X+1$ por dos razones: la primera, Grasshopper utiliza el 0 como número inicial en sus rangos, por lo que hay que restar un valor para que el número elegido sea efectivamente el número de planos perpendiculares utilizados. La segunda, es que tanto el primer como el último plano han de ser borrados, puesto que en ellos no va a haber ni péndolas ni vigas transversales, lo que exige añadir 2 a esta expresión, quedando por lo tanto en la expresión ya mencionada $X+1$.

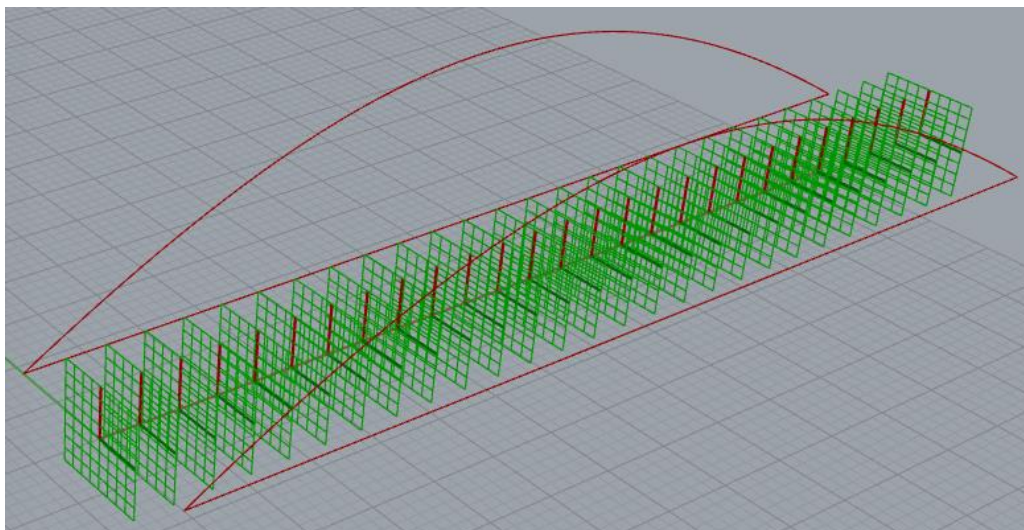


Figura 55. En verde, los planos perpendiculares generados antes de eliminar el inicial y el final para un número de vigas transversales y péndolas igual a 25

Una vez realizado este paso, se ha procedido con la extracción del plano inicial y final. Para que trabaje como un modelo paramétrico adecuadamente, se ha conectado el comando del número de vigas transversales y péndolas a un *Number*, en el que se ha añadido una expresión de $X+1$ como la anteriormente justificada. Tras esto, se ha conectado ese

Number y un *Panel* con el valor 0 a un comando *Cull Index*, en el que se ha borrado así tanto el primer como el último valor de la lista de planos perpendiculares.

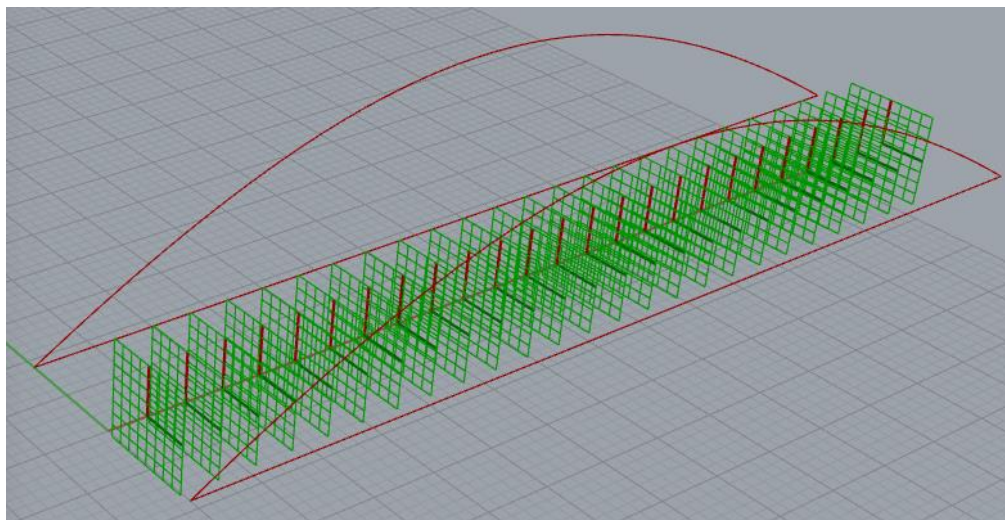


Figura 56. En verde, planos perpendiculares generados tras la eliminación del plano inicial y el final para un valor de 25 péndolas

Además, para obtener los puntos por los que pasan estos planos, se ha realizado la misma operación con una división en puntos de la línea central.

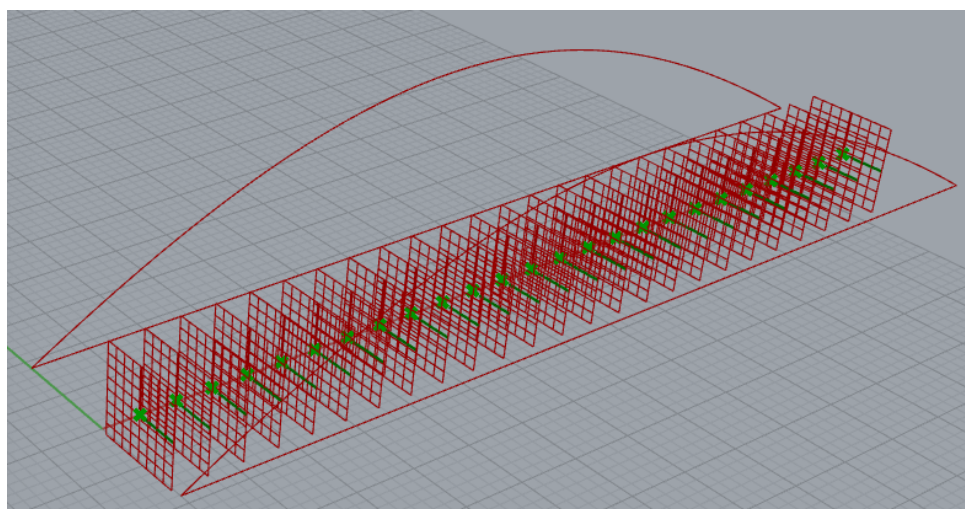


Figura 57. En verde, puntos por los que pasarán las vigas transversales

8.3.3.1. PARTE CENTRAL DE LAS VIGAS TRANSVERSALES

Tras esto, se ha comenzado con la generación de las líneas que suponen la directriz de la parte central de las vigas transversales. Para comenzar, se ha dibujado una línea de longitud igual a la indicada por el *Number Slider* que muestra el valor de la base de la viga rectangular, que se explicará en el apartado 8.3.5. Esta línea se ha orientado con aquella cuya longitud es igual a la distancia entre los extremos más cercanos de las vigas rectangulares dibujada en el apartado 8.3.1 y, posteriormente, se han unido mediante el comando *Join Curves*.



Figura 58. En verde, la línea de longitud igual a la base de las vigas rectangulares orientada junto a la de longitud igual a la distancia entre vigas rectangulares

Gracias a esto, se ha obtenido una línea de longitud igual a la distancia entre los centros de las vigas rectangulares y, por tanto, la longitud de la parte central de las vigas transversales.

Tras esto, se han originado las líneas que suponen la parte central de las vigas transversales. Para ello, se ha utilizado el comando *Orient* con la geometría del segmento originado con anterioridad, con base en el punto central de esta geometría. Para encontrar ese punto, se ha dividido previamente la línea en dos segmentos de igual longitud mediante el comando *Divide Curves* y se ha seleccionado el punto central mediante un *List Item*.

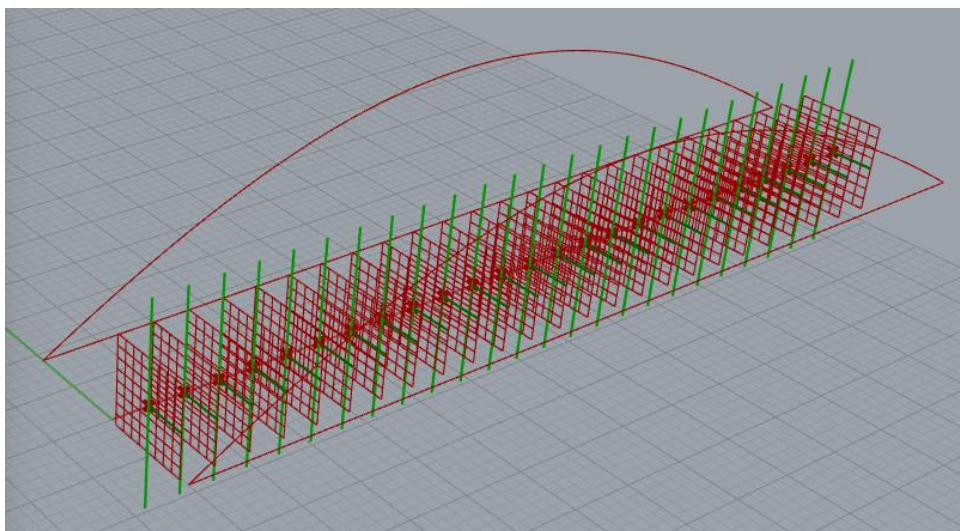


Figura 59. En verde, directrices de la parte central de las vigas transversales generadas

Finalmente, se han rotado en el plano YZ estas líneas para obtener los centros de las vigas transversales.

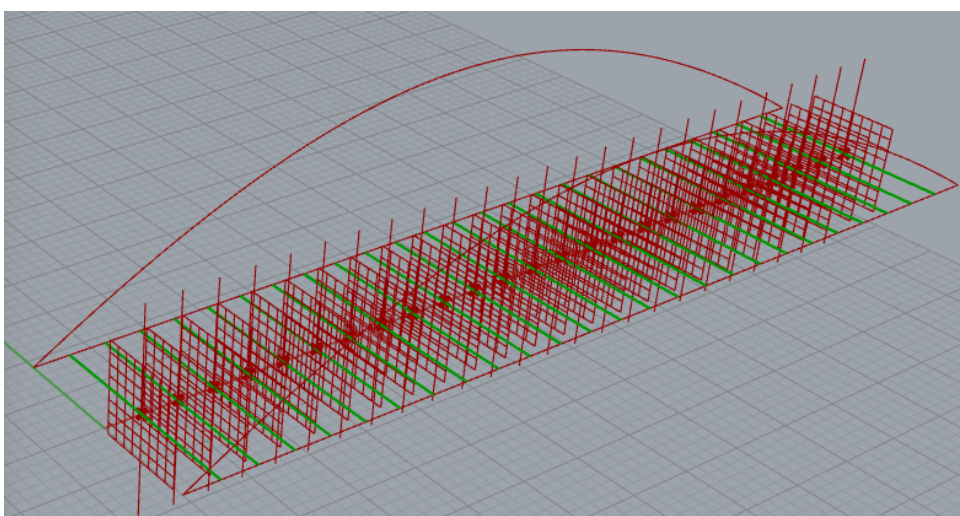


Figura 60. En verde, directrices orientadas del centro de las vigas transversales

En este punto, se ha ocultado todo aquello que ha servido para el proceso generativo, pero no forma parte del modelo final.

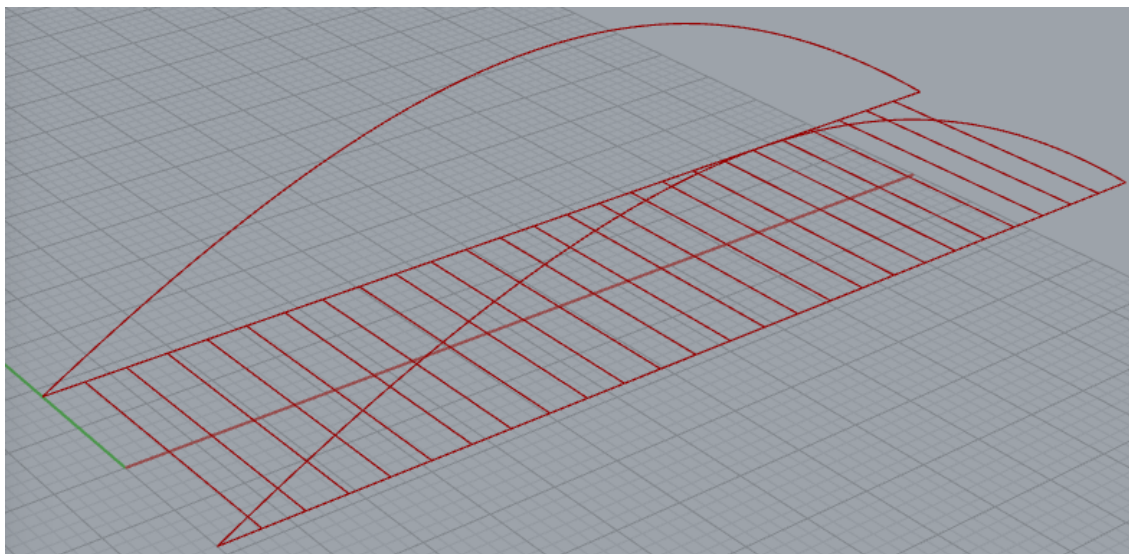


Figura 61. Modelo actualizado con la parte central de las vigas transversales

Se presenta en la Figura 62 el proceso de generación de esta parte del puente.

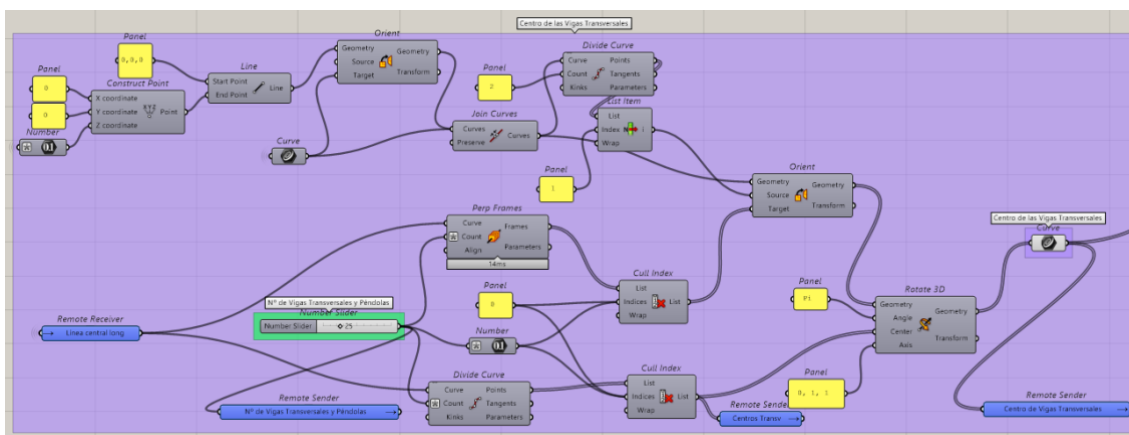


Figura 62. Proceso seguido para la generación de la parte central de las vigas transversales

8.3.3.2. COSTILLAS

El siguiente paso ha sido la generación de la directriz de las costillas. Para ello, se ha utilizado el comando *Divide Curve* para todos los segmentos obtenidos en el apartado 8.3.3.1 con un total de 1 división, de forma que se han obtenido los puntos iniciales y finales de estos.

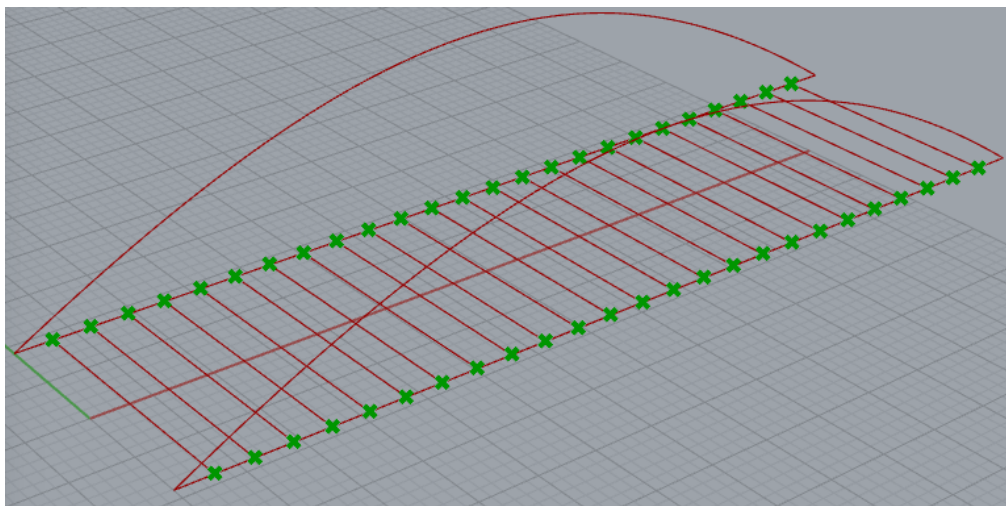


Figura 63. En verde, punto inicial y final de los segmentos que representan la parte central de las vigas transversales

Para la generación de las costillas del primero de los lados, se ha realizado una línea de longitud igual a 5,5 metros – la longitud total de las costillas originales hasta el extremo de la viga longitudinal – y se han escogido los puntos del lado izquierdo mediante un *List Item*. Posteriormente, se han conectado estos a un comando *Orient*, de forma que se han generado las costillas de uno de los lados.

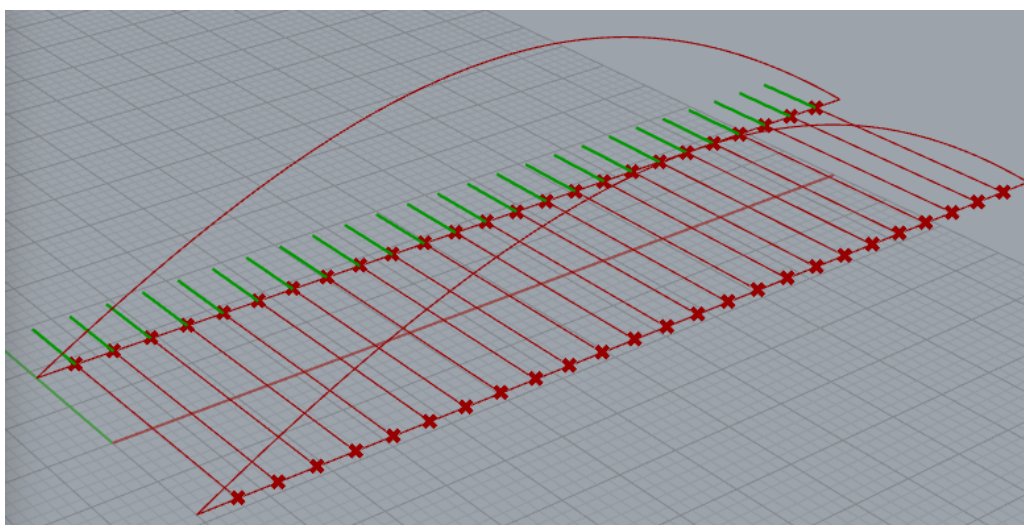


Figura 64. En verde, las directrices de las costillas de uno de los laterales

A estas líneas se les debe añadir la mitad de la base de la viga longitudinal rectangular para que tengan la longitud adecuada según el proyecto original. Para ello, se ha dibujado una línea de longitud igual a la mitad de la base de la sección rectangular. Esto se ha realizado conectando el *Number Slider* que muestra el valor de la base del perfil rectangular – este se explicará, posteriormente, en el apartado 8.3.5 – con un *Number* que tiene interiorizada una expresión de $X/2$ con objeto de marcar la mitad de la base de dicha sección. Este valor se ha utilizado para dibujar una línea de esa longitud. Tras esto, se han unido las dos líneas para formar las directrices de las costillas del primer lado.

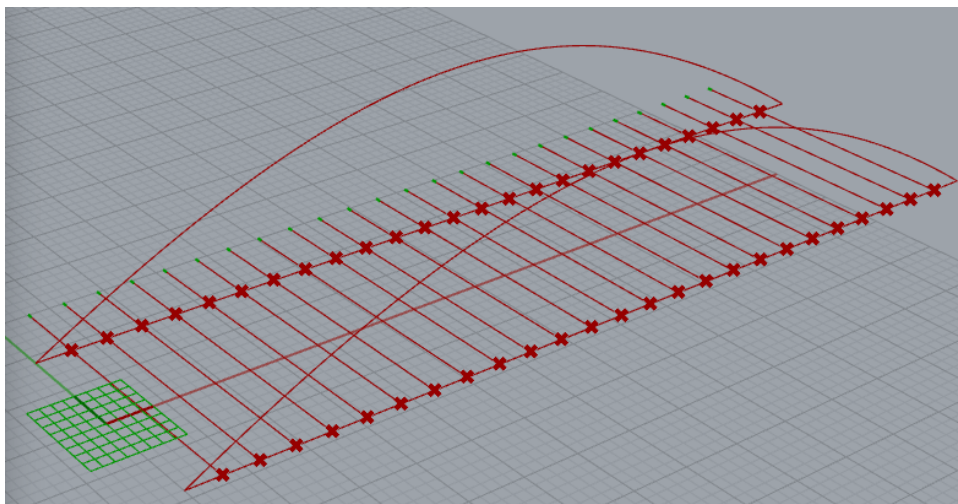


Figura 65. En verde, línea del tamaño de la mitad de la base de la sección de la viga rectangular generada

Para el otro lado, se ha realizado el mismo proceso, generando esta vez las líneas de las directrices orientadas hacia el otro lado. Para ello, se ha realizado una simetría respecto al plano que pasa por el centro del perfil transversal del puente a través del comando *Mirror*.

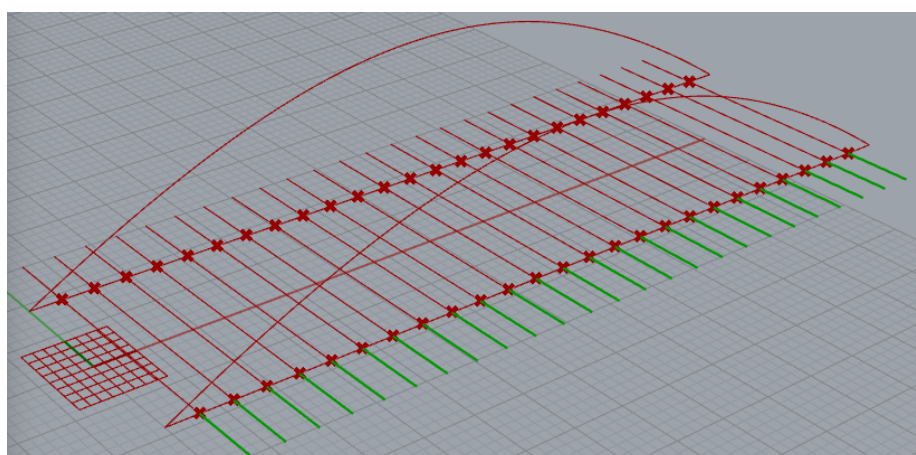


Figura 66. En verde, costillas generadas en el otro lado del puente

Tras esto, se han ocultado aquellos elementos del proceso generativo que no forman parte del modelo paramétrico.

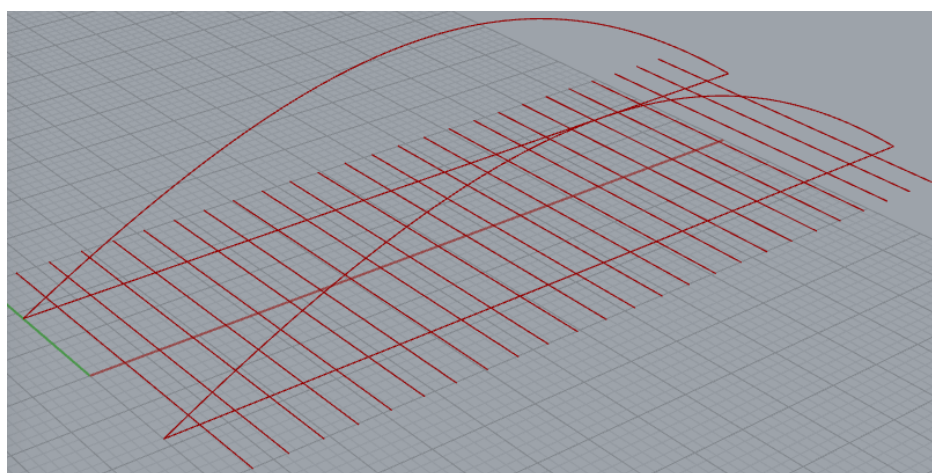


Figura 67. Modelo actualizado con las directrices de las costillas

En la Figura 68 y la Figura 69, se muestra el proceso generativo realizado para las costillas.

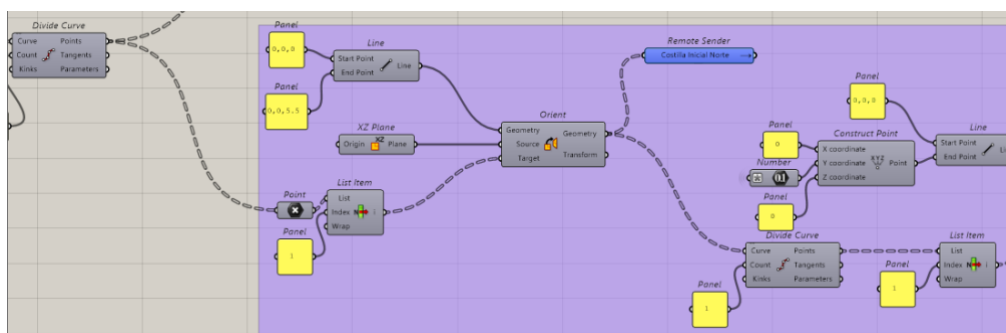


Figura 68. Proceso generativo de las directrices de las costillas (1 de 2)

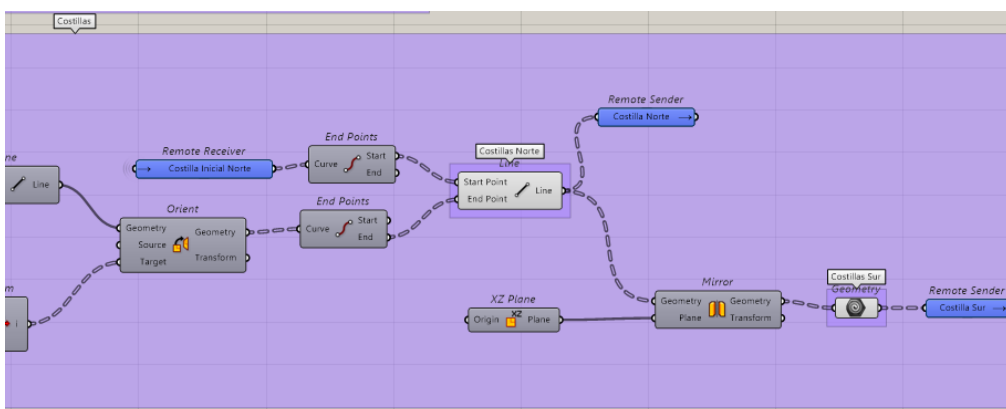


Figura 69. Proceso generativo de las directrices de las costillas (2 de 2)

8.3.4 GENERACIÓN DE LOS CABLES

Para la generación de los cables, se parte de la geometría de la directriz del arco generada en el apartado 8.3.2, el *Number Slider* que indica el número de cables y vigas transversales con la expresión $X+1$ que se ha generado en el apartado 8.3.3, y los puntos centrales de las vigas transversales generados en el apartado 8.3.3.

En primer lugar, se ha realizado una intersección entre la directriz del arco y los planos YZ que pasan por los centros de las vigas transversales, tal como se ha hecho en el apartado 8.3.2, para obtener los puntos de unión de las péndolas y el arco.

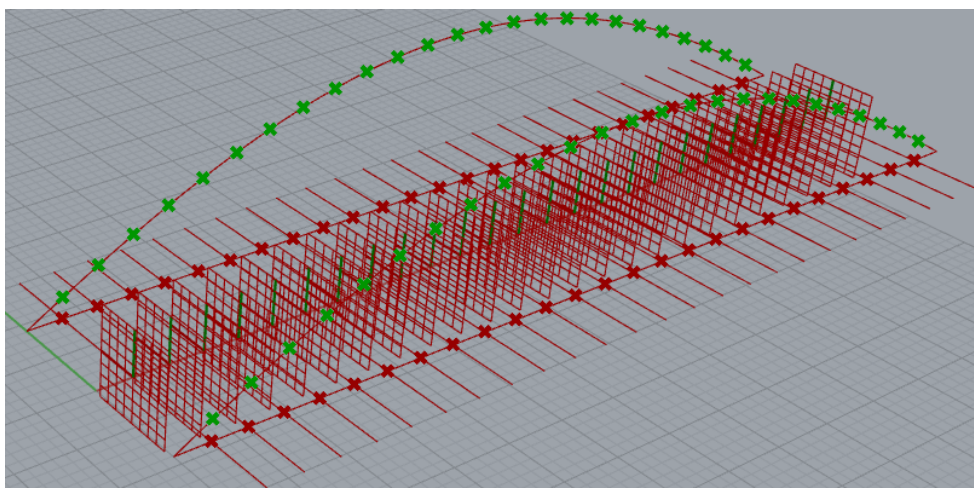


Figura 70. En verde, puntos iniciales de los cables en el arco

Posteriormente, se ha realizado un *Trim Tree* para dividir los puntos en dos sublistas, una por directriz. Este se ha conectado a un *Explode Tree* y se han realizado líneas uniendo los puntos de corte de cada lado del arco con los de las respectivas vigas rectangulares.

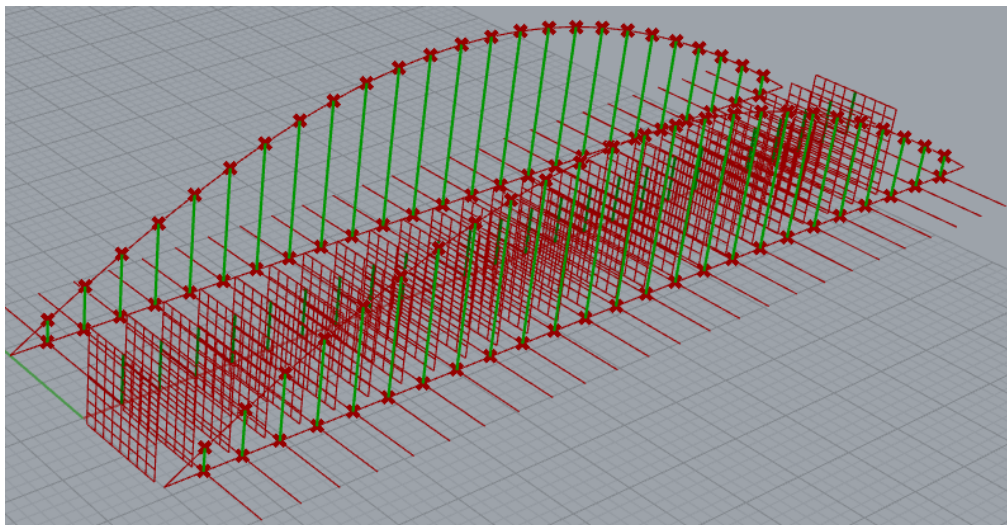


Figura 71. En verde, puntos iniciales de los cables

Por último, se han ocultado todas aquellas partes del proceso generativo que no forman parte del modelo.

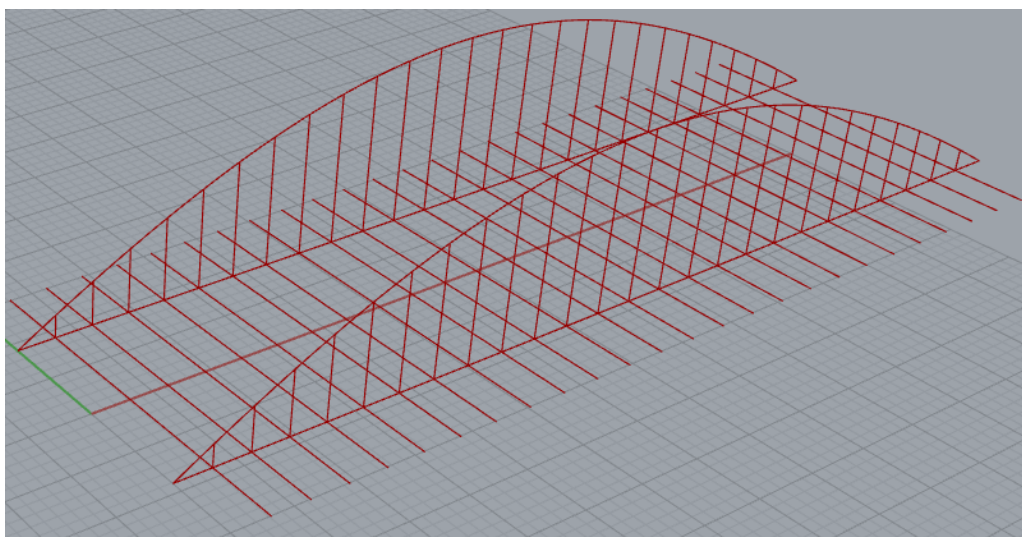


Figura 72. Modelo actualizado con las directrices de los cables

En la Figura 73 se muestra el proceso generativo de las directrices de los cables.

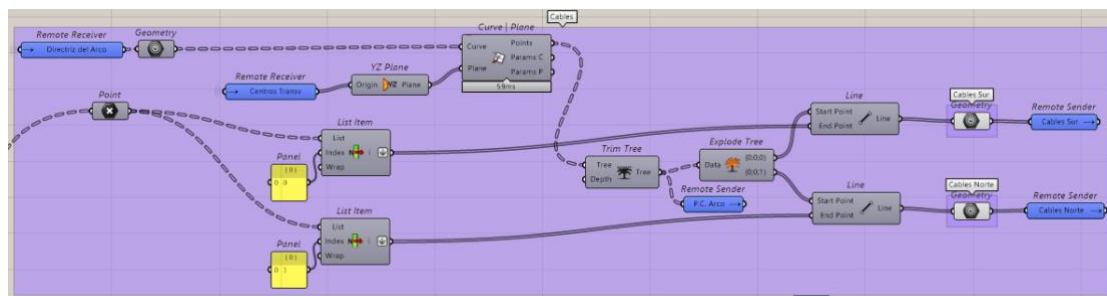


Figura 73. Proceso generativo de los cables

8.3.5 GENERACIÓN DE LAS SECCIONES

Una vez realizadas todas las directrices del puente, se ha procedido con la generación de las diferentes secciones transversales del puente.

Para crear las secciones, se deben seguir cuatro pasos, que se listan a continuación.

En primer lugar, crear una sección de usuario, mediante el comando *Shape User*, en el que se selecciona el tipo de forma que se desea y se conectan a ella los parámetros de las diferentes longitudes. Posteriormente, conectando este parámetro a un *Section*, se le da nombre a la sección.

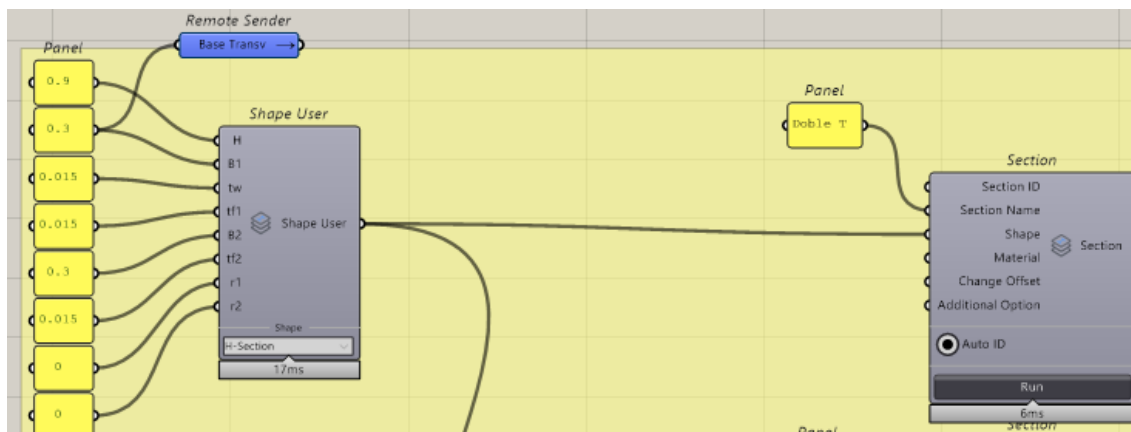


Figura 74. Parámetros para la viga doble T

Paralelamente, se crea el material (acero mediante *Steel Material* u hormigón mediante *Concrete Material*), eligiendo un nombre y el material en la base de datos.

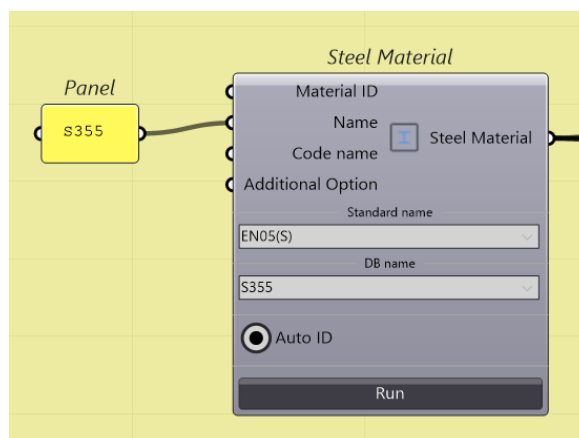


Figura 75. Elección de material acero S355

Finalmente, se conectan la sección, el material y la directriz a un comando *Beam*, que aplica estas secciones a las directrices en Midas Civil NX.

Una vez conocido el proceso de generación de secciones, cabe destacar que una sección que es de canto variable, por lo que su generación se realiza de manera diferente. Para aplicar correctamente esta variación de canto en las costillas, es necesario crear una *Tapered Shape*, que comience con una altura casi igual a cero y termine con la altura de las vigas doble T transversales en el punto de unión con la viga rectangular.

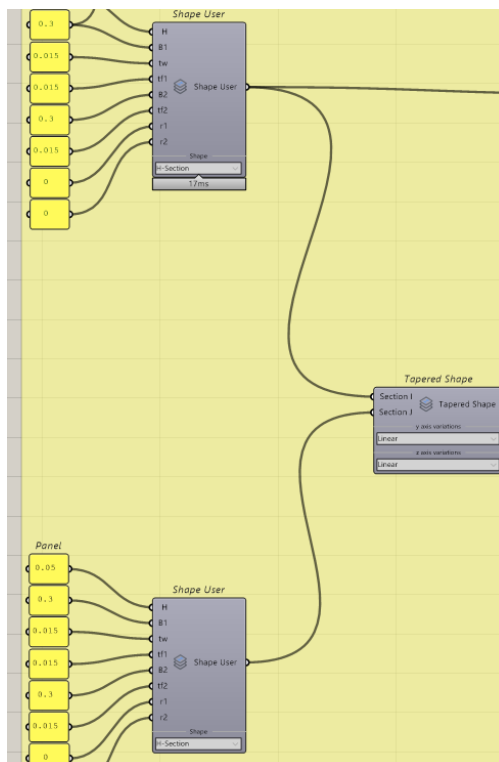


Figura 76. Proceso de generación de la sección de canto variable de las costillas

Se debe mencionar también que la base de las vigas rectangulares y el diámetro del arco se han definido mediante un Number Slider, ya que se trata de uno de los parámetros a iterar.

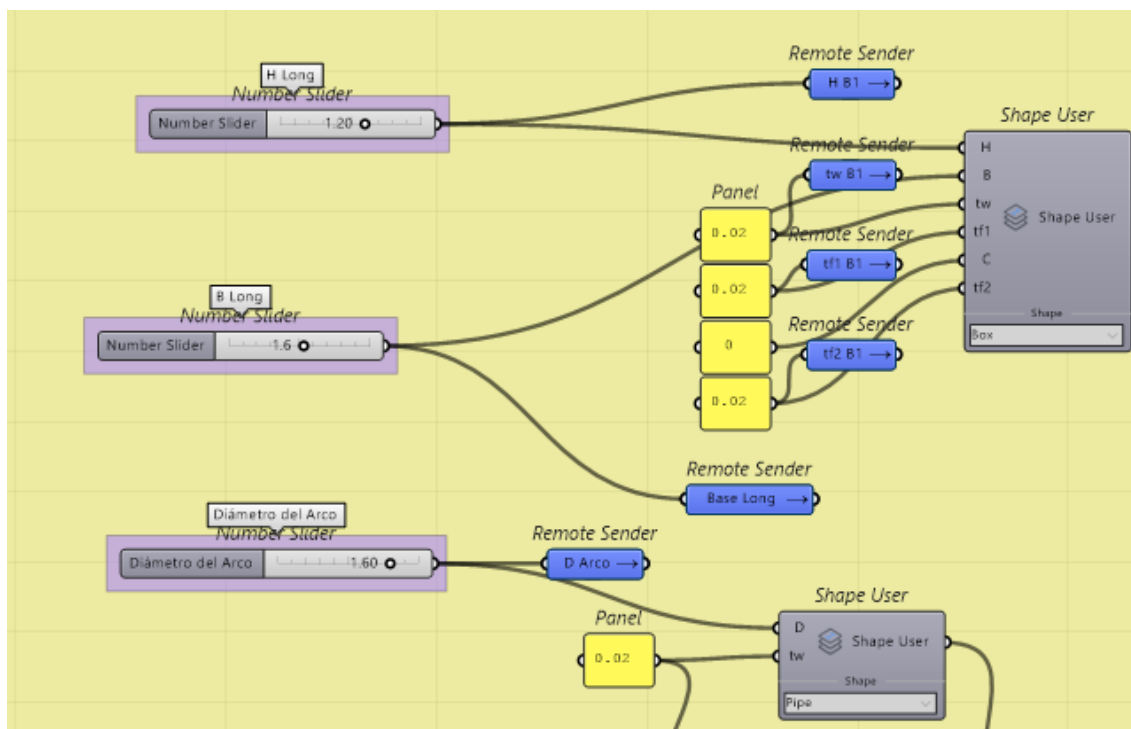


Figura 77. Generación de las secciones del arco y de la viga rectangular

Siguiendo estos pasos, se han generado todas las secciones necesarias. Se muestra a continuación el proceso generativo.

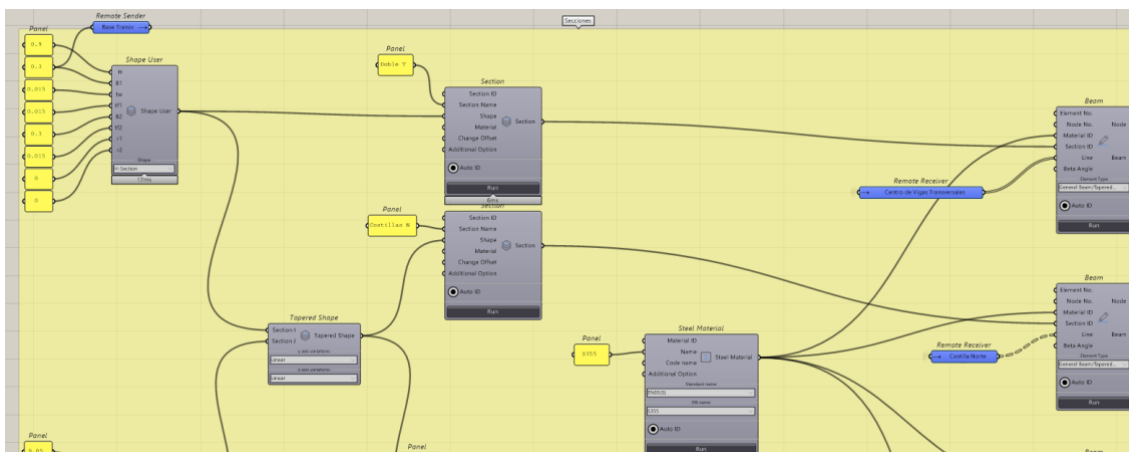


Figura 78. Generación y aplicación de las secciones (1 de 3)

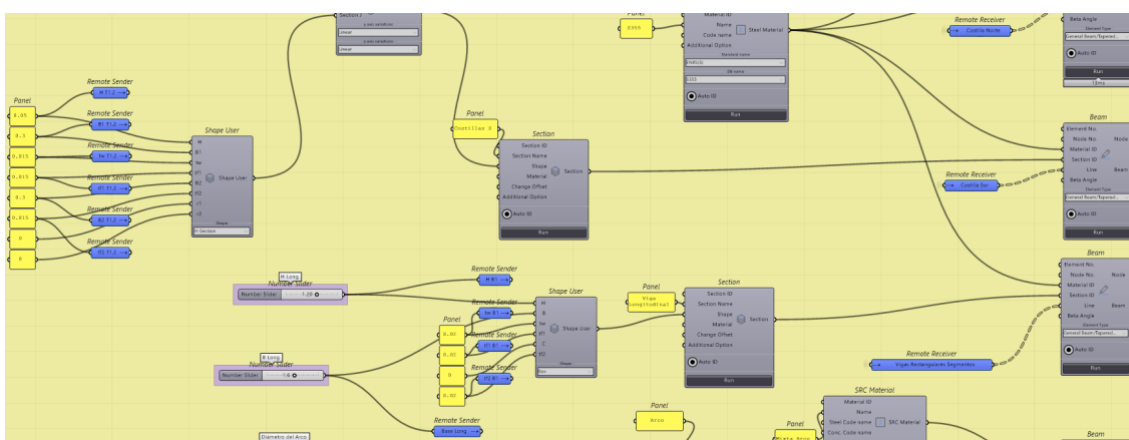


Figura 79. Generación y aplicación de las secciones (2 de 3)

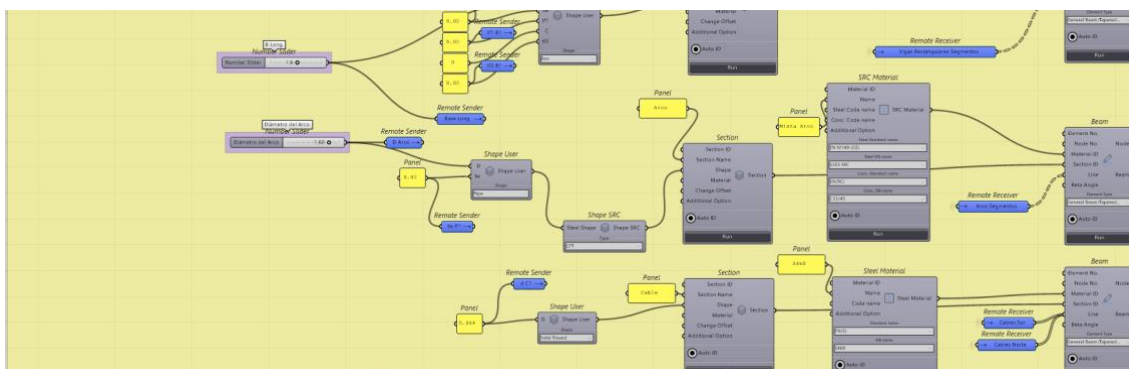


Figura 80. Generación y aplicación de las secciones (3 de 3)

8.3.6 GENERACIÓN DE LOS APOYOS

Para la generación de los apoyos, se han escogido los puntos finales del arco, y se han introducido las siguientes condiciones de apoyo:

- En el lado oeste, se ha bloqueado el movimiento en X, Y, Z en uno de los apoyos y en X, Z en el otro.
- En el lado este, se ha bloqueado el movimiento en Y, Z en un apoyo y en Z en el otro.

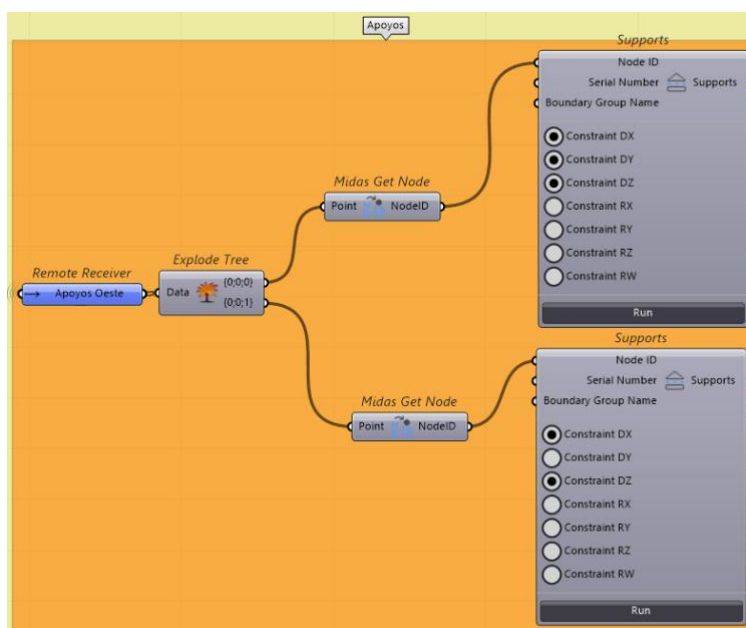


Figura 81. Generación de apoyos (1 de 2)

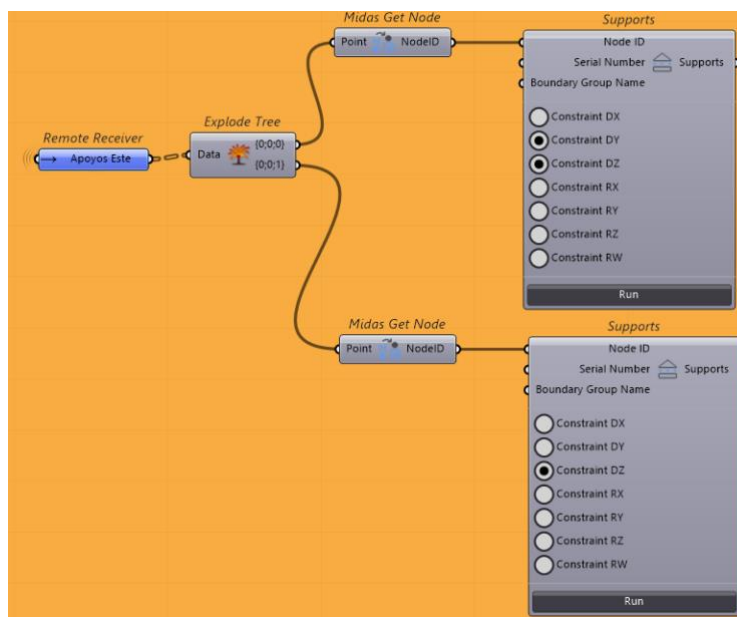


Figura 82. Generación de apoyos (2 de 2)

8.3.7 GENERACIÓN DEL ANCHO EFICAZ

Una vez obtenidos los apoyos, se ha procedido a la generación del ancho eficaz de losa sobre las vigas transversales y longitudinales.

Se define ancho eficaz de la losa como la anchura total de losa de hormigón sobre la viga metálica que se debe tener en cuenta para la resistencia estructural debido al arrastre por cortante. En este puente, se han calculado tres anchos eficaces distintos:

- Vigas longitudinales: se ha definido el ancho eficaz a partir de una sección biapoyada, es decir con una longitud equivalente igual a la luz del puente, $L_e = 82$ m.

- Vigas transversales: se ha definido como una estructura biapoyada, sobre las vigas rectangulares, con un voladizo a cada lado, correspondiente a las costillas. La longitud equivalente en el caso de la parte central es 0,7 veces la distancia entre vigas rectangulares, y para las costillas es 2 veces su longitud.

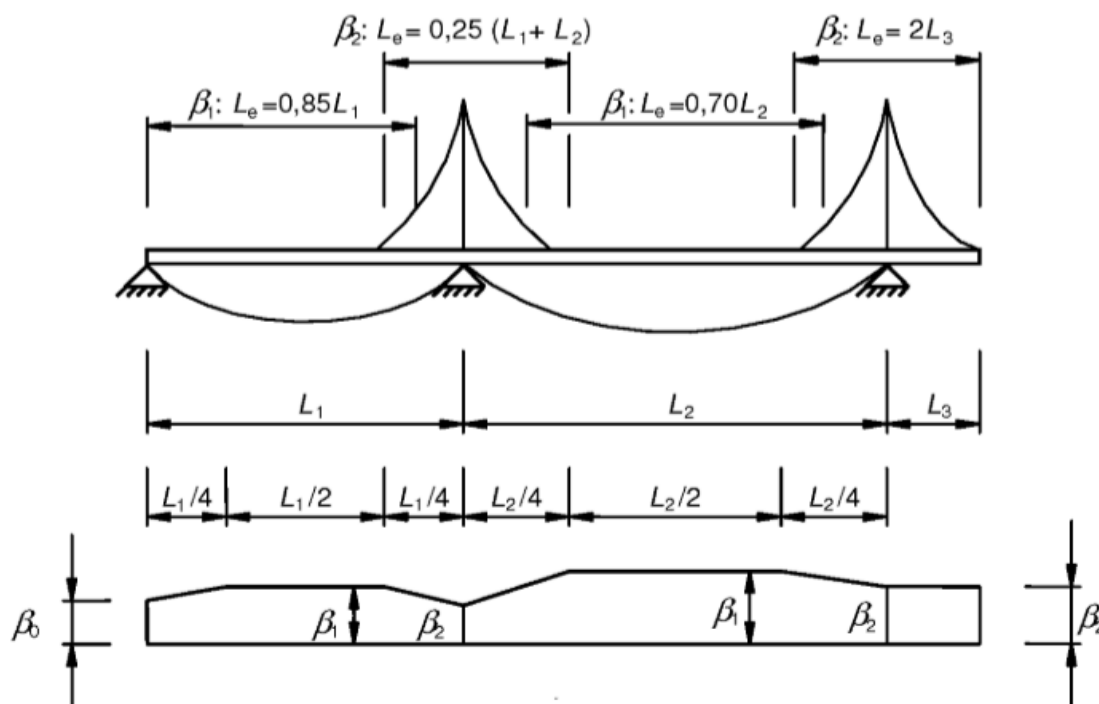


Figura 83. Longitud eficaz en vigas continuas y distribución de la anchura eficaz, según el Eurocódigo 4 [22]

Siguiendo las pautas que indica el Eurocódigo 4 [22], se ha dividido esta longitud equivalente entre ocho para obtener la anchura a sumar a la base de la viga metálica a cada lado.

Por último, se ha dividido esta anchura total entre 7, en el caso de la obtención del ancho eficaz para tiempo inicial, y entre 21 para el caso a tiempo infinito. Este último paso se ha realizado con el objetivo de homogeneizar la sección de hormigón a acero, ya que 7 y 21 es la relación entre los módulos de elasticidad de ambos a tiempo cero y tiempo infinito respectivamente.

Una vez explicado el proceso que se ha seguido, se describe a continuación el procedimiento generativo de estos pasos. Para los tres casos de vigas, tanto a tiempo inicial como a tiempo infinito, se ha seguido la misma metodología.

En primer lugar, se ha obtenido la longitud o distancia a través de la que se obtiene la longitud equivalente. Para las vigas longitudinales y el centro de las vigas transversales, esto se ha conseguido a través de un comando *Length* conectado al primer elemento de las listas que contienen sus directrices. Para la obtención de la longitud de las costillas, esto se ha hecho midiendo la distancia entre la esquina de la losa y el punto inicial de las vigas longitudinales.

Posteriormente, se han realizado todas las operaciones descritas anteriormente para la obtención del ancho eficaz y, finalmente, se ha generado la sección como un rectángulo sólido con la base calculada y la altura igual al espesor de losa. Esta sección se ha atribuido a las directrices de las vigas longitudinales y transversales, junto a un material HA-35.

En las siguientes figuras se muestra el código utilizado.

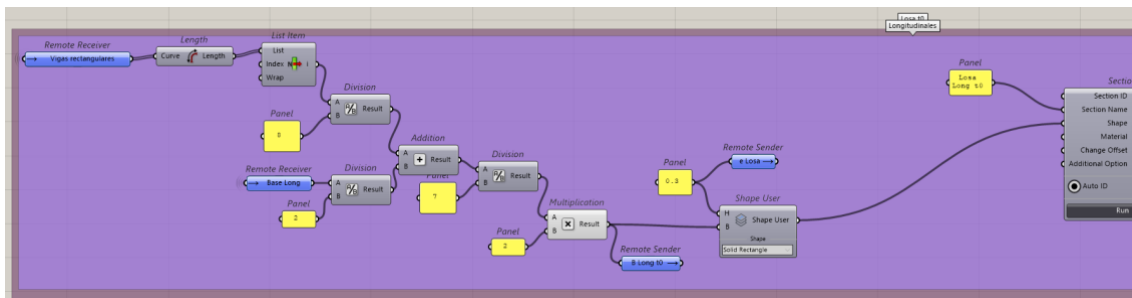


Figura 84. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo inicial (1 de 2)

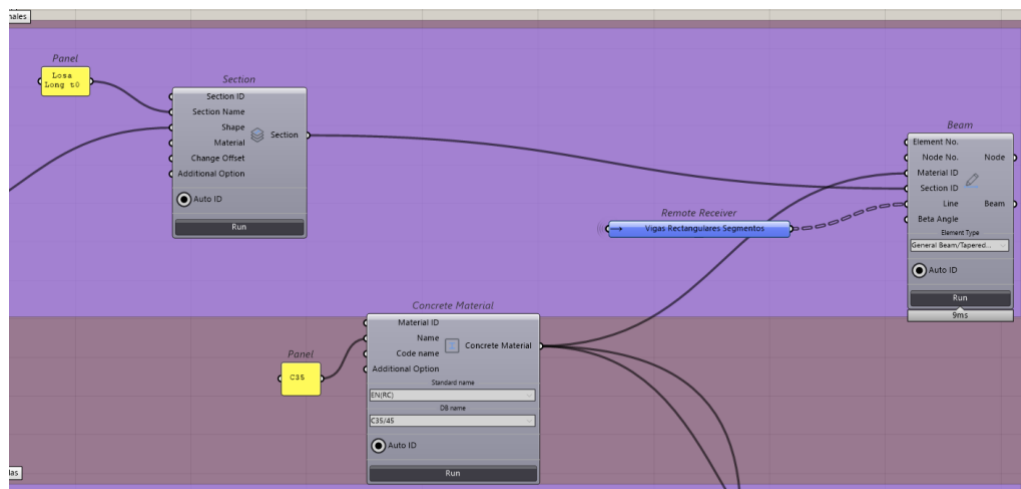


Figura 85. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo inicial (2 de 2)

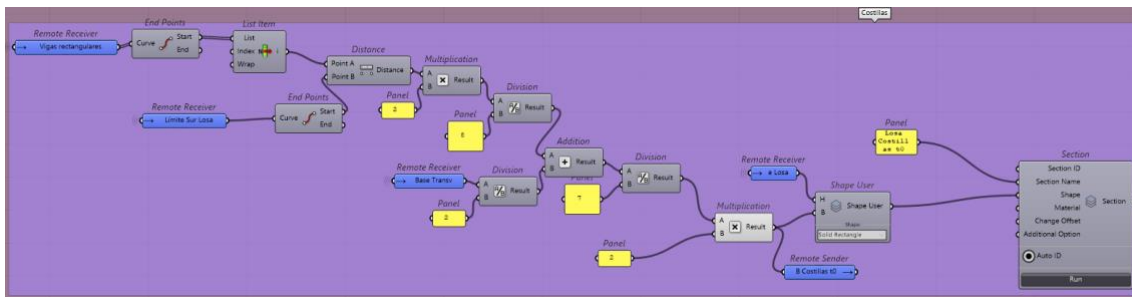


Figura 86. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo inicial (1 de 2)

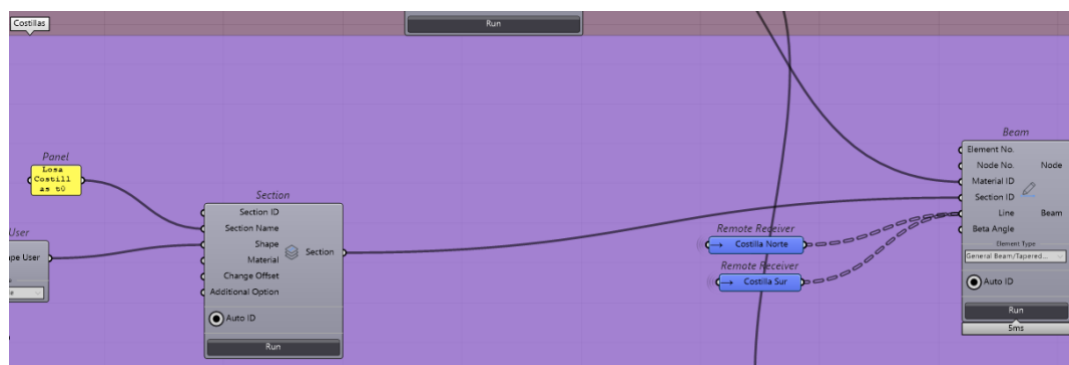


Figura 87. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo inicial (2 de 2)

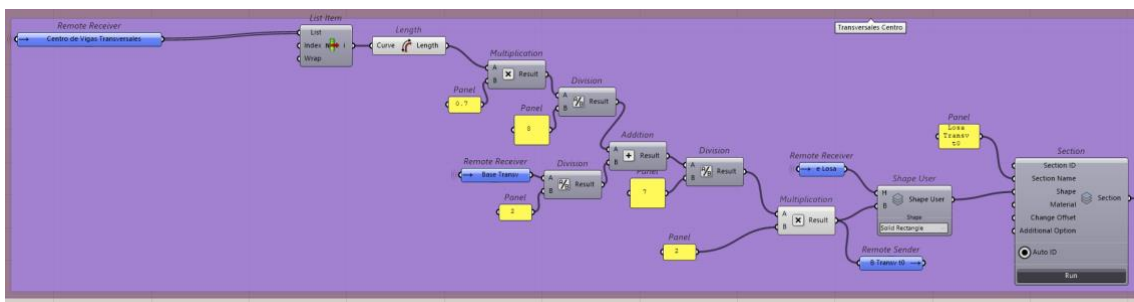


Figura 88. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo inicial (1 de 2)

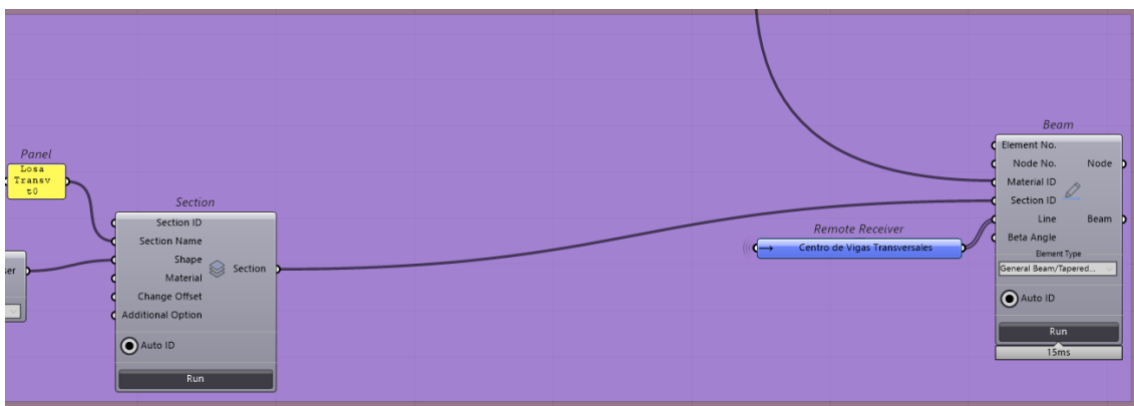


Figura 89. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo inicial (2 de 2)

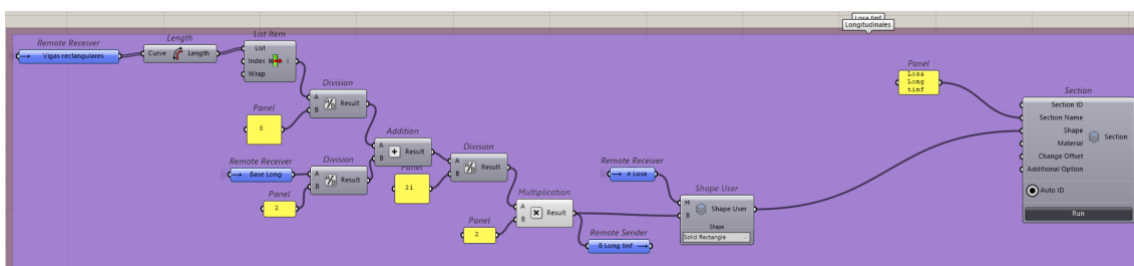


Figura 90. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo infinito (1 de 2)

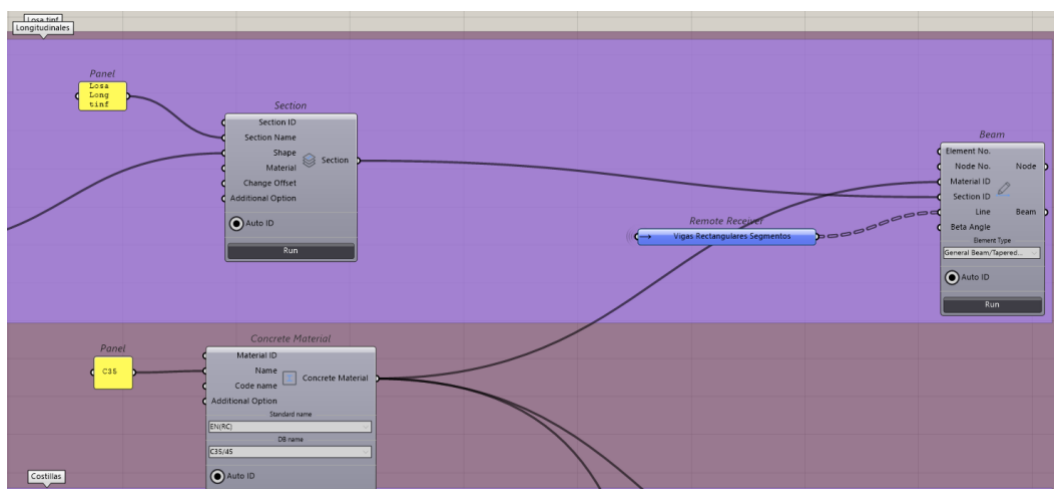


Figura 91. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las vigas longitudinales a tiempo infinito (2 de 2)

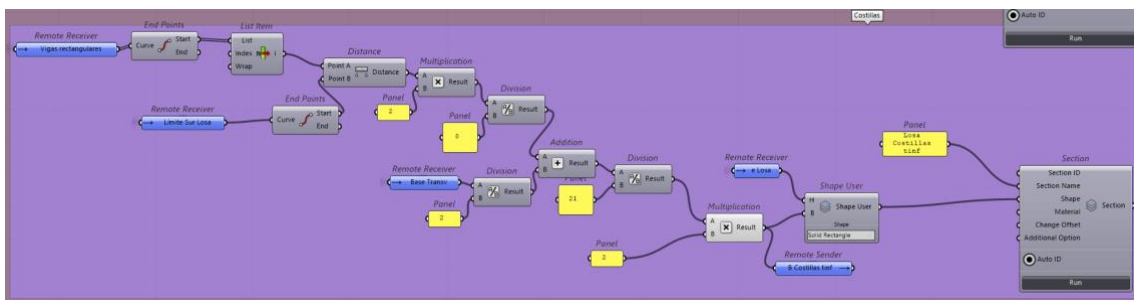


Figura 92. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo infinito (1 de 2)

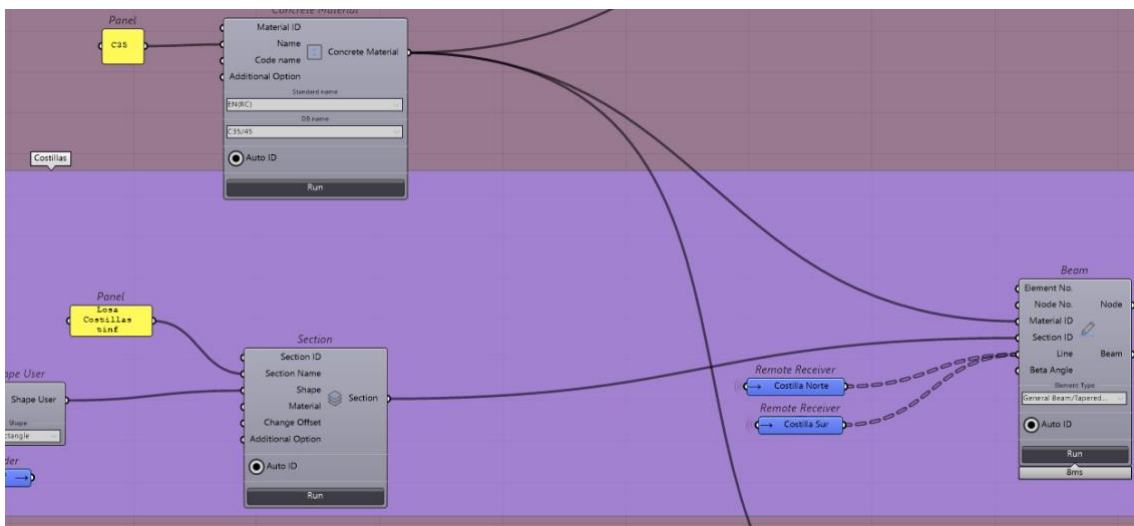


Figura 93. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en las costillas a tiempo infinito (2 de 2)

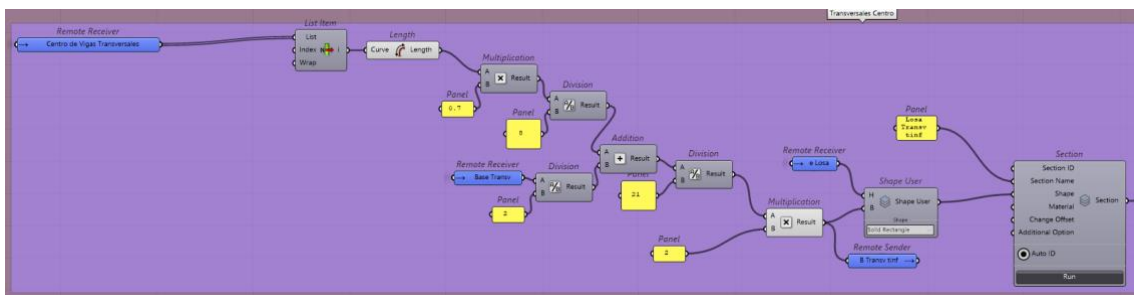


Figura 94. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo infinito (1 de 2)

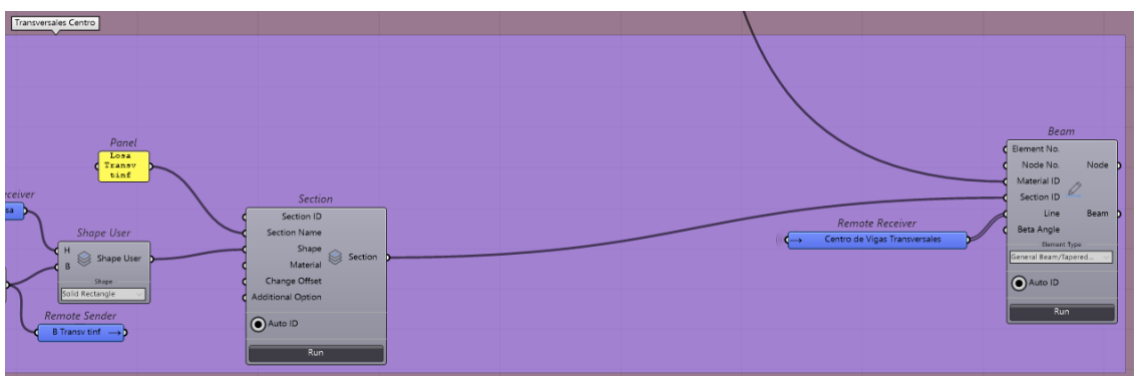


Figura 95. Código utilizado para la generación del ancho eficaz en la parte central de las vigas transversales a tiempo infinito (2 de 2)

8.3.8 CÁLCULO DE VOLÚMENES

El siguiente paso ha sido la generación de un código que permita obtener automáticamente el volumen utilizado de cada material. Para ello, el proceso seguido ha sido el mismo para todos los elementos que componen la estructura del puente, a excepción de la losa: obtener el área transversal de la pieza y multiplicarla por la longitud total de las directrices de esta.

A continuación, se detalla el proceso seguido para la obtención del resto de los volúmenes.

En primer lugar, se ha obtenido el volumen de las vigas transversales. Para ello, se debe tener en cuenta que la altura de las costillas es variable. Para obtener estos volúmenes, se han obtenido las áreas de la doble T de la parte central de estas vigas transversales y la de la punta final de las costillas. Seguidamente, se ha multiplicado la primera de ellas por las directrices de las partes centrales de las vigas transversales, por un lado, y por otro se han sumado las áreas de ambas, dividido entre dos y multiplicado por las directrices de las costillas. El código utilizado se muestra a continuación.

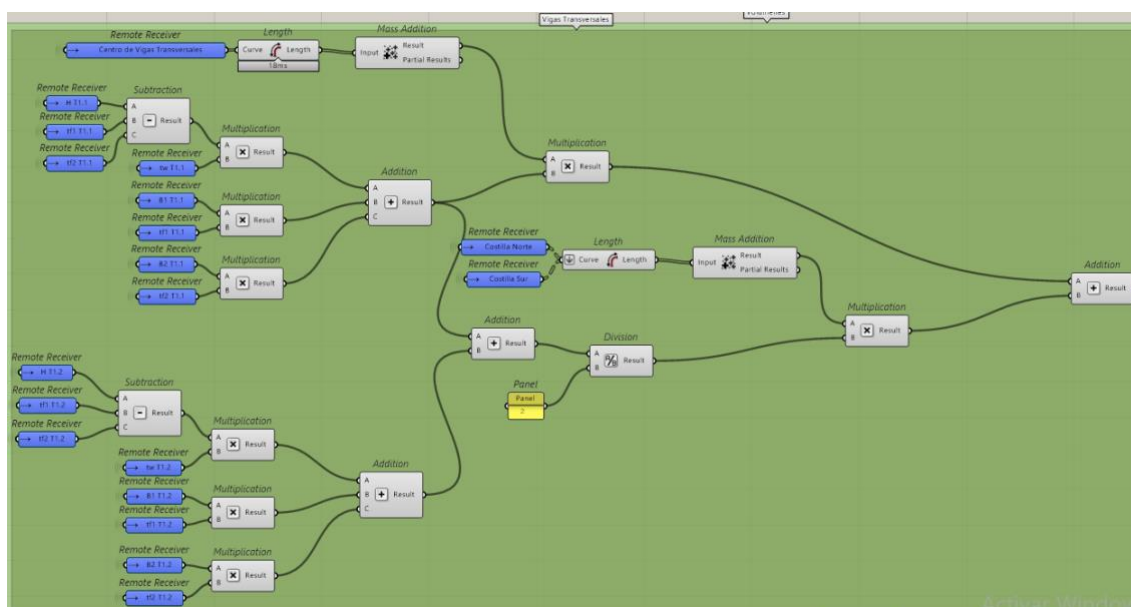


Figura 96. Obtención del volumen de las vigas transversales

El siguiente volumen obtenido es el de las vigas rectangulares longitudinales, que no tiene mayor complicación que multiplicar su área por las directrices de estas. Para realizar esta multiplicación, tanto para este como para todos los perfiles transversales, se siguen los siguientes pasos:

- Por un lado, se obtiene el área del perfil transversal mediante operaciones matemáticas.
- Por otro lado, se conectan las directrices a un comando *Length* para obtener las longitudes de cada línea. Este valor se aplanan mediante *Flatten* si se encuentran en diferentes sublistas antes de conectarlo a un *Mass Addition*, que suma todos los componentes de la lista.
- Finalmente, se multiplica la longitud total obtenida en el anterior paso por el área transversal para obtener el volumen.

A continuación, se muestra el código utilizado para la obtención de los volúmenes de vigas rectangulares.

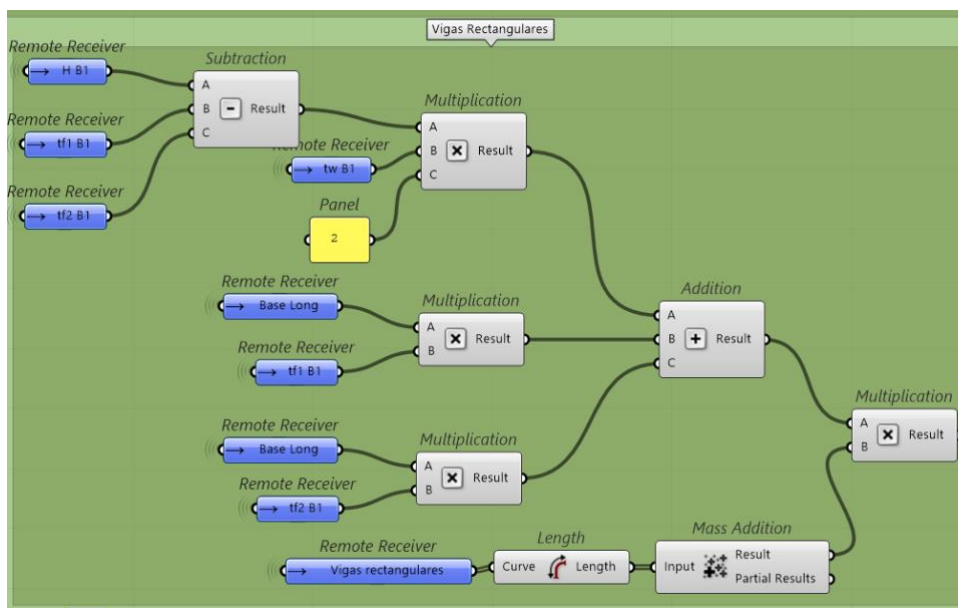


Figura 97. Código utilizado para la obtención de los volúmenes de vigas rectangulares

Tras obtener los volúmenes de las vigas rectangulares, se han obtenido los del arco. Al tratarse de una sección mixta, se ha obtenido por un lado el volumen de hormigón y por otro el de acero, mediante operaciones matemáticas básicas, tal y como muestra la Figura 98.

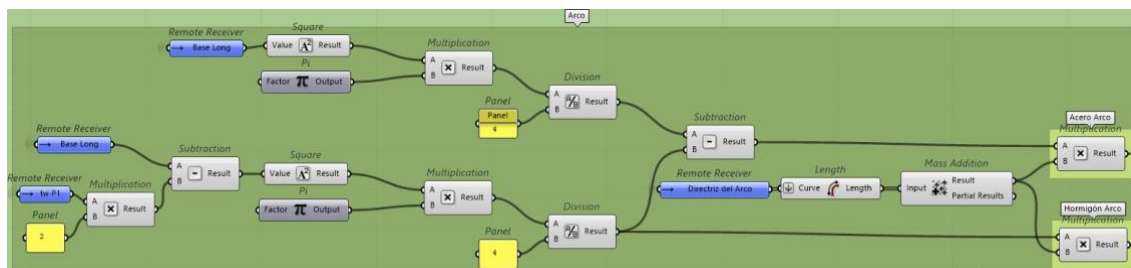


Figura 98. Código utilizado para la obtención de los volúmenes del arco

Posteriormente, se ha obtenido el volumen de cables, siguiendo los pasos básicos ya mencionados.

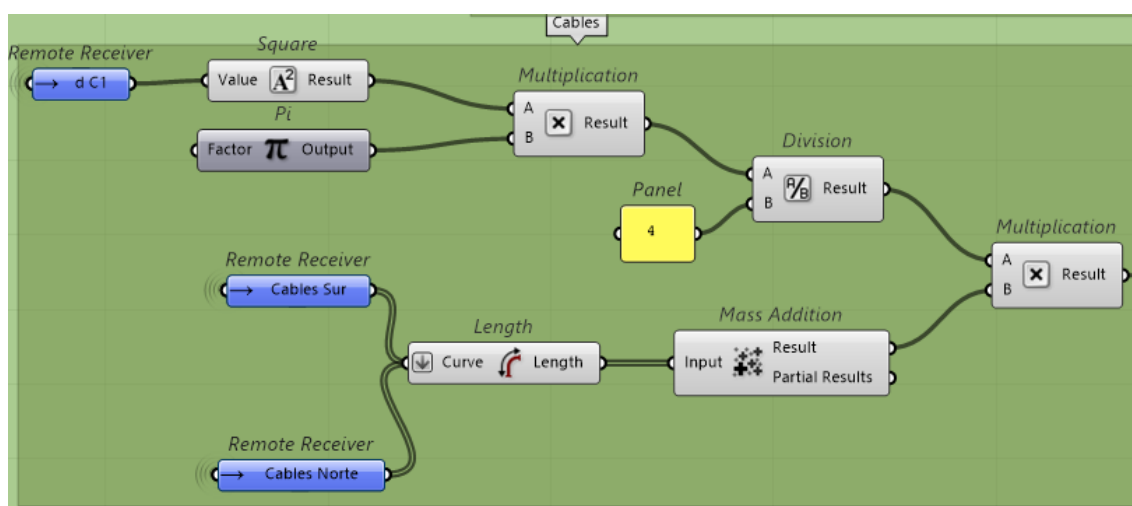


Figura 99. Código utilizado para la obtención del volumen de cables

Para el cálculo del volumen de losa, por otro lado, se han seguido los siguientes pasos:

Primero, se ha obtenido la longitud del primer elemento del código que contiene las directrices de las costillas. Este valor se ha conectado a un *Unit Y*, que se ha utilizado para mover las vigas longitudinales, una en positivo y otra con una expresión $-X$ para que se mueva hacia el otro lado.

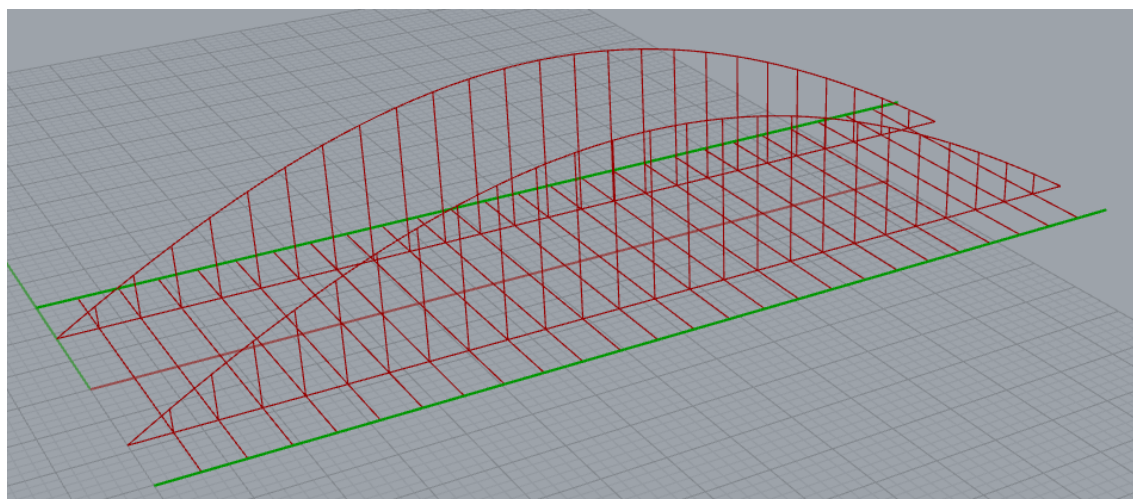


Figura 100. En verde, las vigas longitudinales en su nueva posición

Tras esto, se han obtenido los puntos iniciales y finales de cada línea, y se han creado unas líneas que unen los unos con los otros. De esta forma, se han obtenido cuatro líneas que conforman los límites de la superficie, por lo que se han conectado estas a un componente *Edge Surface* que ha creado las dimensiones de la losa. Este elemento se ha conectado a un comando *Area* para obtener el valor de su superficie en metros cuadrados.

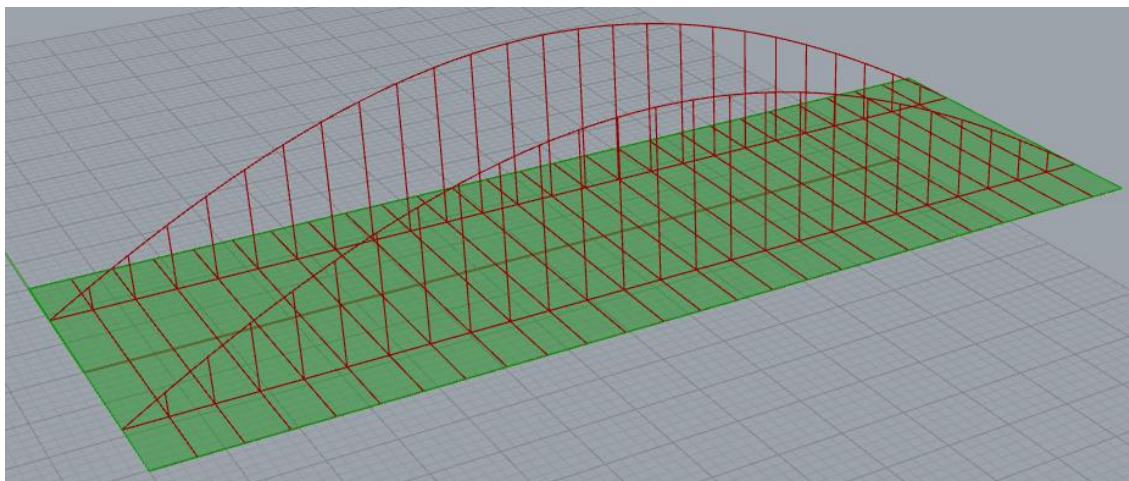


Figura 101. Superficie total de losa

Por último, se ha obtenido el volumen de hormigón en la losa, multiplicando el área de la losa anteriormente obtenida por el espesor de esta.

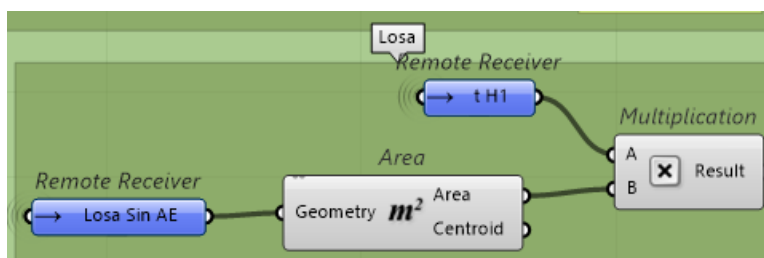


Figura 102. Código utilizado para la obtención del volumen de losa

En las siguientes figuras se muestra el código utilizado.

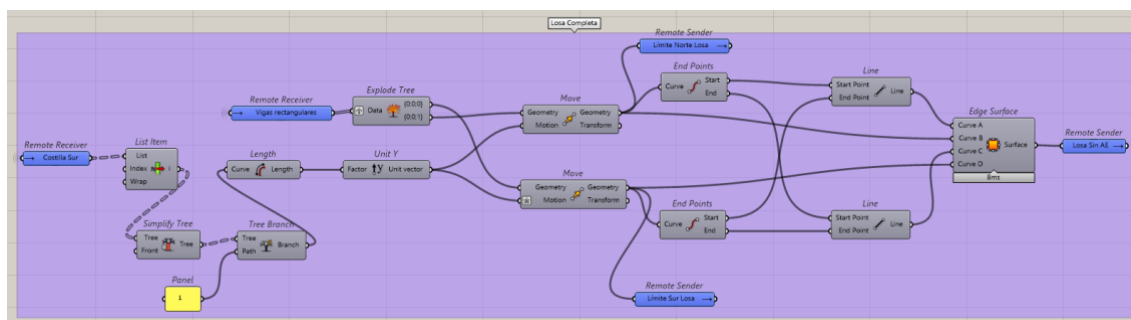


Figura 103. Código utilizado para la obtención de la superficie total de losa

Finalmente, se han sumado entre sí aquellos volúmenes que son del mismo material, para obtener el volumen total utilizado de cada material. Por ello, se han sumado entre sí el volumen de vigas rectangulares, transversales y acero del arco para obtener el total de S355; el hormigón del arco con la losa para obtener el volumen de HA-35, y los cables para el S460. Además, en el caso de los aceros, se ha multiplicado el volumen por su peso para hallar los kilogramos de acero necesarios.

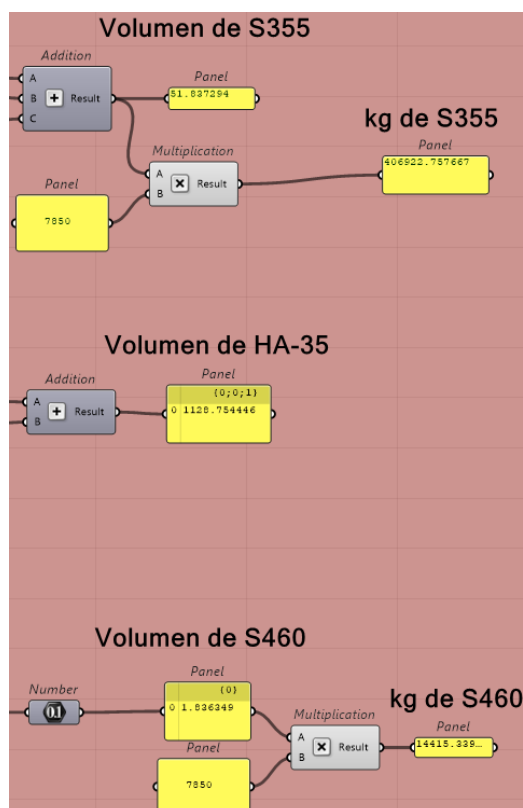


Figura 104. Código utilizado para la obtención de volúmenes. Los valores que aparecen se han obtenido con unas dimensiones de ejemplo

9 CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO PREVIO

9.1 PROGRAMA DE CÁLCULO UTILIZADO

Para el cálculo de los esfuerzos existentes en el puente de San Ignacio, se va a hacer uso de los programas Grasshopper y Midas Civil, junto con el programa Midas Civil NX. La razón de la elección de estos programas es tratar de realizar un modelo de manera similar a la nueva propuesta para que, de esta forma, la comparación de resultados resulte lo más adecuada posible.

9.2 GEOMETRÍA

El proceso de elaboración del modelo del caso de estudio previo se muestra a continuación.

9.2.1 SIMPLIFICACIONES REALIZADAS

Para la elaboración del modelo de cálculo, se han realizado algunas simplificaciones, que se listan a continuación:

- En primer lugar, se han seleccionado para el modelo de análisis exclusivamente las vigas longitudinales rectangulares, las vigas doble T longitudinales y las vigas transversales, además del arco y los cables.
- Además, se han considerado todas las secciones de canto constante a excepción de las costillas de las vigas transversales, en las que se ha mantenido el canto variable.
- Se han eliminado todos los aligeramientos que existen en las vigas transversales.
- Se ha considerado el arco con sección circular en toda su longitud.
- No se ha considerado el aumento de sección en los nudos.

9.2.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Se han considerado tanto las vigas longitudinales como el arco empotrados en sus extremos.

9.3 ACCIONES CONSIDERADAS

Las acciones consideradas en el caso de cálculo de la solución existente se obtienen de forma similar a las obtenidas en el caso de cálculo de la nueva propuesta. Es por ello que no se ha vuelto a detallar el mismo proceso y se listan a continuación las acciones consideradas:

9.3.1 PESO PROPIO

$$Q_{pp,hormigón} = (2 * 6,00 \text{ m} + 18,2 \text{ m}) * 0,30 \text{ m} * 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 226,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

El resto de los pesos propios se obtienen directamente del programa. El peso propio del hormigón se ha calculado aparte porque durante la fase metálica, es la estructura de acero la que debe soportar todo el peso del puente, ya que se considera que el hormigón aún no ha endurecido y, por tanto, no tiene capacidad estructural.

9.3.2 CARGA PERMANENTE

- Pavimento: 2 calzadas de 6,85 metros cada una, con un espesor de 8 cm.

$$Q_p = 2 * 6,85 \text{ m} * 0,08 \text{ m} * 23,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 25,2 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Bordillo separador calzada – acera: dos bordillos de 0,15 por 0,32 metros.

$$Q_b = 2 * 0,15 \text{ m} * 0,32 \text{ m} * 25,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 2,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Barandilla:

$$Q_l = 1,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 2 \text{ barandillas} = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

- Acera: una acera de 6,00 metros a un lado y otra de 8,50 metros al otro.

$$Q_a = (6,00 + 8,50) \text{ m} * 3,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 43,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Con todo esto, el valor de la carga permanente total es:

$$Q_P = Q_p + Q_l + Q_b + Q_a = 25,2 + 2,4 + 2,0 + 43,5 = 73,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

La carga permanente se aplica de forma repartida a lo largo de toda la luz del puente, en las vigas longitudinales.

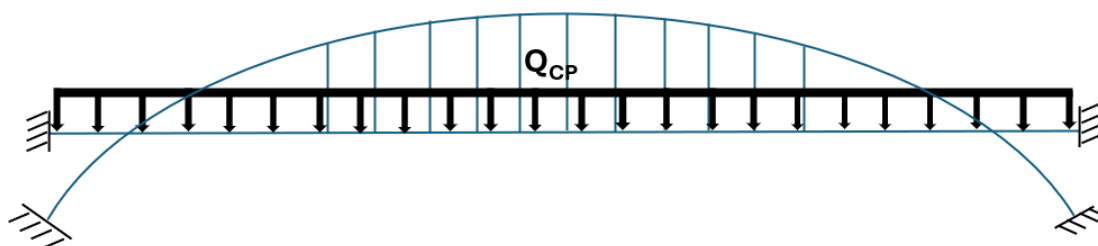


Figura 105. Aplicación de la carga permanente en la solución existente

Esta fase se calcula para un tiempo final t_{inf} , en el que la relación entre módulos de elasticidad del acero y el hormigón es igual a 21. Por lo tanto, los cálculos se obtienen con la estructura de acero completa y el ancho eficaz de la losa de hormigón para el tiempo final.

9.3.3 SOBRECARGA DE USO

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos para cada una de las cargas:

Tabla 2. Valor de las sobrecargas debidas al tráfico de vehículos en la propuesta existente

	Veh. Pesado [kN]	Sobrecarga uniforme [kN/m]
Carril Virtual 1	$2 * 300 = 600$	$9 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 27,0$
Carril Virtual 2	$2 * 200 = 400$	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Carril Virtual 3	$2 * 100 = 200$	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Otros Carriles Virt.	0	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 3 \text{ m} = 7,5$
Área remanente (q_{re})	0	$2,5 \text{ kN} / \text{m}^2 * 1,39 \text{ m} = 3,5$

Total (para el análisis)	1200	53,0
--------------------------	------	------

Además de esta carga debida al tráfico, se debe añadir una sobrecarga en las zonas peatonales. En este caso, en el puente existen dos aceras y una zona habilitada para carril bici. Para ello, se ha utilizado un valor de $5 \text{ kN} / \text{m}^2$, de acuerdo con el Eurocódigo 1 [21]. Por lo tanto, el valor de la sobrecarga repartida en las aceras es el siguiente:

$$Q_{su,acera} = 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * (6 + 8,5) \text{ m} = 72,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Finalmente, el valor de la sobrecarga repartida total resulta en:

$$Q_{su} = Q_{su,tráfico} + Q_{su,acera} = 53,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 72,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 125,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

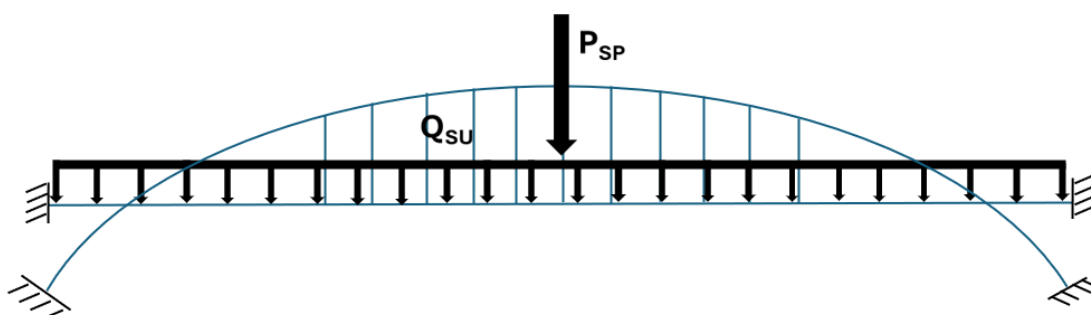


Figura 106. Aplicación de la sobrecarga de uso en la solución existente

Como se ha hecho con el modelo de la nueva propuesta, Midas Civil permite aplicar esta sobrecarga de uso como una carga móvil, por lo que se aplicará de esta manera.

Esta fase se calcula para un tiempo inicial t_0 , en el que la relación entre módulos de elasticidad del acero y el hormigón es igual a 7. Por ello, los cálculos se obtienen con la estructura de acero completa y el ancho eficaz de la losa de hormigón para el tiempo inicial.

9.4 ELABORACIÓN DEL MODELO

Para la elaboración del modelo de cálculo, se ha tratado de seguir un proceso lo más similar posible al realizado para la construcción de la nueva propuesta para el puente de San Ignacio.

9.4.1 GENERACIÓN DE LAS VIGAS LONGITUDINALES RECTANGULARES

Para la elaboración de las vigas longitudinales, se ha seguido el mismo proceso que en el apartado 8.3.1.



Figura 107. Vigas longitudinales rectangulares generadas

9.4.2 GENERACIÓN DE LAS VIGAS LONGITUDINALES DOBLE T

Además de estas vigas rectangulares, el puente existente tiene también tres vigas longitudinales de sección doble T en la parte central de la sección transversal. Estas vigas se han suprimido de la nueva propuesta, por lo que el proceso seguido para su construcción se describe a continuación.

Partiendo el segmento ya orientado, se ha dividido este en 4 partes iguales con objeto de encontrar los puntos por los que pasan las tres vigas doble T longitudinales, que se encuentran separadas 4,3 metros entre sí.



Figura 108. Puntos obtenidos al dividir el segmento transversal en 4 partes iguales

Con estos puntos encontrados, ya solo queda copiar la línea longitudinal 4 veces, de forma que pase por las rectas paralelas que unen los puntos encontrados de forma longitudinal.

Se han seleccionado en primer lugar los puntos de la lista que corresponden a líneas centrales, es decir, los valores 1,2 y 3 mediante el comando *List Item*. Una vez seleccionados, se ha orientado el segmento longitudinal por los tres puntos para la obtención de las directrices de las tres vigas doble T longitudinales.

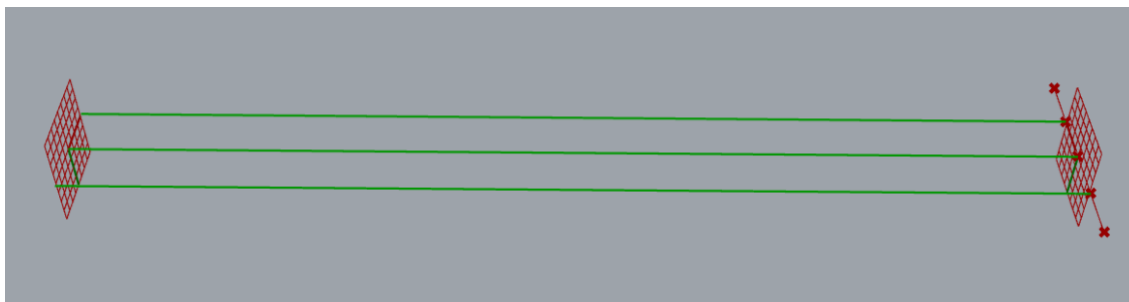


Figura 109. Directrices de las vigas doble T longitudinales

Por último, se han dividido las líneas en el número de vigas transversales más 1, tal como se ha explicado anteriormente, para obtener los puntos de corte de las vigas transversales con estas.

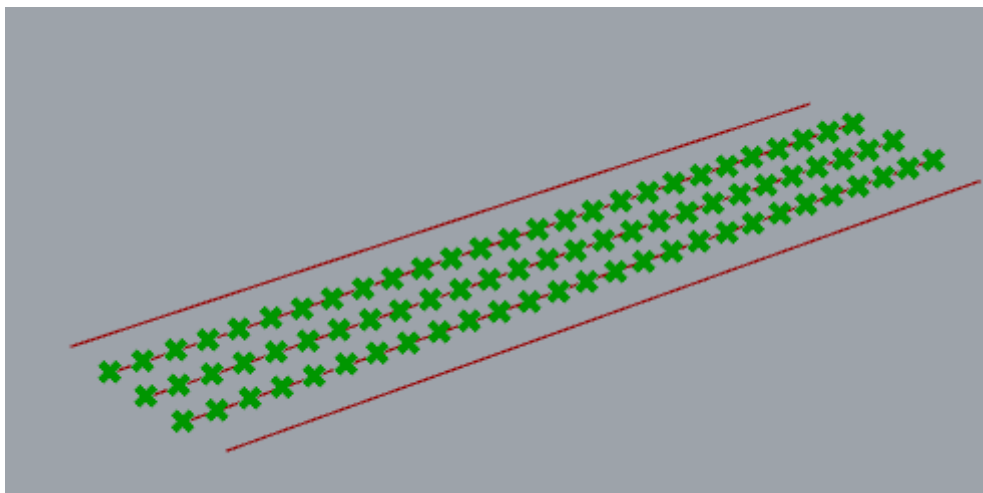


Figura 110. División de vigas doble T longitudinales

Finalmente, se ocultan todos los pasos intermedios para dejar visibles exclusivamente las directrices que forman parte del modelo a analizar.



Figura 111. Directrices de las vigas longitudinales creadas

Se detalla en la Figura 112 y la Figura 113 la construcción de estas directrices.

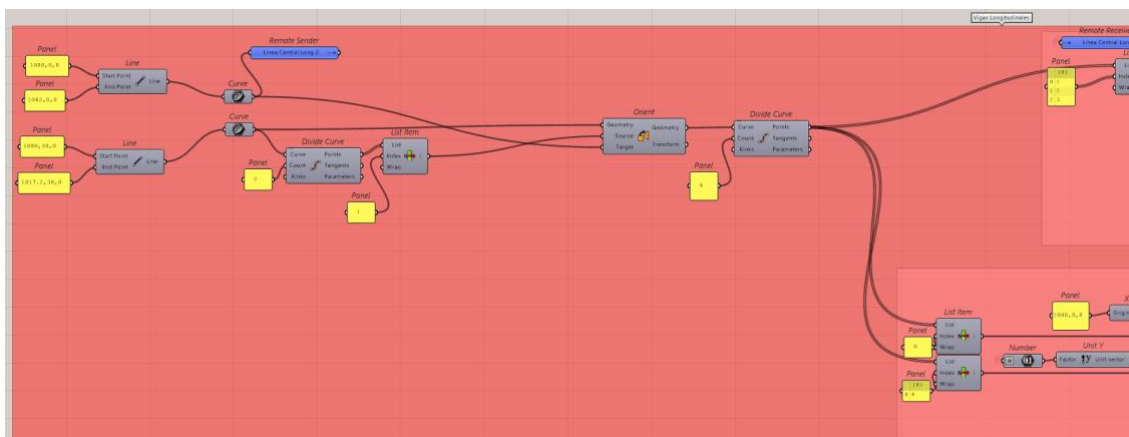


Figura 112. Proceso constructivo de las directrices de las vigas longitudinales (1 de 2)

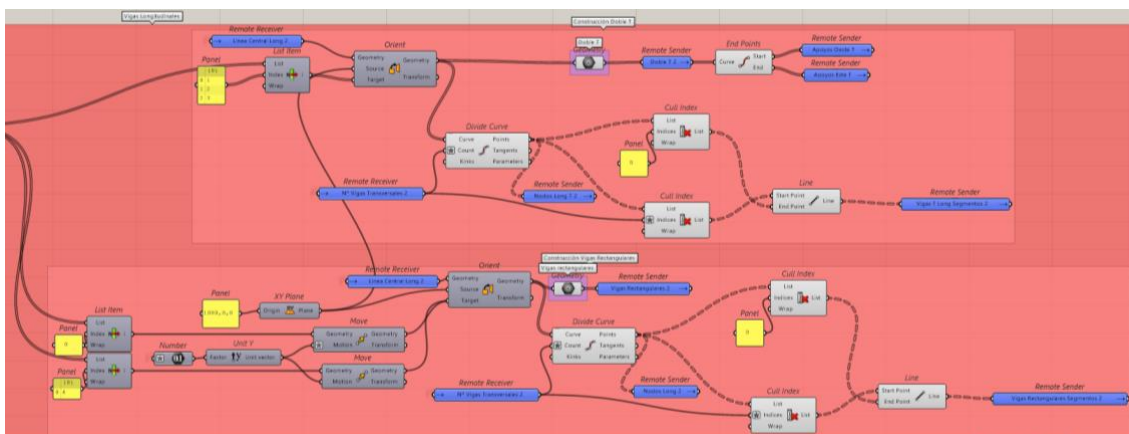


Figura 113. Proceso constructivo de las directrices de las vigas longitudinales (2 de 2)

9.4.3 GENERACIÓN DE LA DIRECTRIZ DEL ARCO

A continuación, se ha procedido a la generación de la directriz del arco. El código utilizado ha sido el mismo que en la nueva propuesta con dos diferencias. La primera es que, en el caso del puente existente, la flecha total del arco es de ocho metros, por lo que así se ha fijado en el *Number Slider* que indica su valor.

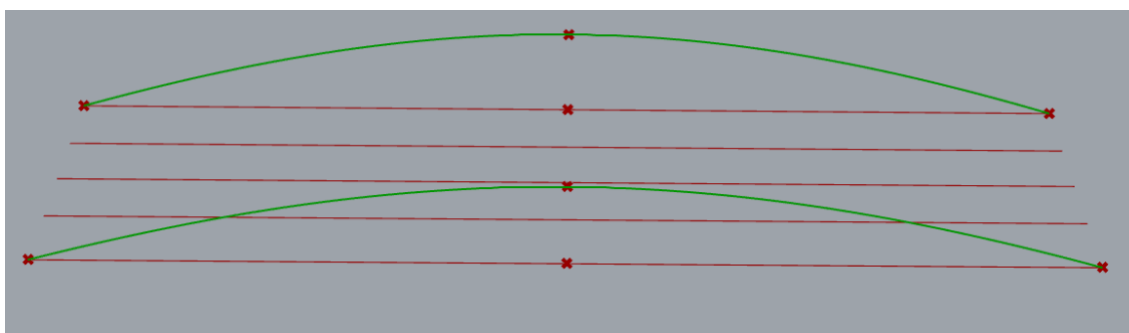


Figura 114. En verde, directrices iniciales de los arcos

La segunda diferencia es que se trata de un arco intermedio, por lo que hay que rebajar su posición con respecto del tablero. Para ello, se ha movido en sentido vertical 3,00 metros mediante un comando *Move*.

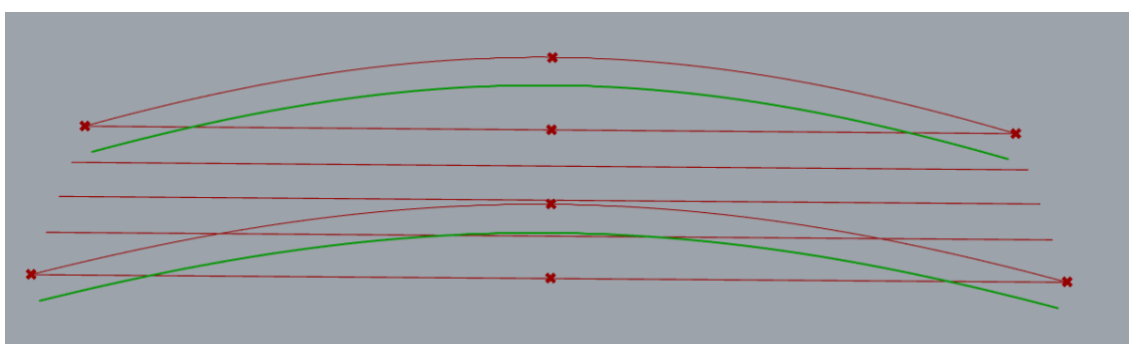


Figura 115. En verde, nueva posición de las directrices de los arcos

Cabe destacar que ha sido necesario eliminar cuatro de los nodos que conformaban los elementos del arco porque se encontraban demasiado cerca de algunos de los nodos de la directriz de las vigas rectangulares y se producía un error al importarlos a Midas.

Por último, se han ocultado todos los pasos intermedios hasta la obtención de los elementos en los que se han dividido las directrices.

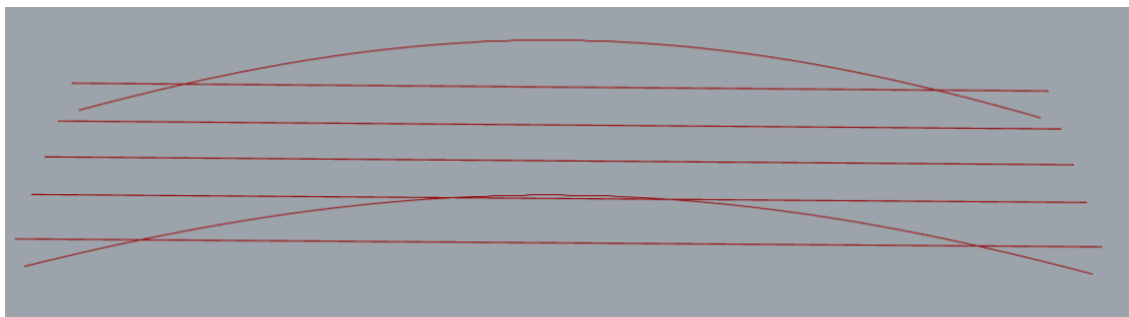


Figura 116. Modelo del puente existente actualizado con las directrices los elementos de los arcos

En la Figura 117 se muestra el código utilizado para la generación de las directrices de los arcos.

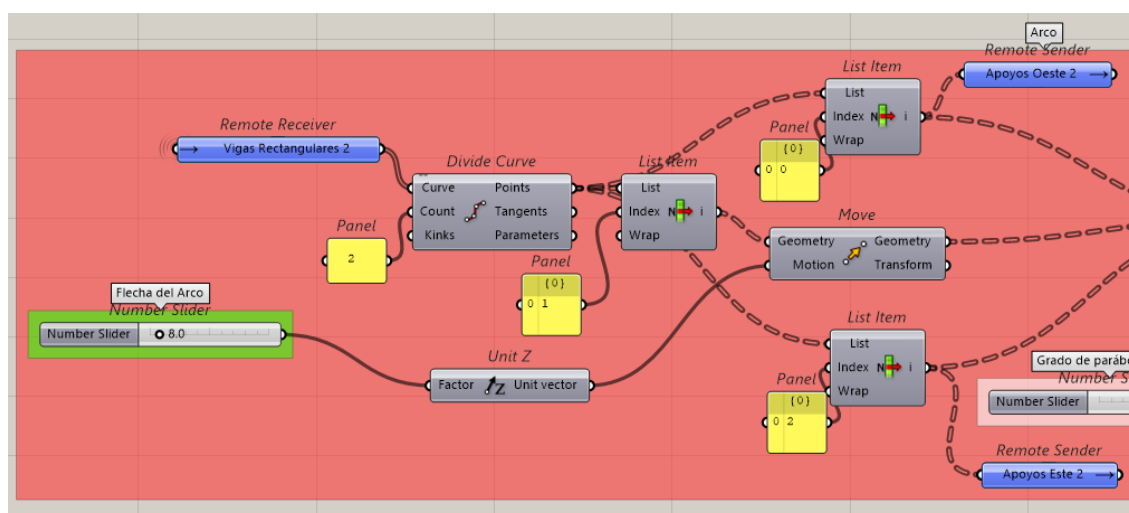


Figura 117. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (1 de 4)

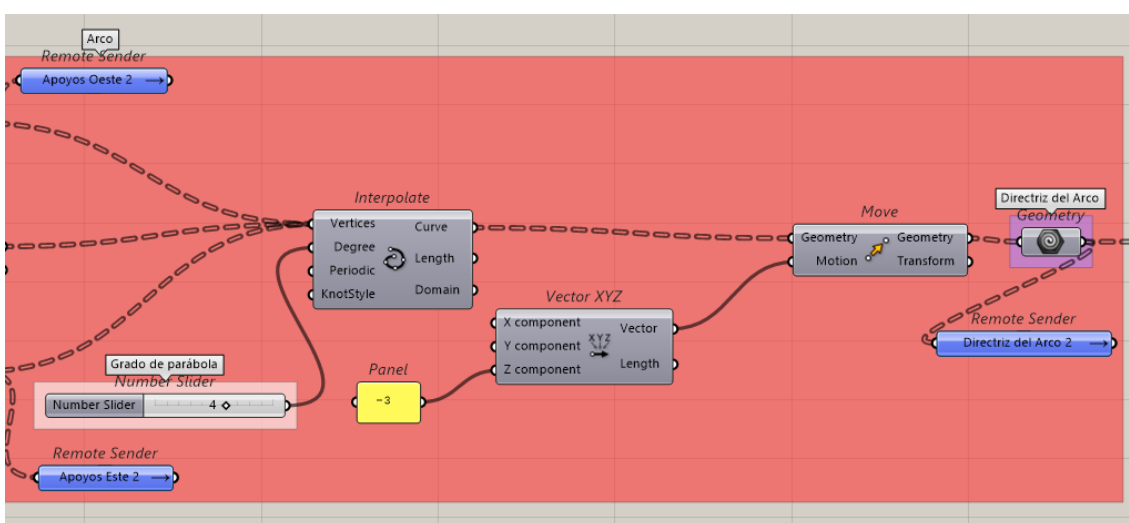


Figura 118. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (2 de 4)

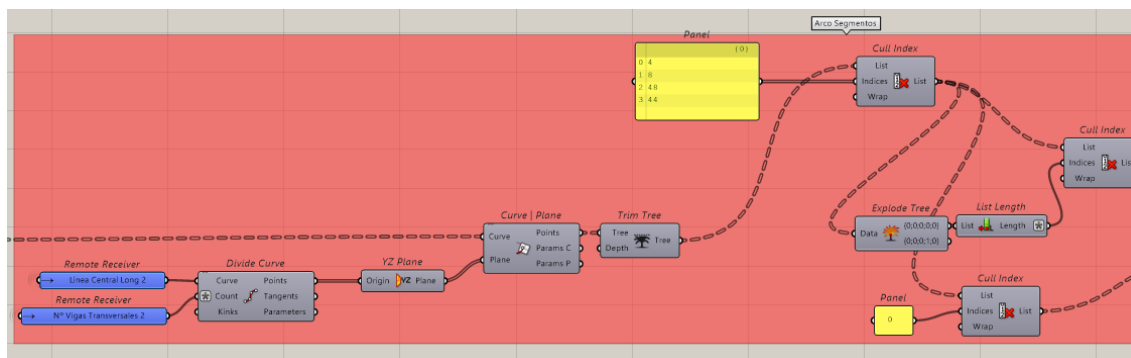


Figura 119. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (3 de 4)

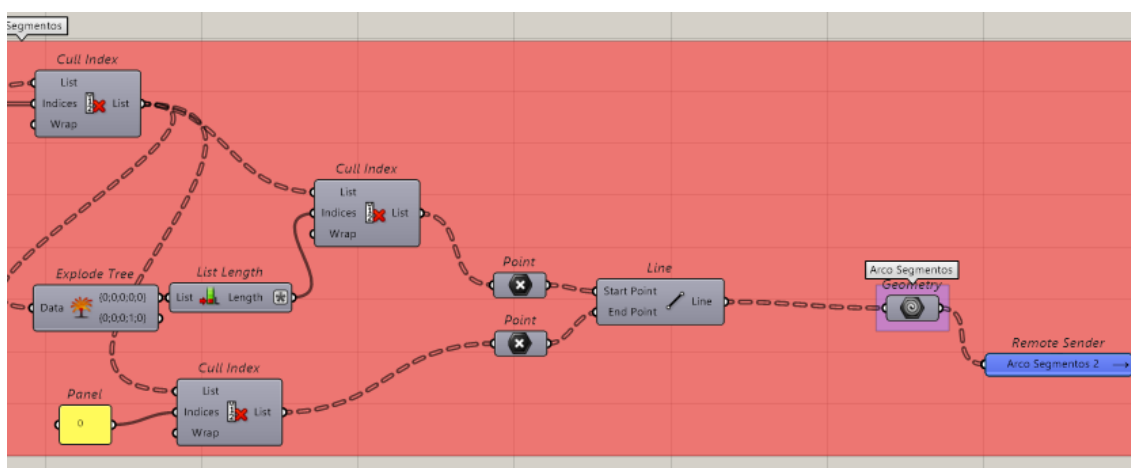


Figura 120. Código utilizado para la generación de las directrices de los arcos (4 de 4)

9.4.4 GENERACIÓN DE LAS VIGAS TRANSVERSALES

Para la generación de las vigas transversales, el proceso seguido ha sido idéntico al utilizado en la nueva propuesta, por lo que no se va a explicar, de nuevo, paso a paso. Sin embargo, estas vigas se han tenido que dividir en diferentes elementos para que se conecten correctamente con las vigas doble T longitudinales, por lo que deben ser divididas en cuatro líneas diferentes.

Para ello, se ha realizado el corte de las líneas transversales con los planos XZ que pasan por las líneas que indican la directriz de las vigas longitudinales doble T. Posteriormente, se han unido estos puntos entre sí para generar las nuevas directrices de la zona central de las vigas transversales.

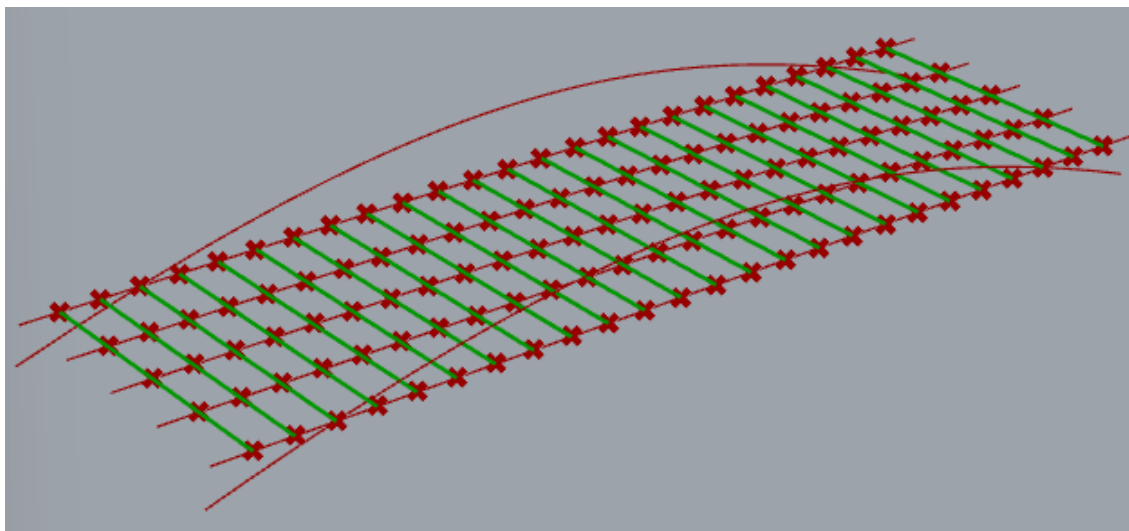


Figura 121. En verde, centro de las vigas transversales, dividido en cuatro elementos por cada viga

El resto del proceso generativo de las vigas transversales es igual al utilizado en el modelo de arco superior.

La Figura 122 muestra el modelo actualizado con las vigas transversales. La Figura 123 y la Figura 125 muestran el código utilizado para la obtención de estas vigas.

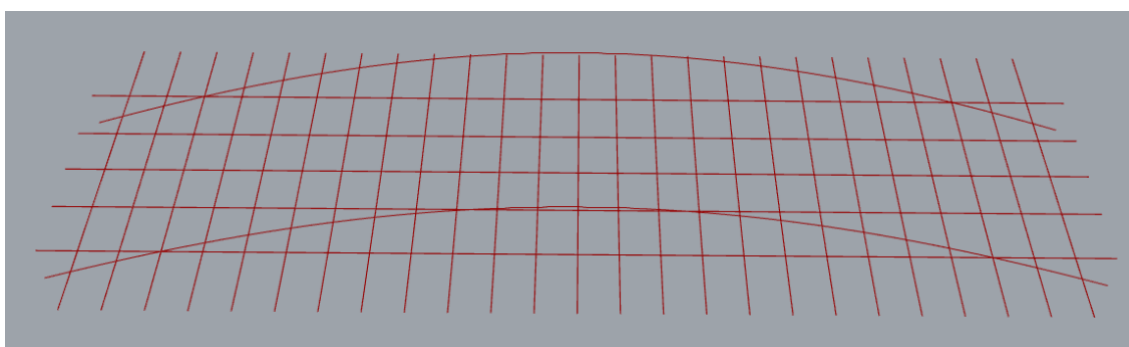


Figura 122. Modelo del puente existente, actualizado con las directrices de las vigas transversales

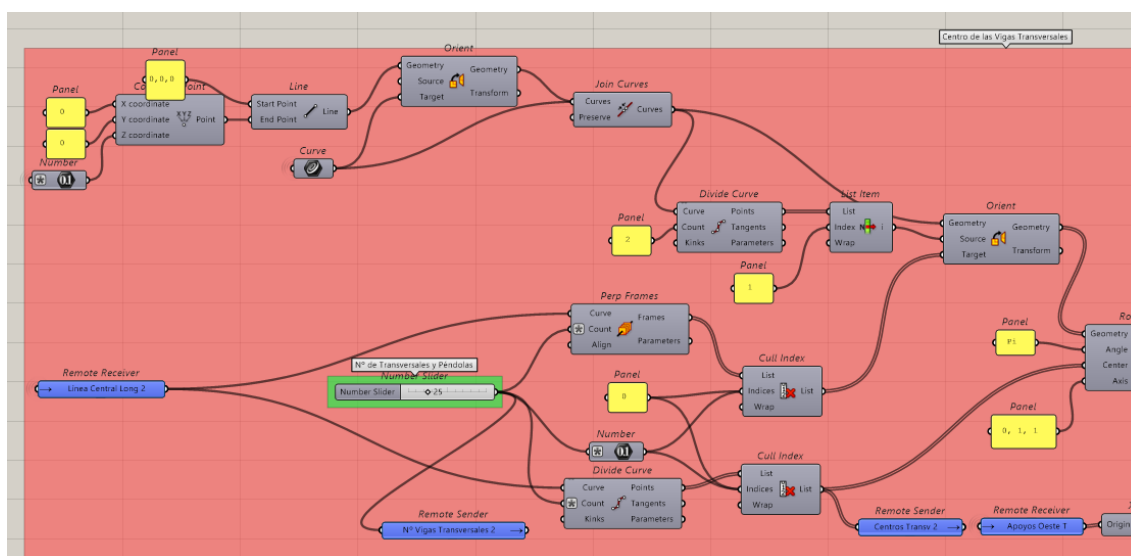


Figura 123. Código utilizado para la generación del centro de las vigas transversales (1 de 2)

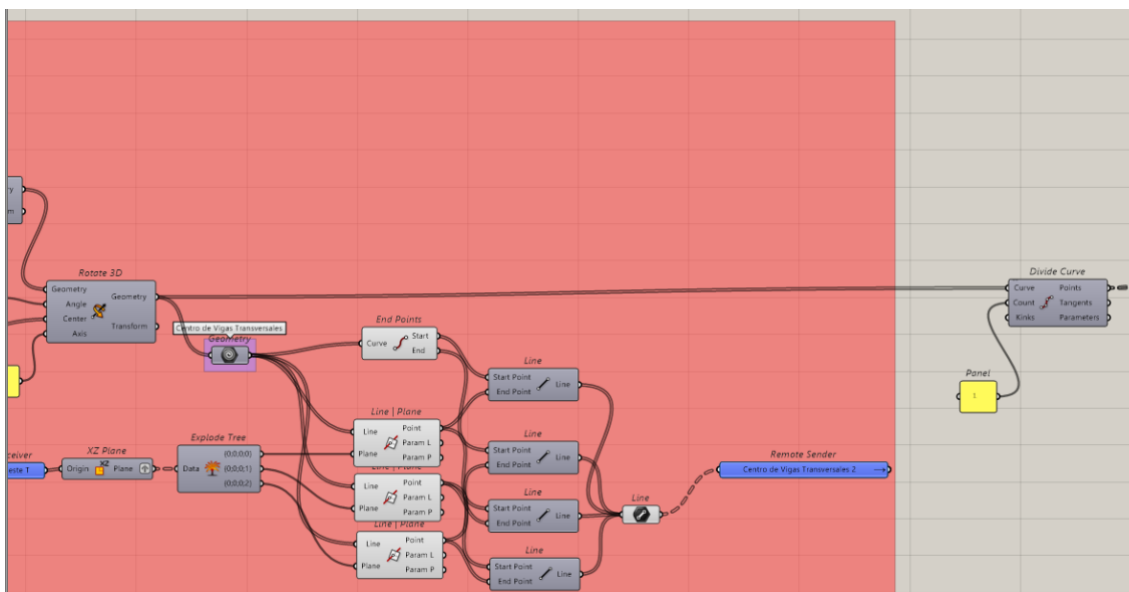


Figura 124. Código utilizado para la generación del centro de las vigas transversales (2 de 2)

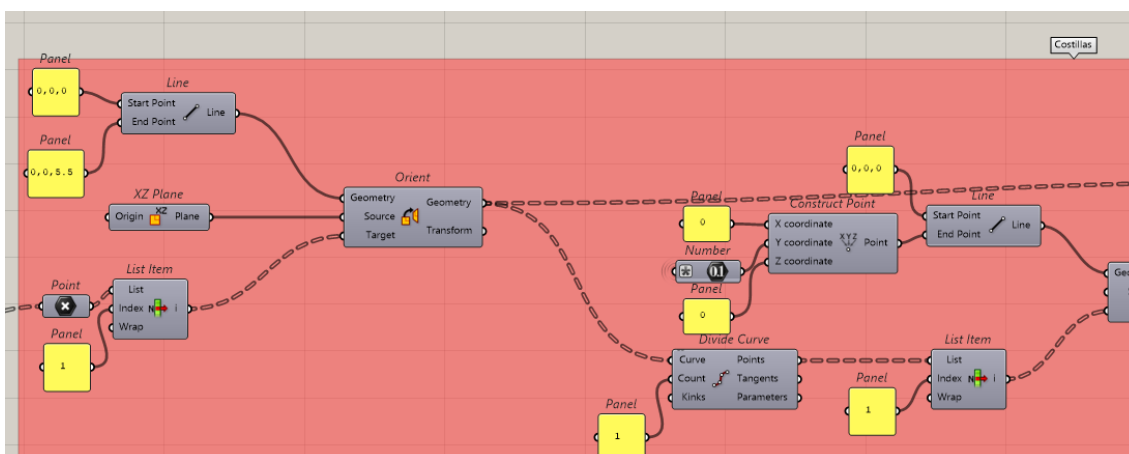


Figura 125. Código utilizado para la generación de las costillas de las vigas transversales (1 de 2)

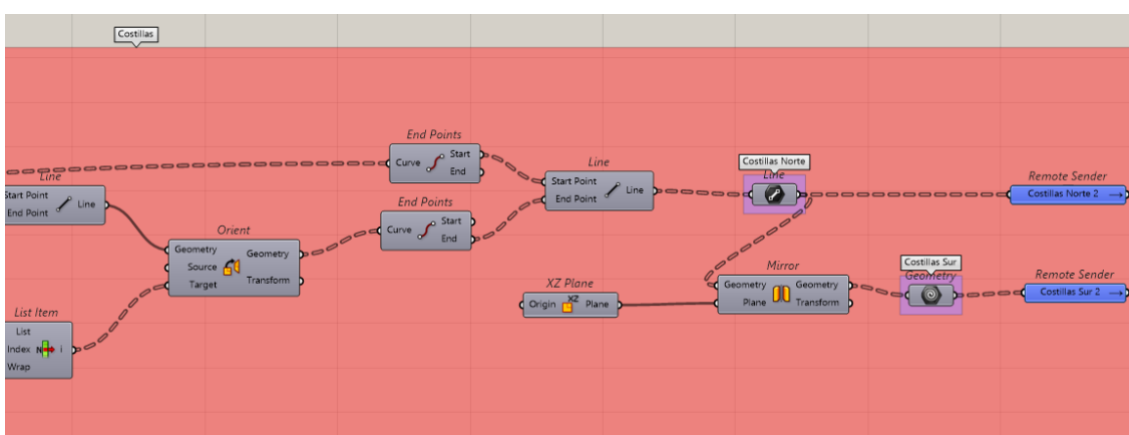


Figura 126. Código utilizado para la generación de las costillas de las vigas transversales (2 de 2)

9.4.5 GENERACIÓN DE LOS CABLES

Por último, se ha procedido a la generación de los cables del puente. Este es el código que más difiere del realizado para la nueva propuesta, puesto que el puente existente tiene

menos cables a cada lado en la parte central de la luz, situados a la altura de las vigas transversales centrales.

Partiendo del comando que contiene la lista de puntos de corte entre las vigas transversales y las rectangulares longitudinales, se ha procedido a invertir dicha matriz mediante el comando *Flip Matrix*. Esto ha hecho que los puntos tengan como primer término en la lista su posición longitudinal, y como segundo término la viga longitudinal rectangular en la que se encuentran.

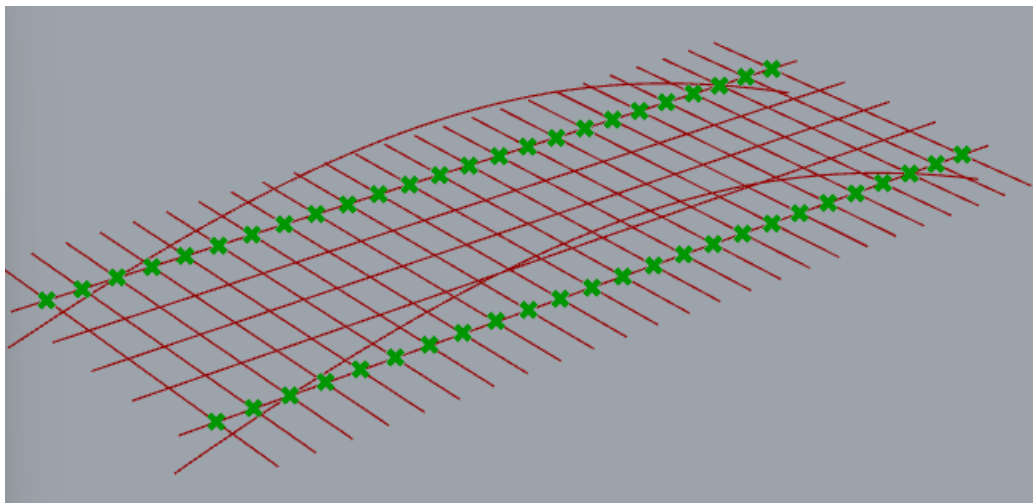


Figura 127. En verde, conjunto de puntos iniciales para la obtención de los puntos iniciales de los cables

Una vez realizado esto, se han eliminado todos los puntos que no corresponden a los cables centrales de la lista de puntos.

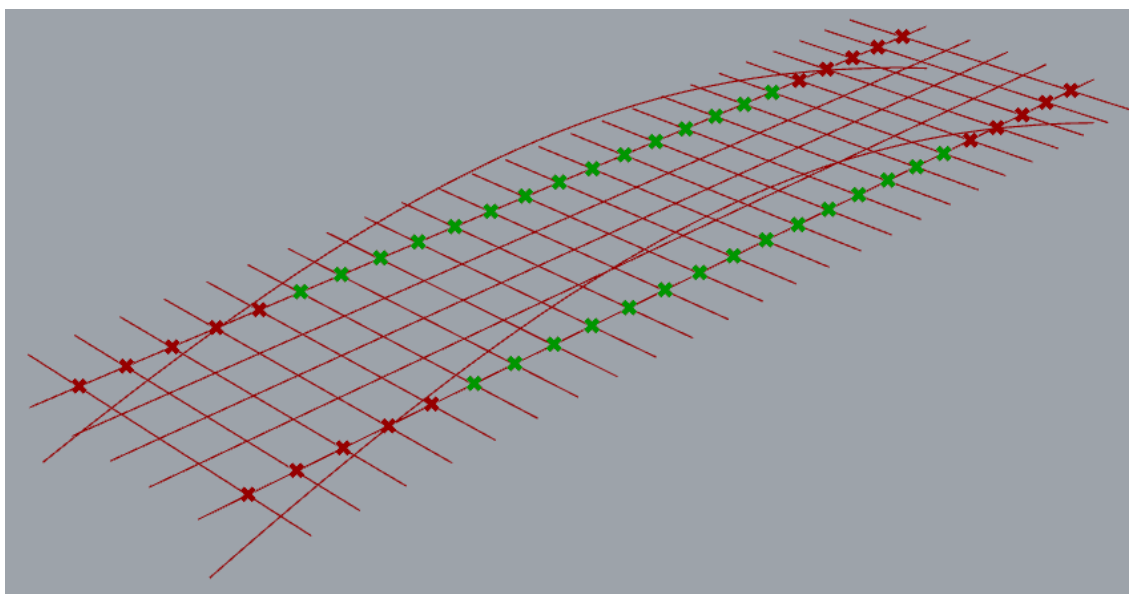


Figura 128. En verde, puntos iniciales de los cables

Posteriormente, se han obtenido los puntos de corte de los planos YZ que pasan por estos puntos con la directriz del arco mediante un *Curve / Plane*.

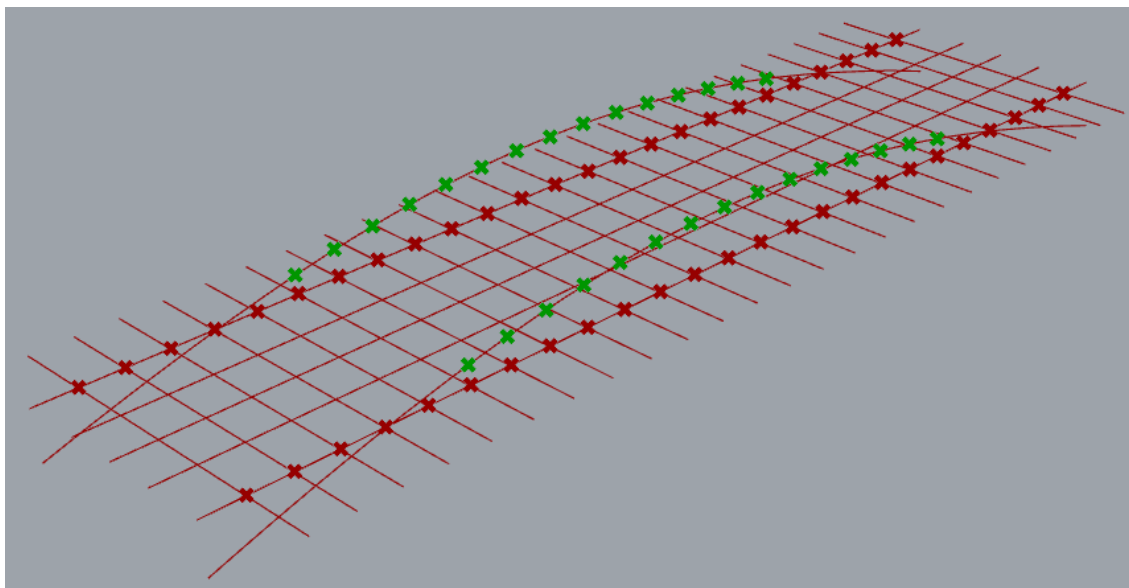


Figura 129. En verde, puntos finales de los cables

Tras esto, se ha realizado un *Explode Tree* para obtener los puntos de uno y otro lado en ambas listas, y se han juntado mediante un comando *Line* para obtener las directrices de los cables.

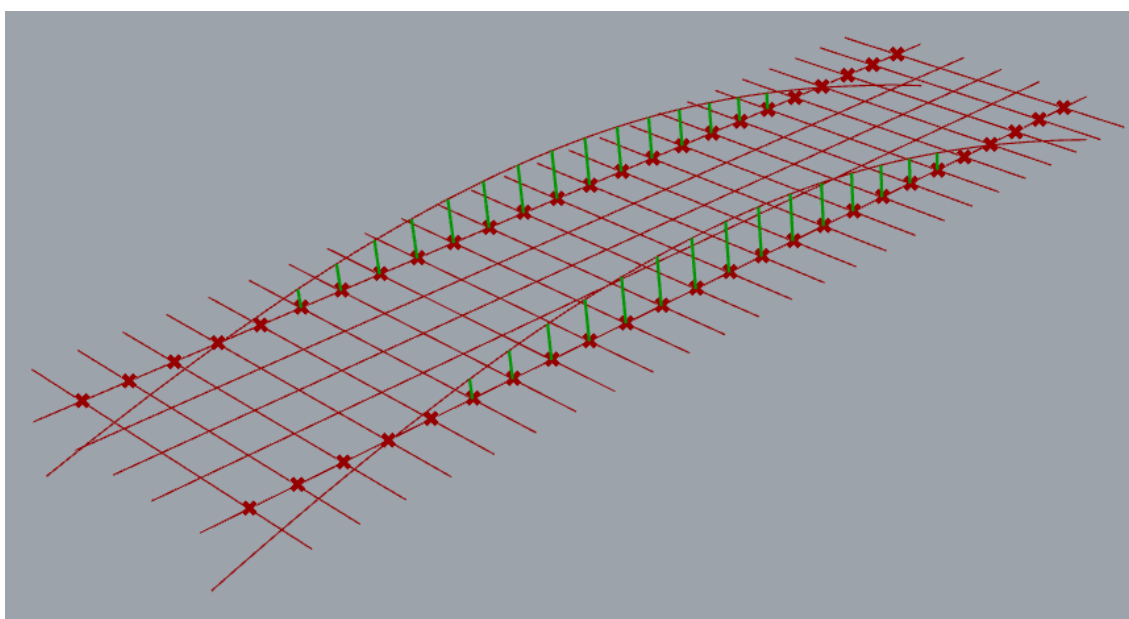


Figura 130. En verde, directrices de los cables del puente actual

Finalmente, se han ocultado todas aquellas geometrías que se han utilizado como pasos intermedios para la obtención de las directrices.

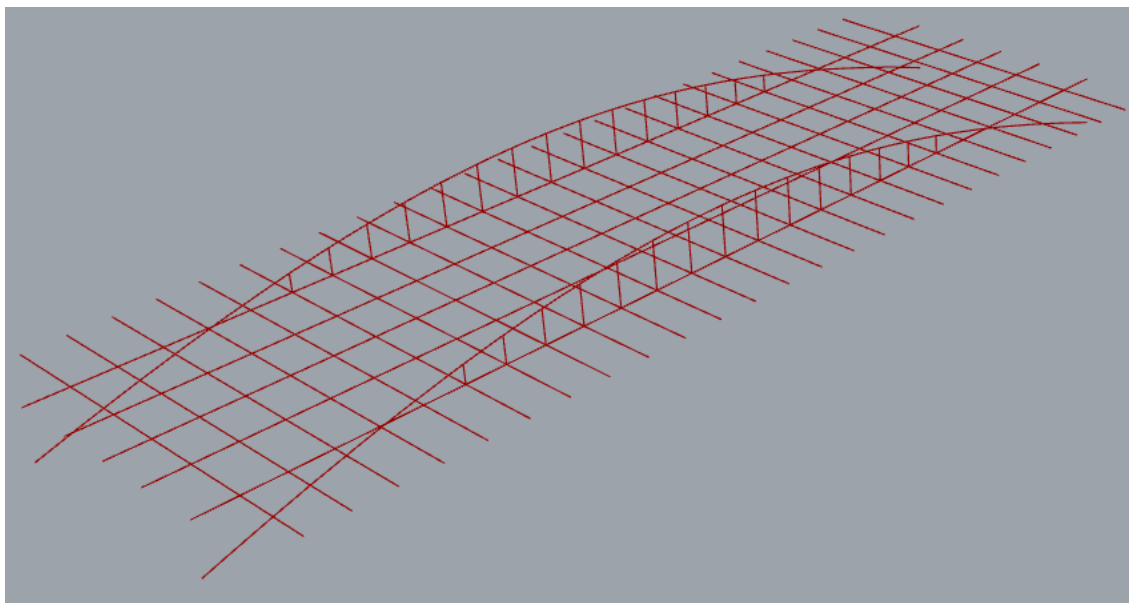


Figura 131. Modelo actualizado del puente con las directrices de los cables

La Figura 132 muestra el código utilizado para la generación de las directrices de los cables.

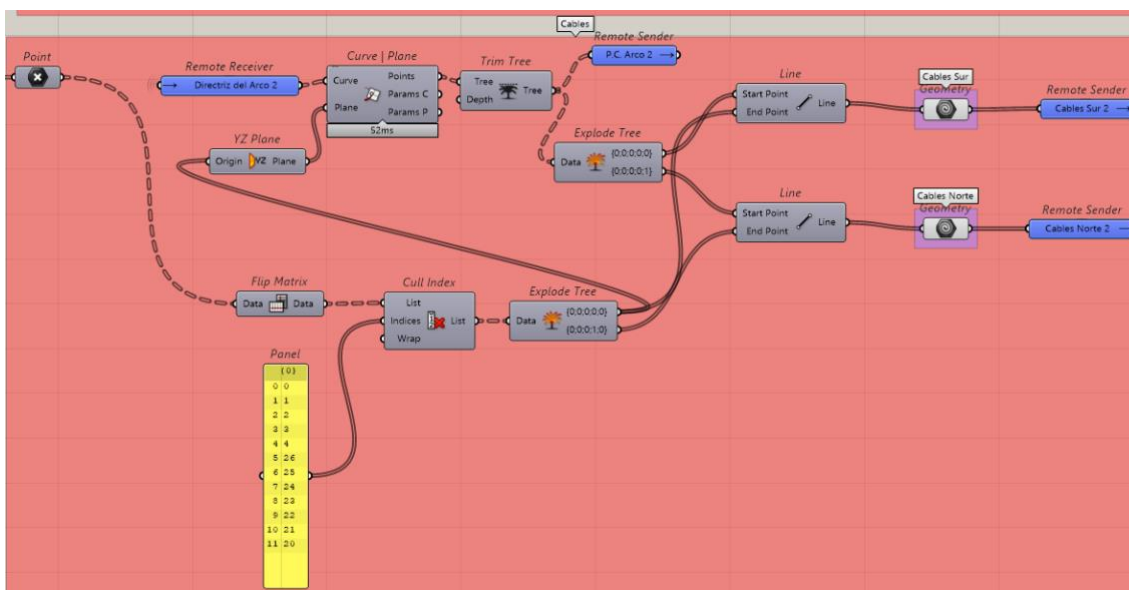


Figura 132. Código utilizado para la generación de las directrices de los cables

9.4.6 GENERACIÓN DE LAS SECCIONES

Las secciones se han generado y aplicado de manera idéntica al caso del puente con arco superior, por lo que no se va a detallar, de nuevo, el proceso generativo. Se adjuntan a continuación unas figuras que muestran este proceso.

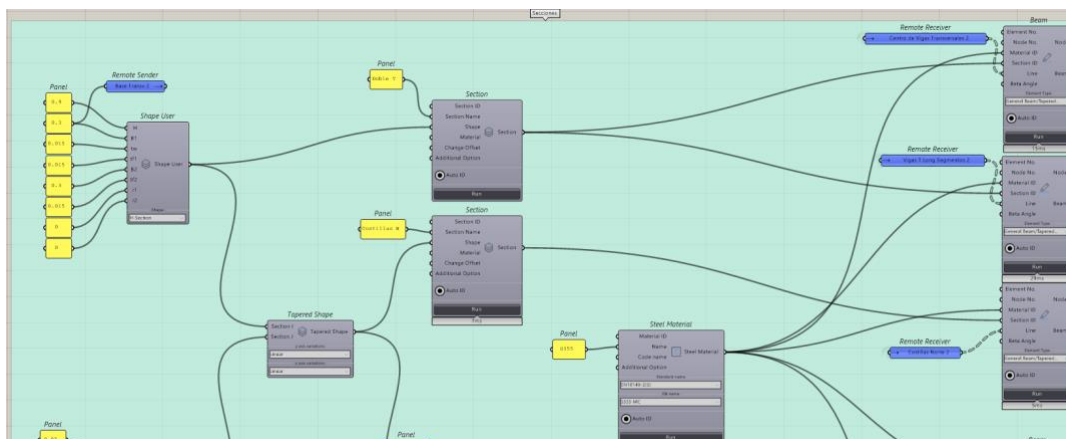


Figura 133. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (1 de 3)

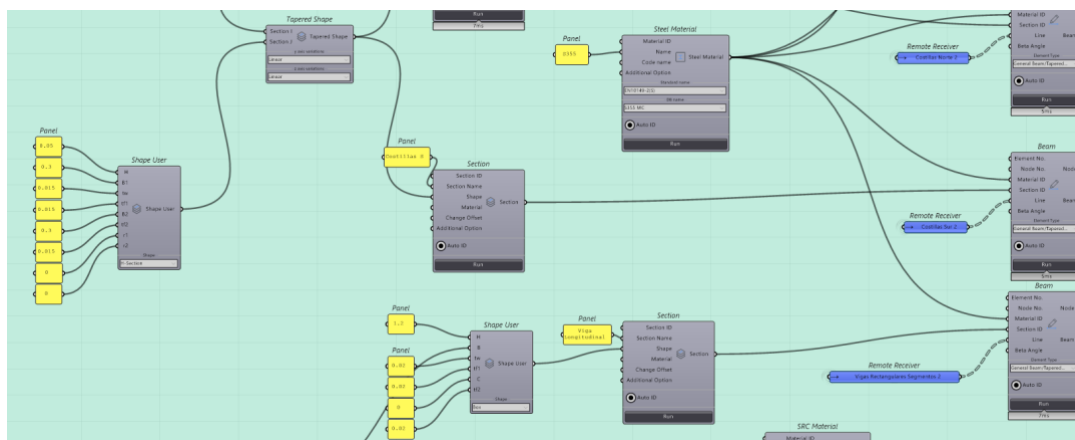


Figura 134. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (2 de 3)

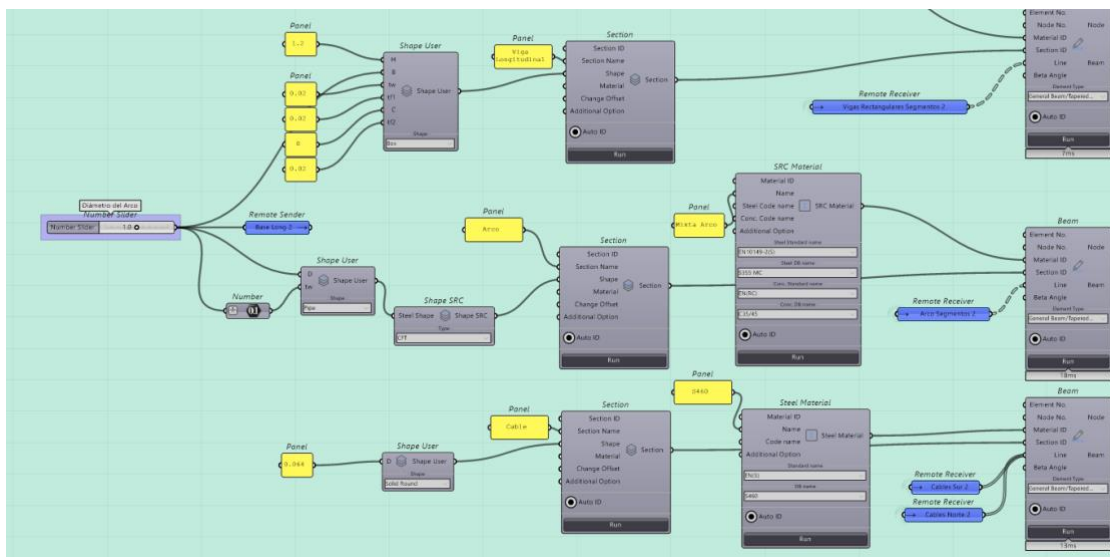


Figura 135. Generación de secciones para el caso de arco con tablero intermedio (3 de 3)

9.4.7 GENERACIÓN DE LOS APOYOS

Para generar los apoyos, se han obtenido los puntos finales de las vigas longitudinales y de las directrices de los arcos, y se han realizado las siguientes restricciones en ellos:

- En los apoyos más meridionales de las vigas longitudinales (es decir, en los de la viga rectangular sur), se ha restringido el movimiento en Y, Z.
- En el resto de los apoyos de las vigas longitudinales se ha restringido el movimiento en Z.
- En los apoyos del arco sur, se ha restringido el movimiento en X, Y, Z.
- En los apoyos del arco norte se ha restringido el movimiento en X, Z.

A continuación, se muestra el proceso generativo de los apoyos.

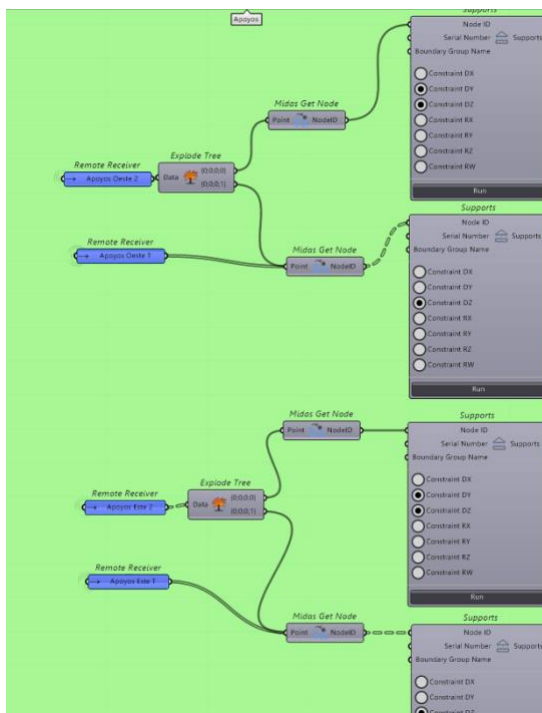


Figura 136. Proceso generativo de los apoyos del caso de tablero intermedio (1 de 2)

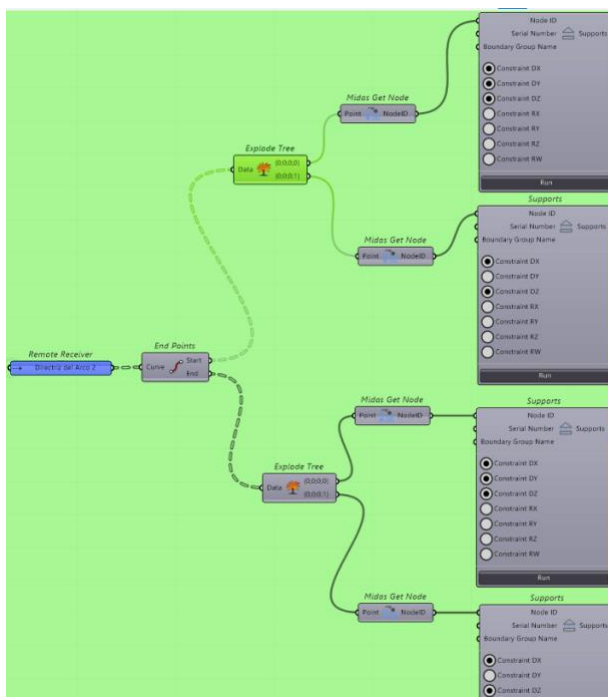


Figura 137. Proceso generativo de los apoyos del caso de tablero intermedio (2 de 2)

9.4.8 GENERACIÓN DEL ANCHO EFICAZ

La generación del ancho eficaz se ha realizado de manera similar a la realizada en el caso del puente de tablero inferior, con la única diferencia de la adición del ancho eficaz correspondiente al hormigón que se encuentra sobre las vigas longitudinales doble T, que se ha obtenido de la misma forma que el de las vigas rectangulares. Debido a esto, no se va a volver a explicar en detalle el proceso de obtención de este, y se mostrará exclusivamente el código utilizado en las siguientes figuras.

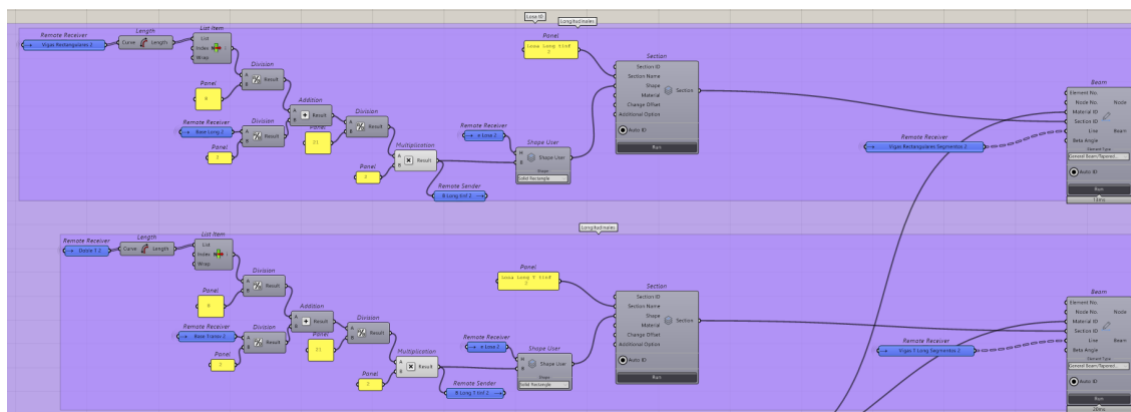


Figura 138. Código para la generación del ancho eficaz (1 de 2)

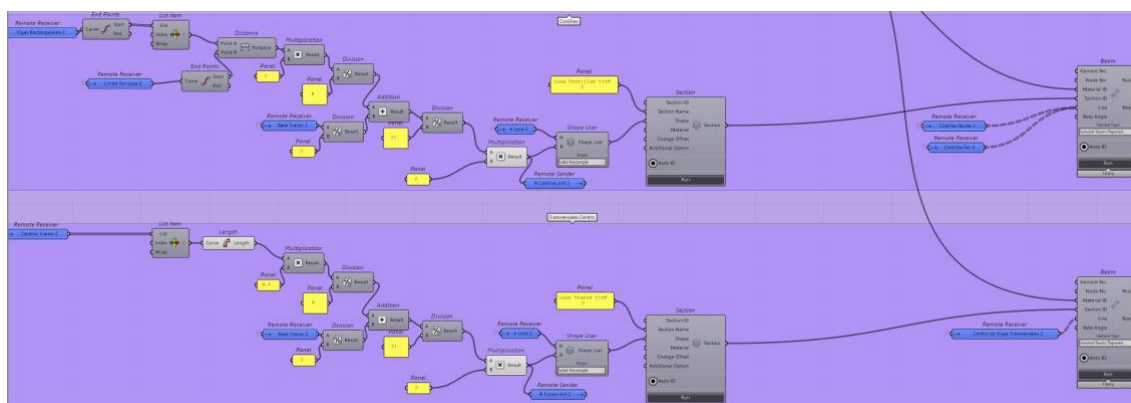


Figura 139. Código para la generación del ancho eficaz (2 de 2)

9.4.9 CÁLCULO DE VOLÚMENES

La obtención de los volúmenes se ha hecho de igual manera a la realizada en la solución de arco superior, por lo que no se va a volver a explicar en detalle. La única diferencia es que en esta se han añadido también los perfiles longitudinales doble T a su volumen correspondiente (S355). Se muestra en las siguientes figuras el código utilizado.

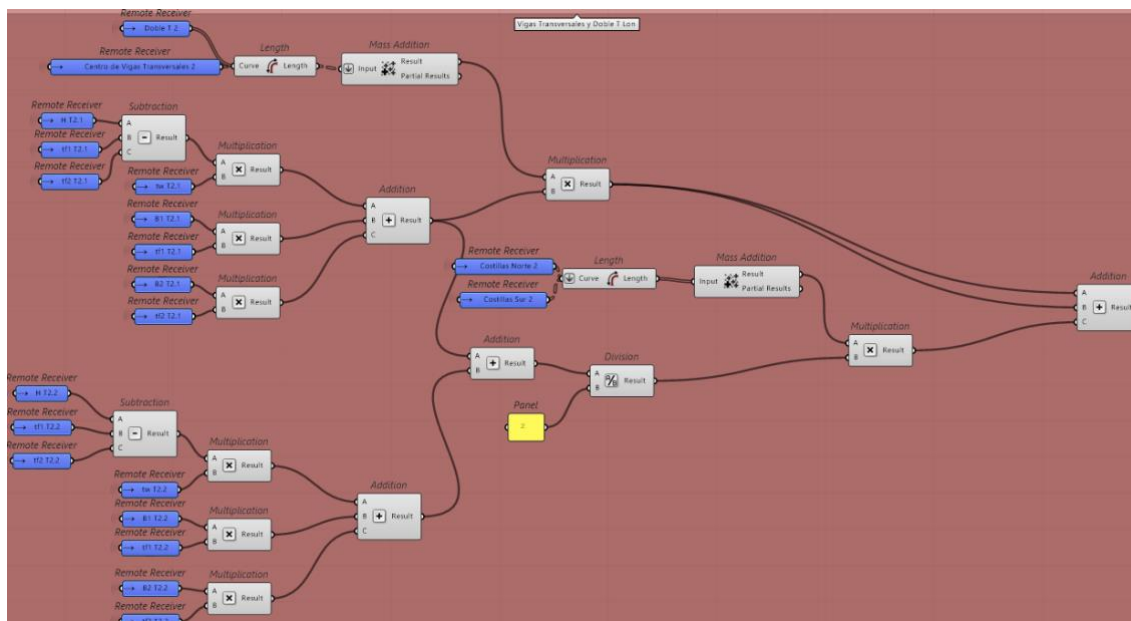


Figura 140. Código utilizado para la obtención del volumen de doble T

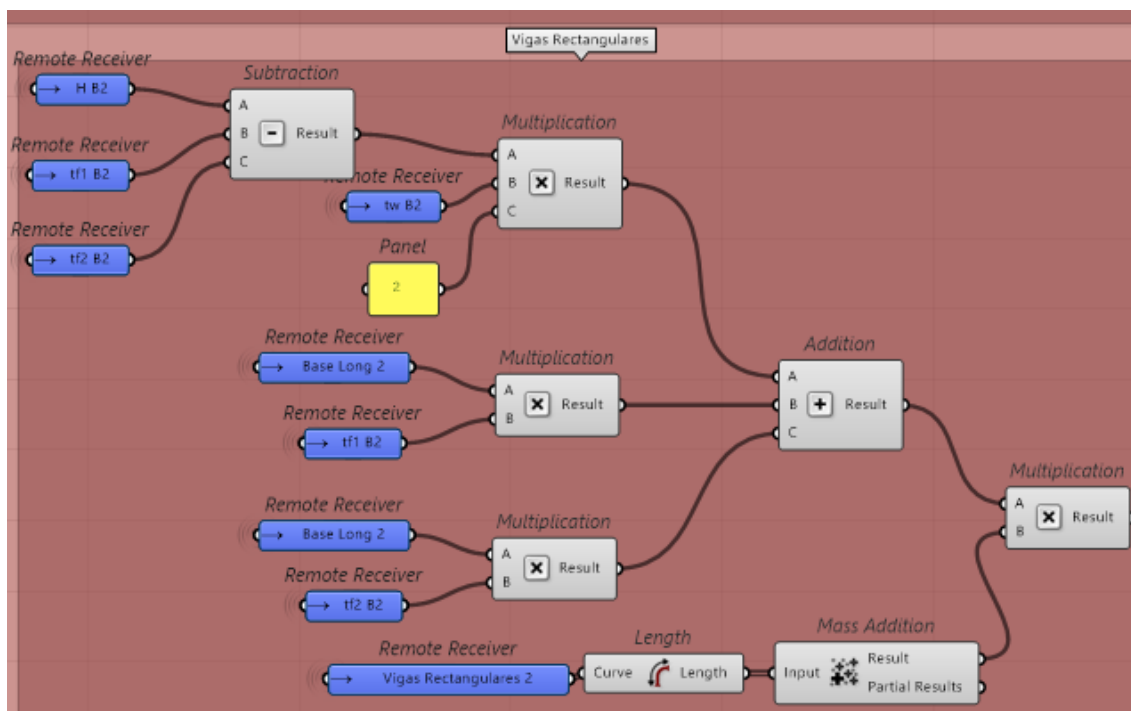


Figura 141. Código utilizado para la obtención del volumen de vigas rectangulares

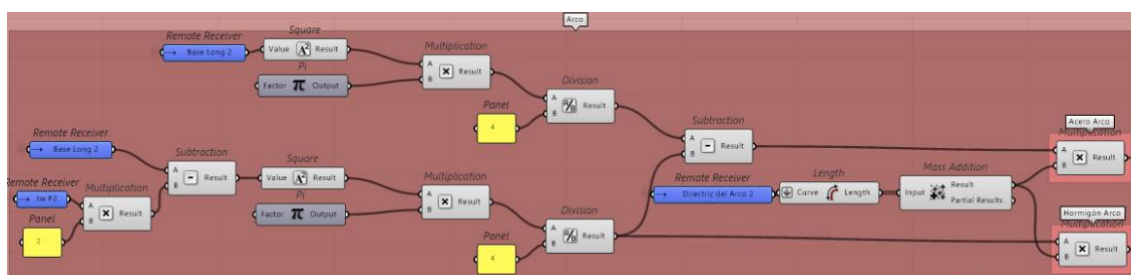


Figura 142. Código utilizado para la obtención de los volúmenes del arco

10 CÓDIGO COMPLETO UTILIZADO

Con lo realizado en el apartado anterior, se ha finalizado la parte del TFM ligada a la codificación. Para mostrar la dimensión global del proceso generativo, se muestran en este apartado unas figuras que muestran el código utilizado al completo, desde una vista panorámica.

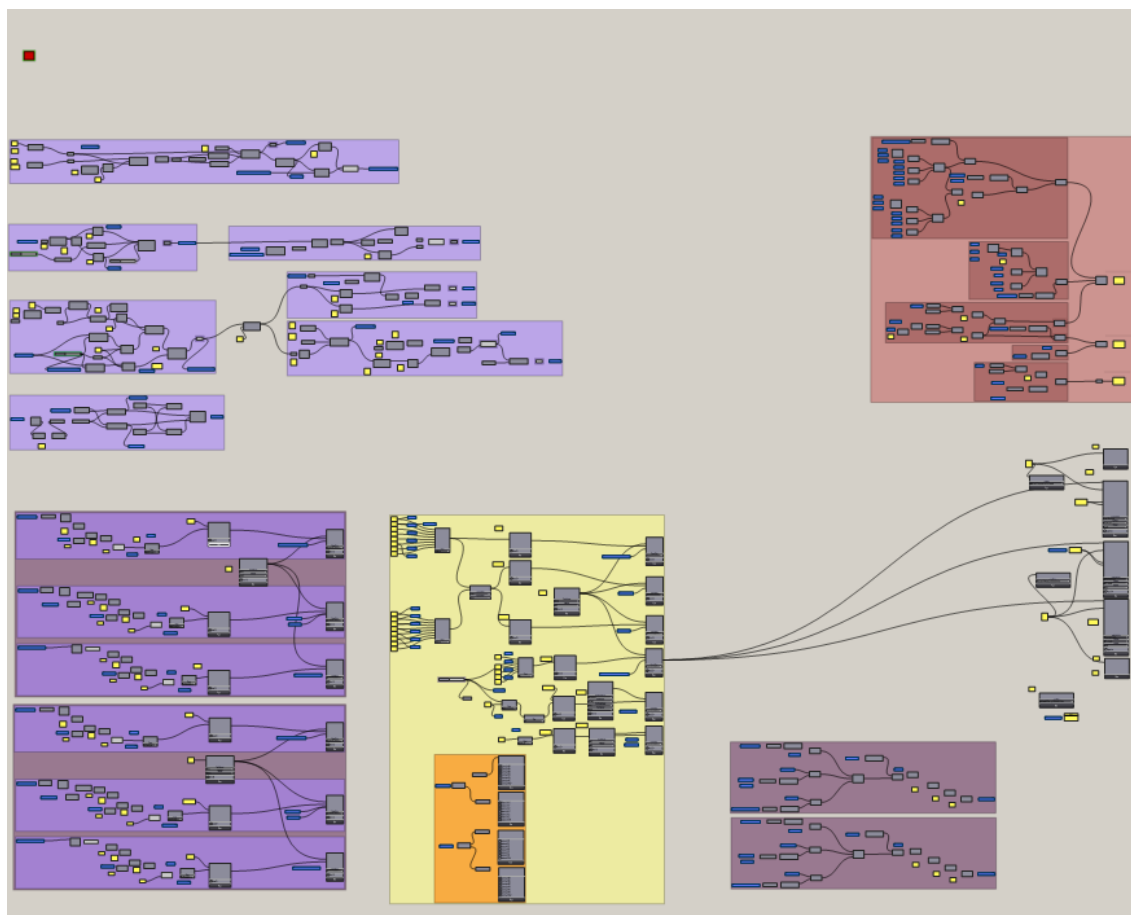


Figura 147. Código utilizado para la generación del modelo (1 de 3)

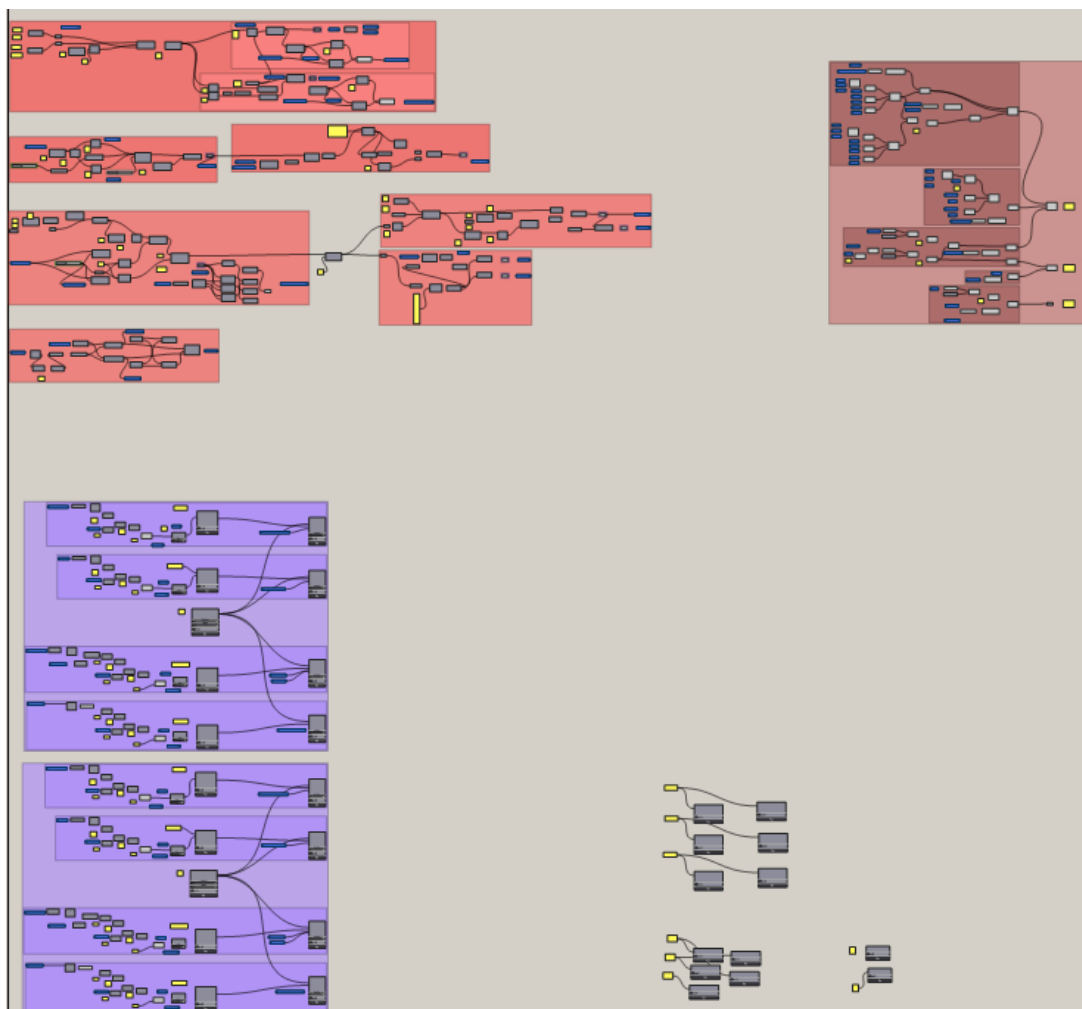


Figura 148. Código utilizado para la generación del modelo (2 de 3)

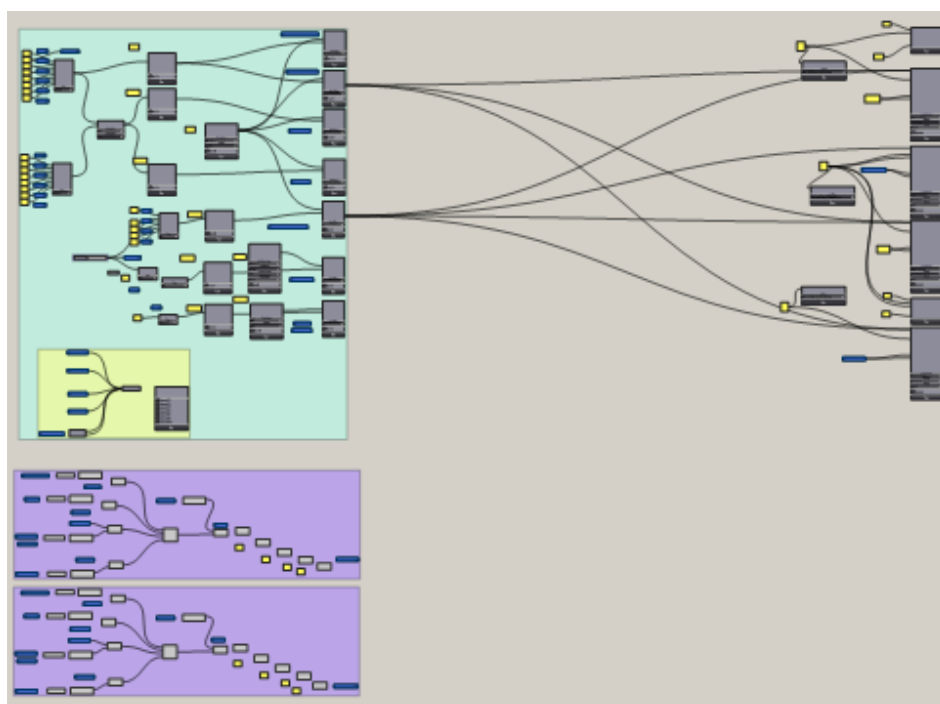


Figura 149. Código utilizado para la generación del modelo (3 de 3)

11 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Antes de comprobar los resultados y comenzar con la optimización del modelo, resulta imperativo comprobar la correcta calibración del modelo. En este apartado, se explica el proceso seguido para proceder con esta comprobación.

11.1 METODOLOGÍA UTILIZADA

Para la resolución del modelo de manera sencilla, se ha utilizado la metodología explicada en el apartado 2.3. La disposición del puente arco propuesto es similar a las líneas de presión que se muestran en dicho apartado y que se pueden observar de nuevo en la Figura 150. Es decir, el puente tiene un arco superior que se comporta a compresión y unas vigas longitudinales inferiores que se comportan como los tirantes del arco y se llevan todo el esfuerzo horizontal de tracción generado por el arco. Sin embargo, el puente modelado no es exactamente así, ya que cuenta también con cables que hacen que cuelguen las vigas longitudinales que, a su vez, han de soportar el tablero del arco.

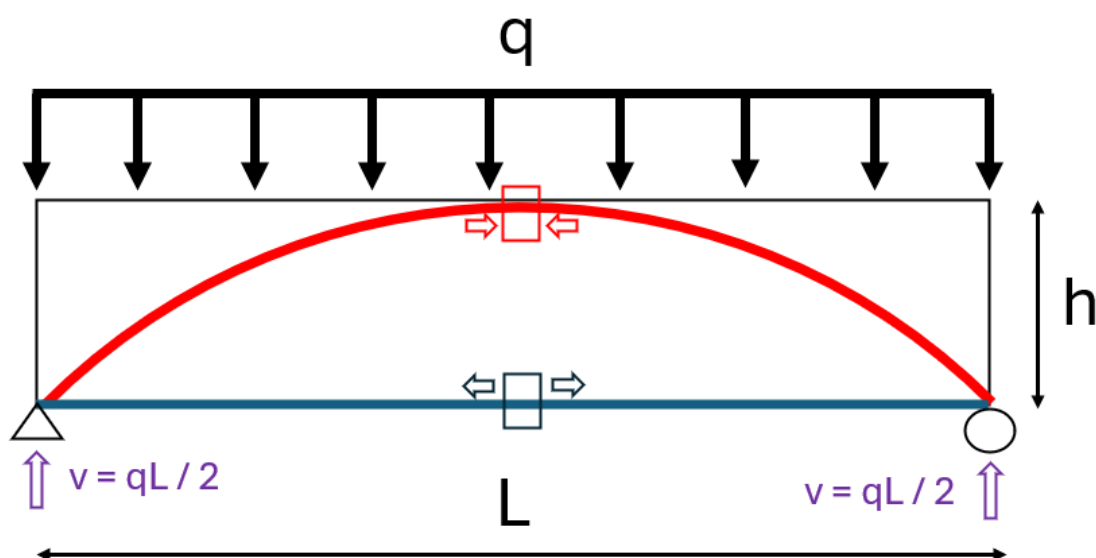


Figura 150. Línea de presión para una viga con carga repartida

A modo de recordatorio, se va a realizar a continuación un breve resumen de lo explicado en el apartado anteriormente mencionado. En él, se explica la forma de obtención de la curvatura de un arco como el ángulo girado desde el arranque hasta el centro de luz, dividido entre la mitad de la luz del arco (ver Figura 151Figura 8):

$$x = \frac{d\theta}{dx} = \frac{\frac{2h}{L/2}}{L/2} = \frac{8h}{L^2}$$

donde

- x curvatura del arco
- L luz del arco
- h flecha del arco

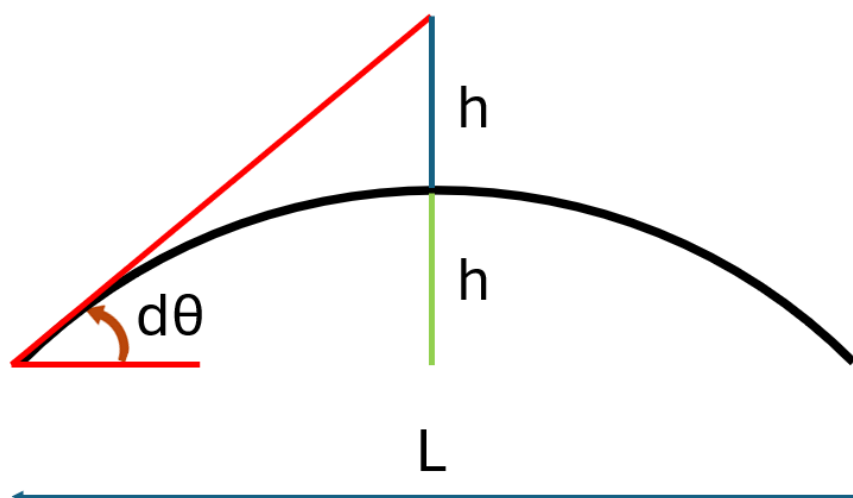


Figura 151. Representación para la búsqueda de la curvatura de un arco

Debido a la simetría, tanto de la estructura como del estado estructural, cada apoyo se lleva la mitad de la carga repartida. El esfuerzo en el tirante inferior H es inversamente proporcional a la curvatura del arco encargado de transmitir la carga vertical a los apoyos, por lo tanto:

$$v = \frac{qL}{2} \rightarrow H = \frac{q}{x} = \frac{qL^2}{8h}$$

donde

v	reacción en los apoyos
q	carga repartida
L	longitud de la viga
H	esfuerzo en el tirante inferior
x	curvatura
h	altura de la viga

De esta forma, el esfuerzo en el tirante inferior H es igual al esfuerzo en la dirección horizontal que obtiene dicho tirante del arco.

Si se aplica esta metodología al puente de estudio, H es igual al axil de las vigas longitudinales. Para obtener los axiles de los diferentes elementos rectos en los que se ha dividido el arco, basta con dividir dicho valor H entre el seno del ángulo que forman las mencionadas barras con la horizontal, todo ello suponiendo que el arco trabaja exclusivamente a axil pese a que, en la realidad y tal como muestra el modelo de GH y Midas Civil NX, existe un esfuerzo cortante también en el arco, pero con un valor unas diez veces menor al axil.

Para obtener las tracciones de los cables, se ha utilizado el área tributaria del peso que cada uno de estos debe soportar.

11.2 SIMPLIFICACIONES REALIZADAS Y MODELO ANALIZADO

Se muestran, en primer lugar, los parámetros fijados para el modelo de análisis a mano.

- El modelo consta de 25 cables.
- El diámetro del arco y la base de las vigas longitudinales se han fijado en 1,00 metro.
- La flecha del arco se ha fijado en 14,00 metros.
- El resto de los parámetros se han mantenido como en el puente existente.

A continuación, se listan las simplificaciones que se han realizado en el modelo de calibración a mano.

- Se ha realizado un análisis bidimensional, por lo que los elementos transversales se han incluido en el modelo como fuerzas sobre los nudos en los que se encuentran, obviando el torsor que estos generan.
- Se ha considerado un modelo simétrico tanto en el eje X como en el eje Y .
- Se ha considerado que los cables trabajan exclusivamente a tracción.
- Se ha considerado que el arco trabaja exclusivamente a axil.
- Se ha realizado el análisis en fase metálica.
- En el cálculo de las reacciones a mano, se ha supuesto el peso propio de las vigas transversales y de los cables repartido uniformemente a lo largo de toda la estructura.
- Se ha supuesto un valor de altura de los cables igual a la mitad de la flecha del arco, es decir, 7,00 metros, para calcular los pesos.

11.3 RESOLUCIÓN A MANO

En este apartado, se detalla la resolución del problema a mano mediante el método anteriormente explicado.

En primer lugar, se debe definir la estructura. Como se ha mencionado con anterioridad, se ha optado por un modelo de 25 cables, con los parámetros mencionados. En la Figura 152 se muestra el puente analizado.

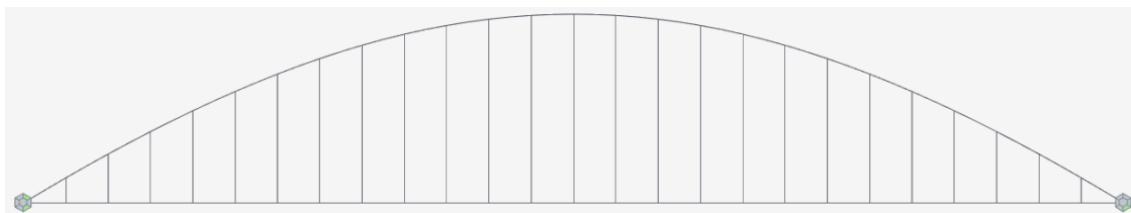


Figura 152. Modelo de puente para el cálculo a mano

Para terminar con la fase preparatoria de cálculos, se ha definido un sistema de signos, que se muestra a continuación:

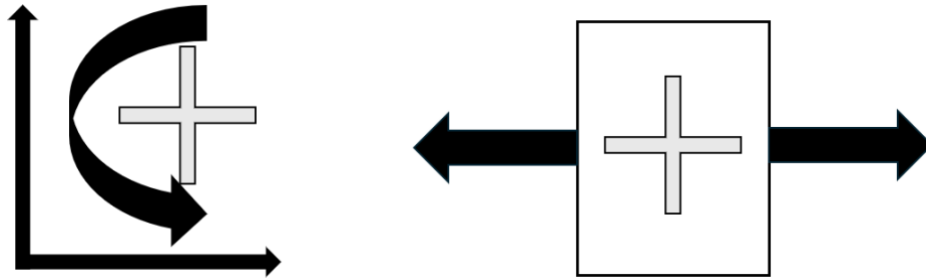


Figura 153. Criterio de signos utilizado

Una vez definida la estructura, se ha comenzado con los cálculos. En primer lugar, se han obtenido las fuerzas actuantes sobre el modelo. Al tratarse de la fase metálica, se debe tener en cuenta exclusivamente el peso propio de toda la estructura metálica y la losa de hormigón. Sin embargo, a la hora de analizar la resistencia del puente, solo se tendrá en cuenta la estructura metálica, ya que es esta la que debe soportar toda la carga de peso propio hasta que el hormigón endurezca.

Los valores de peso propio se han obtenido de acuerdo con el Eurocódigo [21]. A continuación, se muestran los cálculos realizados para la obtención de estas fuerzas actuantes:

$$q_{\text{arco}} := -1 \cdot \left(\pi \cdot (0,5^2 - 0,48^2) \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{3} + \pi \cdot 0,48^2 \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{3} \right) = -22,2054 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{\text{long}} := -1 \cdot \left(78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (1,2 \text{ m} \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 2 + (1 \text{ m} - 2 \cdot 0,02 \text{ m}) \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 2) \right) = -6,7824 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$q_{\text{cable}} := -1 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (0,064 \text{ m})^2}{4} \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) = -0,2525 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{\text{centro,transv}} := -1 \cdot \frac{(0,3 \text{ m} \cdot 0,015 \text{ m} \cdot 2 + (0,9 - 0,015 \cdot 2) \text{ m} \cdot 0,015 \text{ m}) \cdot 18,5 \text{ m} \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}}{2} = -16,0111 \text{ kN}$$

$$F_{\text{costillas}} := -1 \cdot \left((0,015 \text{ m} \cdot (0,9 - 0,03) \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot 0,5 + 6 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0,015 \text{ m} + \sqrt{0,9^2 + 6^2} \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 0,015 \text{ m}) \cdot 78,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) = -7,336 \text{ kN}$$

$$F_{\text{transversales}} := F_{\text{centro,transv}} + F_{\text{costillas}} = -23,347 \text{ kN}$$

$$q_{\text{hormigón}} := (-1) \cdot \frac{(2 \cdot 6 + 18,2) \text{ m} \cdot 0,30 \text{ m}}{2} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = -113,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Figura 154. Obtención de fuerzas actuantes sobre la estructura analizada a mano

Una vez obtenidas las fuerzas actuantes, se ha procedido con el cálculo de las reacciones. Para ello y de acuerdo con la metodología seleccionada, se han obtenido ambas reacciones con la siguiente fórmula:

$$R_1 = R_2 = \frac{q \cdot L}{2}$$

donde

R_1, R_2 reacciones verticales en los apoyos

q carga actuante sobre la estructura

L luz del puente

En la Figura 155 se muestra la resolución del valor de estas reacciones:

$$R_1 := - \left((q_{arco} + q_{long} + q_{hormigón}) \cdot \frac{82 \text{ m}}{2} + \frac{q_{cable} \cdot (25 \cdot 7 \text{ m})}{2} + \frac{F_{transversales} \cdot 25}{2} \right) = 6145,6848 \text{ kN}$$

$$R_2 := R_1 = 6145,6848 \text{ kN}$$

Figura 155. Obtención de las reacciones de la estructura analizada a mano

Tras obtener las reacciones, se ha procedido a la obtención del axil de la viga longitudinal inferior. Pese a que se ha dividido en tramos tanto en el modelo a mano como en el modelo de GH y Midas Civil NX, el axil debería ser constante e igual al inverso de la curvatura del arco, tal y como se ha explicado anteriormente en el apartado 11.1. Por tanto, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$H = \frac{q}{x} = \frac{qL^2}{8h}$$

donde

H	axil en la viga longitudinal inferior
q	carga repartida
x	curvatura del arco
L	luz del puente
h	flecha del arco

Con esto, el proceso resolutivo para la obtención del axil de los elementos inferiores de la estructura se muestra en la Figura 156.

$$H := - \frac{\left(q_{arco} + q_{long} + q_{cable} \frac{25 \cdot 7 \text{ m}}{82 \text{ m}} + q_{hormigón} + \frac{25 \cdot F_{transversales}}{82 \text{ m}} \right) \cdot (82 \text{ m})^2}{8 \cdot 14 \text{ m}} = 8999,0384 \text{ kN}$$

Figura 156. Obtención del axil de las vigas longitudinales de la estructura analizada a mano

Una vez obtenido el axil de las vigas longitudinales inferiores, se ha procedido con la obtención de los axiles del arco. El valor del axil del tirante inferior es igual al esfuerzo horizontal que soporta el arco, tal y como se ha explicado en el apartado 2.3 por lo que, suponiendo que el arco actúa exclusivamente a axil – pese a que esto no es del todo cierto, ya que tiene soporta también un esfuerzo cortante, pero que debería de ser de un valor mucho menor al axil –, se obtiene el valor de dicho axil mediante geometría.

En el centro luz, el axil es igual a la horizontal anteriormente calculada en sentido contrario, ya que este no tiene componente vertical en las coordenadas globales. Este esfuerzo horizontal es constante a lo largo de todo el arco, por lo que para obtener el axil en los apoyos basta con dividir el valor de este esfuerzo horizontal entre el seno del ángulo de arranque.

Para obtener este valor, se ha obtenido, en primer lugar, el ángulo que se forma desde el arranque hasta el punto de unión con el arco de la primera de las péndolas, como se muestra en la Figura 157:

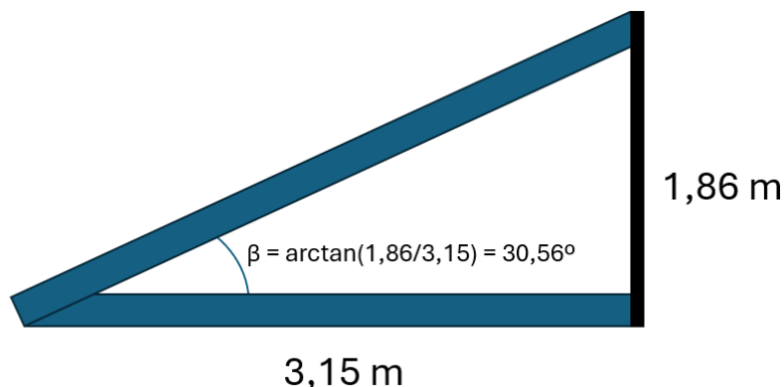


Figura 157. Geometría utilizada para obtener el ángulo de arranque

Con esta geometría, el axil en el arranque se obtiene de la siguiente forma:

$$N_{\text{arranque, arco}} := \frac{-H}{\cos(30,5608^\circ)} = -10450,7512 \text{ kN}$$

Figura 158. Axil en los arranques del arco en la resolución a mano

Finalmente, el axil de tracción en los cables se obtiene con el área tributaria que estos deben soportar.

$$F_{\text{cables}} := -\left(3,55 \text{ m} \cdot (q_{\text{hormigón}} + q_{\text{long}}) + F_{\text{transversales}} + q_{\text{cable}} \cdot 7 \text{ m}\right) = 451,2298 \text{ kN}$$

Figura 159. Axil en los cables en la resolución a mano

11.4 RESULTADOS DEL MODELO DE GH Y MIDAS CIVIL NX

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el modelo realizado en el presente TFM. Para esta resolución, solo se ha tenido que correr el modelo de GH con los parámetros fijados en el apartado 11.2, a los que se ha añadido una carga repartida en las vigas correspondiente al peso de la losa de hormigón.

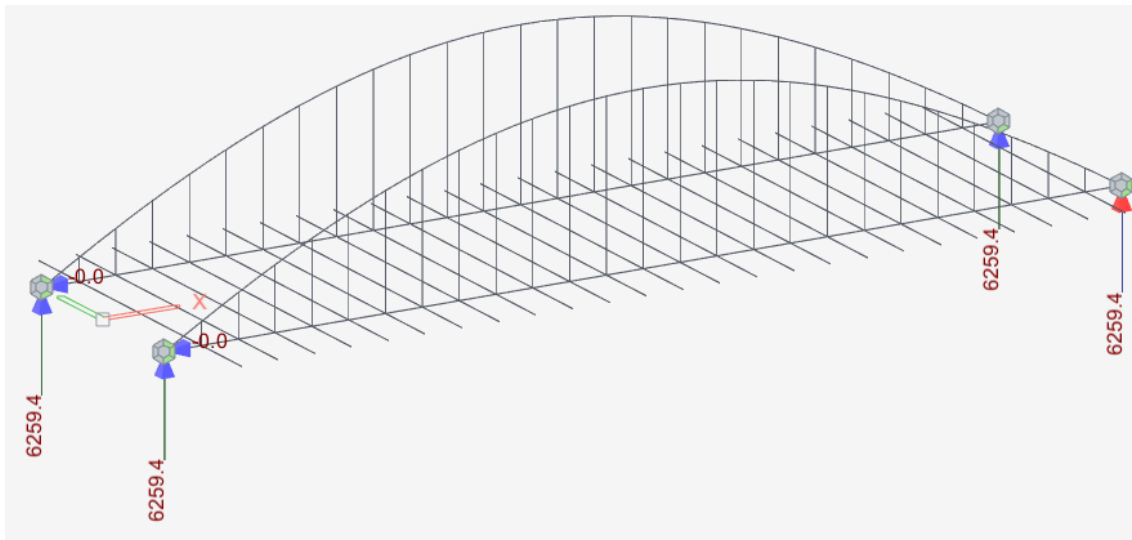


Figura 160. Reacciones obtenidas en el modelo de GH y Midas Civil NX para el modelo de calibración

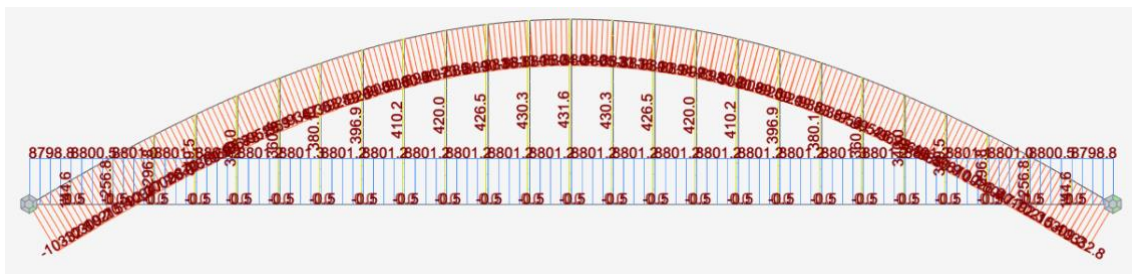


Figura 161. Axiles obtenidos en el modelo de GH y Midas Civil NX para el modelo de calibración

Si se realiza un zoom, en primer lugar, en el centro luz, se observan los siguientes axiles:

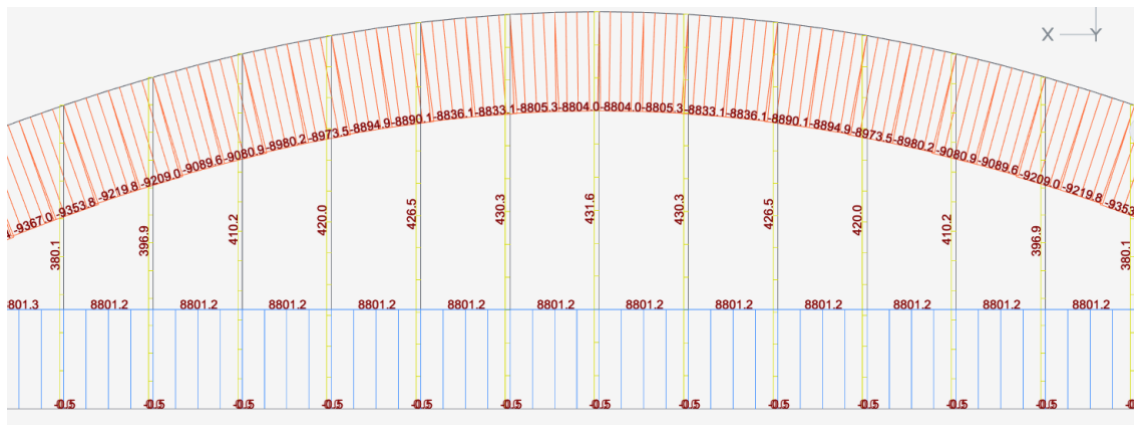


Figura 162. Axiles obtenidos en centro luz en el modelo de GH y Midas Civil NX

Si se realiza el aumento ahora en uno de los arranques, se observan los siguientes axiles:

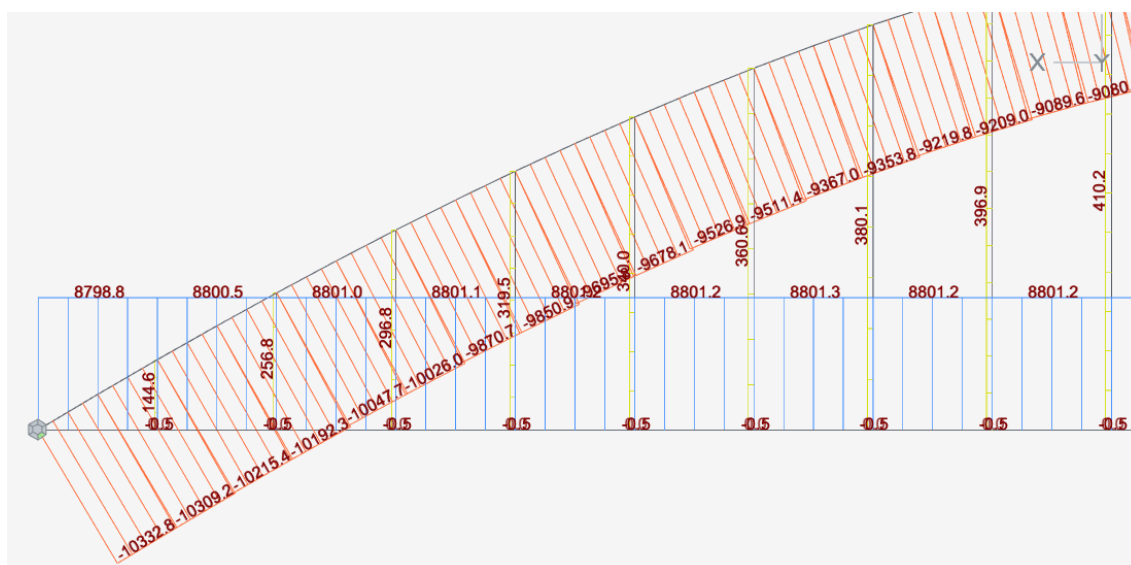


Figura 163. Axiles obtenidos en el arranque en el modelo de calibración de GH y Midas Civil NX

Como se puede observar, los errores obtenidos son muy bajos en toda la estructura. Por lo tanto, se concluye que el modelo está calibrado y listo para su uso.

12 RESULTADOS

En este apartado, se detallan los resultados obtenidos para las diferentes iteraciones realizadas del modelo propuesto y para el modelo realizado del puente existente.

Los resultados que se mostrarán, en todos los casos, serán: las reacciones en el apoyo oeste de la doble T longitudinal central y en los apoyos de la esquina suroeste del arco y de la viga rectangular, los diagramas de axiles, cortantes y momentos de toda la estructura en 2D y un diagrama de tensiones, junto con los valores máximos y mínimos hallados de cada uno de ellos en las diferentes secciones transversales.

12.1 RESULTADOS DEL PUENTE EXISTENTE

En primer lugar, se muestran los resultados del puente existente, cuya estructura metálica se muestra a continuación:

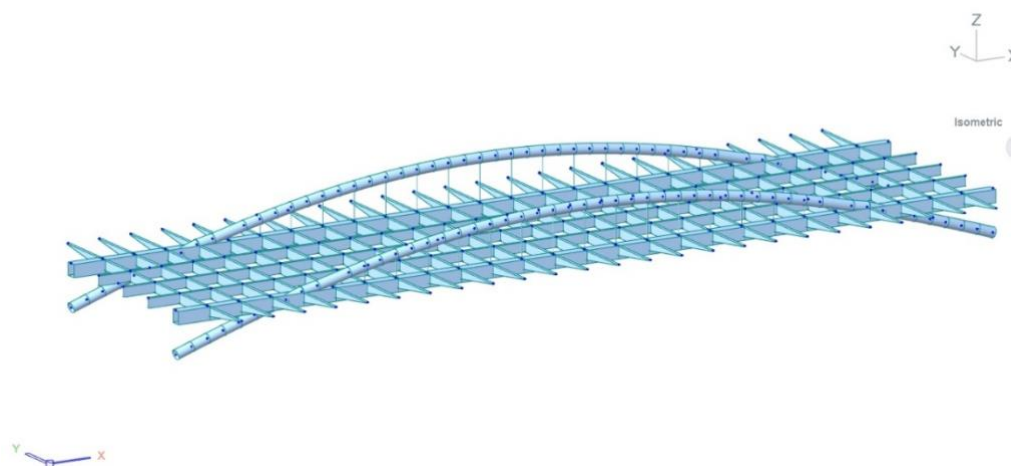


Figura 164. Modelo del puente existente analizado, sin losa

12.1.1 FASE METÁLICA

Se analiza, en primer lugar, la fase metálica. Las reacciones obtenidas son las siguientes:

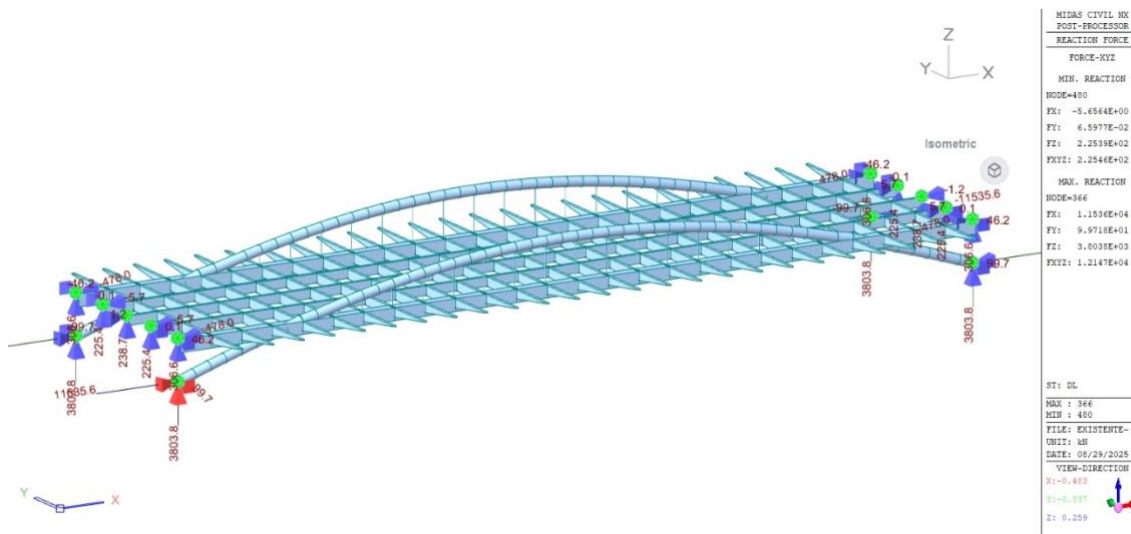


Figura 165. Reacciones en el modelo del puente existente para la fase metálica

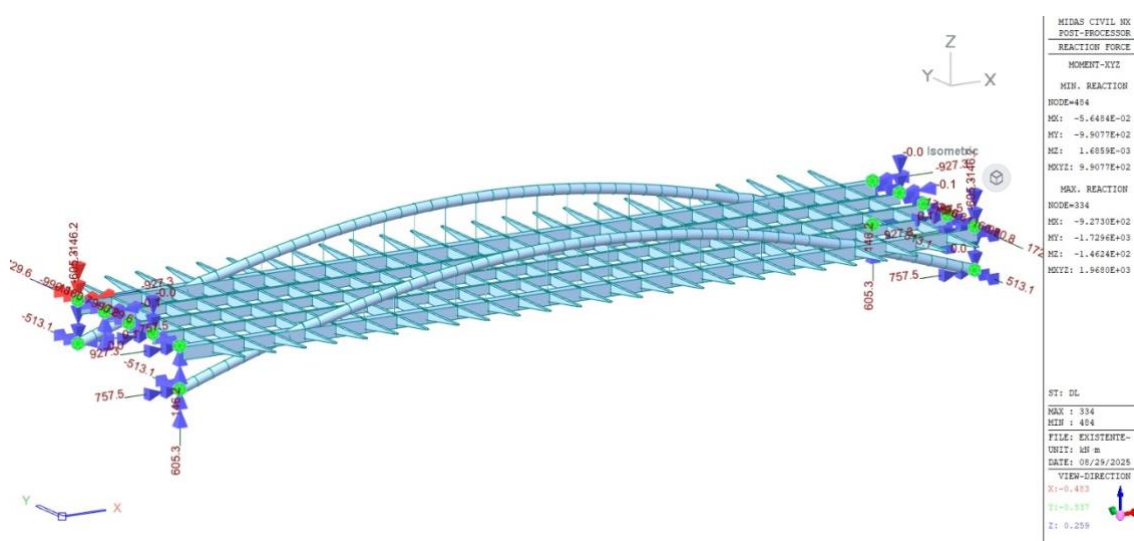


Figura 166. Momentos en los empotramientos del modelo del puente existente en la fase metálica

Como se puede observar, existen importantes reacciones horizontales, además de momentos en todas las direcciones, en los apoyos del puente.

A continuación, se muestran los esquemas de los diagramas de axiles, cortantes y momentos:

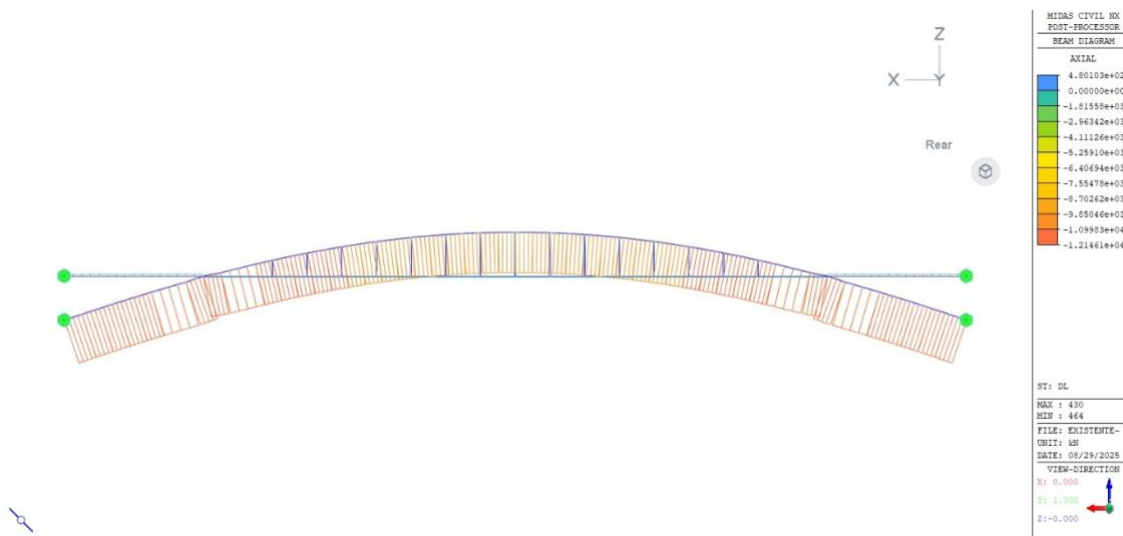


Figura 167. Diagrama de axiles del modelo del puente existente en la fase metálica



Figura 168. Diagrama de cortantes en el modelo del puente existente para la fase metálica

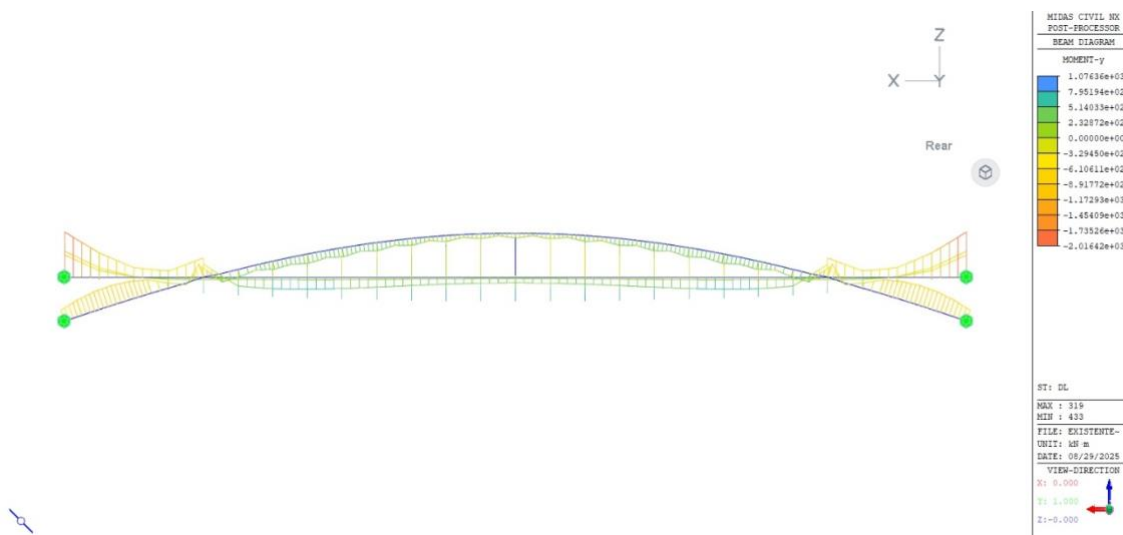


Figura 169. Diagrama de momentos en el modelo del puente existente para la fase metálica

Se muestra ahora el esquema de tensiones:

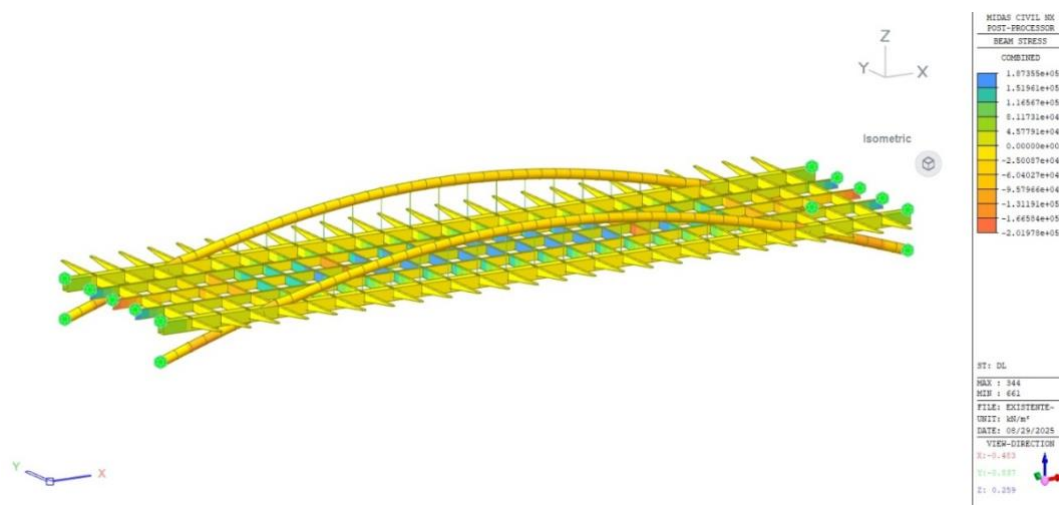


Figura 170. Tensiones en el modelo del puente existente para la fase metálica

Por último, se muestran los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento del puente:

Tabla 3. Valores máximos y mínimos en cada elemento del puente existente para la fase metálica

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-10839	-12146	547	-547	416	-857	-64	-102
Vigas Rectangulares	480	-217	318	-318	535	-2017	74	-27
Doble T	29	-96	238	-278	1076	-1160	187	-202
Cables	291	235	0	0	0	0	170	88

12.1.2 SOBRECARGA

Seguidamente, se analiza la fase de sobrecarga. En primer lugar, se muestran las reacciones obtenidas en los empotramientos:

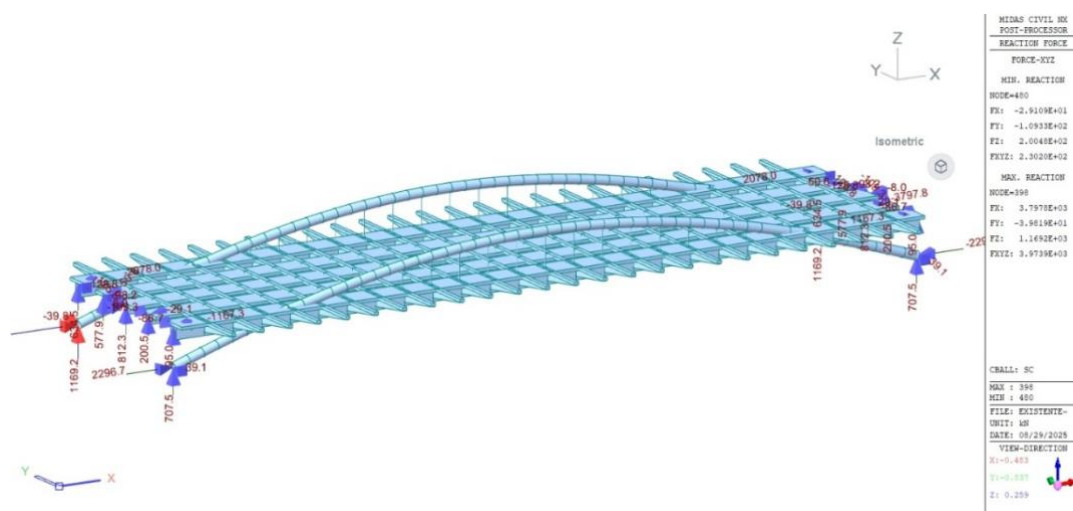


Figura 171. Reacciones en los apoyos del puente existente para la sobrecarga de uso

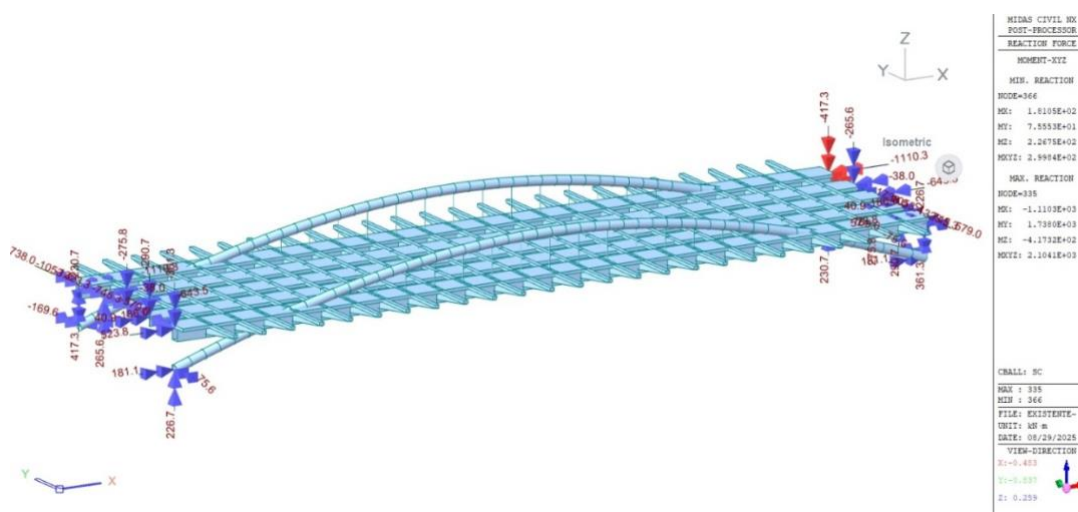


Figura 172. Momentos en los apoyos del puente existente para la sobrecarga de uso

A continuación, se muestran los resultados de los diagramas de axiles, cortantes y momentos para este caso de carga. En ellos, se muestran dos valores para cada elemento del puente, puesto que se trata de los valores máximos y mínimos obtenidos en las diferentes situaciones de sobrecarga de uso – es decir, se observa la envolvente de todas las cargas –. Al no ser la carga simétrica, se muestran los diagramas desde una perspectiva isométrica.

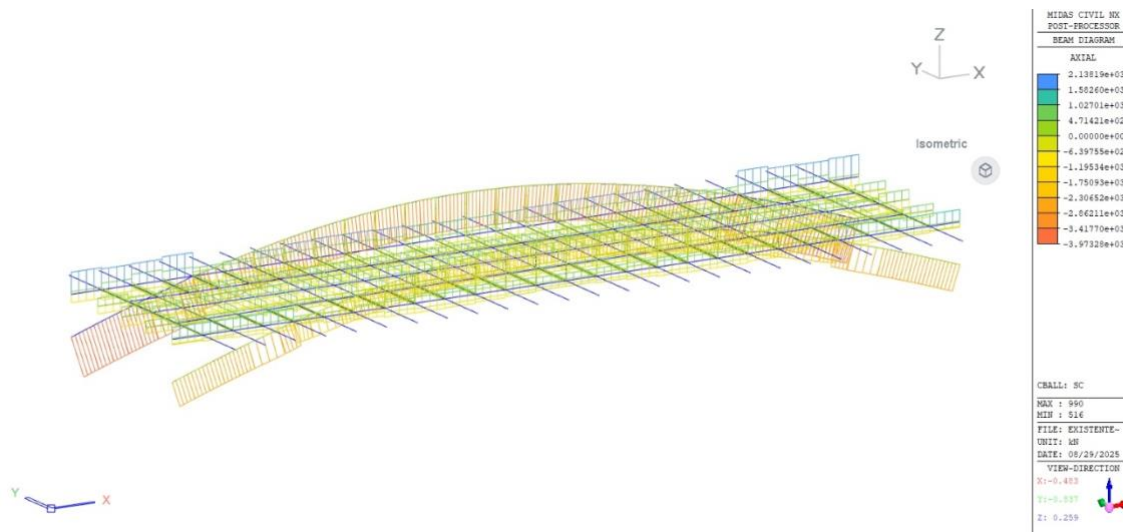


Figura 173. Diagrama de axiles en el puente existente para la sobrecarga de uso

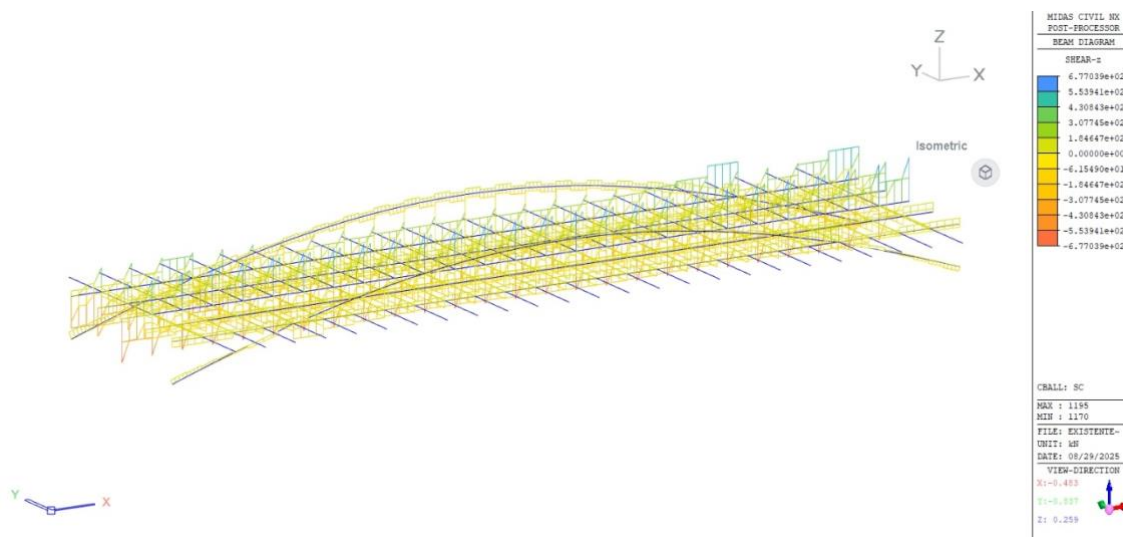


Figura 174. Diagrama de cortantes en el puente existente para la sobrecarga de uso

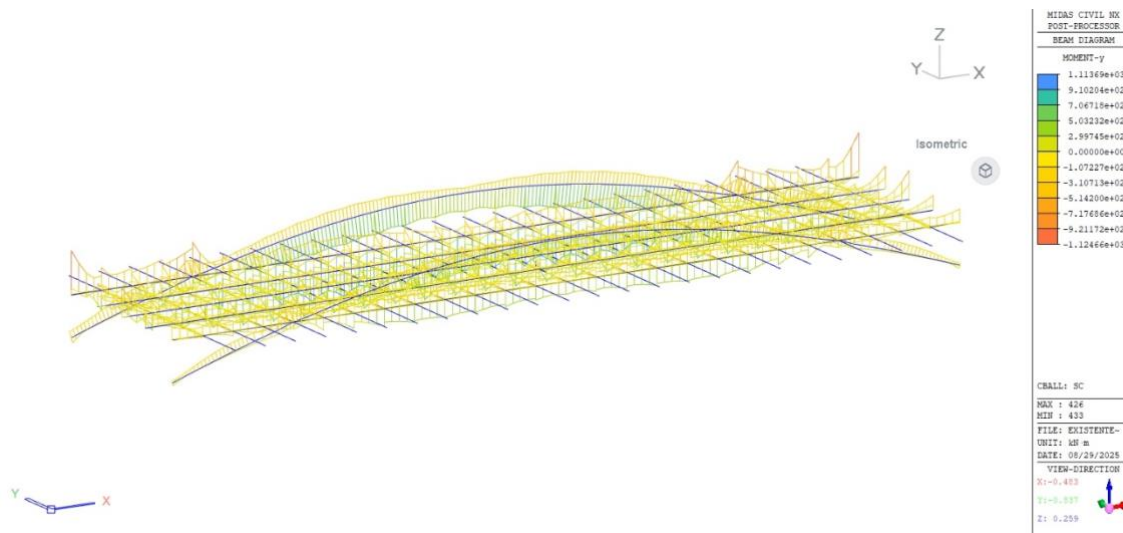


Figura 175. Diagrama de momentos en el puente existente para la sobrecarga de uso

A continuación, se muestran las tensiones obtenidas en el puente existente para la sobrecarga de uso.

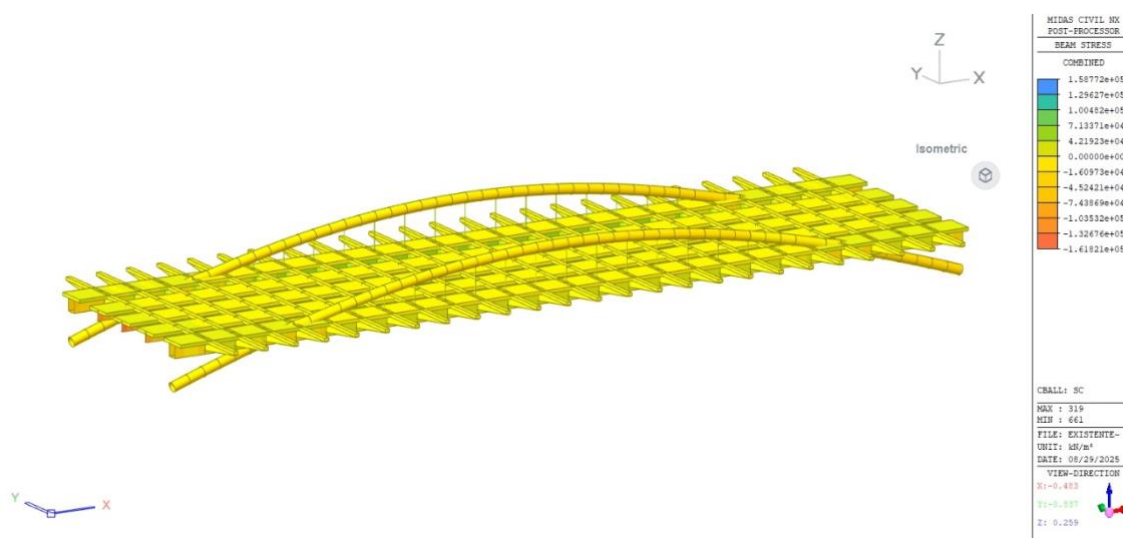


Figura 176. Tensiones en el puente existente para la sobrecarga de uso

Por último, se muestra una tabla resumen con los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento del puente.

Tabla 4. Valores máximos y mínimos en el puente existente para la sobrecarga de uso

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	9	-3972	178	-178	620	-472	-12	-37
Vigas Rectangulares	1729	-810	536	-536	1114	-1125	64	-63
Doble T	903	-884	356	-356	706	-754	159	-162
Cables	153	0	0	0	0	0	55	20

12.1.3 CARGA PERMANENTE

El último caso de carga analizado es el de carga permanente en el que, como ya se ha mencionado con anterioridad, se incluyen la geometría de la estructura metálica y la losa de hormigón homogeneizada a tiempo infinito. Se muestran, en primer lugar, las reacciones obtenidas en los empotramientos.

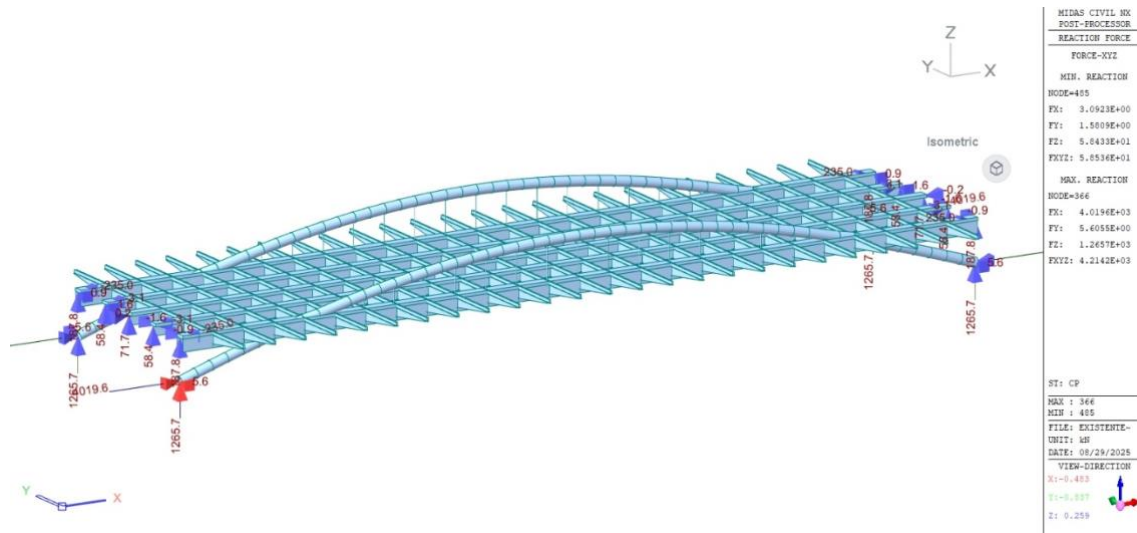


Figura 177. Reacciones en los empotramientos del puente existente para la carga permanente

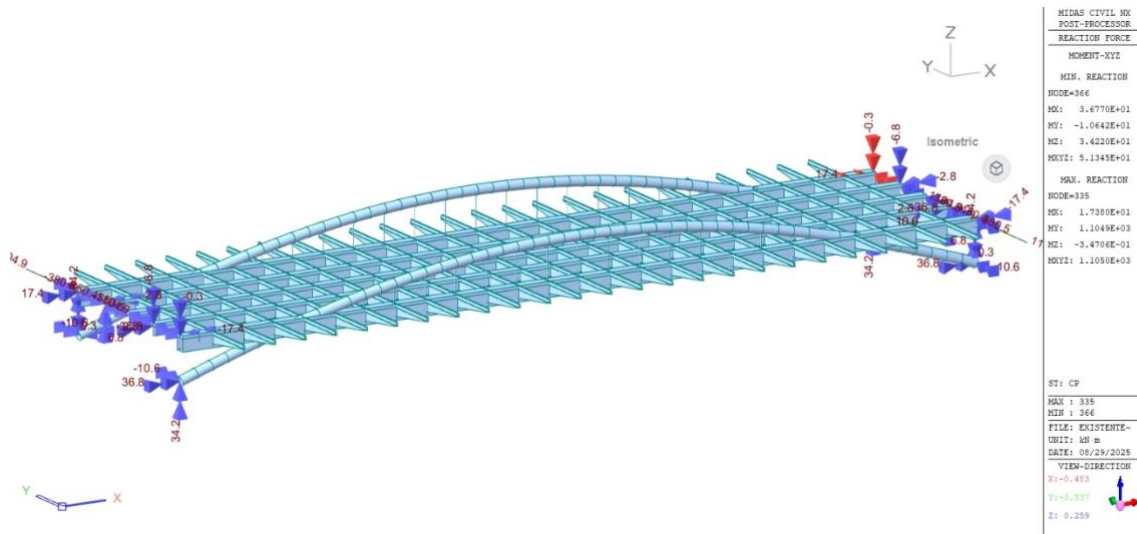


Figura 178. Momentos en los empotramientos para la carga permanente

Seguidamente, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos para este caso de carga:

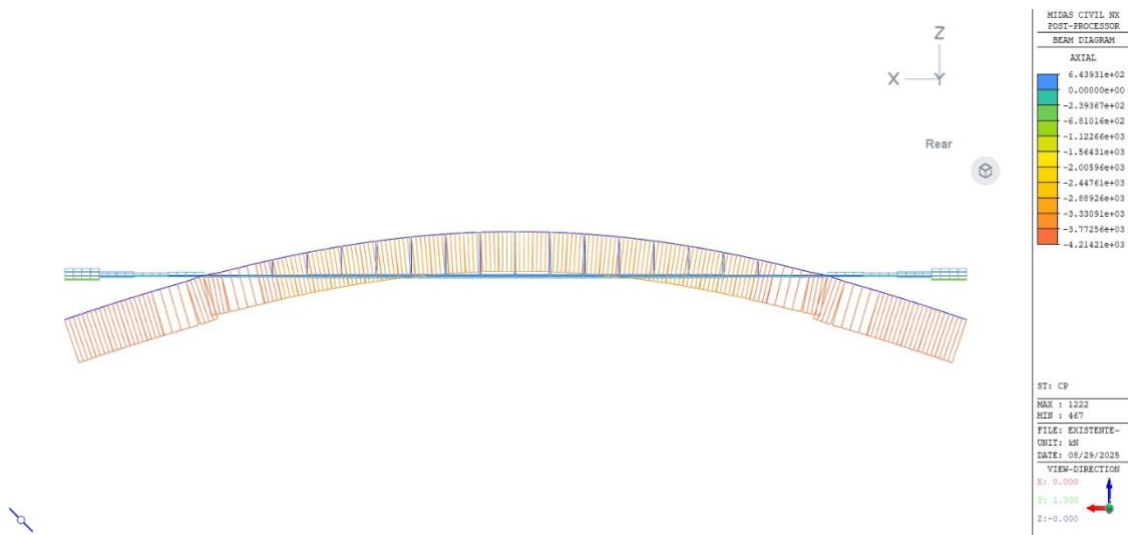


Figura 179. Diagrama de axiles en el puente existente para la carga permanente

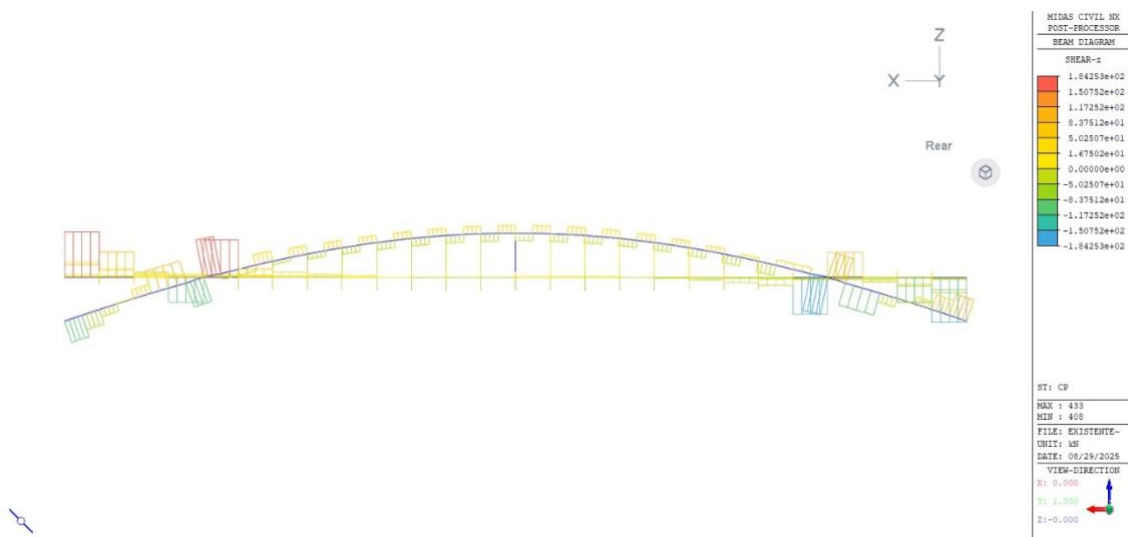


Figura 180. Diagrama de cortantes en el puente existente para la carga permanente

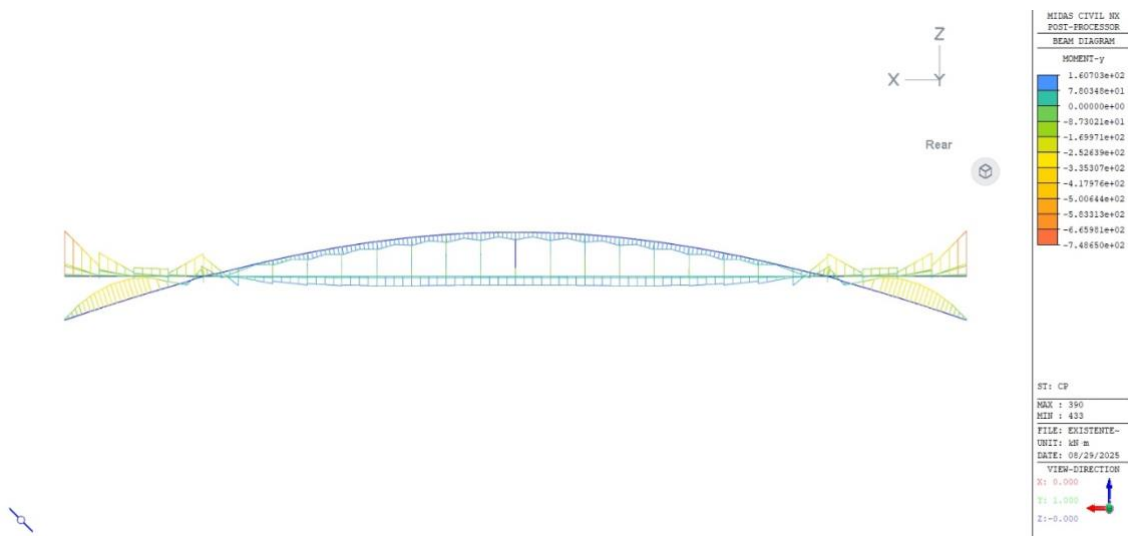


Figura 181. Diagrama de momentos en el puente existente para la carga permanente

Se muestran ahora las tensiones encontradas en el puente para el caso de carga permanente.

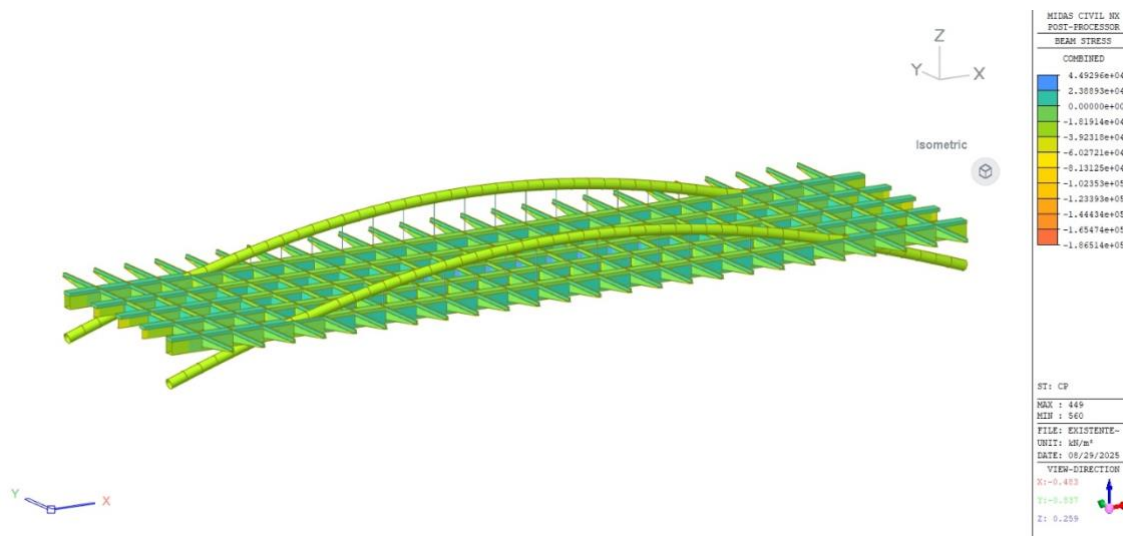


Figura 182. Tensiones en el puente existente para la carga permanente

Por último, se muestra una tabla con los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para este caso de carga

Tabla 5. Valores máximos y mínimos hallados en el puente existente para la carga permanente

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-3677	-4214	154	-154	127	-317	-21	-35
Vigas Rectangulares	121	-409	184	-184	161	-749	7	-29
Doble T	119	-365	63	-63	125	-204	27	-52
Cables	126	107	0	0	0	0	45	34

12.1.4 CANTIDADES DE MATERIAL

A continuación, se muestra la cantidad de material utilizada en el puente, obtenida a través del código generado en GH:

Tabla 6. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para el modelo del puente existente

S355 (kg)	472971
S460 (kg)	2285
HA-35 [m ³]	864

12.1.5 RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Se muestra, en primer lugar, una tabla que recoge las reacciones en dirección X, Y y Z obtenidas en cada caso de carga, así como la suma de todos ellos, para el puente existente.



Tabla 7. Reacciones en el puente existente para los diferentes casos de carga

	PP Secc. Metálica	SC	CP	Suma
Rx Arco	11836	3798	4020	19654
Ry Arco	3804	1169	1266	6239
Rz Arco	100	40	5	145
Rx Vigas Rectang.	-478	-2078	-235	-2791
Ry Vigas Rectang.	307	635	188	1130
Rz Vigas Rectang.	46	129	0	175
Rx Doble T Long.	0	-30	0	-30
Ry Doble T Long.	239	812	58	1109
Rz Doble T Long.	0	0	0	0

Finalmente, se muestran los valores máximos y mínimo hallados en cada elemento para los diferentes casos de carga, así como la suma total de estos.

Tabla 8. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para el puente existente

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-10839	-12146	547	-547	416	-857	-64	-102
	Vigas Rectangulares	480	-217	318	-318	535	-2017	74	-27
	Doble T	29	-96	238	-278	1076	-1160	187	-202
	Cables	291	235	0	0	0	0	170	88
SC	Arco	9	-3972	178	-178	620	-472	-12	-37
	Vigas Rectangulares	1729	-810	536	-536	1114	-1125	64	-63
	Doble T	903	-884	356	-356	706	-754	159	-162
	Cables	153	0	0	0	0	0	55	20
CP	Arco	-3677	-4214	154	-154	127	-317	-21	-35
	Vigas Rectangulares	121	-409	184	-184	161	-749	7	-29
	Doble T	119	-365	63	-63	125	-204	27	-52
	Cables	126	107	0	0	0	0	45	34
Suma	Arco	-14507	-20332	879	-879	1163	-1646	-97	-174
	Vigas Rectangulares	2330	-1436	1038	-1038	1810	-3891	145	-119
	Doble T	1051	-1345	657	-697	1907	-2118	373	-416
	Cables	570	342	0	0	0	0	270	142

Como se puede ver, el puente cumple en todas sus partes con el objetivo de $0,9 \cdot f_y$, a excepción de las vigas Doble T. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos máximos se dan en los apoyos, donde existen las cimentaciones y la sección es mucho mayor, por lo que se consideran los resultados adecuados.

12.2 RESULTADOS DE LAS ITERACIONES DEL PUENTE PROPUESTO

A continuación, se van a mostrar los resultados de la iteración final del modelo de arco con tablero inferior. El resto de las iteraciones, junto con sus resultados, se muestran en el apartado -. La búsqueda de la geometría óptima se realizará mediante la combinación de tensiones obtenidas en la fase metálica, sobrecargas de uso a tiempo cero y carga permanente a tiempo infinito en servicio. Se dimensionará para una limitación de tensiones de 0,9 veces el límite elástico, esto es, 319,5 MPa en el caso de los elementos conformados por acero S355 y 414,0 MPa en el caso de las péndolas.

12.2.1 ITERACIÓN FINAL

Para la última iteración, se han comprobado los valores obtenidos al aumentar la sección del arco con respecto a las anteriores iteraciones para evitar el pandeo, aumentando también ligeramente la base de la viga longitudinal para que encaje con la sección del arco.

Tabla 9. Parámetros utilizados en la iteración final

Flecha de los arcos	20,0	m
Diámetro de los arcos	1,6	m
Vigas rectangulares	H	1,2
	B	1,6
Nº transversales y péndolas	21	a cada lado

La geometría correspondiente a estos parámetros se muestra a continuación.

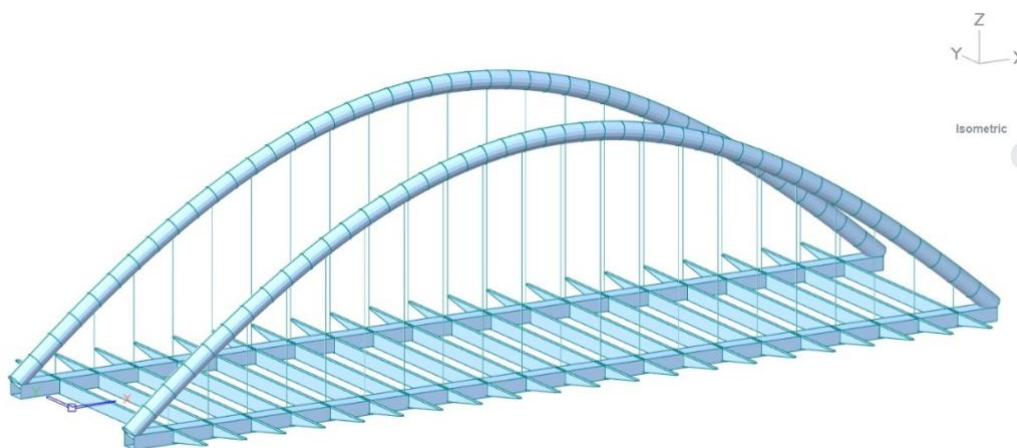


Figura 183. Geometría de la iteración final sin losa

12.2.1.1. FASE METÁLICA

Se muestran en primer lugar las reacciones obtenidas en la fase metálica.

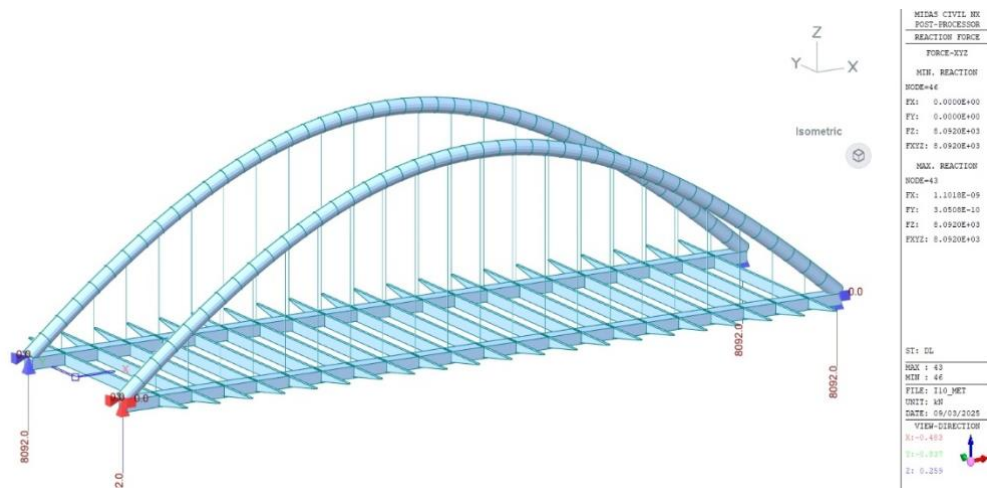


Figura 184. Reacciones en la fase metálica para la iteración final

Se muestran a continuación los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en esta fase.

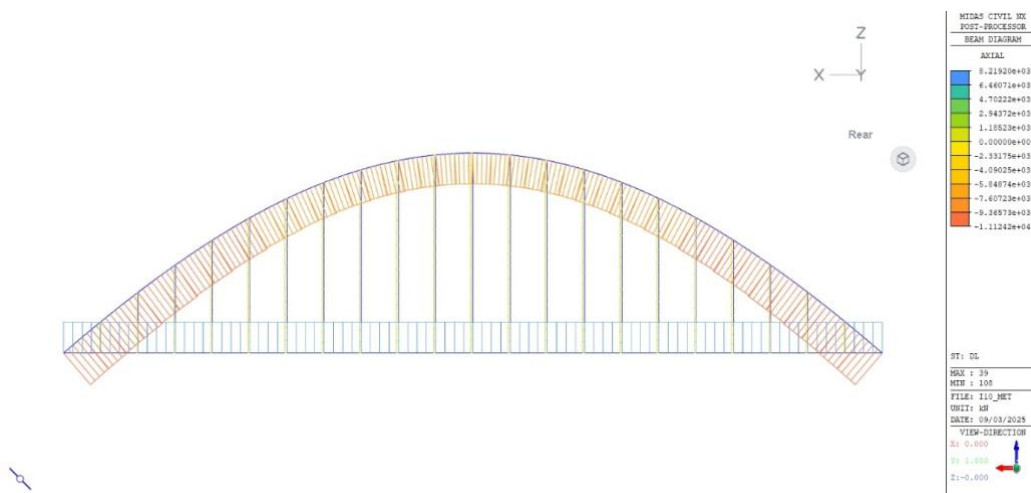


Figura 185. Axiles obtenidos en la fase metálica para la iteración final

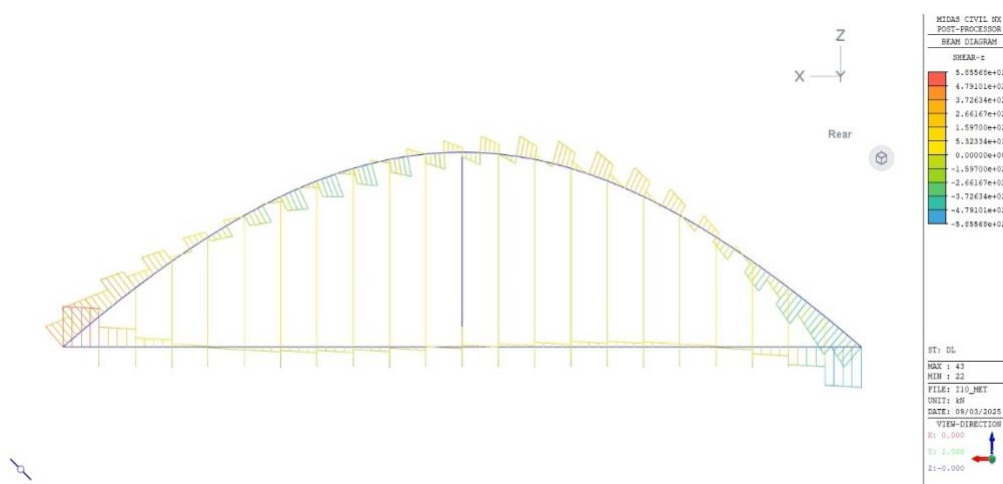


Figura 186. Cortantes obtenidos en la fase metálica para la iteración final



Figura 187. Momentos obtenidos en la fase metálica para la iteración final

Las tensiones obtenidas se muestran en la siguiente figura:

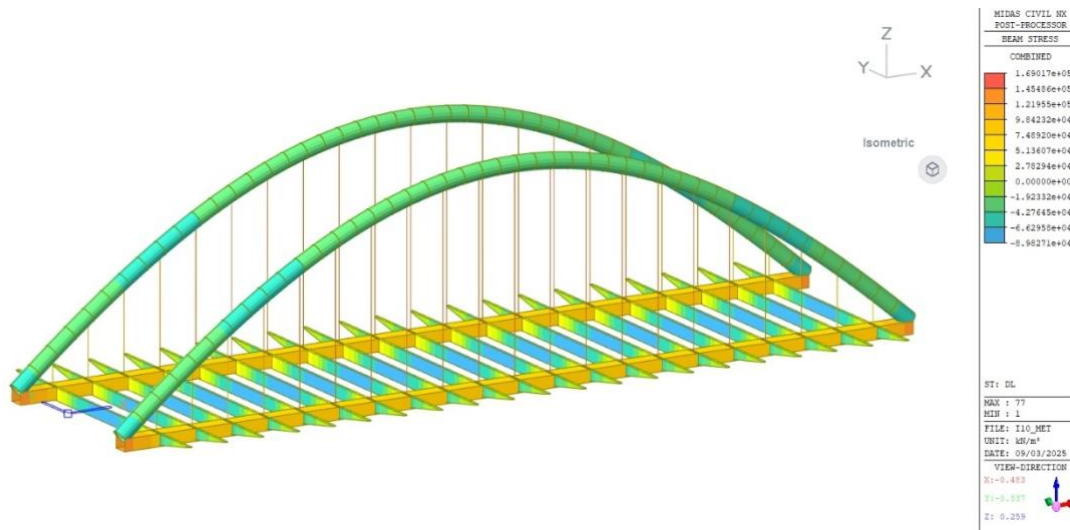


Figura 188. Tensiones obtenidas en la fase metálica para la iteración final

La siguiente tabla recoge un resumen de los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento en esta fase.

Tabla 10. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la iteración final

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-8224	-11124	434	-434	2180	-2237	-21	-51
Vigas Rectangulares	8224	8224	586	-586	965	-2694	134	75
Transversales	0	-18	292	-292	773	-593	69	-90
Cables	543	218	0	0	0	0	169	69

12.2.1.2. SOBRECARGA DE USO

Las reacciones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso se muestran a continuación:

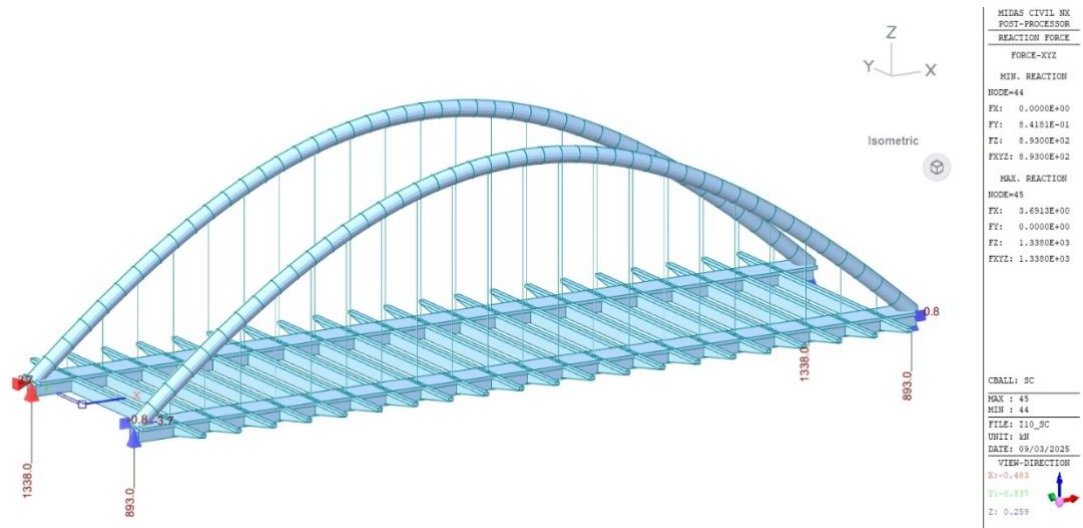


Figura 189. Reacciones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final

Las siguientes figuras muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos.

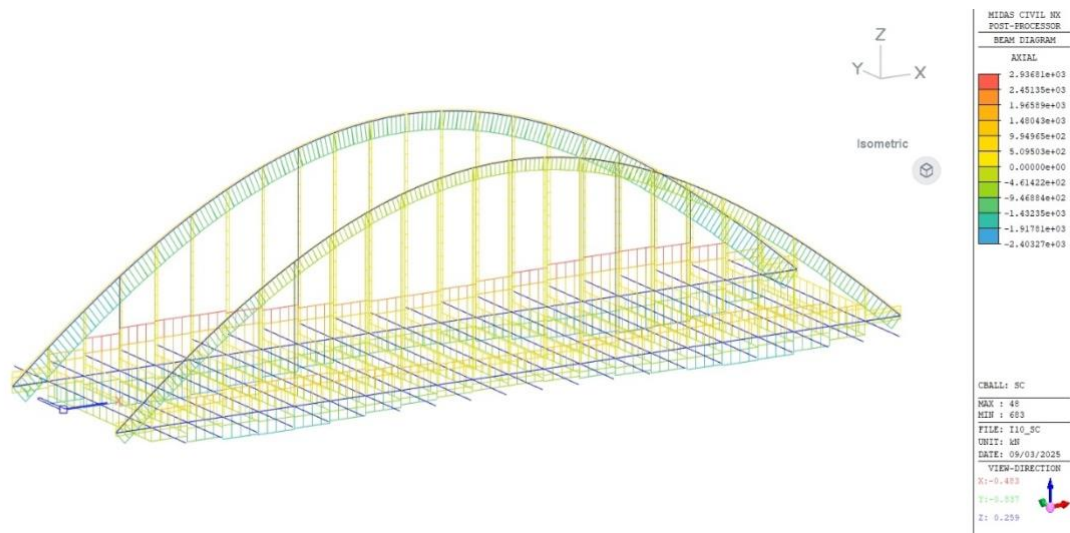


Figura 190. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final

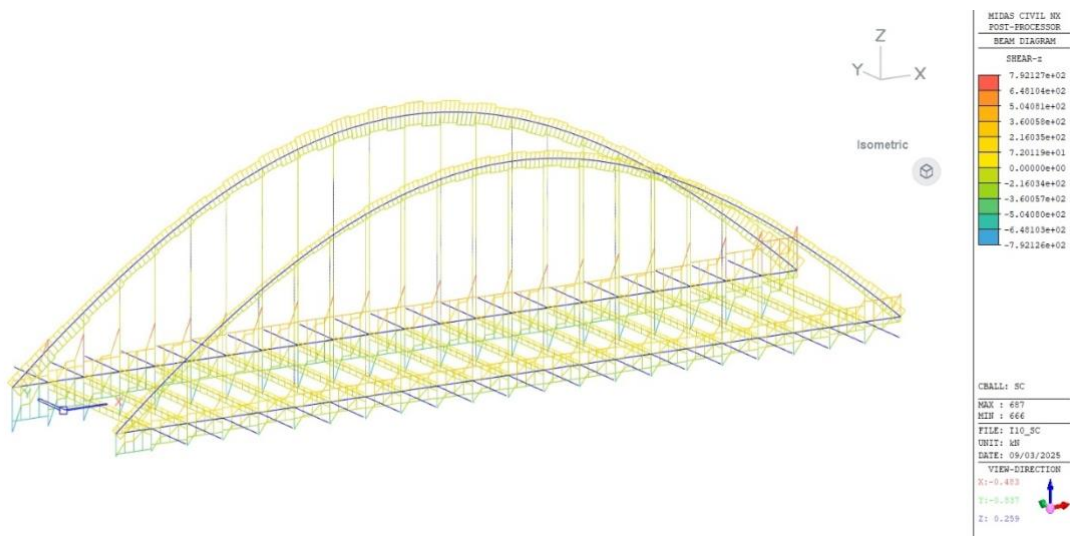


Figura 191. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final

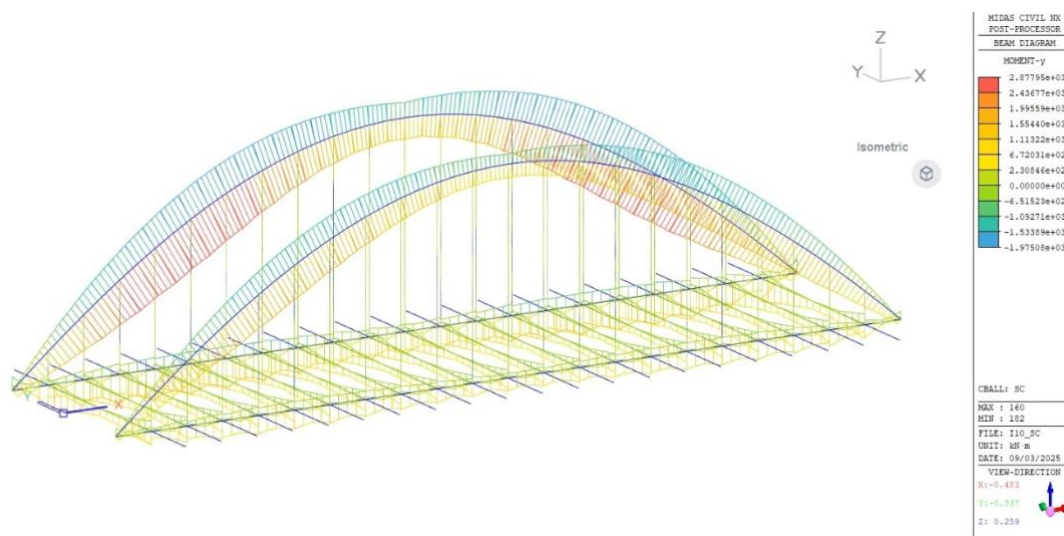


Figura 192. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final

La siguiente figura muestra las tensiones obtenidas.

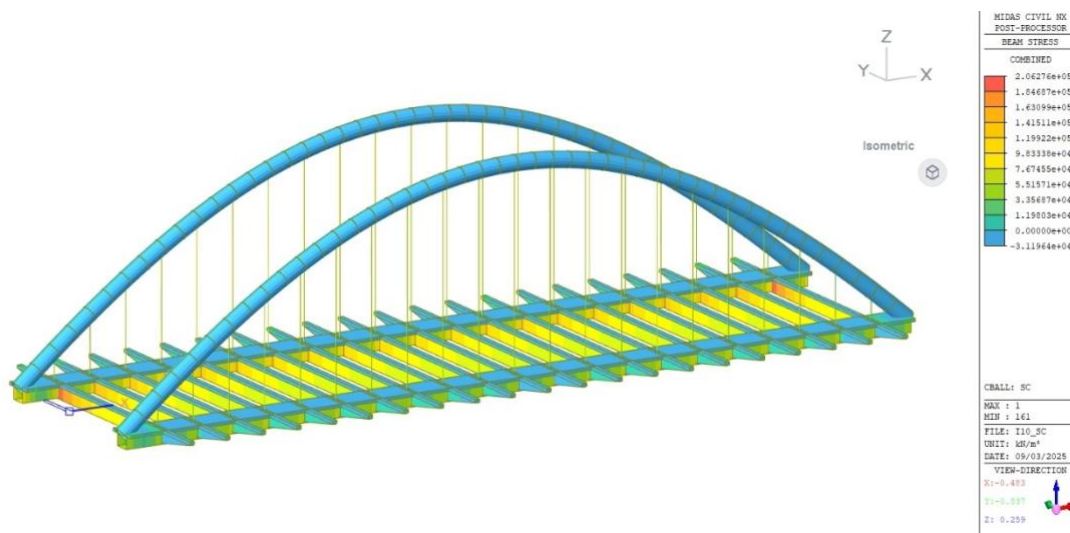


Figura 193. Tensiones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso para la iteración final

Los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en los elementos en este caso de carga se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Valores máximos y mínimos para el caso de sobrecarga de uso

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	134	-1483	226	-226	2878	-1975	-10	-32
Vigas Rectangulares	2937	-962	603	-603	1998	-888	113	9
Transversales	912	0	70	-117	1516	-673	207	67
Cables	186	0	0	0	0	0	61	25

12.2.1.3. CARGA PERMANENTE

Las reacciones obtenidas en el caso de carga permanente se muestran a continuación.

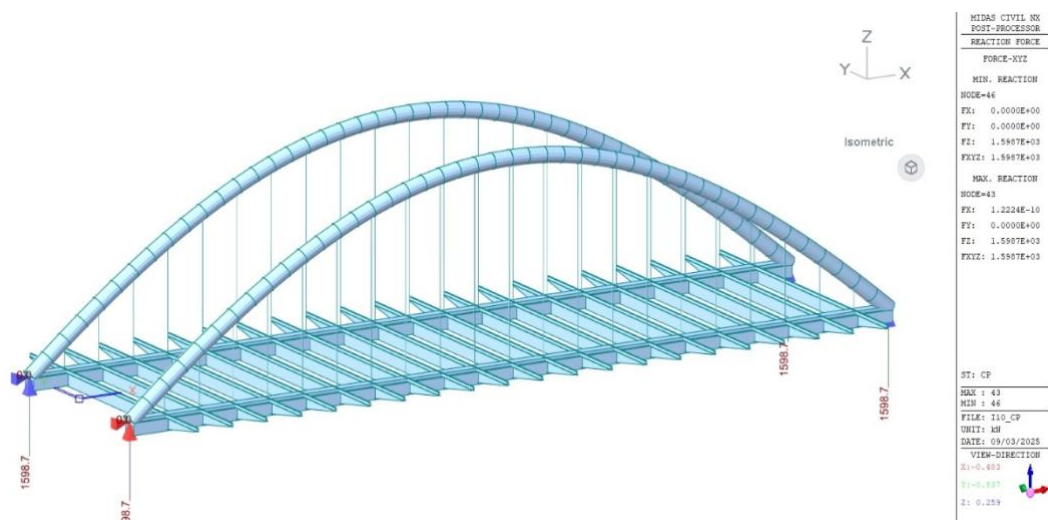


Figura 194. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración final

Las siguientes figuras muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos.

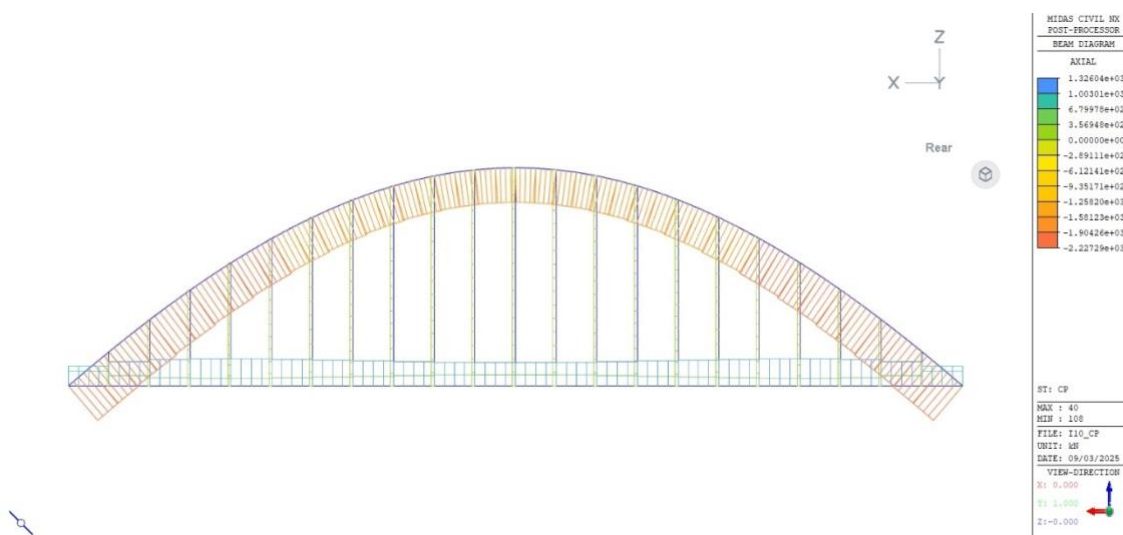


Figura 195. Axiles obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final

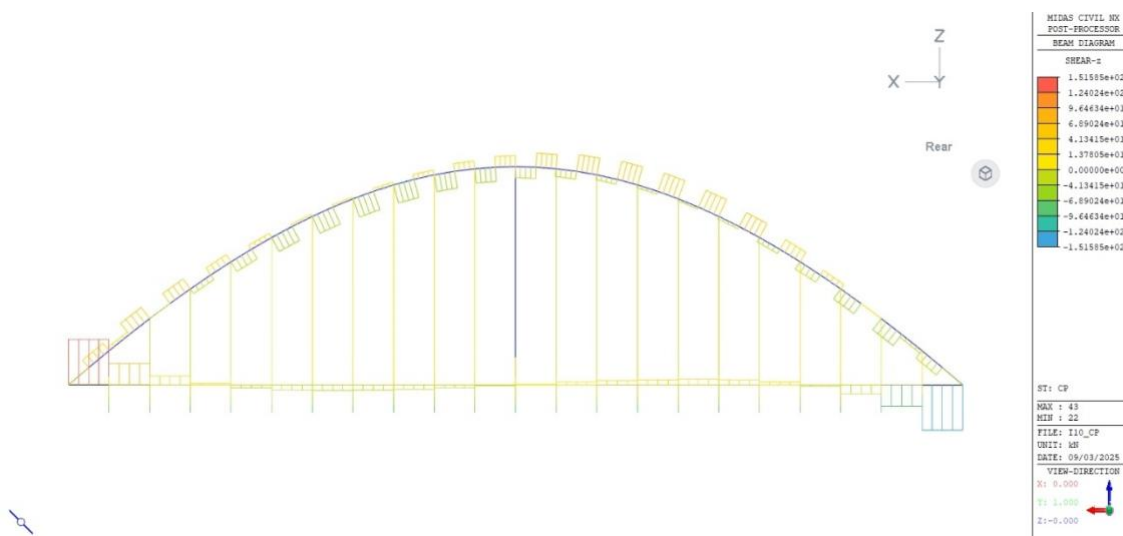


Figura 196. Cortantes obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final

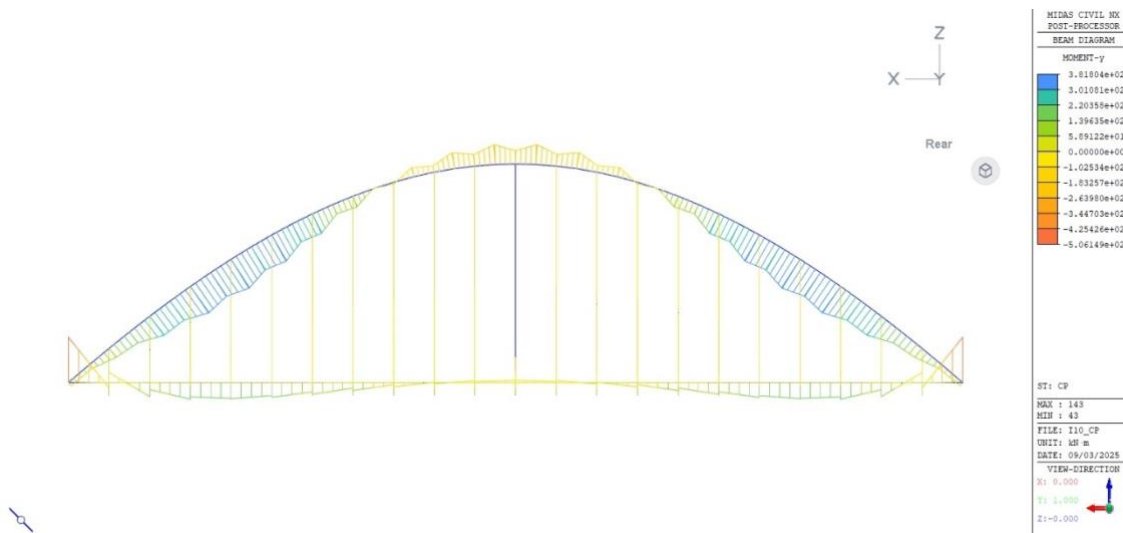


Figura 197. Momentos obtenidos en el caso de carga permanente para la iteración final

Las tensiones obtenidas se muestran a continuación.

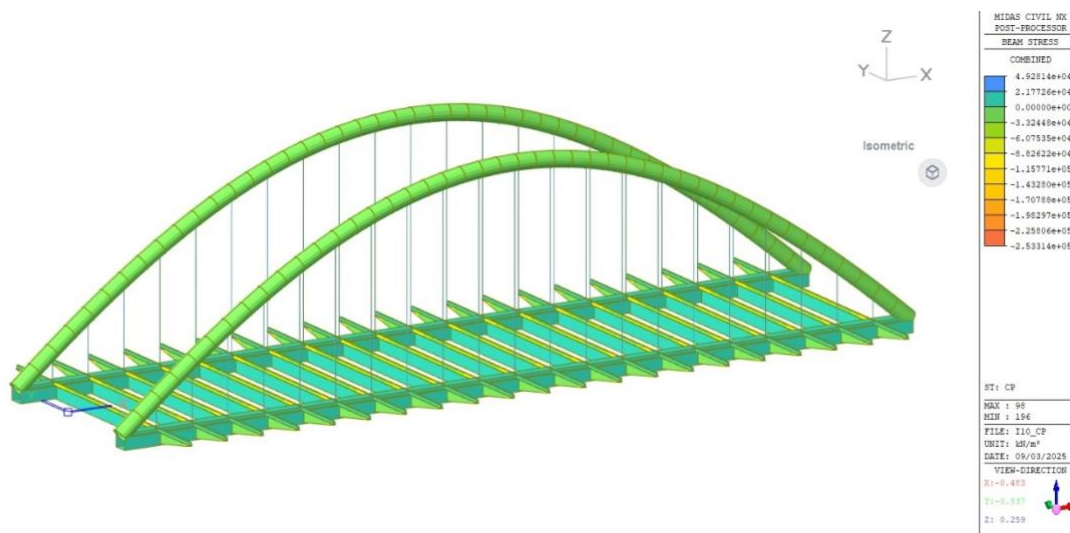


Figura 198. Tensiones obtenidas en el caso de carga permanente para la iteración final

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en cada elemento para este caso de carga.

Tabla 12. Valores máximos y mínimos en el caso de carga permanente para la iteración final

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1696	-2227	65	-65	382	-220	-5	-9
Vigas Rectangulares	1326	959	152	-152	186	-506	20	10
Transversales	50	-24	91	-91	56	-138	9	9
Cables	159	71	0	0	0	0	50	23

12.2.1.4. CANTIDADES DE MATERIAL

La siguiente tabla recoge la cantidad de material necesaria para realizar esta iteración.

Tabla 13. Cantidad de material necesaria para la iteración final

S355 (kg)	406923
S460 (kg)	14415
HA-35 [m ³]	1129

12.2.1.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, en este apartado se recoge un resumen de los valores obtenidos, así como la combinación resultante de ellos.

Se muestran, en primer lugar, las reacciones.

Tabla 14. Reacciones obtenidas en la iteración final

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	8092
SC	1338
CP	1599
Suma	11029

Finalmente, la siguiente tabla recoge los axiles, cortantes, momentos y tensiones máximos y mínimos y la resultante de su combinación.

Tabla 15. Valores máximos y mínimos obtenidos y combinación de cargas

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-8224	-11124	434	-434	2180	-2237	-21	-51
	Vigas Rectangulares	8224	8224	586	-586	965	-2694	134	75
	Transversales	0	-18	292	-292	773	-593	69	-90
	Cables	543	218	0	0	0	0	169	69
SC	Arco	134	-1483	226	-226	2878	-1975	-10	-32
	Vigas Rectangulares	2937	-962	603	-603	1998	-888	113	9
	Transversales	912	0	70	-117	1516	-673	207	67
	Cables	186	0	0	0	0	0	61	25
CP	Arco	-1696	-2227	65	-65	382	-220	-5	-9
	Vigas Rectangulares	1326	959	152	-152	186	-506	20	10
	Transversales	50	-24	91	-91	56	-138	9	9
	Cables	159	71	0	0	0	0	50	23
Suma	Arco	-9786	-14834	725	-725	5440	-4432	-36	-92
	Vigas Rectangulares	12487	8221	1341	-1341	3149	-4088	267	94
	Transversales	962	-42	453	-500	2345	-1404	285	-14
	Cables	888	289	0	0	0	0	280	117

Como se puede observar, todos los valores entran dentro de la limitación de tensiones de servicio establecida, por lo que estos resultados se consideran válidos.



12.2.1.6. COMPROBACIÓN DEL ARCO A PANDEO

Por último, se va a comprobar la nueva geometría a pandeo. A la vista de los resultados obtenidos en la iteración 8, esta vez la comprobación se va a realizar exclusivamente para la combinación de cargas a tiempo infinito. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$P_{crit} \leq \frac{\pi^3 * r^3 * \left(e_a + \frac{r}{42}\right) * E}{L^2} \rightarrow 14834 \leq \frac{\pi^3 * r^3 * \left(0,02 + \frac{r}{42}\right) * 2,1 * 10^8}{93^2} \rightarrow$$
$$\rightarrow r \geq 0,797 \text{ m} \rightarrow D \geq 1,59 \text{ m}$$

Este cálculo demuestra que la geometría del arco resulta válida en el cálculo a pandeo. Como se puede observar, la sección transversal del arco no puede ser reducida, ya que dejaría de cumplir la comprobación a pandeo. La de las vigas longitudinales, por otro lado, tampoco puede reducirse, ya que esto implicaría un aumento de axiles en el arco que significaría, de nuevo, el incumplimiento de la comprobación a pandeo. Por lo tanto, los valores de los parámetros de esta iteración final se dan por válidos y la geometría por optimizada.

13 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado, se van a comparar algunos de los resultados obtenidos en las iteraciones para sacar información acerca del comportamiento de los arcos.

13.1 COMPARACIÓN DE FLECHAS

En primer lugar, se van a comparar los resultados obtenidos en la fase metálica para la flecha de 14,0 metros y la de 20,0 metros. Se ha seleccionado esta fase porque, al ser una fase de carga repartida a lo largo de toda la luz, los resultados resultan más fácilmente interpretables.

Los axiles obtenidos en la iteración 1 y en la iteración 2 se comparan en la siguiente tabla:

Tabla 16. Comparación de axiles de las iteraciones 1 y 2

		Iteración 1		Iteración 2	
		Axil [kN]		Axil [kN]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-9120	-10700	-6558	-8695
	Vigas Rectangulares	9118	9115	6551	6551
	Transversales	0	-14	0	-15
	Cables	450	151	456	146

Como se puede observar, los axiles en el arco disminuyen en la iteración 2, que es la que tiene una flecha de 20,0 metros. Estos resultados confirman la teoría descrita en el presente TFM acerca de la relación entre la fuerza horizontal del arco y de las vigas longitudinales ya que, de acuerdo con la ecuación que se muestra a continuación, ante una carga similar y una luz igual, la fuerza horizontal del arco y de la viga aumenta de manera inversamente proporcional a la flecha.

$$H = \frac{q}{x} = \frac{qL^2}{8h}$$

donde

- H axil en la viga longitudinal inferior
- q carga repartida
- x curvatura del arco
- L luz del puente
- h flecha del arco

13.2 COMPARACIÓN DE NÚMERO DE VIGAS TRANSVERSALES Y PÉNDOLAS

A continuación, se va a realizar la comparación de los resultados obtenidos en las iteraciones 2 y 3, cuya única diferencia es que en la segunda de ellas se ha aumentado el número de vigas transversales y péndolas de 25 a 30.

La siguiente tabla muestra la comparación de las tensiones totales.

Tabla 17. Comparación de tensiones de las iteraciones 2 y 3

		Iteración 1		Iteración 2	
		Tensiones [MPa]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
Totales	Arco	-61	-141	-60	-142
	Vigas Rectangulares	369	102	371	100
	Transversales	307	-67	267	-57
	Cables	231	81	196	57

Como muestra esta tabla, el aumento de vigas transversales y péndolas solo ha afectado a los valores de las tensiones totales halladas en estos, mientras que los arcos y las vigas longitudinales apenas se han visto afectados por este cambio.

13.3 COMPARACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES

Se comparan en este apartado los resultados de las iteraciones 8 y final. La diferencia que existe entre estas es el aumento sustancial de la sección transversal del arco y el ligero aumento en la sección transversal de las vigas longitudinales. Los parámetros utilizados en cada caso se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18. Valores de los parámetros utilizados en las iteraciones 8 y final

		Iteración 8	Iteración Final	
Flecha de los arcos		20,0	20,0	m
Diámetro de los arcos		0,5	1,6	m
Vigas rectangulares	H	1,4	1,2	m
	B	1,3	1,6	m
Nº transversales y péndolas		21	21	a cada lado

La siguiente tabla muestra la comparación de tensiones entre estas iteraciones.

Tabla 19. Comparación de tensiones de las iteraciones 8 y final

		Iteración 8		Iteración Final	
		Tensiones [MPa]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
Totales	Arco	-153	-238	-36	-92
	Vigas Rectangulares	314	-40	267	94
	Transversales	314	-80	285	-14
	Cables	268	107	280	117

Como se puede observar en esta tabla, el principal cambio entre las iteraciones es la disminución de tensiones en el arco y, en menor medida, en las vigas longitudinales. Este

resultado resulta lógico, ya que el aumento de sección transversal en estos implica una mayor cantidad de material con capacidad de soportar las cargas que se aplican sobre ellos y, por tanto, una disminución de tensiones.

Se comparan ahora los axiles obtenidos en fase metálica.

Tabla 20. Comparación de axiles de las iteraciones 8 y final

		Iteración 8		Iteración Final	
		Axil [kN]		Axil [kN]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-5890	-7682	-8224	-11124
	Vigas Rectangulares	5884	5884	8224	8224
	Transversales	0	-18	0	-18
	Cables	562	227	543	218

Como muestra la tabla, los axiles en las vigas longitudinales y el arco aumentan considerablemente. Esto es debido al aumento de peso propio que debe soportar el puente, aunque, como se ha visto anteriormente, esto no supone un aumento de las tensiones en ellos debido al incremento de la sección transversal.

13.4 COMPARACIÓN DE MODELOS

Por último, se van a comparar los resultados obtenidos en el modelo del puente existente con los de la iteración final.

13.4.1 COMPARACIÓN DE REACCIONES

En primer lugar, se han comparado las reacciones obtenidas en cada uno de los casos.

Tabla 21. Reacciones en la iteración final y en el caso existente

	Reacciones [kN]	
	Iteración Final	Caso Existente
Rx Arco		19654
Ry Arco	11029	6239
Rz Arco		145
Rx Vigas Rectang.		-2791
Ry Vigas Rectang.		1130
Rz Vigas Rectang.		175
Rx Doble T Long.		-30
Ry Doble T Long.		1109
Rz Doble T Long.		0

Comparando estos valores, se observa que la reacción vertical total es similar en ambos casos, aunque en el caso del puente existente está algo más repartida con las vigas longitudinales debido a que estas se encuentran también empotradas.

Sin embargo, la principal diferencia radica en que en la iteración final solo existen reacciones verticales en los apoyos del arco, mientras que en el caso existente hay reacciones horizontales, verticales, transversales y momentos en todos los sentidos en 7 apoyos, lo que hace que la diferencia de cimentaciones necesarias para cada caso sea sustancial. Además, el modelo del puente existente tiene unas importantes reacciones horizontales que dificultan aún más la construcción de unas cimentaciones capaces de soportar estas cargas.

13.4.2 COMPARACIÓN DE AXILES

A continuación, se muestran los diagramas de axiles y los resultados obtenidos para la fase metálica en cada caso.

Tabla 22. Valor de los axiles obtenidos en la iteración final y en el caso del puente existente

		Iteración Final		Caso Existente	
		Axil [kN]		Axil [kN]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-8224	-11124	-10839	-12146
	Vigas Rectangulares	8224	8224	480	-217
	Transversales	0	-18	29	-96
	Cables	543	218	291	235

Se observa en la tabla que los axiles en las vigas rectangulares son mucho menores en el caso de las vigas longitudinales del puente existente, mientras que en el arco son similares. La explicación de estos resultados radica en que, en el caso existente, el arco se lleva casi todo el axil a los empotramientos, que es mucho mayor que en la iteración final si se tiene en cuenta la diferencia de secciones transversales que existe entre ellos (1,6 metros de diámetro en la iteración final y 1,0 metro en el caso existente). Este supuesto es fácilmente comprobable mediante una comparación de las tensiones en estos miembros, como la que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 23. Comparación de tensiones en el arco y en las vigas longitudinales para la fase metálica de la iteración final y el caso existente

		Iteración Final		Caso Existente	
		Tensiones [MPa]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-21	-51	-64	-102
	Vigas Rectangulares	134	75	74	-27

Esta tabla demuestra que, efectivamente, en la iteración final el arco tiene unas tensiones bajas en comparación con las vigas rectangulares, mientras que en el caso existente estas son mayores en el arco.

Se van a comparar ahora los diagramas de axiles.

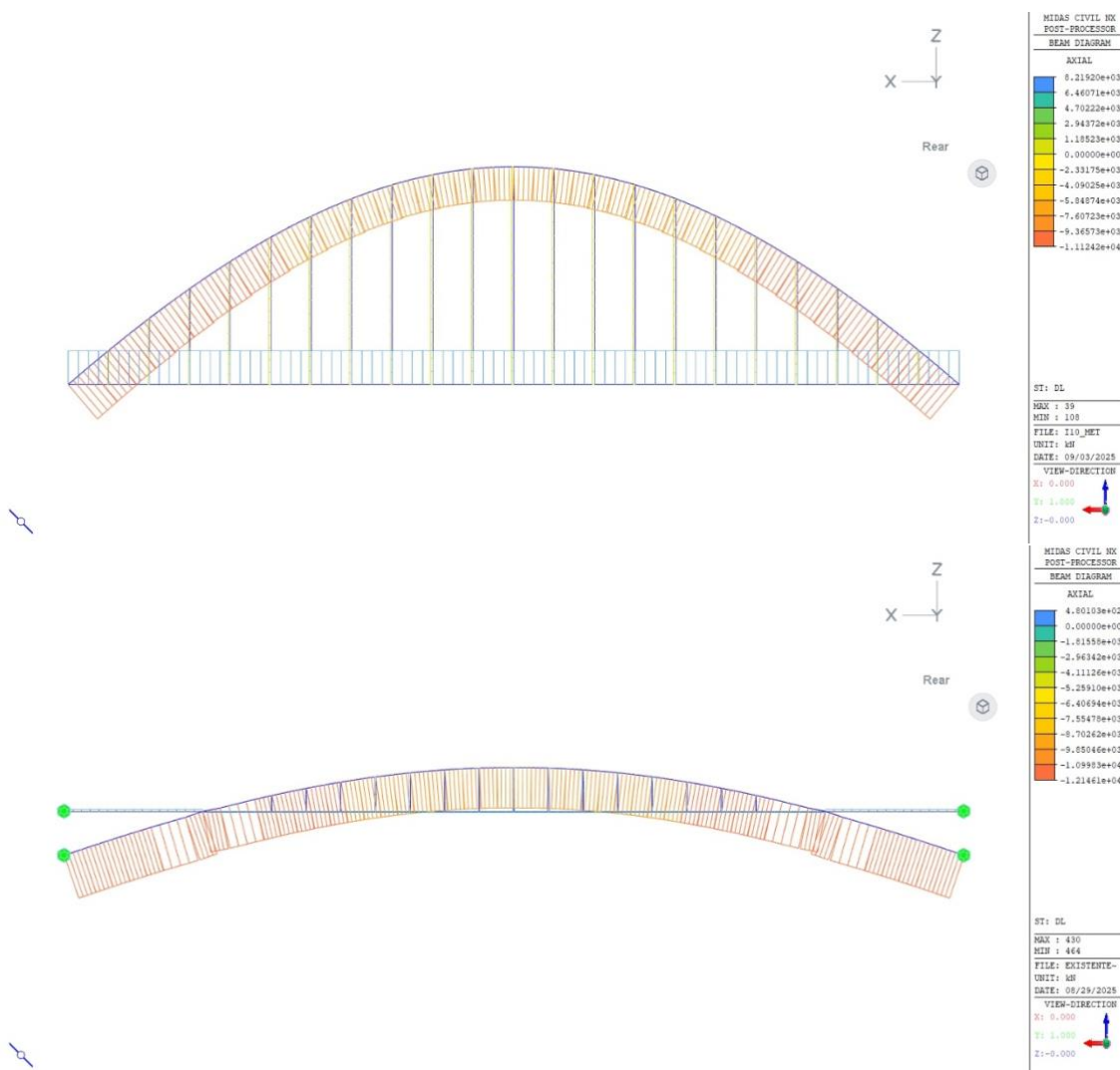
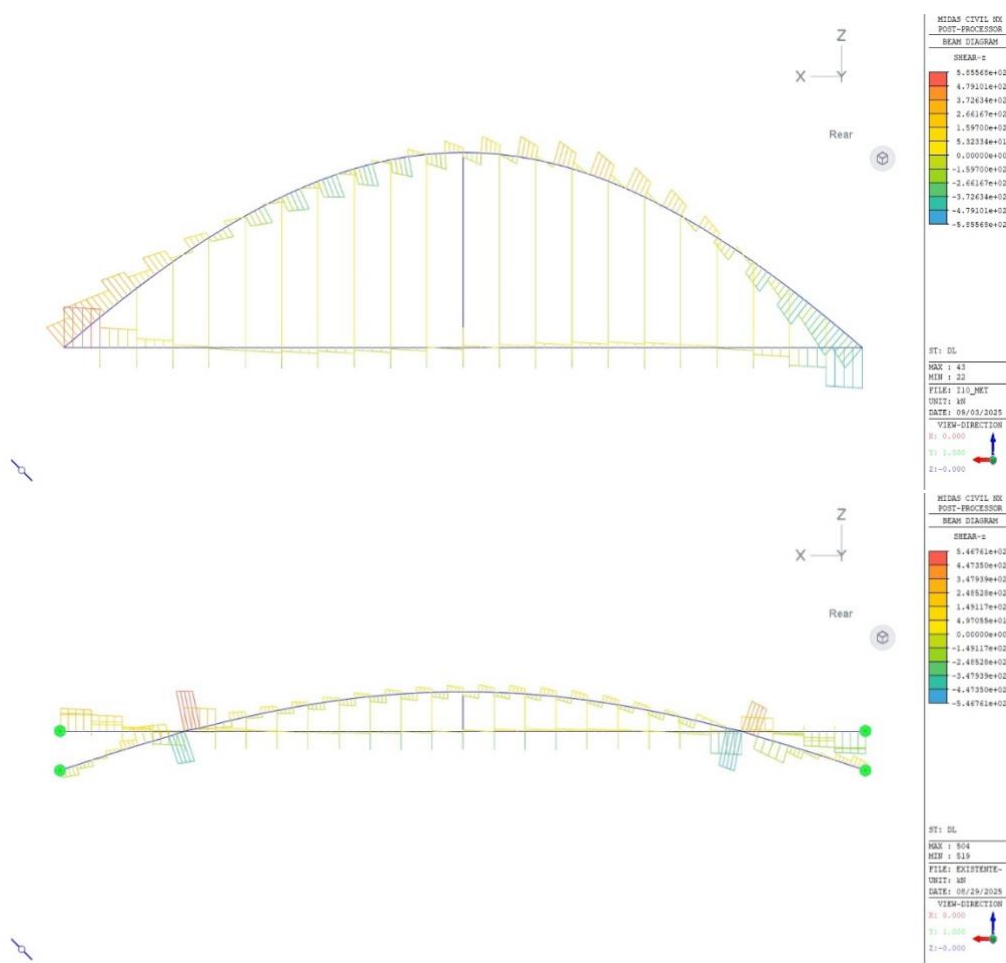


Figura 199. Comparación de diagramas de axiles de la iteración final (superior) y del caso del puente existente (inferior)

A la vista de estos diagramas, se pueden sacar una conclusión principal, y es que en el primero de los casos el tablero actúa como tirante del arco, recibiendo un axil igual al esfuerzo horizontal que se produce en este, mientras que en el segundo de los casos es el arco el que recoge el axil casi en su totalidad de forma independiente al tablero, que casi no tiene axil, ya que este es recogido por los empotramientos del arco y no por el tablero como tirante.

13.4.3 COMPARACIÓN DE CORTANTES

La siguiente figura recoge el diagrama de cortantes de cada uno de los casos en la fase metálica.



Se observa cómo, en ambos casos el cortante máximo se da en el punto de unión del tablero con el arco y, en menor medida, en los arranques del tablero en el modelo del puente existente. Estos puntos de máximo cortante se deben a que estos son puntos de transmisión de esfuerzos del tablero al arco.

13.4.4 COMPARACIÓN DE MOMENTOS

Se presenta a continuación una comparación de los diagramas de momentos de cada solución.

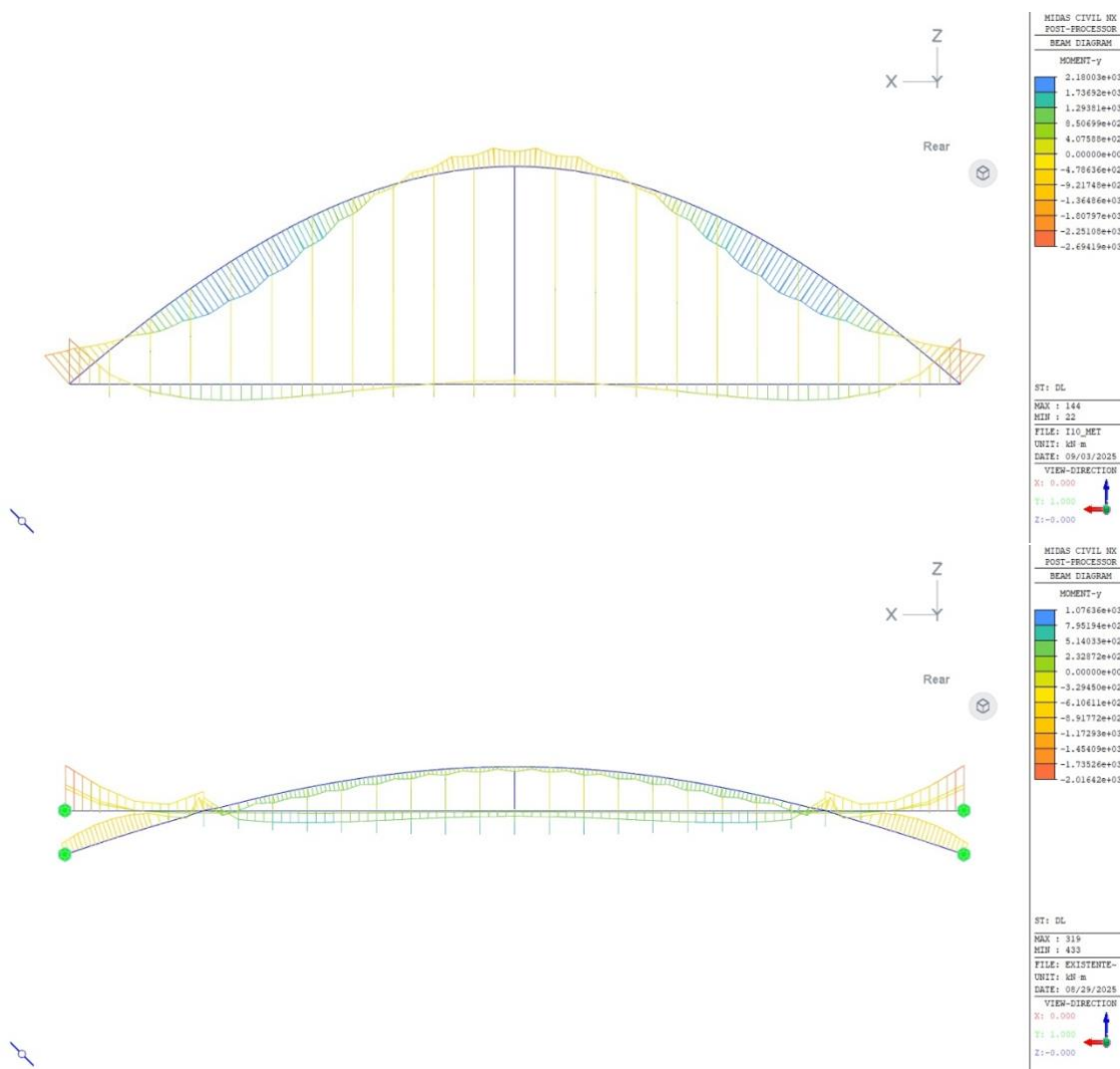


Figura 201. Comparación del diagrama de momentos de la iteración final (superior) y el modelo del puente existente (inferior)

Si se observa el diagrama de momentos de la iteración final, se muestra una forma negativa en la parte central y la cercana a los apoyos y positiva en las zonas intermedias. Esto es debido a que la línea de presiones se encuentra por debajo en la zona central y por encima en las zonas intermedias, ya que el modelo no se tiene una funicularidad perfecta. Sin embargo, se observa que los momentos no son muy grandes, por lo que el arco se asemeja a esta forma. En los nudos aparecen momentos negativos debidos a la conexión rígida entre el arco y el tablero.

Centrando el análisis ahora en el diagrama de momentos del modelo del puente existente, se observan dos picos principales de momento: en los empotramientos de las vigas y en los nudos de encuentro arco-tablero. El momento negativo en ambos casos resulta lógico, pues la carga que ha de soportar el empotramiento forma momento negativo hacia los extremos, y el nudo de encuentro arco-tablero se comporta como un apoyo intermedio que recibe momento negativo debido a las cargas en la dirección -Z.

13.4.5 AHORRO DE MATERIAL

Por último, se va a realizar una comparativa del material necesario para la construcción de cada modelo.

Tabla 24. Material necesario para realizar la iteración final y el modelo del puente existente

	Iteración Final	Caso Existente
S355 (kg)	406923	472971
S460 (kg)	14415	2285
HA-35 [m ³]	1129	864

Como se aprecia en la tabla, la solución obtenida en el estudio paramétrico permite reducir la cantidad de acero necesaria para la construcción del puente. En cuanto al hormigón empleado en el tablero y los arcos, su volumen aumenta en esta alternativa debido a la mayor luz del puente. No obstante, el ahorro más relevante en términos de recursos, impacto ambiental y huella de carbono se encuentra en la simplificación de la cimentación.

En la solución propuesta, la única transmisión entre la estructura y la cimentación corresponde a la reacción vertical generada por el peso propio de la estructura y la sobrecarga, dado que el diseño estructural plantea que el tablero absorba la totalidad del empuje horizontal del arco. En cambio, en la solución actual, tanto el arco como el tablero transmiten esfuerzos significativos a la cimentación. Esto, combinado con la mala calidad del terreno aluvial de la Ría de Bilbao, obliga a recurrir a una cimentación profunda y de gran complejidad, lo que implica un considerable incremento de recursos, plazos de ejecución, impacto sobre el entorno y huella de carbono.



14 CONCLUSIONES

14.1 CONCLUSIONES RELATIVAS AL ARCO

- El arco es un elemento que ha sido utilizado por muchas civilizaciones a lo largo de la historia desde hace 6000 años: persas, micénicos, romanos...
- La búsqueda de una definición para el arco ha sido objeto de debate durante siglos, especialmente durante el Renacimiento. Personas muy importantes en la historia como Da Vinci, Palladio o Caius Julius Lácer – supuesto ingeniero del puente de Alcántara – han tratado de aportar su definición.
- Existen diferentes tipos de arcos: según su sección, según la posición del tablero, según el material, según su forma, según la presencia de enjutas, según las condiciones de los apoyos... Dependiendo de estas características, el comportamiento del arco en el conjunto puede ser muy distinto.
- El arco constituye el antifunicular de la ley de flectores originada por una carga permanente. Es precisamente dicha carga la que determina la dirección del esfuerzo, o línea de presión, haciendo que esta coincida con la directriz del arco. Este comportamiento permite que los arcos trabajen “por forma”, es decir, principalmente a esfuerzo axial.
- Si se añade un tablero inferior en los arranques de un arco, este actúa como un tirante, recogiendo el esfuerzo horizontal que se genera en el arco.

14.2 CONCLUSIONES RELATIVAS A LA PARAMETRIZACIÓN DE ESTRUCTURAS

- El modelado paramétrico es un proceso utilizado desde hace unos 300 años. Gaudí, entre otros, basaba sus diseños en la búsqueda de la antifunicularidad a través de modelos paramétricos analógicos.
- En 1963 se da el salto al modelado paramétrico computacional de la mano de Ivan Sutherland y su Sketchpad.
- Las herramientas de modelado paramétrico, tales como Grasshopper, permiten facilitar el proceso iterativo de la búsqueda de la forma óptima de una estructura.
- Gracias a la parametrización de estructuras, el ahorro de tiempo y recursos aumenta considerablemente.
- Si se conecta una herramienta de modelado paramétrico a una de cálculo de estructuras como Midas Civil NX, las posibilidades en el mundo ingenieril aumentan exponencialmente.
- El nivel de detalle, así como la flexibilidad del modelo paramétrico, condicionan la funcionalidad de la herramienta de cálculo de estructuras que lo complementa.
- Grasshopper, en particular, es una potente herramienta de modelado paramétrico que facilita el diseño de manera intuitiva, con un sinfín de posibilidades creativas.
- Midas Civil NX, por su parte, es una herramienta de cálculo que ofrece resultados de manera rápida y eficiente, con una interfaz simple y visualmente clara.

14.3 CONCLUSIONES SOBRE EL CASO DE ESTUDIO

14.3.1 ARCO

- En todas las combinaciones analizadas, la sección crítica del arco se encuentra en los arranques.
- Un aumento en la sección transversal del arco implica una mayor cantidad de esfuerzos axiales actuantes sobre él, pero una reducción de las tensiones obtenidas.
- La reducción de la flecha del arco implica un aumento en los esfuerzos de la estructura como consecuencia del aumento de la componente horizontal del axil del arco.
- En el modelo del puente existente, con tablero intermedio, el axil es recogido gran parte por el arco, que lo dirige hacia sus empotramientos. En la iteración final del caso de estudio, por otro lado, se observa que existe un axil tanto en el arco como en el tablero, correspondiente este último a la componente horizontal del esfuerzo axial del primero.
- El pandeo juega un papel muy importante en el dimensionamiento del arco, ya que un arco muy esbelto sometido a compresiones tan elevadas puede pandear con facilidad.
- Se ha comprobado que la sección óptima del arco en el caso de estudio es de 1,6 metros de diámetro, con una flecha de 20,0 metros.

14.3.2 VIGA LONGITUDINAL

- Un aumento en la sección de la viga longitudinal implica un aumento en la cantidad de esfuerzos recogidos, pero una reducción de las tensiones en la viga gracias a este incremento de sección transversal.
- El axil en la viga longitudinal es igual a la componente horizontal del axil del arco.
- La sección transversal de la viga longitudinal viene determinada por el diámetro del arco.
- La sección transversal óptima de la viga longitudinal para el caso de estudio es de 1,2 metros de alto y 1,6 metros de base.

14.3.3 PÉNDOLAS Y VIGAS TRANSVERSALES

- La variación del número de péndolas y vigas transversales afecta principalmente a las tensiones y esfuerzos obtenidos en estos.
- El número de estas péndolas y vigas transversales viene limitado por las tensiones que se producen en las segundas, ya que deben de ir siempre debajo de las péndolas para transmitir adecuadamente los esfuerzos en los puntos críticos de la estructura.
- Pese a que las péndolas tienen tensiones algo alejadas de la limitación de tensiones de diseño propuesta, no conviene que se acerquen en exceso al límite elástico debido a que son un componente crítico de la estructura que se somete a condiciones de fatiga.
- El número óptimo de péndolas a cada lado y vigas transversales bajo cada par de estas en el caso de estudio es de 21.



14.3.4 REACCIONES

- Las reacciones verticales producidas en el puente de arco con tablero inferior aumentan con el aumento del peso propio de la estructura. La carga permanente y la sobrecarga de uso, como es lógico, producen las mismas reacciones verticales en todas las iteraciones, ya que la carga no varía.
- Pese a que las reacciones verticales en la iteración final y en el modelo del puente existente son similares, la principal diferencia radica en la importante componente horizontal de las reacciones en el segundo de los casos. Esto, unido a los momentos que también se generan en las reacciones, hace que la cimentación necesaria para realizar estos empotramientos sea mucho más grande y costosa que en el caso del puente de arco superior, que se encuentra biapoyado.

14.3.5 AHORRO DE MATERIAL

- La solución de arco superior permite un ahorro en cantidad de acero, aunque aumenta por otro lado el hormigón necesario para su construcción, si se considera estrictamente la estructura del puente.
- La gran diferencia en ahorro de material se observa en las cimentaciones requeridas para cada solución. En la solución propuesta, la única transmisión entre la estructura y la cimentación corresponde a la reacción vertical generada por el peso propio de la estructura y la sobrecarga, dado que el diseño estructural plantea que el tablero absorba la totalidad del empuje horizontal del arco. En cambio, en la solución actual, tanto el arco como el tablero transmiten esfuerzos significativos a la cimentación, además de que se encuentran empotrados. Esto, combinado con la mala calidad del terreno aluvial de la Ría de Bilbao, obliga a recurrir a una cimentación profunda y de gran complejidad, lo que implica un considerable incremento de recursos, plazos de ejecución, impacto sobre el entorno y huella de carbono.

15 ANEXO DE RESULTADOS

15.1.1 ITERACIÓN 1

La primera iteración realizada tiene los siguientes parámetros fijados:

Tabla 25. Parámetros de la iteración 1

Flecha de los arcos	14,0	m
Diámetro de los arcos	1,0	m
Vigas rectangulares	H	1,2
	B	1,0
Nº transversales y péndolas	25	a cada lado

La geometría resultante tras la aplicación de estos parámetros, sin incluir la losa de hormigón, es la siguiente:

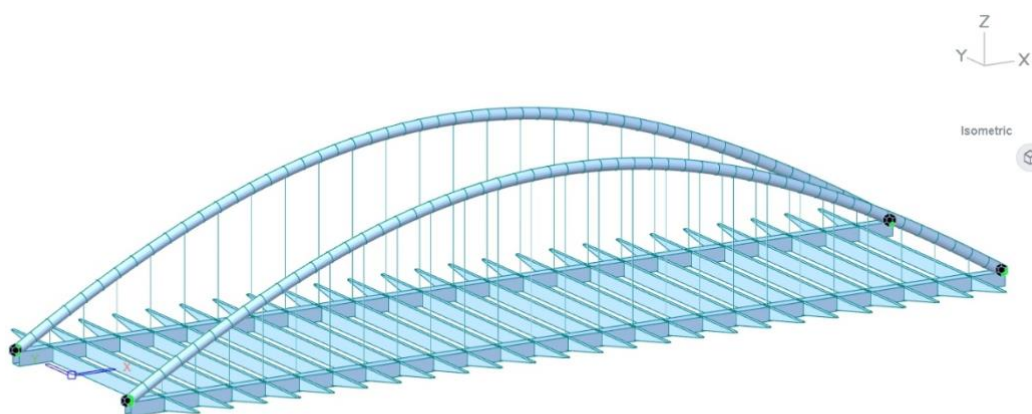


Figura 202. Estructura metálica en la iteración 1

Los resultados obtenidos en la iteración 1 para las diferentes fases analizadas se muestran en los siguientes apartados.

15.1.1.1. FASE METÁLICA

Se analiza, en primer lugar, la fase metálica. En ella, la estructura metálica debe soportar todo el peso del hormigón.

Se muestran a continuación las reacciones obtenidas:

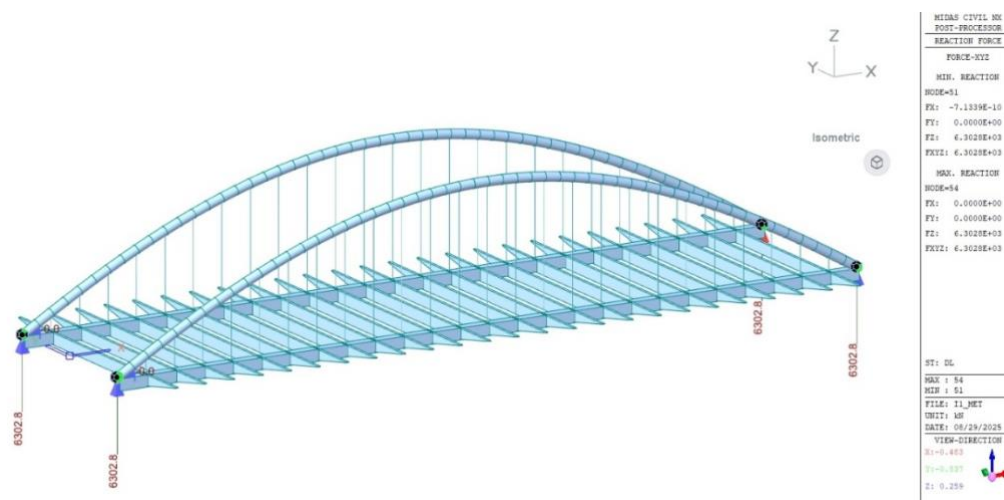


Figura 203. Reacciones en la fase metálica para la iteración 1

Seguidamente, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en la fase metálica.

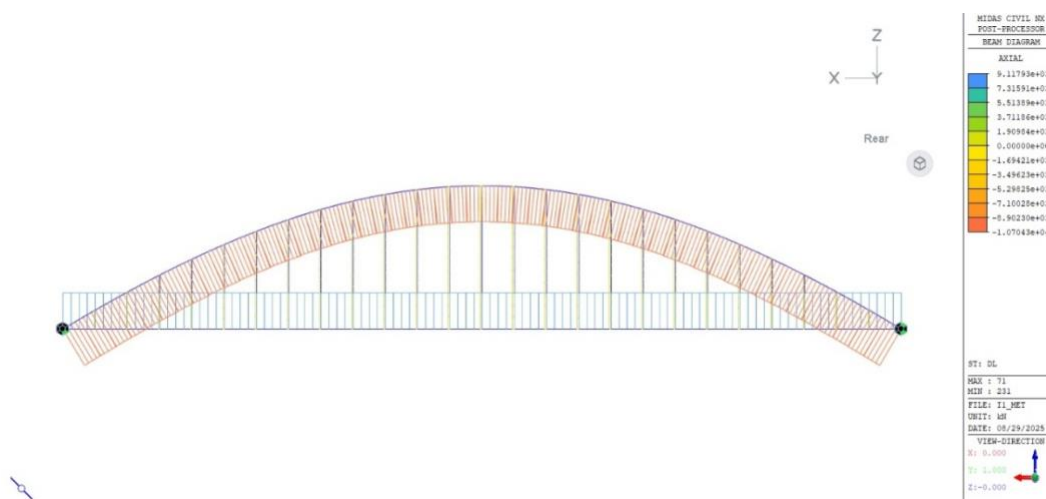


Figura 204. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 1

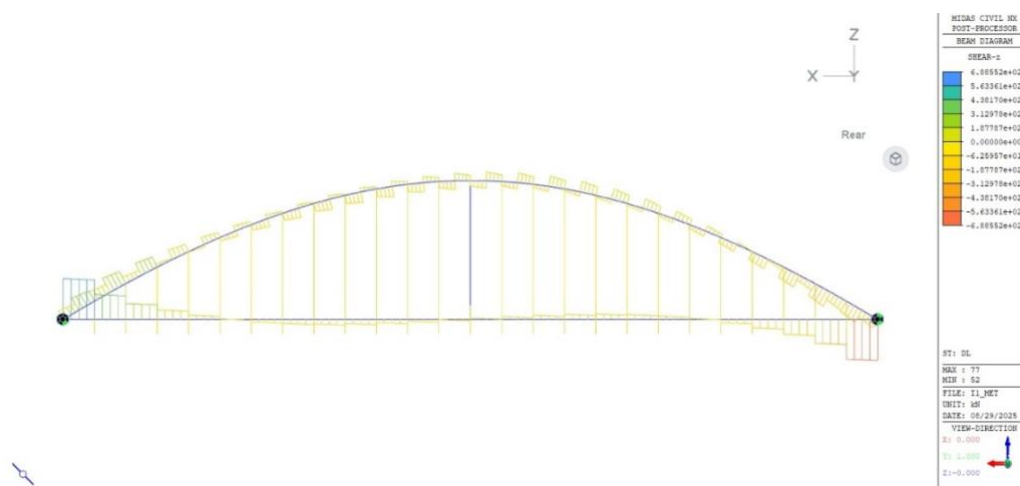


Figura 205. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 1

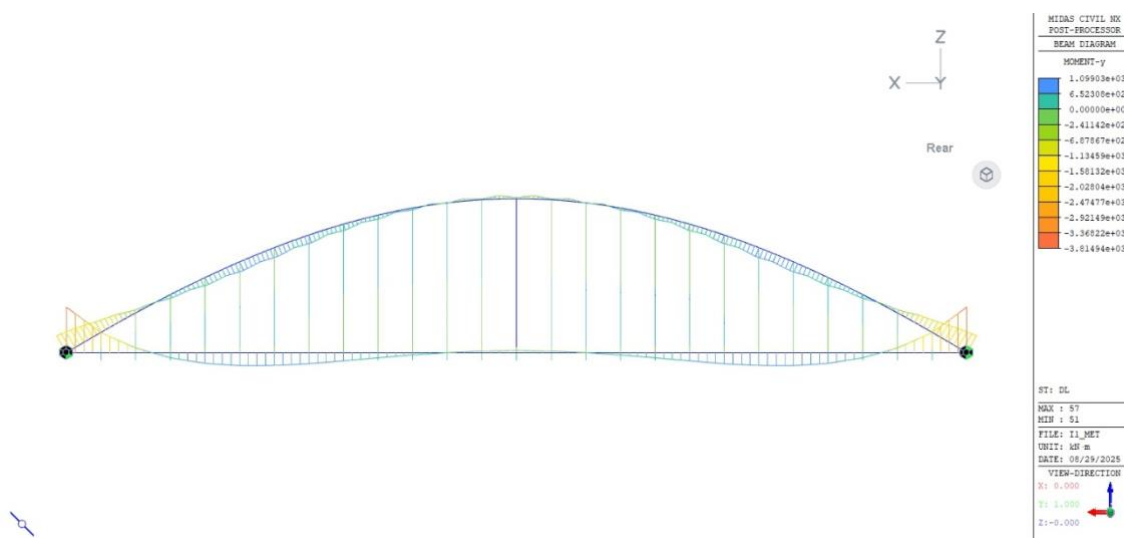


Figura 206. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 1

En la siguiente figura, se indican las tensiones halladas en la estructura metálica en esta fase.

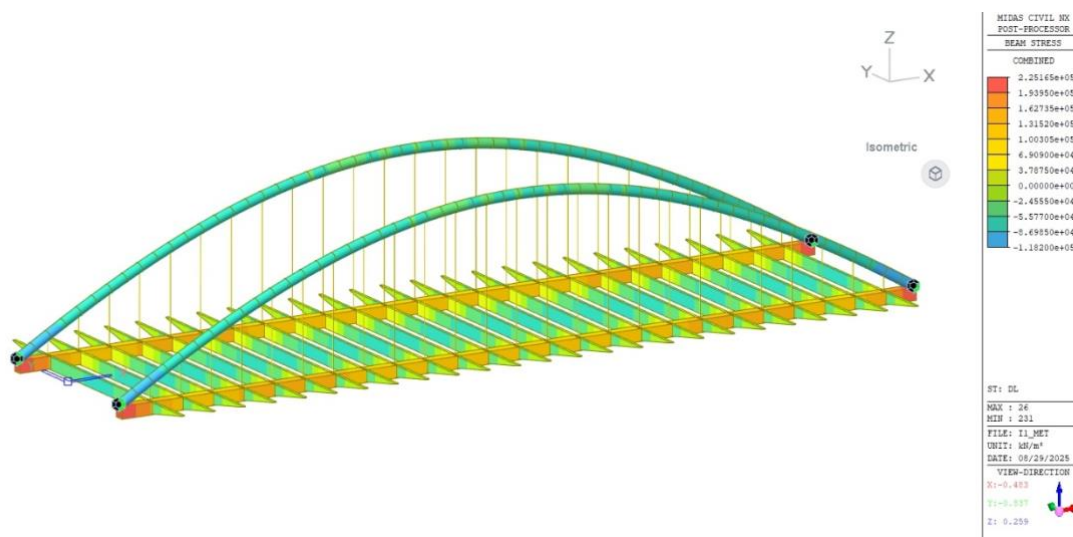


Figura 207. Tensiones en fase metálica para la iteración 1

Por último, se indican en la siguiente tabla los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento.

Tabla 26. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 1

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-9120	-10700	268	-268	796	-1654	-51	-119
Vigas Rectangulares	9118	9115	687	-687	1099	-3815	225	106
Transversales	0	-14	243	-243	640	-464	54	-74
Cables	450	151	0	0	0	0	140	49

15.1.1.2. SOBRECARGA

El siguiente caso de carga analizado es el de sobrecarga de uso. En él, se aplican las sobrecargas debidas al paso de vehículos en el puente. Esta carga es soportada por el entramado metálico y la anchura de losa de hormigón correspondiente a la homogeneización de esta a acero en un tiempo inicial t_0 .

Se muestran, en primer lugar, las reacciones obtenidas en esta fase:

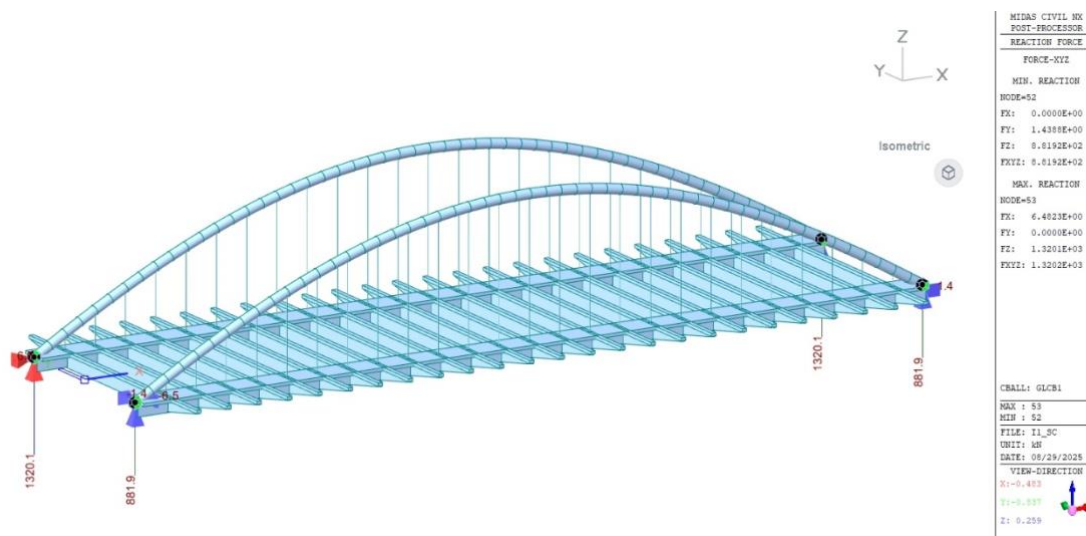


Figura 208. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1

A continuación, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en este caso de carga.

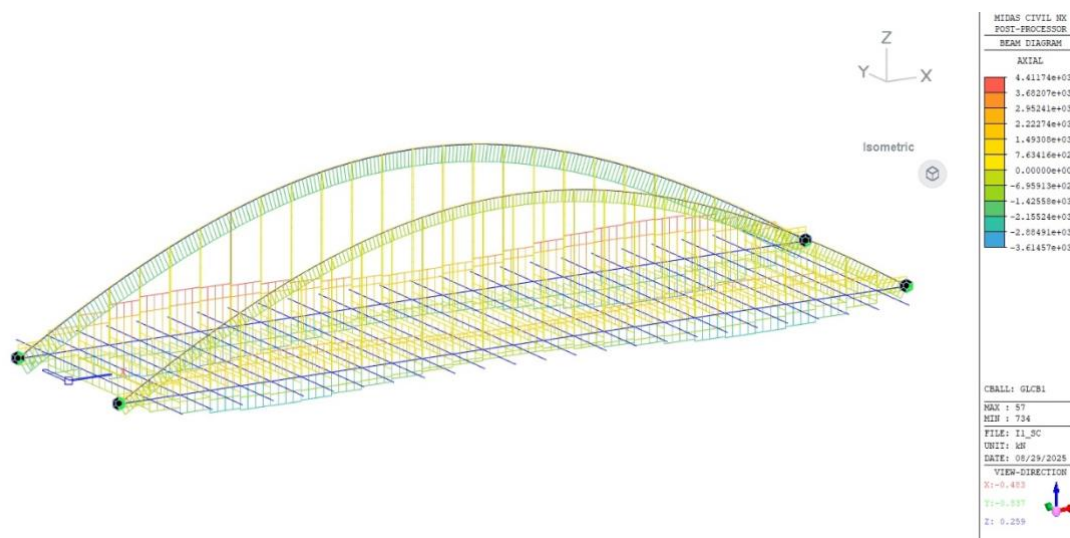


Figura 209. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1

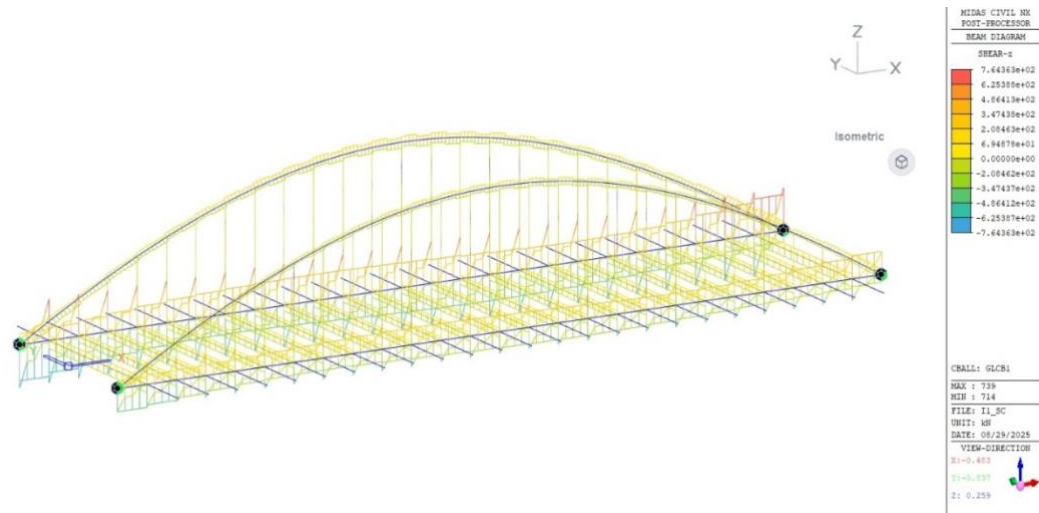


Figura 210. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1

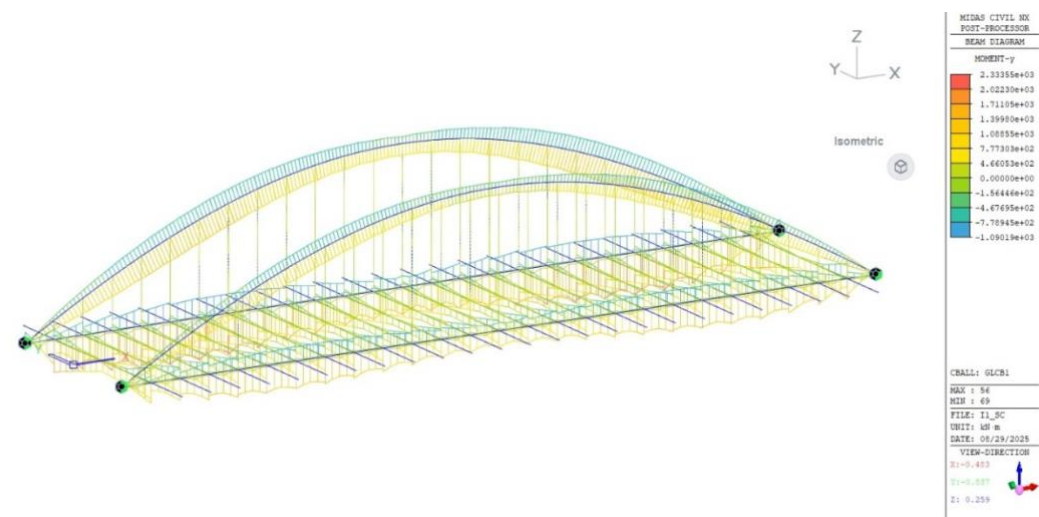


Figura 211. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1

En la siguiente figura, se indican las tensiones halladas en el puente en este caso de carga:

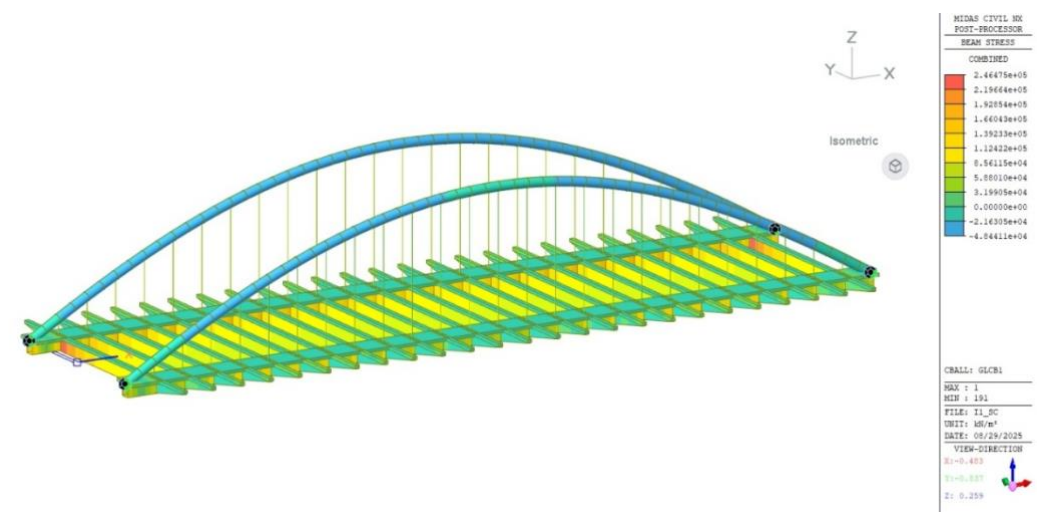


Figura 212. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 1

Por último, en la siguiente tabla se muestran los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes y momentos hallados en este caso de carga.

Tabla 27. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 1

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	112	-1922	137	-137	1227	-758	-12	-48
Vigas Rectangulares	4412	-1803	642	-642	2324	-1090	175	15
Transversales	1106	0	9	-144	1807	-822	246	0
Cables	143	0	0	0	0	0	50	21

15.1.1.3. CARGA PERMANENTE

El último caso de carga analizado es el de carga permanente. En él, se analiza la afección de la carga producida por los pesos propios de los elementos del puente que se encuentran sobre la estructura resistente. En esta fase, se incluye como estructura resistente el entramado metálico y la anchura de losa de hormigón correspondiente a la homogeneización de esta a acero para un tiempo final t_{inf} .

Se muestran, en primer lugar, las reacciones obtenidas en este caso de carga:

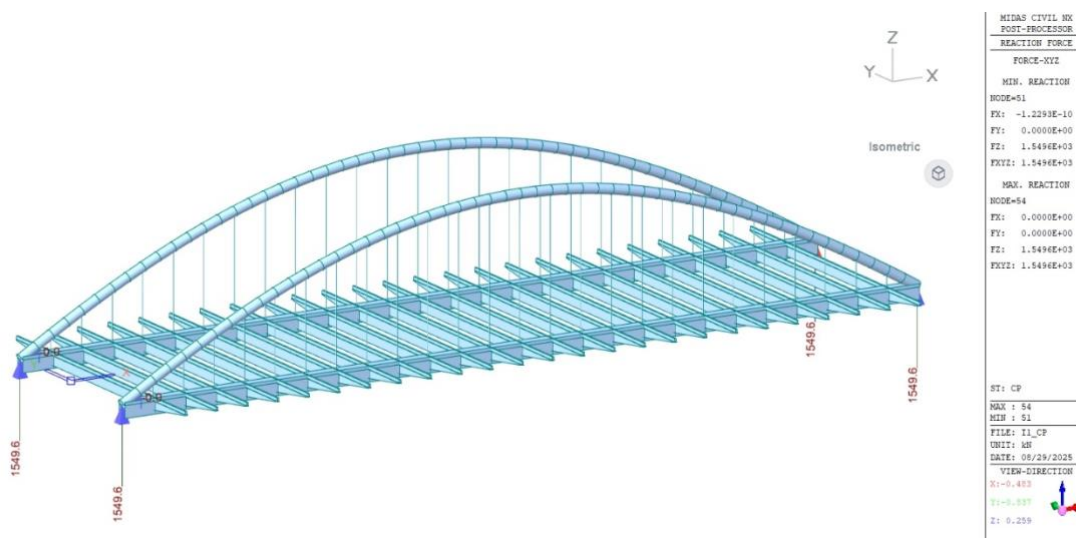


Figura 213. Reacciones para el caso de carga permanente en la iteración 1

Seguidamente, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos encontrados en esta iteración.

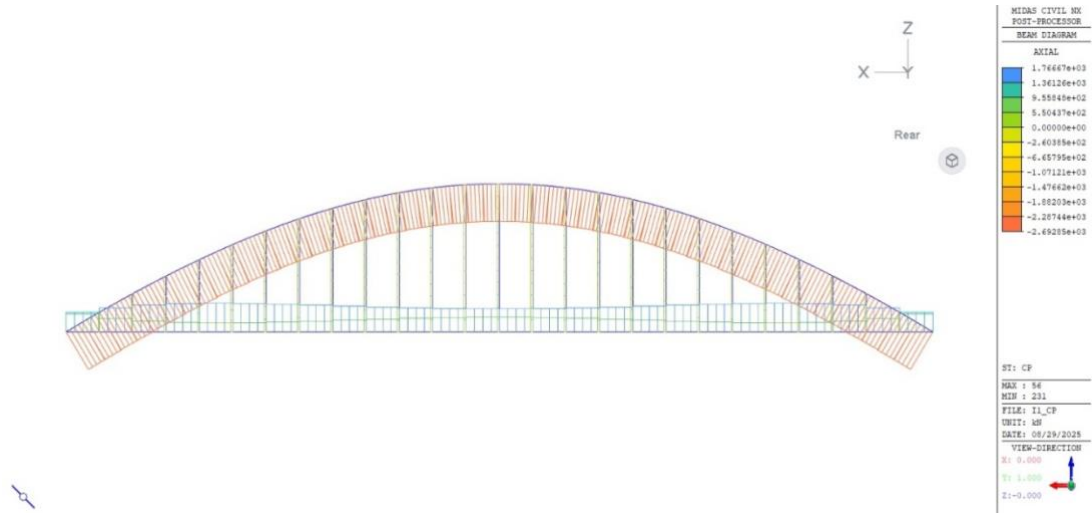


Figura 214. Diagrama de axiles en el caso de carga permanente para la iteración 1

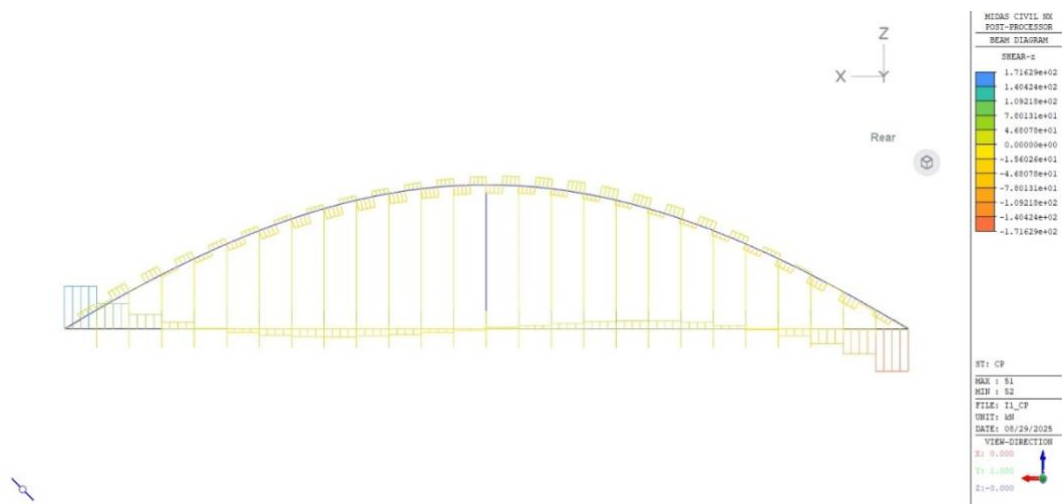


Figura 215. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 1

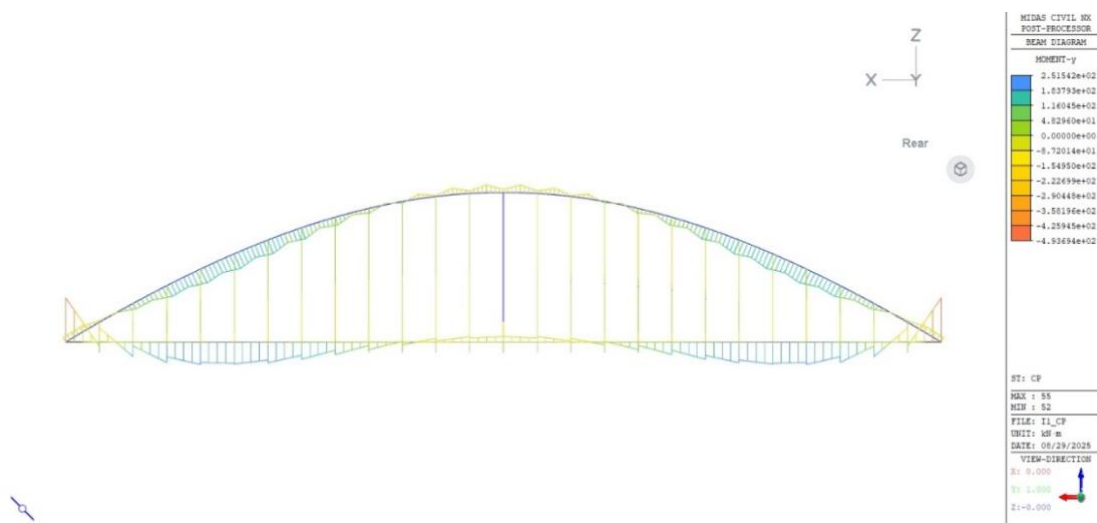


Figura 216. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 1

Se indican ahora las tensiones halladas en la estructura resistente para este caso de carga.

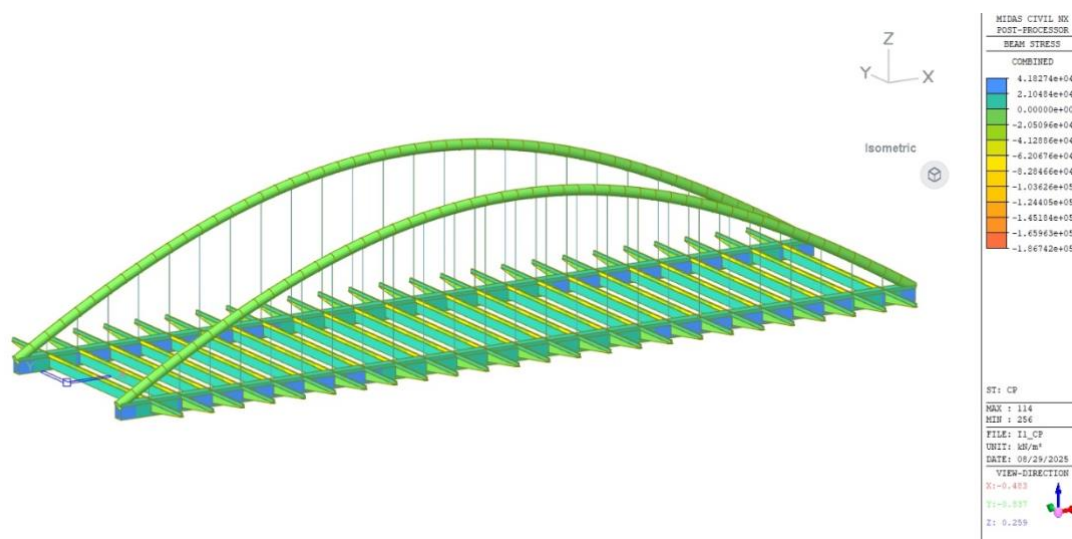


Figura 217. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 1

Finalmente, se indican en la siguiente tabla los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en esta fase.

Tabla 28. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 1

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-2316	-2693	43	-43	180	-87	-13	-20
Vigas Rectangulares	1767	1210	177	-177	252	-494	15	29
Transversales	58	-26	75	-75	115	-225	10	10
Cables	134	52	0	0	0	0	42	17

15.1.1.4. CANTIDADES DE MATERIAL

A continuación, se muestra la cantidad de cada material necesaria para construir la estructura resistente de esta iteración.

Tabla 29. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 1

S355 (kg)	333107
S460 (kg)	11918
HA-35 [m ³]	870

15.1.1.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, se recoge en este apartado un resumen de los valores obtenidos, así como la combinación de cargas de estos.

Se muestran, en primer lugar, las reacciones.

Tabla 30. Reacciones totales en la iteración 1

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	6303
SC	1320
CP	1550
Suma	9173

Finalmente, se muestran los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento de axiles, cortantes, momentos y tensiones, así como la suma de estos indicando, en el caso de las tensiones, si la suma obtenida cumple con los criterios de diseño (verde) o no (rojo).

Tabla 31. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 1

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PPMet.	Arco	-9120	-10700	268	-268	796	-1654	-51	-119
	Vigas Rectangulares	9118	9115	687	-687	1099	-3815	225	106
	Transversales	0	-14	243	-243	640	-464	54	-74
	Cables	450	151	0	0	0	0	140	49
SC	Arco	112	-1922	137	-137	1227	-758	-12	-48
	Vigas Rectangulares	4412	-1803	642	-642	2324	-1090	175	15
	Transversales	1106	0	9	-144	1807	-822	246	0
	Cables	143	0	0	0	0	0	50	21
CP	Arco	-2316	-2693	43	-43	180	-87	-13	-20
	Vigas Rectangulares	1767	1210	177	-177	252	-494	15	29
	Transversales	58	-26	75	-75	115	-225	10	10
	Cables	134	52	0	0	0	0	42	17
Suma	Arco	-11324	-15315	448	-448	2203	-2499	-76	-187
	Vigas Rectangulares	15297	8522	1506	-1506	3675	-5399	415	150
	Transversales	1164	-40	327	-462	2562	-1511	310	-64
	Cables	727	203	0	0	0	0	232	87

Como se puede observar, en las vigas rectangulares se produce esfuerzos que exceden el valor de 319,5 MPa, por lo que este diseño no resulta válido.

15.1.2 ITERACIÓN 2

Para la siguiente iteración, se va a comprobar qué estado tensional se produce en el caso del otro extremo de la flecha del arco, es decir, L/4, con el resto de los parámetros iguales al caso anterior:

Tabla 32. Parámetros utilizados para la iteración 2

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		1,0	m
Vigas rectangulares	H	1,2	m
	B	1,0	m
Nº transversales y péndolas		25	a cada lado

La estructura metálica correspondiente a estos parámetros es la siguiente:

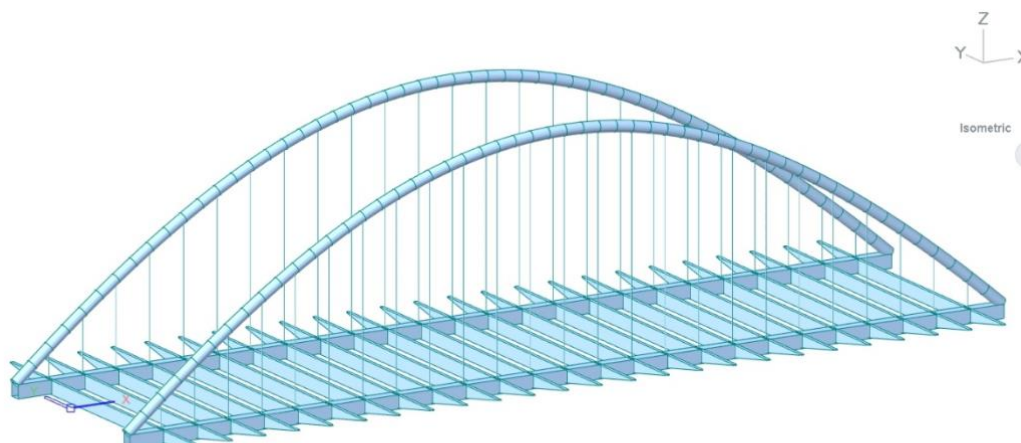


Figura 218. Estructura metálica en la iteración 2

En los siguientes apartados, se han analizado los diferentes casos de carga expuestos con anterioridad.

15.1.2.1. FASE METÁLICA

En primer lugar, se ha analizado la fase metálica. Las reacciones obtenidas se muestran en la siguiente figura:

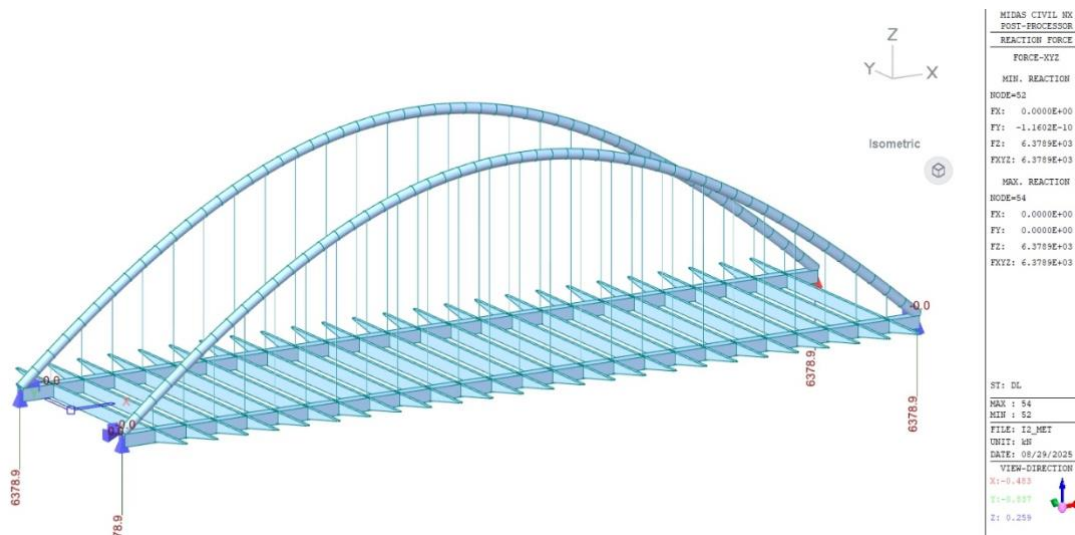


Figura 219. Reacciones en la fase metálica para la iteración 2

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos para este caso de carga.

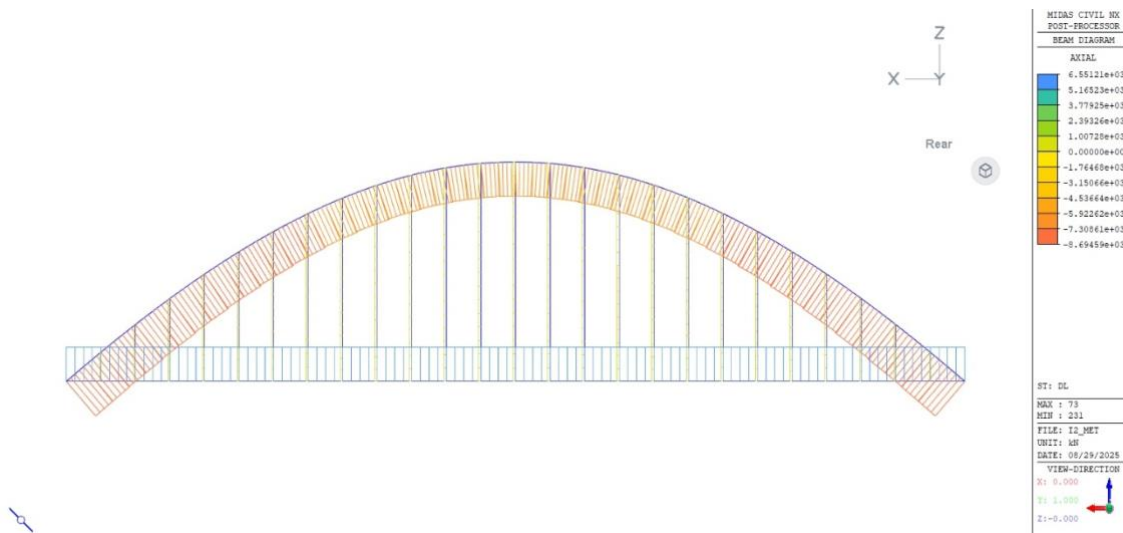


Figura 220. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 2

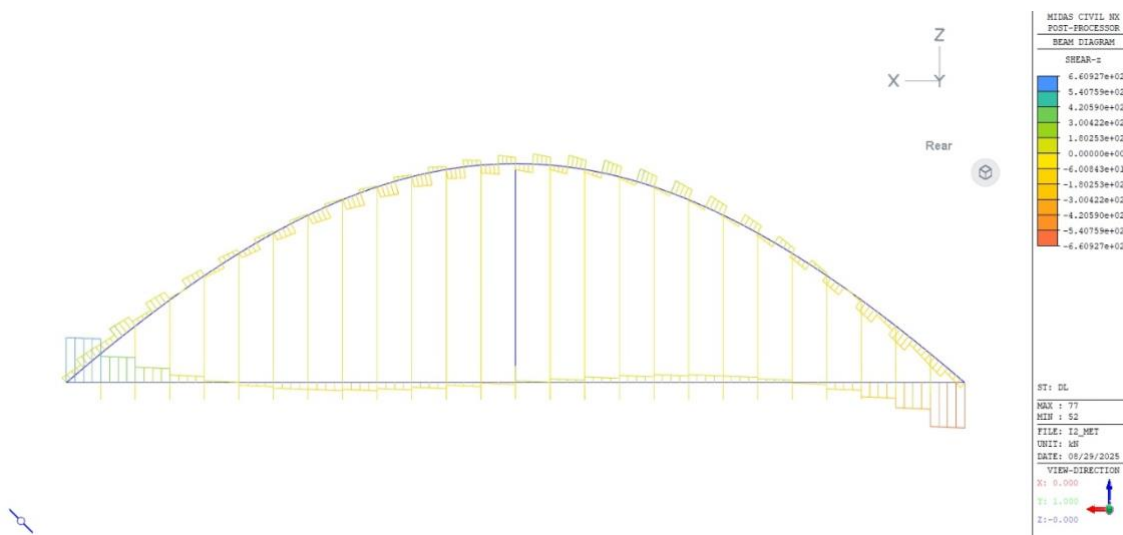


Figura 221. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 2



Figura 222. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 2

Las tensiones obtenidas en la estructura resistente para este caso de carga son las siguientes:

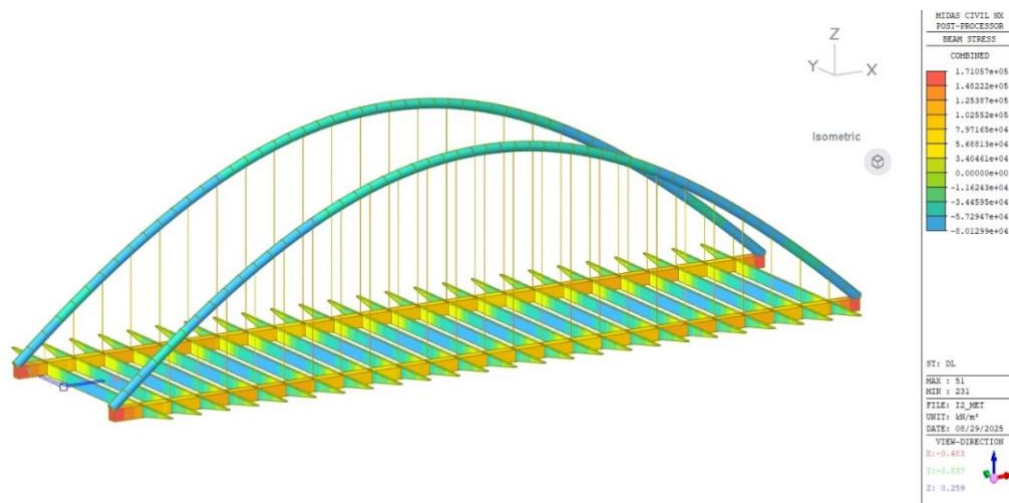


Figura 223. Tensiones en fase metálica para la iteración 2

Por último, se muestra una tabla con los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento en esta fase.

Tabla 33. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 2

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-6558	-8695	199	-199	835	-894	-39	-80
Vigas Rectangulares	6551	6551	661	-661	1244	-3037	171	76
Transversales	0	-15	243	-243	640	-464	54	-74
Cables	456	146	0	0	0	0	143	47

15.1.2.2. SOBRECARGA

La siguiente fase analizada es la de sobrecarga de uso. Las reacciones obtenidas son las siguientes:

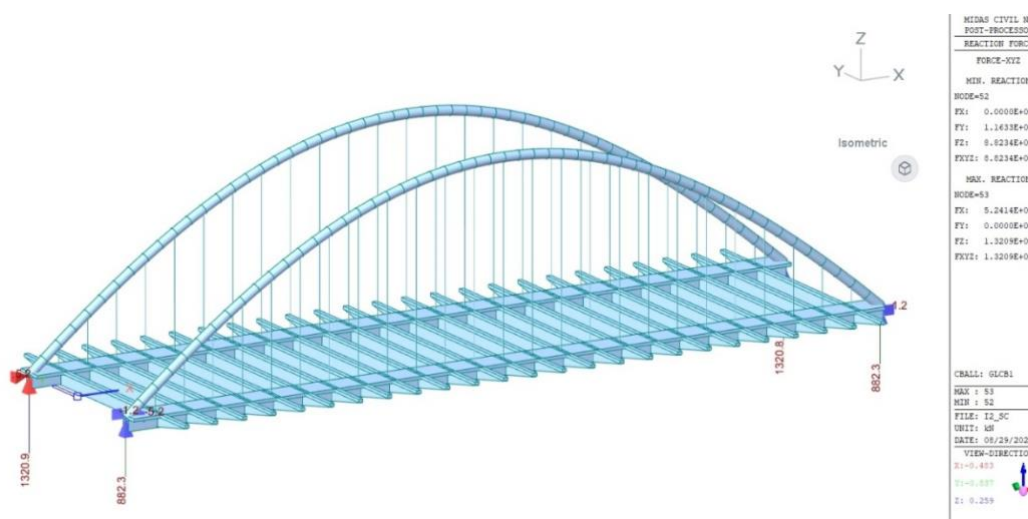


Figura 224. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos de este caso de carga:

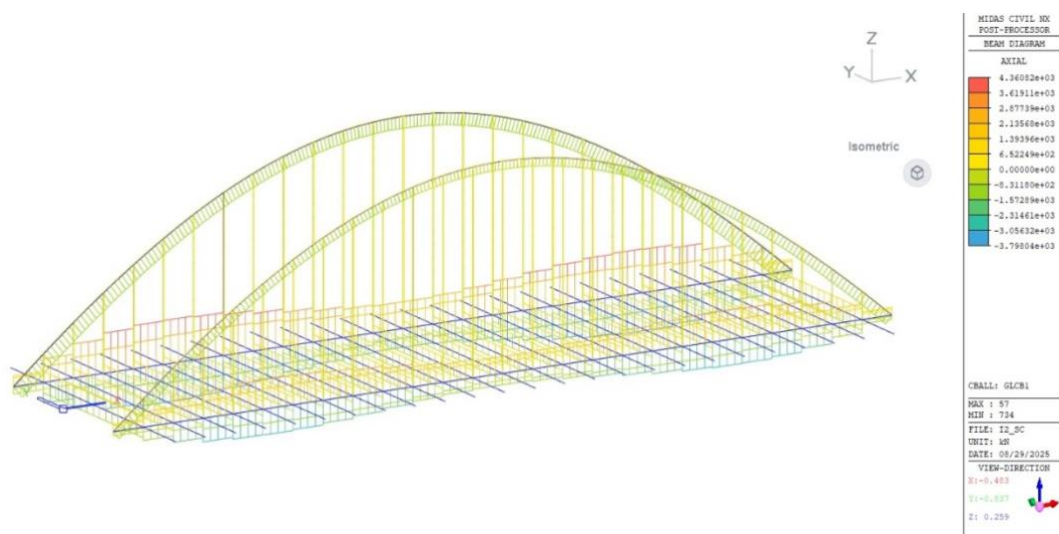


Figura 225. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2

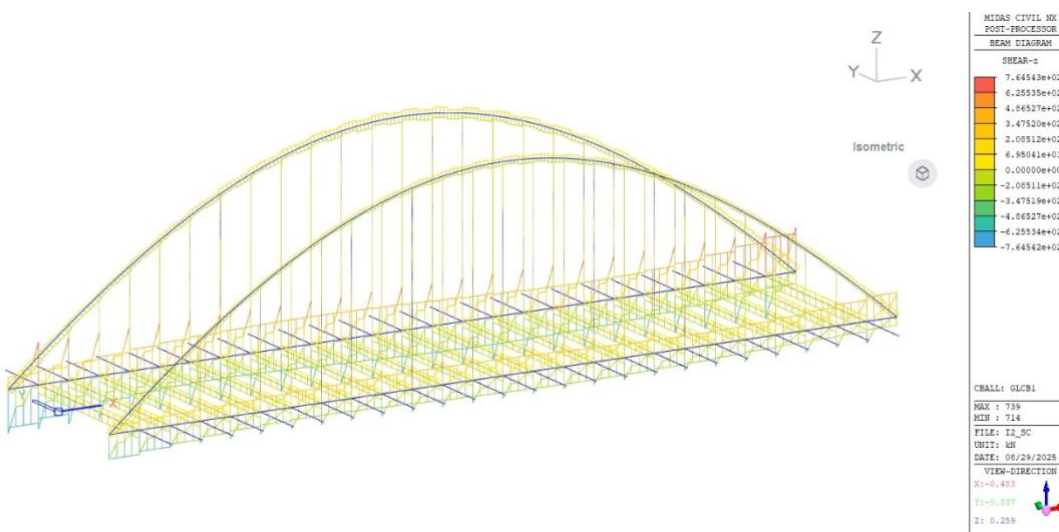


Figura 226. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2

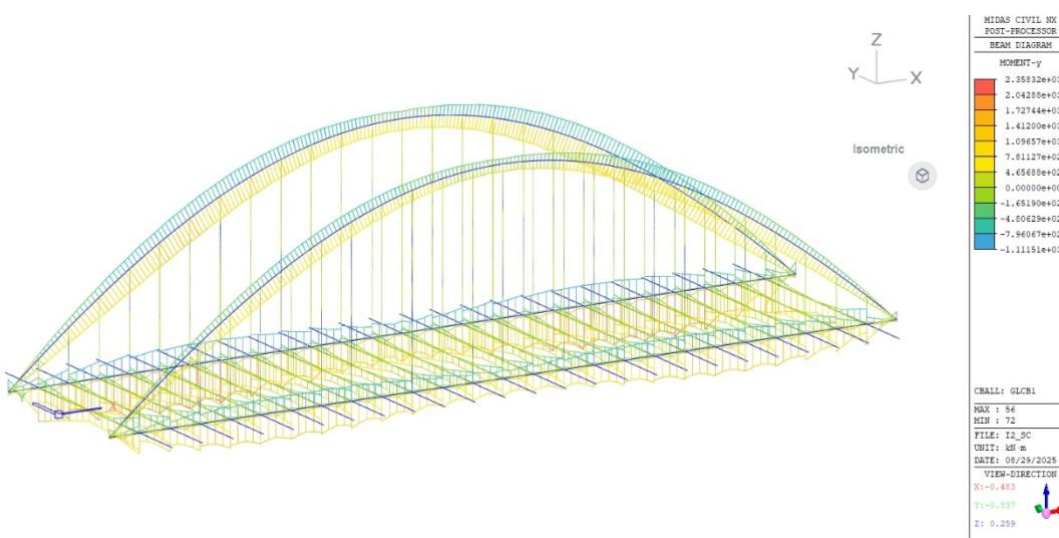


Figura 227. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2

Las tensiones obtenidas en este caso de carga son las siguientes:

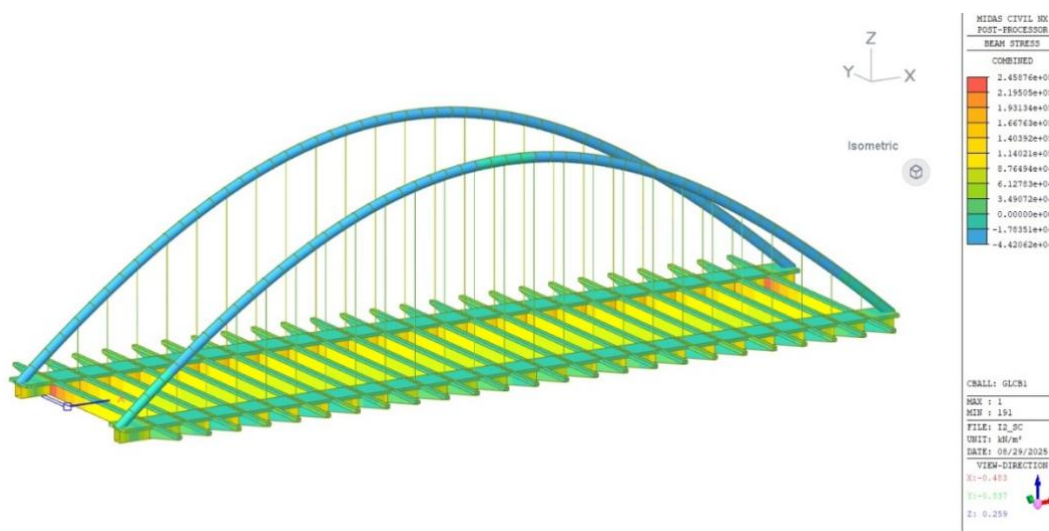


Figura 228. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 2

En la siguiente tabla se recogen los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en cada elemento para este caso de carga.

Tabla 34. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 2

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	93	-1516	107	-107	1137	-742	-12	-44
Vigas Rectangulares	4361	-1972	660	-660	2358	-1112	175	15
Transversales	1102	0	89	-143	1803	-819	246	0
Cables	137	0	0	0	0	0	46	18

15.1.2.3. CARGA PERMANENTE

Por último, se muestran los resultados del caso de carga permanente. Las reacciones obtenidas son las siguientes:

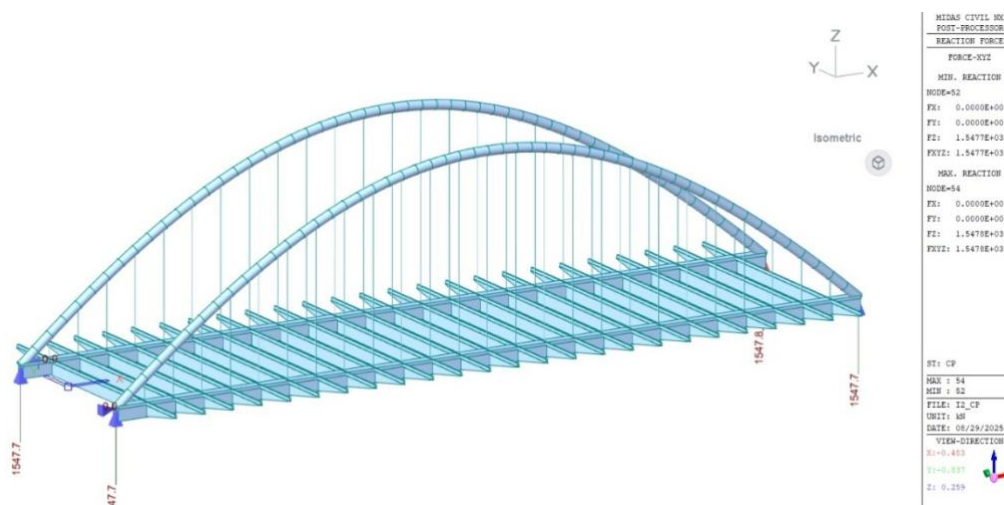


Figura 229. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 2

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos.

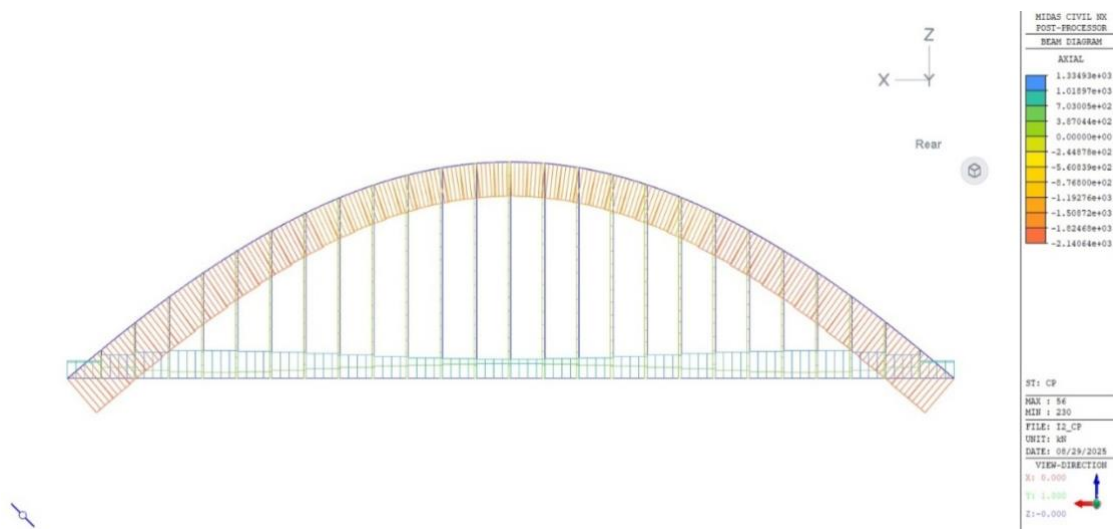


Figura 230. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 2

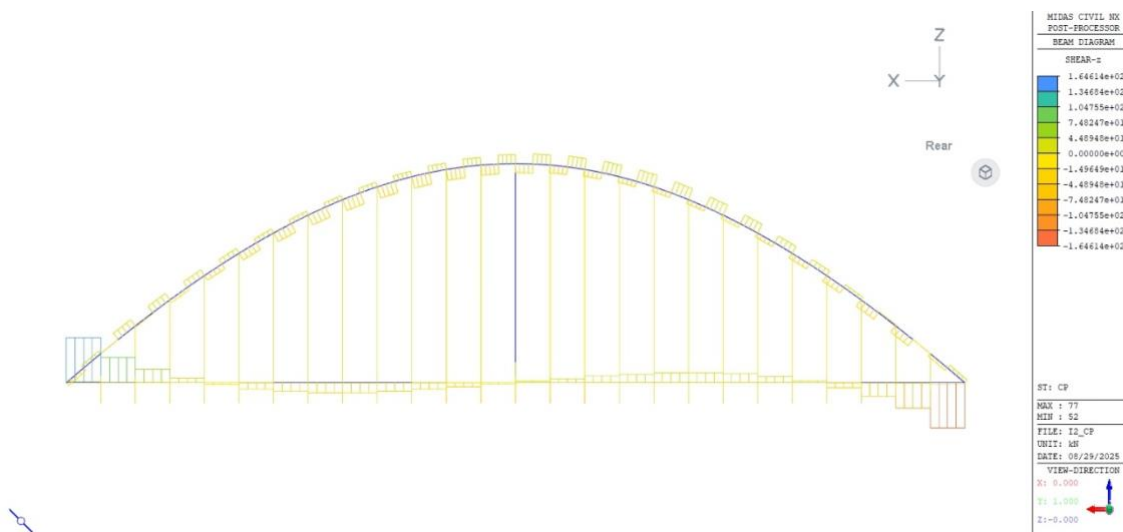


Figura 231. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 2

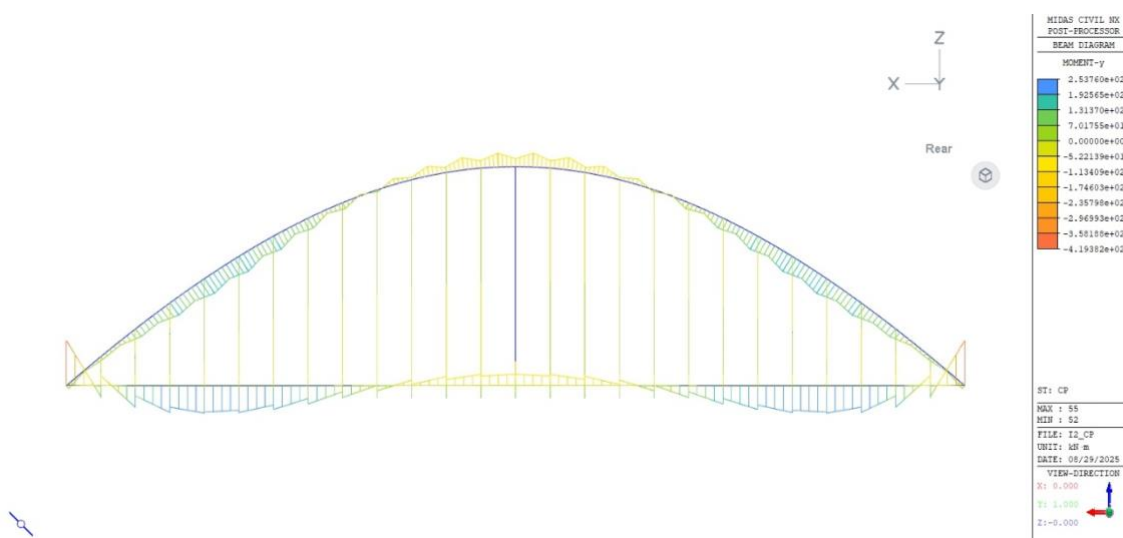


Figura 232. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 2

Por último, se muestran las tensiones obtenidas en esta fase:

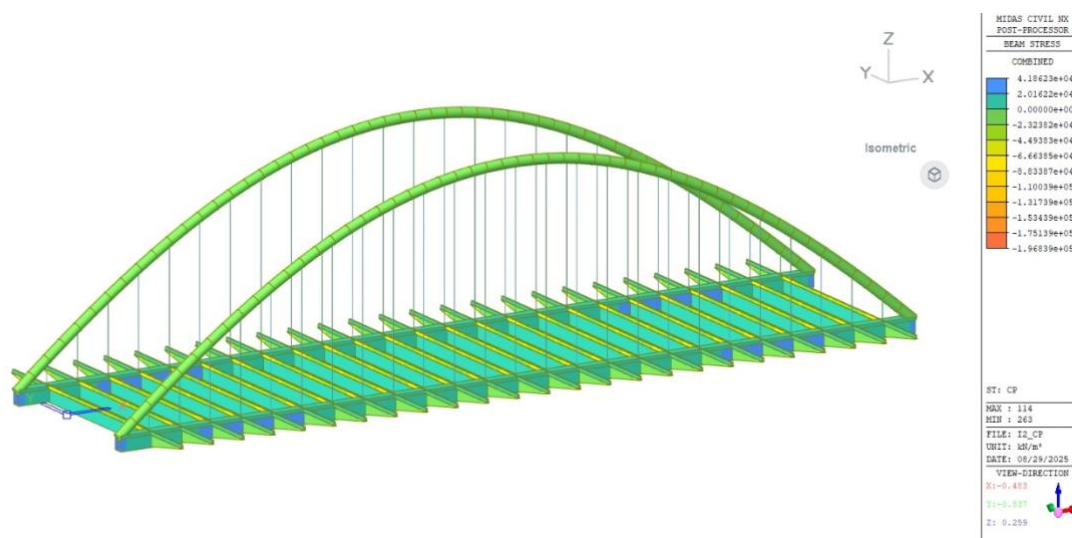


Figura 233. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 2

En la siguiente tabla, se recogen los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en los elementos para este caso de carga.

Tabla 35. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 2

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1638	-2141	42	-42	165	-126	-10	-17
Vigas Rectangulares	1335	852	164	-164	254	-419	23	11
Transversales	42	-18	75	-75	114	-225	7	7
Cables	134	50	0	0	0	0	42	16

15.1.2.4. CANTIDADES DE MATERIAL

La cantidad de cada material necesaria para obtener la geometría de esta iteración se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 36. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 2

S355 (kg)	338384
S460 (kg)	17045
HA-35 [m ³]	878

15.1.2.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, se muestra en este apartado un resumen de los valores obtenidos, así como la combinación de cargas obtenida.

Se muestran las reacciones obtenidas en la siguiente tabla.

Tabla 37. Reacciones totales en la iteración 2

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	6379
SC	1321
CP	1548
Suma	9248

Por último, se recogen en la siguiente tabla los axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos, así como la combinación de estos en las diferentes fases.

Tabla 38. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 2

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-6558	-8695	199	-199	835	-894	-39	-80
	Vigas Rectangulares	6551	6551	661	-661	1244	-3037	171	76
	Transversales	0	-15	243	-243	640	-464	54	-74
	Cables	456	146	0	0	0	0	143	47
SC	Arco	93	-1516	107	-107	1137	-742	-12	-44
	Vigas Rectangulares	4361	-1972	660	-660	2358	-1112	175	15
	Transversales	1102	0	89	-143	1803	-819	246	0
	Cables	137	0	0	0	0	0	46	18
CP	Arco	-1638	-2141	42	-42	165	-126	-10	-17
	Vigas Rectangulares	1335	852	164	-164	254	-419	23	11
	Transversales	42	-18	75	-75	114	-225	7	7
	Cables	134	50	0	0	0	0	42	16
Suma	Arco	-8103	-12352	348	-348	2137	-1762	-61	-141
	Vigas Rectangulares	12247	5431	1485	-1485	3856	-4568	369	102
	Transversales	1144	-33	407	-461	2557	-1508	307	-67
	Cables	727	196	0	0	0	0	231	81

Como se puede observar, se han reducido las tensiones en las vigas rectangulares, aunque aún no es suficiente para cumplir la condición fijada, por lo que este diseño resulta, de nuevo, no válido.

15.1.3 ITERACIÓN 3

Para la siguiente iteración, se ha comprobado cómo afecta al modelo anterior un aumento en el número de péndolas y de vigas transversales, con el objetivo de reducir las tensiones que se producen sobre las vigas rectangulares.

Tabla 39. Parámetros utilizados en la iteración 3

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		1,0	m
Vigas rectangulares	H	1,2	m
	B	1,0	m
Nº transversales y péndolas		30	a cada lado

La estructura metálica correspondiente a estos parámetros es la siguiente:

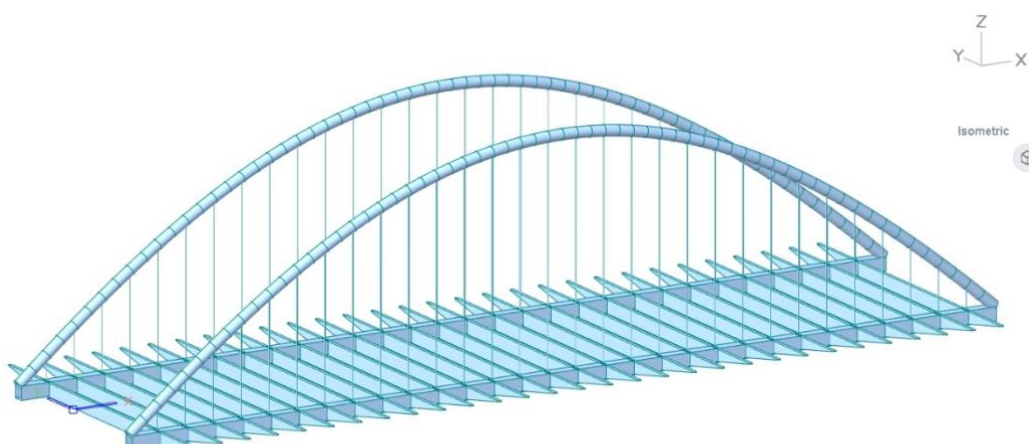


Figura 234. Estructura metálica en la iteración 3

En los siguientes apartados se analizan los diferentes casos de carga.

15.1.3.1. FASE METÁLICA

En este apartado se analiza la fase metálica. Las reacciones obtenidas son las siguientes:

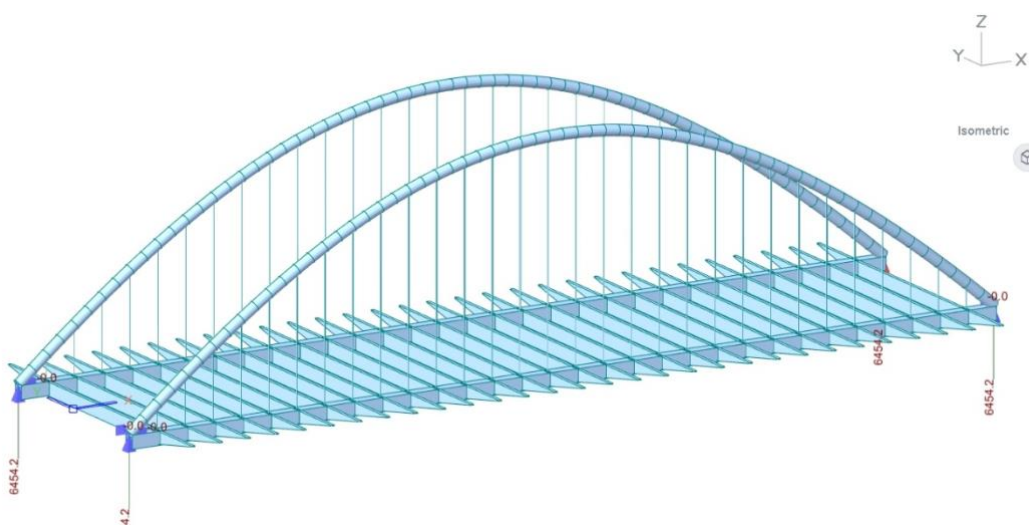


Figura 235. Reacciones en la fase metálica para la iteración 3

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos.

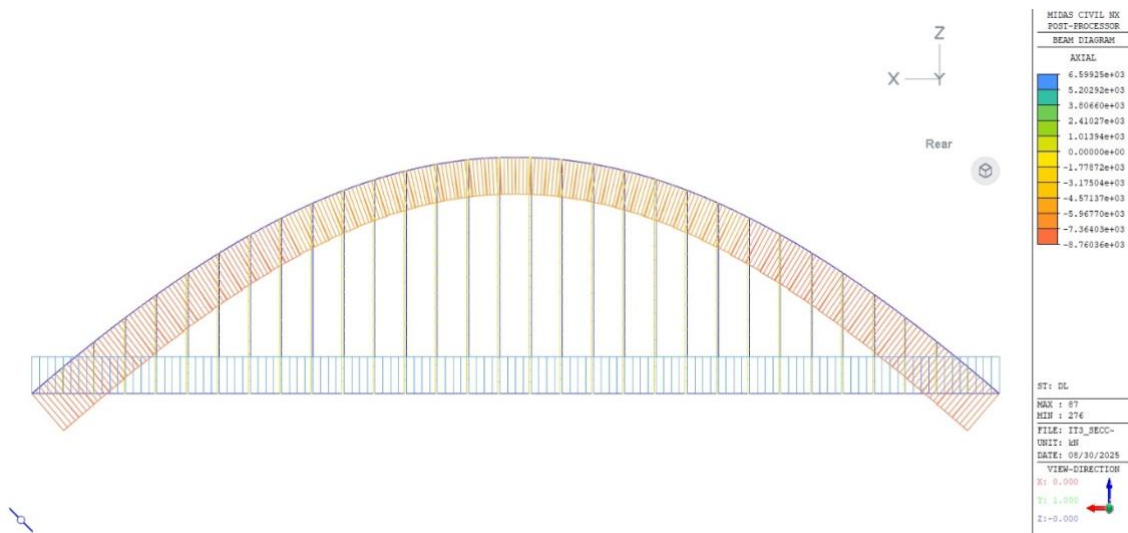


Figura 236. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 3

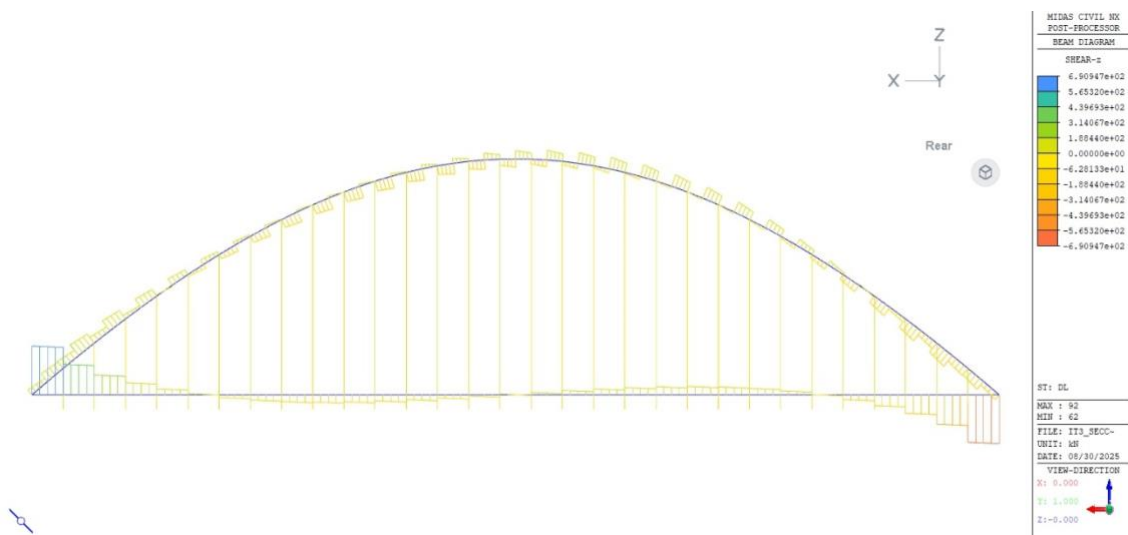


Figura 237. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 3

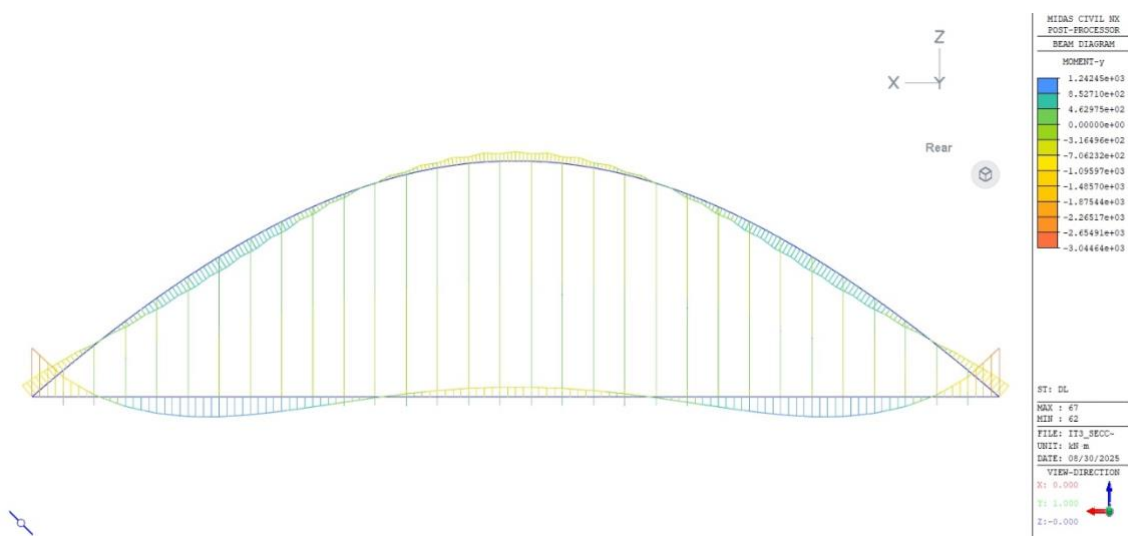


Figura 238. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 3

Se indican en la siguiente figura las tensiones obtenidas en esta fase:

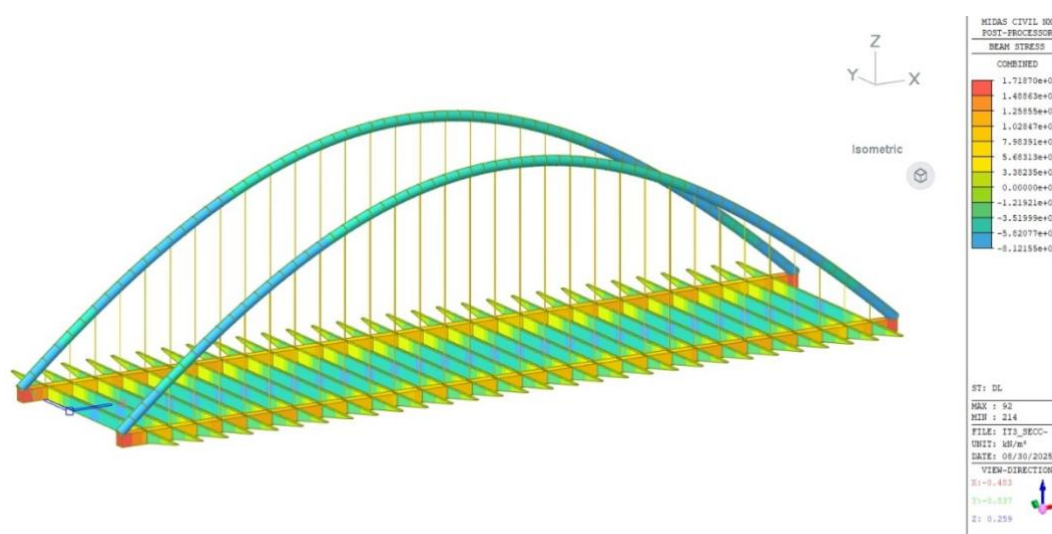


Figura 239. Tensiones en fase metálica para la iteración 3

Por último, en la siguiente tabla se recogen los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento.

Tabla 40. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 3

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-6616	-8761	193	-193	818	-914	-39	-81
Vigas Rectangulares	6600	6600	691	-691	1243	-3045	171	76
Transversales	0	-12.5	205	-205	544	-390	45	-63
Cables	386	97	0	0	0	0	121	32

15.1.3.2. SOBRECARGA

La siguiente fase analizada es la de sobrecarga de uso. Las reacciones obtenidas son las siguientes:



Figura 240. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos son los siguientes:

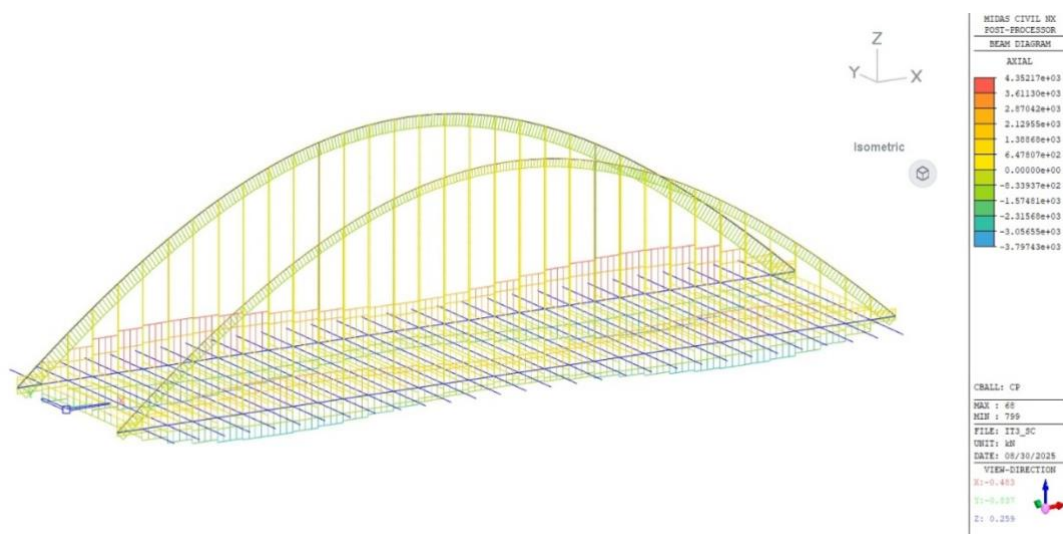


Figura 241. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3

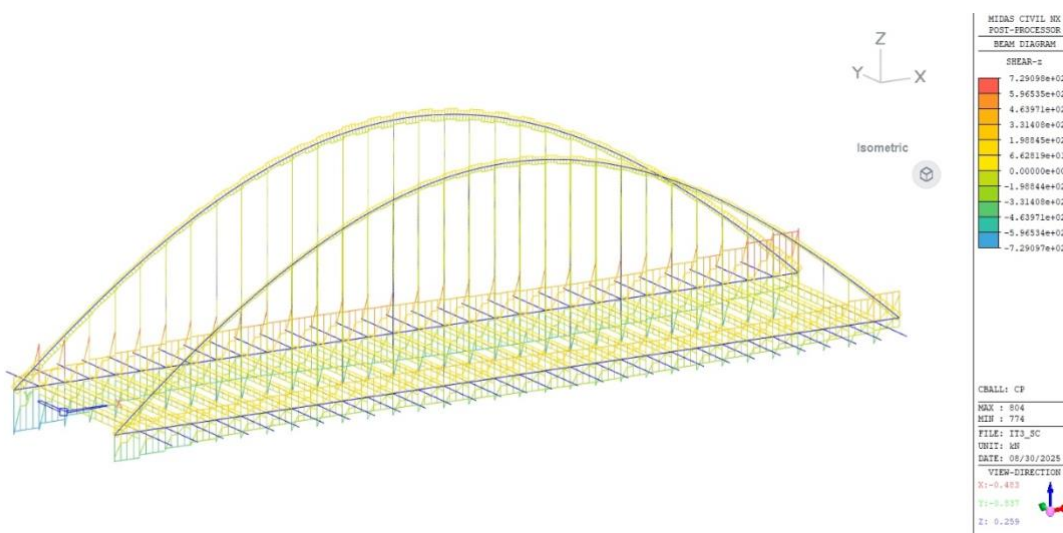


Figura 242. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3

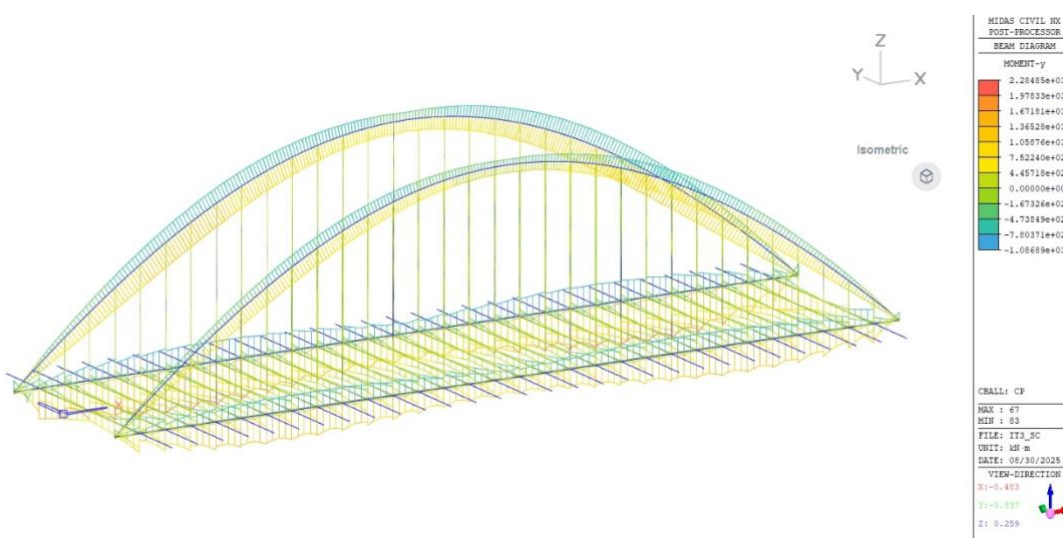


Figura 243. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3

Las tensiones en la estructura resistente para esta fase se muestran en la siguiente figura:

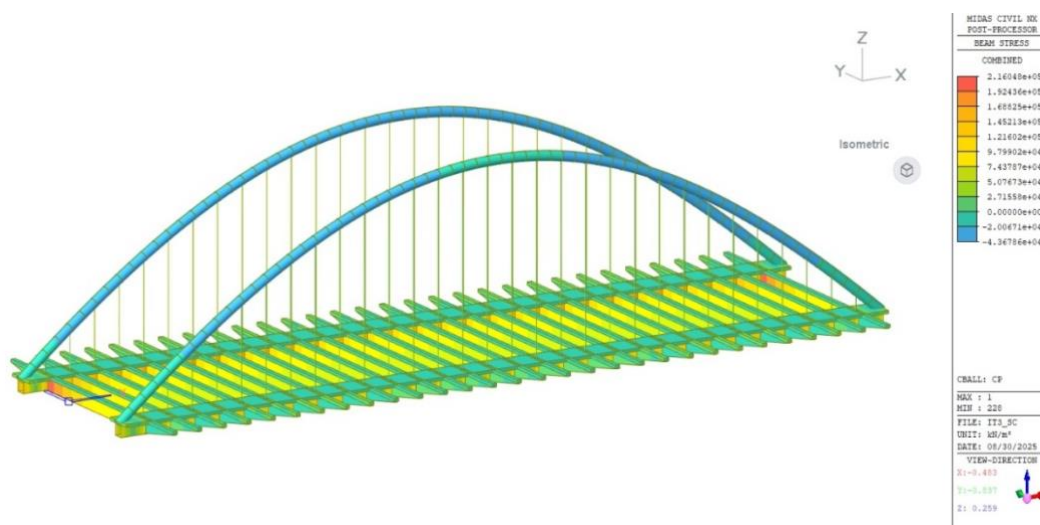


Figura 244. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 3

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 41. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 3

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	88	-1516	104	-104	1124	-724	-11	-44
Vigas Rectangulares	4316	-1947	685	-685	2285	-1087	177	13
Transversales	957	0	80.6	-127.2	1586	-733	216	0
Cables	116	0	0	0	0	0	40	14

15.1.3.3. CARGA PERMANENTE

Por último, se ha analizado el caso de carga permanente. Las reacciones obtenida en este caso de carga son las siguientes:



Figura 245. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 3

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos se muestran en las siguientes figuras:

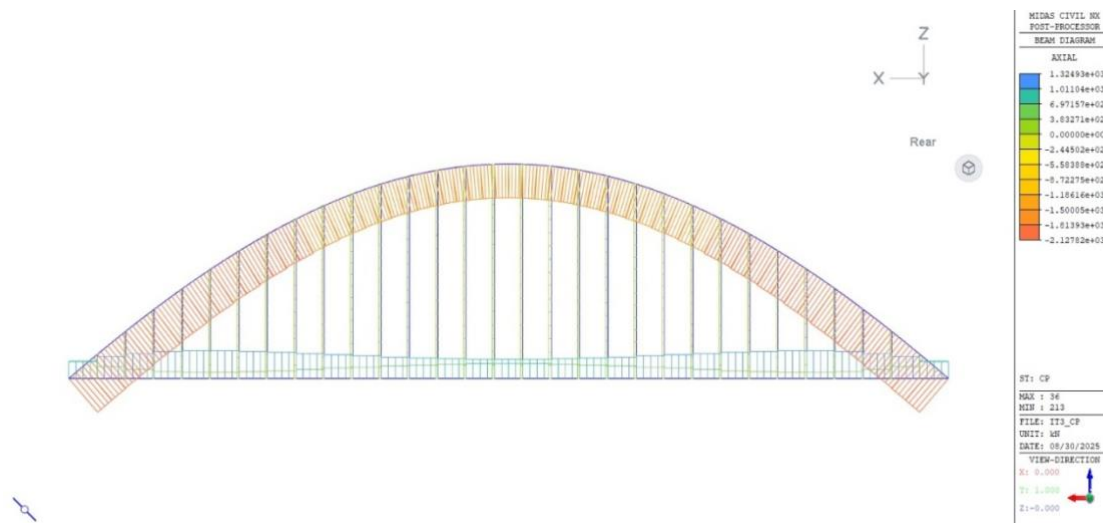


Figura 246. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 3

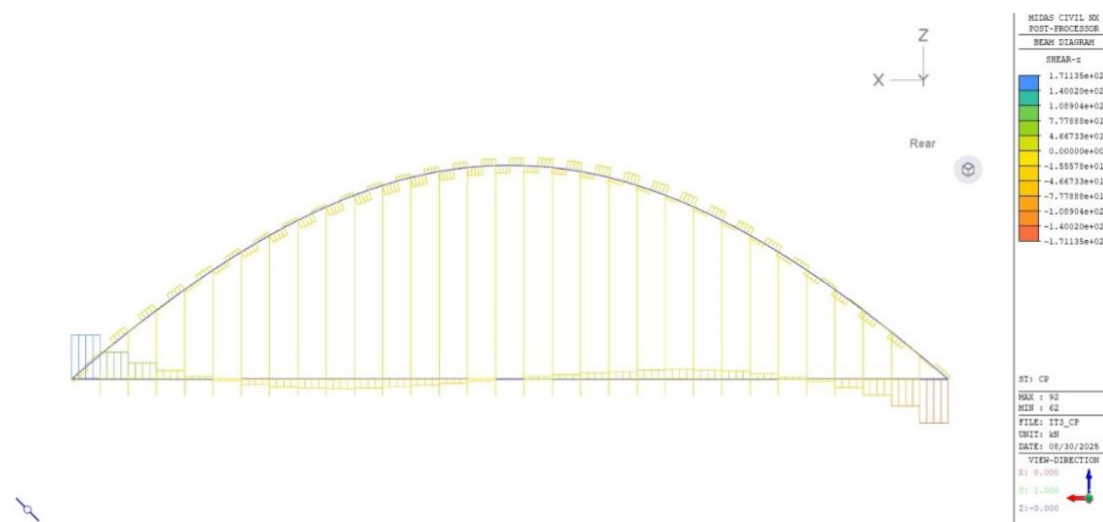


Figura 247. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 3

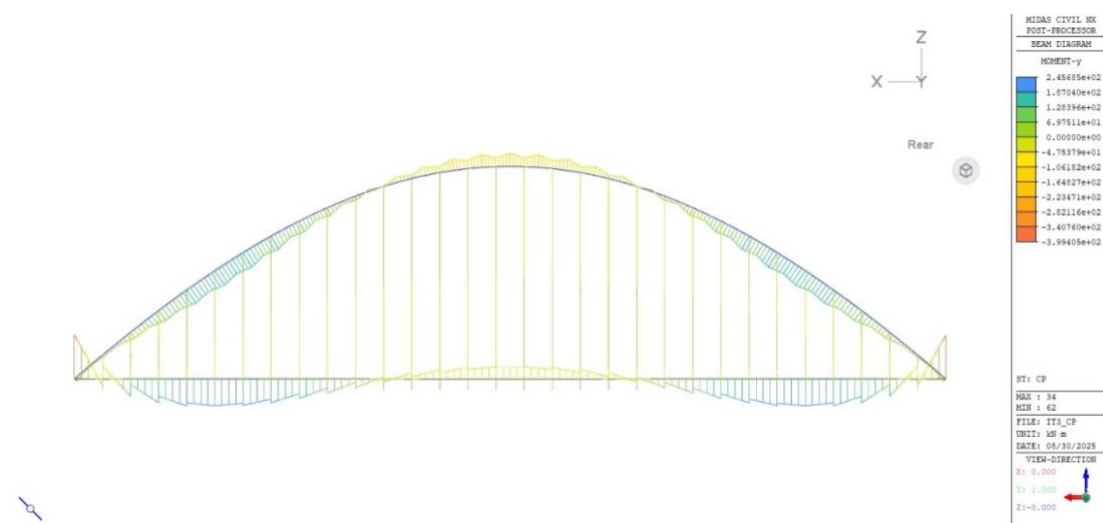


Figura 248. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 3

Las tensiones halladas en esta fase se muestran en la siguiente figura:

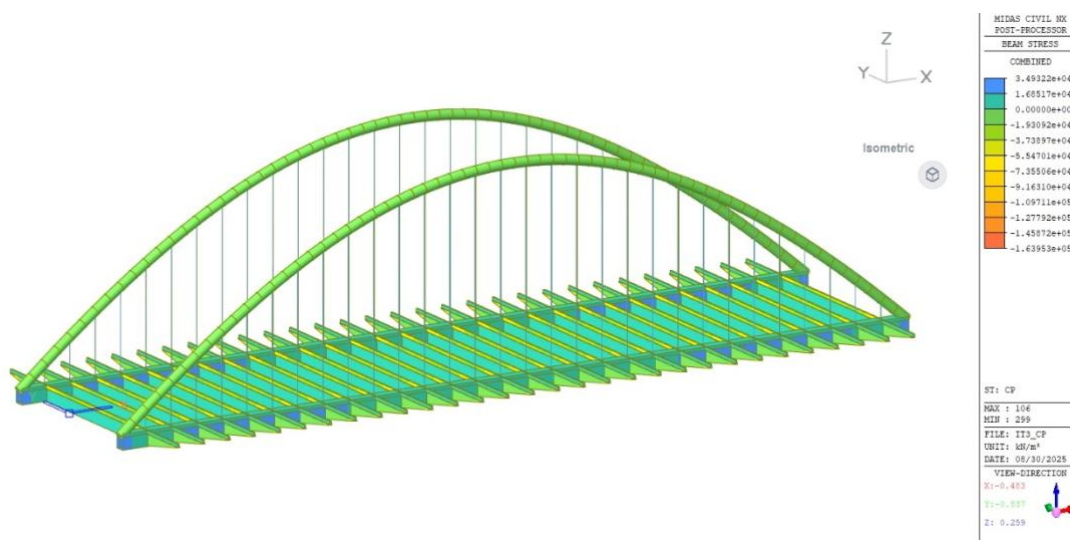


Figura 249. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 3

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 42. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 3

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1626	-2128	38	-38	160	-118	-10	-17
Vigas Rectangulares	1323	829	171	-171	246	-400	23	11
Transversales	35	-15	62	-62	95	-188	6	6
Cables	111	35	0	0	0	0	35	11

15.1.3.4. CANTIDADES DE MATERIAL

A continuación, se muestran los kilogramos de cada tipo de acero y los metros cúbicos de hormigón HA-35 necesarios para la construcción de la geometría resistente de esta iteración.

Tabla 43. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 3

S355 (kg)	365792
S460 (kg)	20332
HA-35 [m³]	878

15.1.3.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, se recoge en este apartado un resumen de los valores obtenidos, así como la combinación de cargas obtenida.

En primer lugar, se muestran en la siguiente tabla las reacciones obtenidas en cada caso de carga, así como la combinación de estas.

Tabla 44. Reacciones totales en la iteración 3

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	6455
SC	1319
CP	1547
Suma	9321

Finalmente, la tabla que se muestra a continuación recoge los axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en las diferentes fases, así como la combinación de estos.

Tabla 45. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 3

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-6616	-8761	193	-193	818	-914	-39	-81
	Vigas Rectangulares	6600	6600	691	-691	1243	-3045	171	76
	Transversales	0	-12.5	205	-205	544	-390	45	-63
	Cables	386	97	0	0	0	0	121	32
SC	Arco	88	-1516	104	-104	1124	-724	-11	-44
	Vigas Rectangulares	4316	-1947	685	-685	2285	-1087	177	13
	Transversales	957	0	80.6	-127.2	1586	-733	216	0
	Cables	116	0	0	0	0	0	40	14
CP	Arco	-1626	-2128	38	-38	160	-118	-10	-17
	Vigas Rectangulares	1323	829	171	-171	246	-400	23	11
	Transversales	35	-15	62	-62	95	-188	6	6
	Cables	111	35	0	0	0	0	35	11
Suma	Arco	-8154	-12405	335	-335	2102	-1756	-60	-142
	Vigas Rectangulares	12239	5482	1547	-1547	3774	-4532	371	100
	Transversales	992	-27.5	347.6	-394.2	2225	-1311	267	-57
	Cables	613	132	0	0	0	0	196	57

Como se puede observar, en comparación con la anterior iteración, las tensiones en las vigas rectangulares no han sufrido cambios con la adición de cables y vigas transversales, por lo que sigue sin cumplir el criterio de limitación de tensiones de diseño, además de aumentar la cantidad de material utilizado, lo que confirma que esta iteración no es apta.

15.1.4 ITERACIÓN 4

A la vista de los resultados obtenidos en las anteriores iteraciones, se ha procedido a aumentar, por un lado, la base de la viga rectangular, con objeto de reducir en ella las tensiones que se producen. Por otro lado, se ha reducido el diámetro del arco, ya que las tensiones que se producían en él eran algo bajas en comparación con lo que puede soportar. Por último, se ha reducido el número de cables y vigas transversales, ya que en todas las iteraciones anteriores se cumplía el criterio de limitación de tensiones.

Tabla 46. Parámetros utilizados en la iteración 4

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		0,7	m
Vigas rectangulares	H	1,2	m
	B	1,4	m
Nº transversales y péndolas		24	a cada lado

La estructura metálica correspondiente a estos valores es la siguiente:

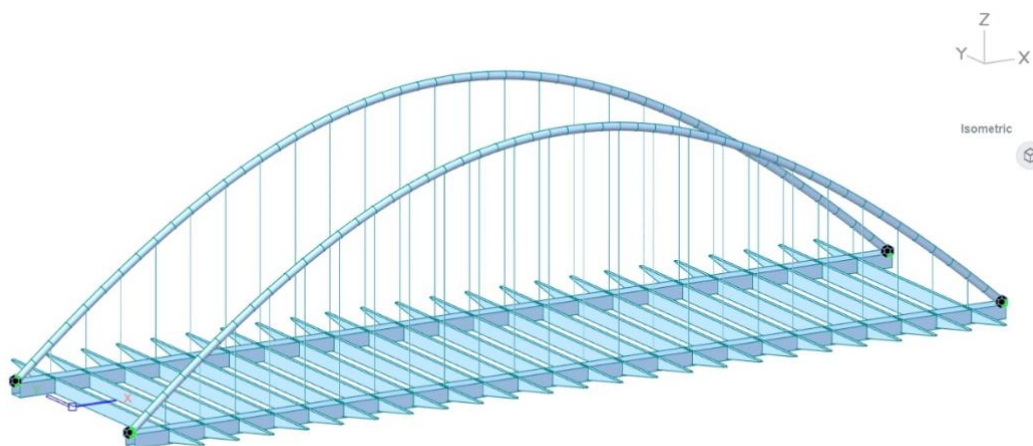


Figura 250. Estructura metálica en la iteración 4

En los siguientes apartados se han analizado las diferentes fases.

15.1.4.1. FASE METÁLICA

Las reacciones obtenidas en la fase metálica se muestran en la siguiente figura.

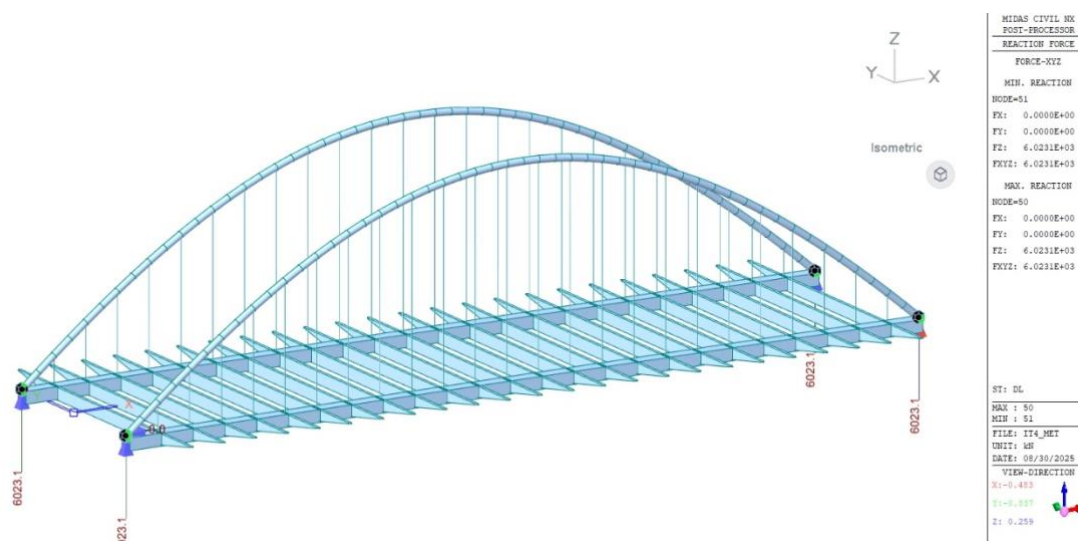


Figura 251. Reacciones en la fase metálica para la iteración 4

Seguidamente, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos.

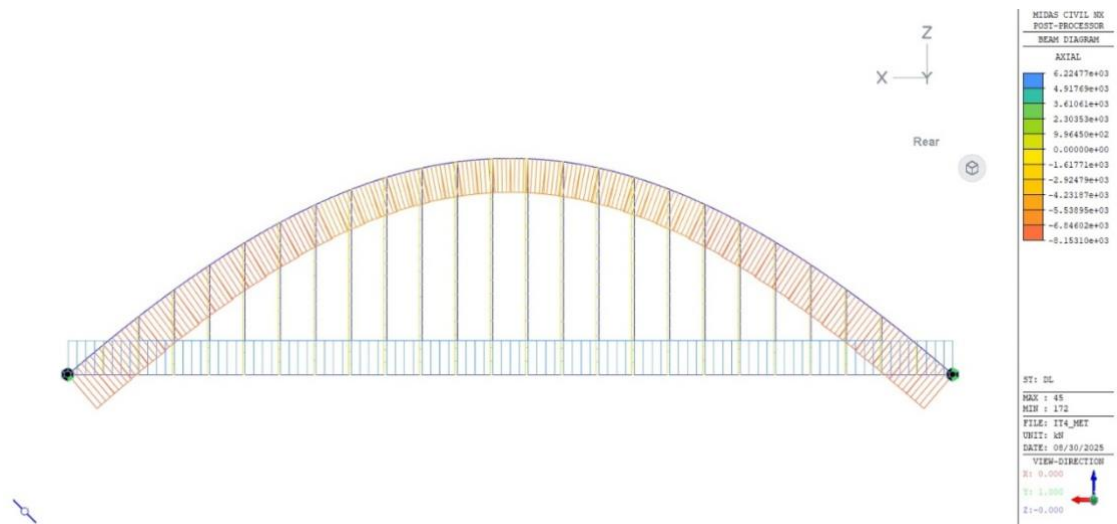


Figura 252. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 4

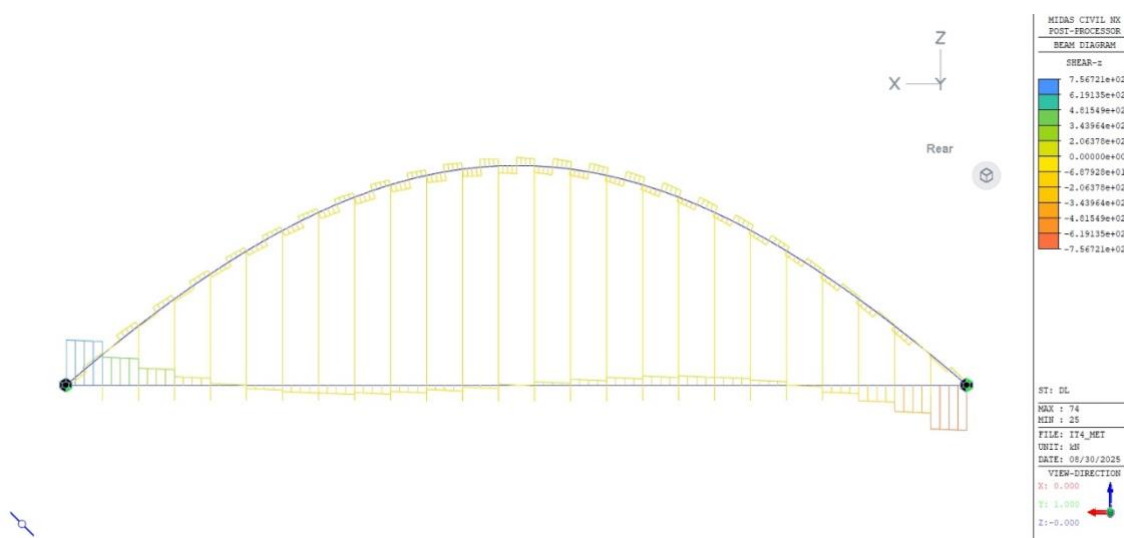


Figura 253. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 4

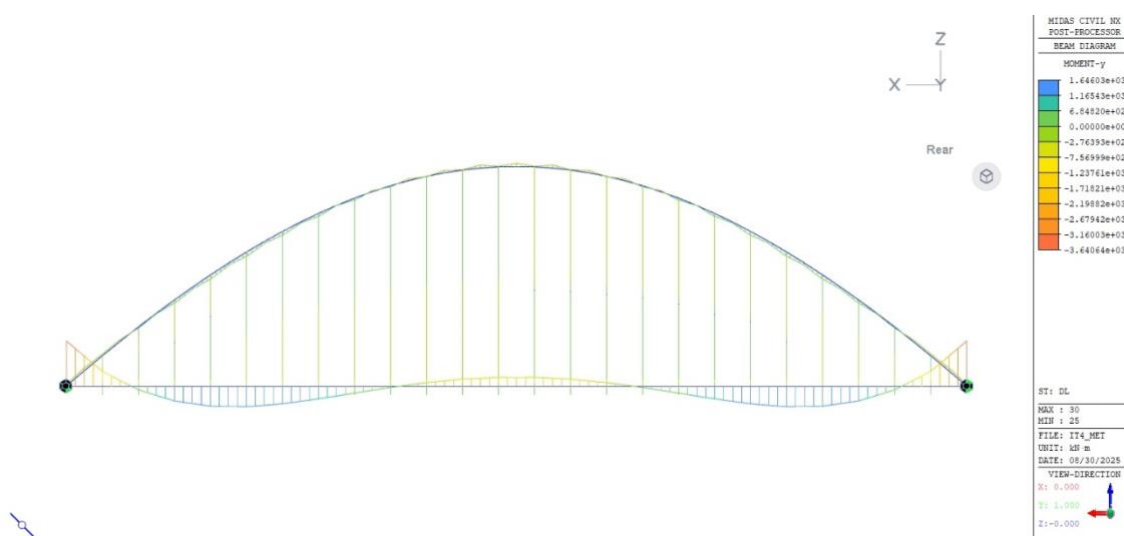


Figura 254. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 4

Las tensiones obtenidas en esta fase se muestran en la siguiente figura:

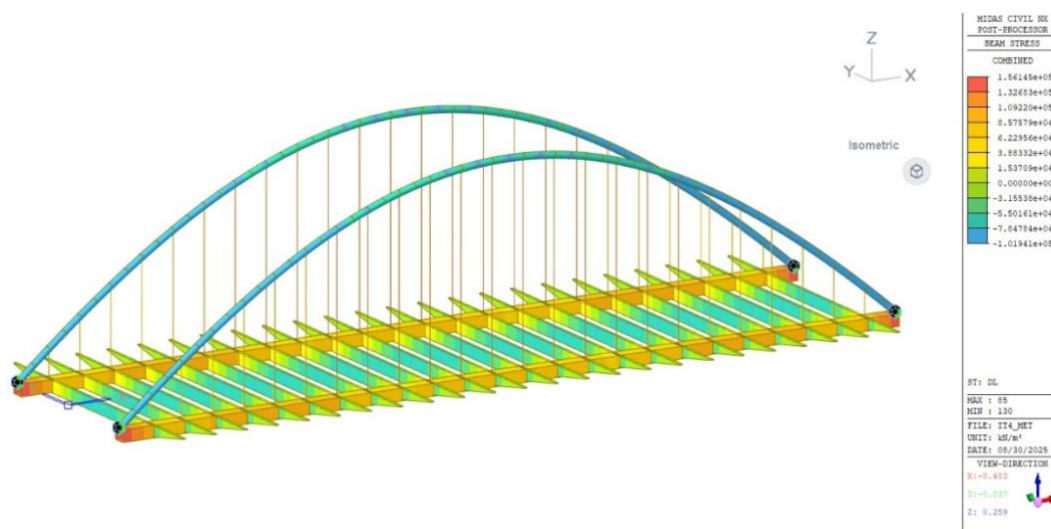


Figura 255. Tensiones en fase metálica para la iteración 4

En la tabla que se muestra a continuación se observan los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en los elementos para esta fase.

Tabla 47. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 4

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-6224	-8153	145	-145	299	-253	-65	-102
Vigas Rectangulares	6225	6225	757	-757	1646	-3641	149	61
Transversales	0	-15.5	257	-257	686	-515	60	-79
Cables	500	162	0	0	0	0	121	32

15.1.4.2. SOBRECARGA

La siguiente fase analizada es la de sobrecarga de uso. Las reacciones obtenidas se muestran en la siguiente figura.



Figura 256. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos se muestran en las siguientes figuras.

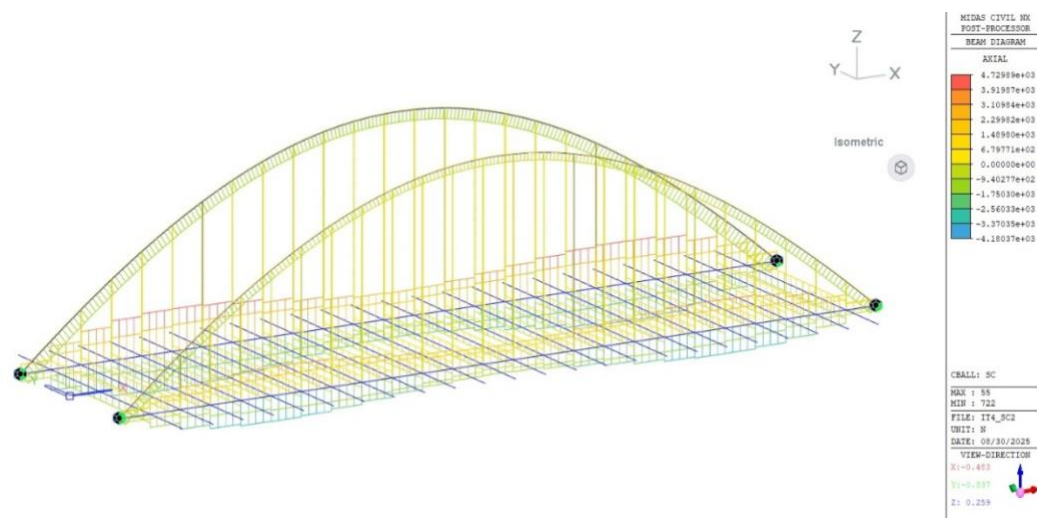


Figura 257. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4

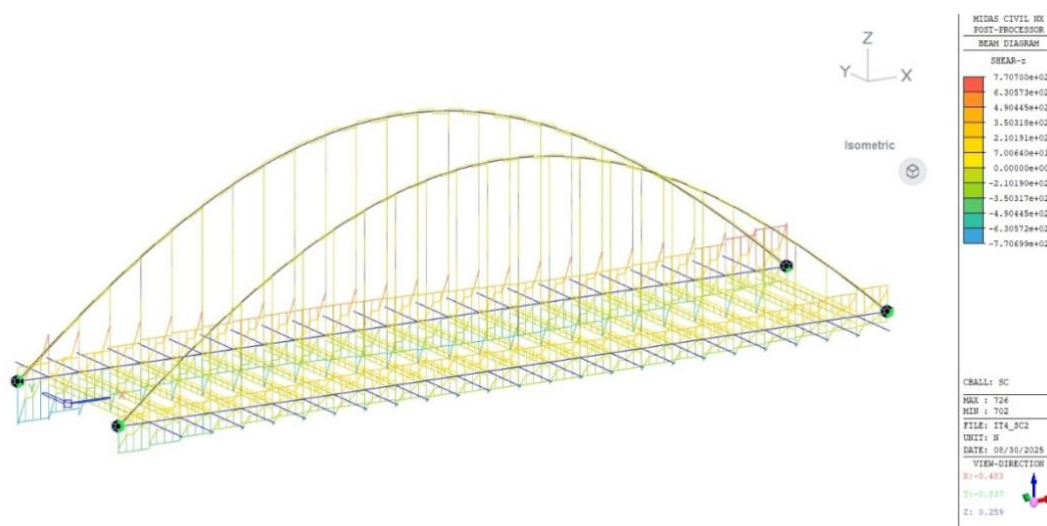


Figura 258. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4

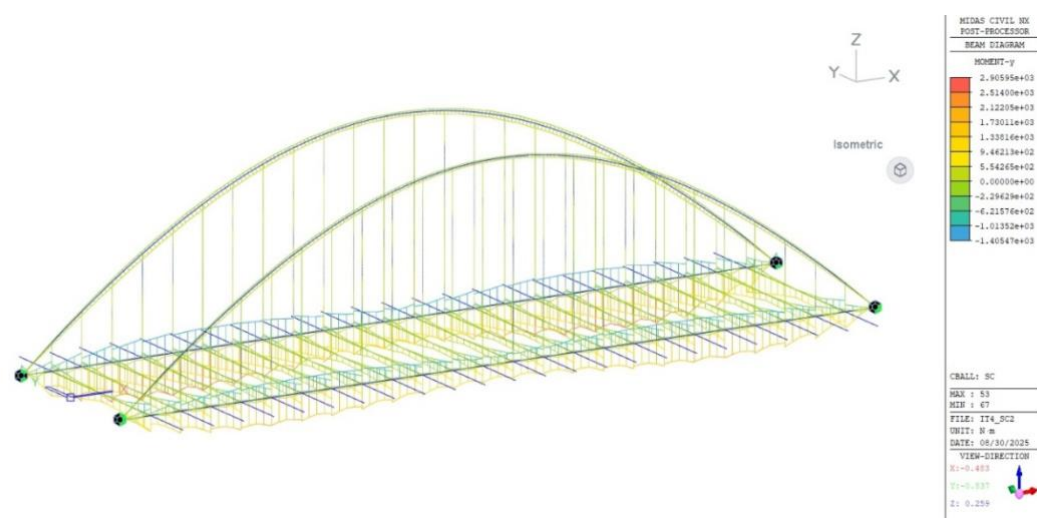


Figura 259. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4

Las tensiones obtenidas en esta fase se muestran a continuación.

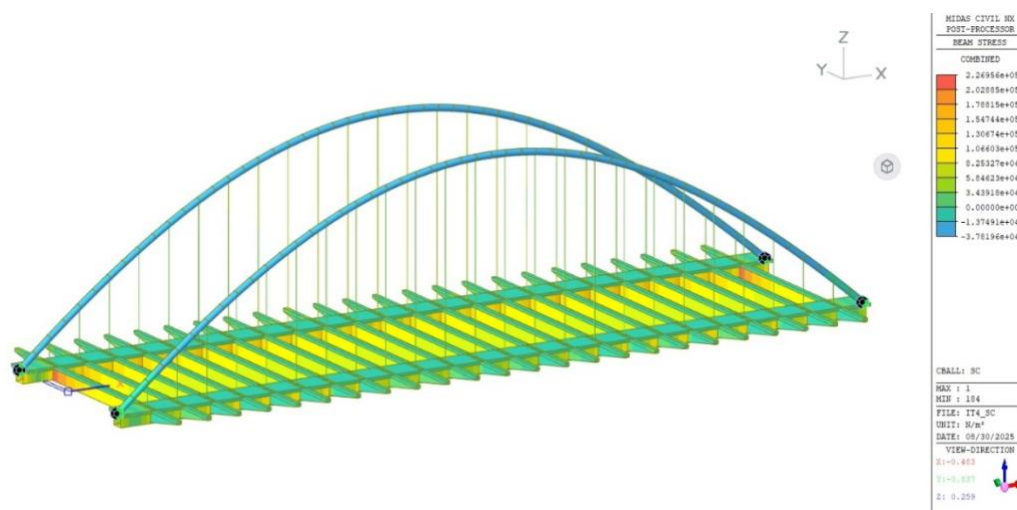


Figura 260. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 4

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 48. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 4

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	106	-1512	47	-47	341	-216	-13	-38
Vigas Rectangulares	4730	-2149	731	-731	2906	-1406	159	14
Transversales	999	0	83	-131	1673	-775	227	0
Cables	100	0	0	0	0	0	40	11

15.1.4.3. CARGA PERMANENTE

Se ha analizado por último el caso de carga permanente. Las reacciones obtenidas se muestran en la siguiente figura:



Figura 261. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 4

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos.



Figura 262. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 4

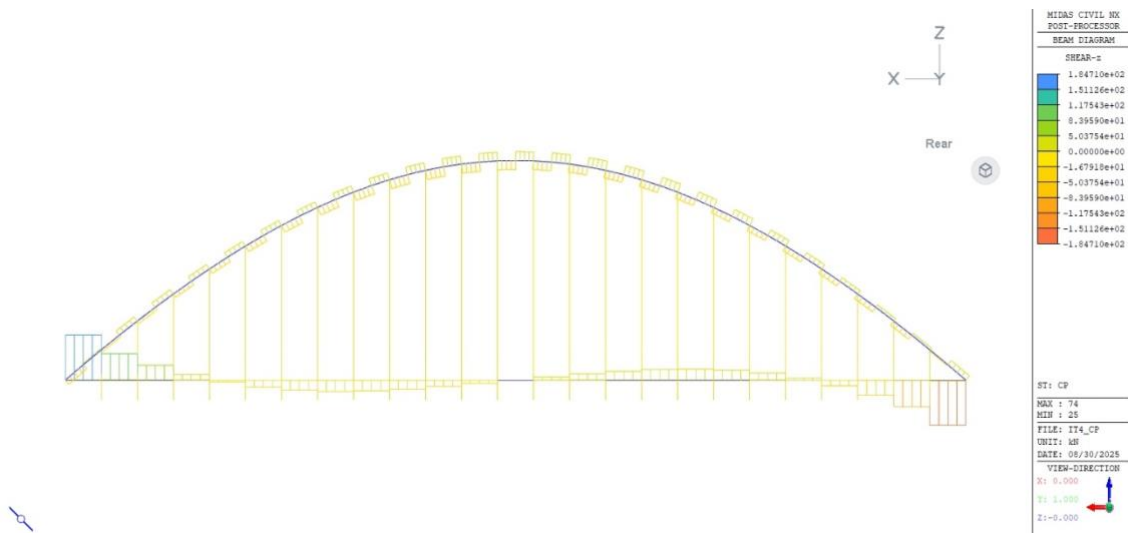


Figura 263. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 4

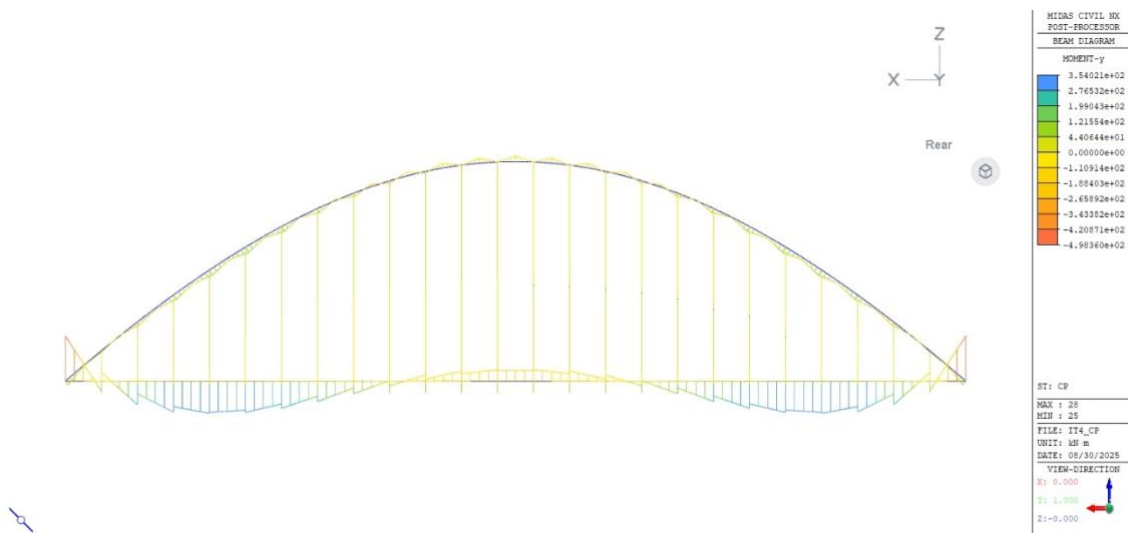
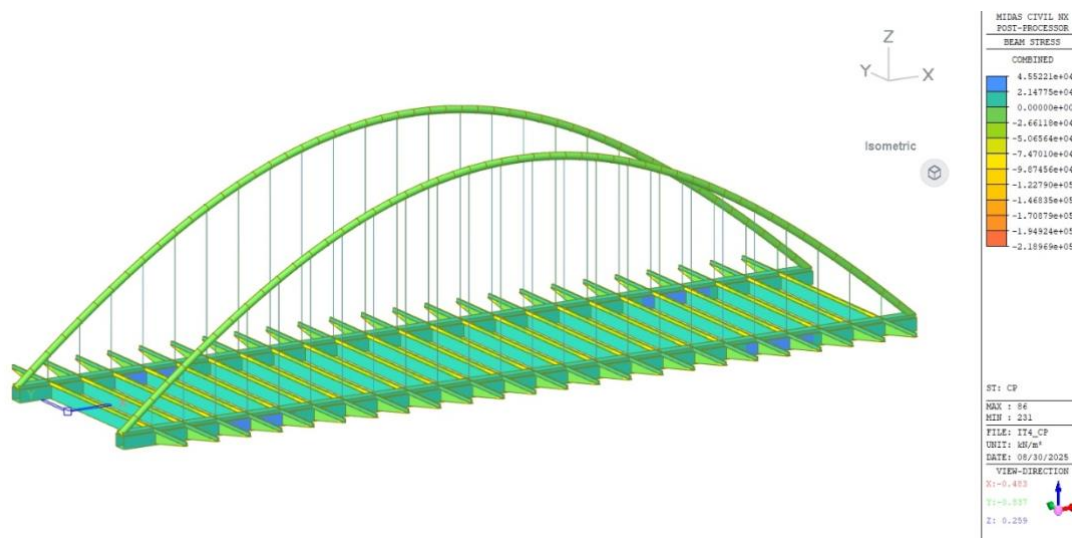


Figura 264. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 4

Las tensiones obtenidas en este caso de carga se muestran a continuación.



La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en este caso de carga.

Tabla 49. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 4

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1677	-2185	38	-38	67	-58	-17	-27
Vigas Rectangulares	1469	941	185	-185	354	-499	23	11
Transversales	43	-43	79	-79	124	-246	7	7
Cables	146	55	0	0	0	0	46	18

15.1.4.4. CANTIDADES DE MATERIAL

A continuación, se muestra la cantidad de cada acero y de hormigón armado necesarias para la obtención de esta estructura resistente.

Tabla 50. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 4

S355 (kg)	393631
S460 (kg)	16388
HA-35 [m³]	1033

15.1.4.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, se muestra en este apartado un resumen de los valores obtenidos en los casos de carga analizados, así como el valor resultante de su combinación.

Se muestran, en primer lugar, las reacciones obtenidas en los diferentes casos de carga y la reacción resultante de su combinación.

Tabla 51. Reacciones totales en la iteración 4

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	6023
SC	1312
CP	1588
Suma	8923

Finalmente, la siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones, así como la combinación de estos.

Tabla 52. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 4

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-6224	-8153	145	-145	299	-253	-65	-102
	Vigas Rectangulares	6225	6225	757	-757	1646	-3641	149	61
	Transversales	0	-15.5	257	-257	686	-515	60	-79
	Cables	500	162	0	0	0	0	121	32
SC	Arco	106	-1512	47	-47	341	-216	-13	-38
	Vigas Rectangulares	4730	-2149	731	-731	2906	-1406	159	14
	Transversales	999	0	83	-131	1673	-775	227	0
	Cables	100	0	0	0	0	0	40	11
CP	Arco	-1677	-2185	38	-38	67	-58	-17	-27
	Vigas Rectangulares	1469	941	185	-185	354	-499	23	11
	Transversales	43	-43	79	-79	124	-246	7	7
	Cables	146	55	0	0	0	0	46	18
Suma	Arco	-7795	-11850	230	-230	707	-527	-95	-167
	Vigas Rectangulares	12424	5017	1673	-1673	4906	-5546	331	86
	Transversales	1042	-58.5	419	-467	2483	-1536	294	-72
	Cables	746	217	0	0	0	0	207	61

Como se puede observar en los resultados, pese a que han bajado las tensiones, estas siguen siendo mayores que la limitación de diseño, por lo que estos resultados no son válidos.

15.1.5 ITERACIÓN 5

Para la siguiente iteración, a la vista de los resultados, se ha aumentado el canto de las vigas rectangulares y se ha reducido ligeramente el diámetro del arco y el número de péndolas y vigas transversales.

Tabla 53. Parámetros utilizados en la iteración 5

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		0,5	m
Vigas rectangulares	H	1,4	m
	B	1,4	m
Nº transversales y péndolas		22	a cada lado

La geometría correspondiente a estos parámetros es la siguiente:

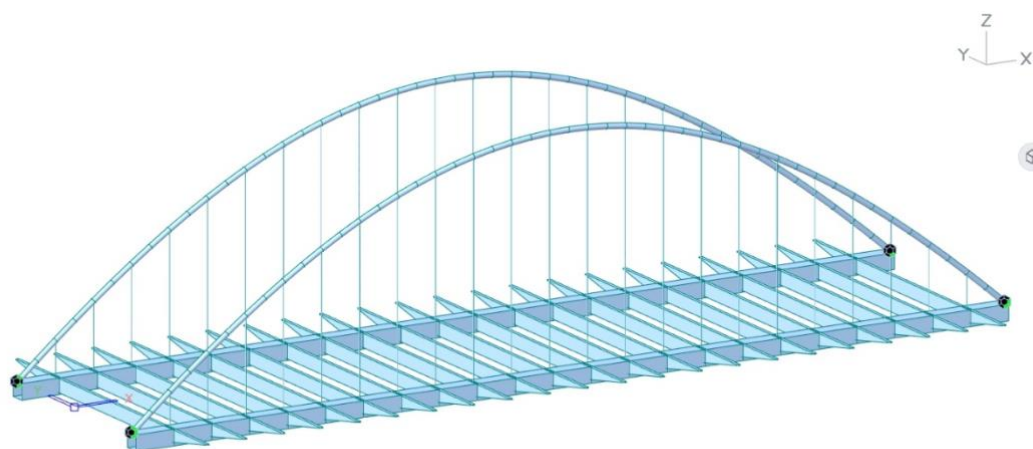


Figura 265. Estructura metálica en la iteración 5

15.1.5.1. FASE METÁLICA

Las reacciones obtenidas en la fase metálica son las siguientes:

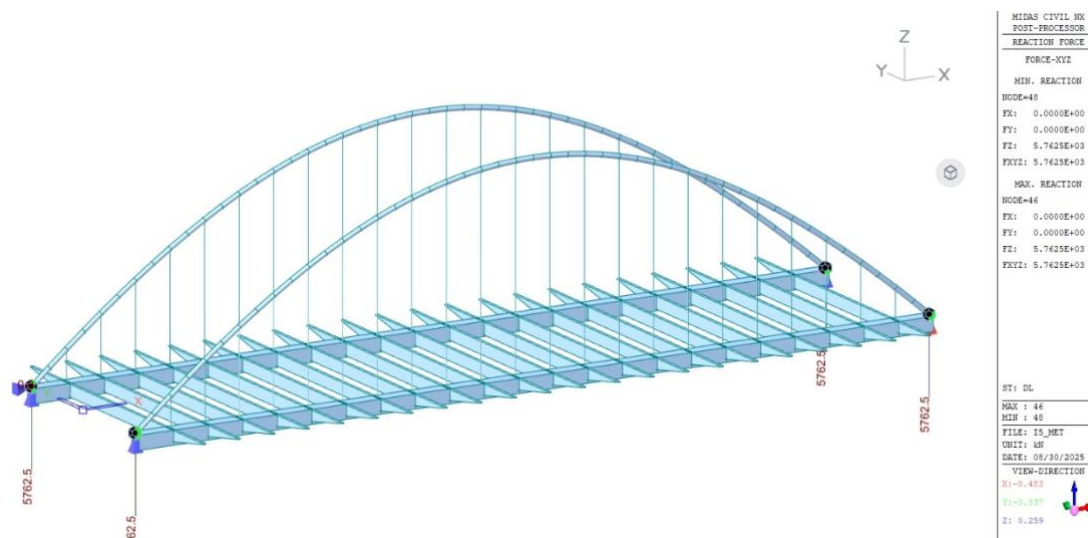


Figura 266. Reacciones en la fase metálica para la iteración 5

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en la fase metálica.

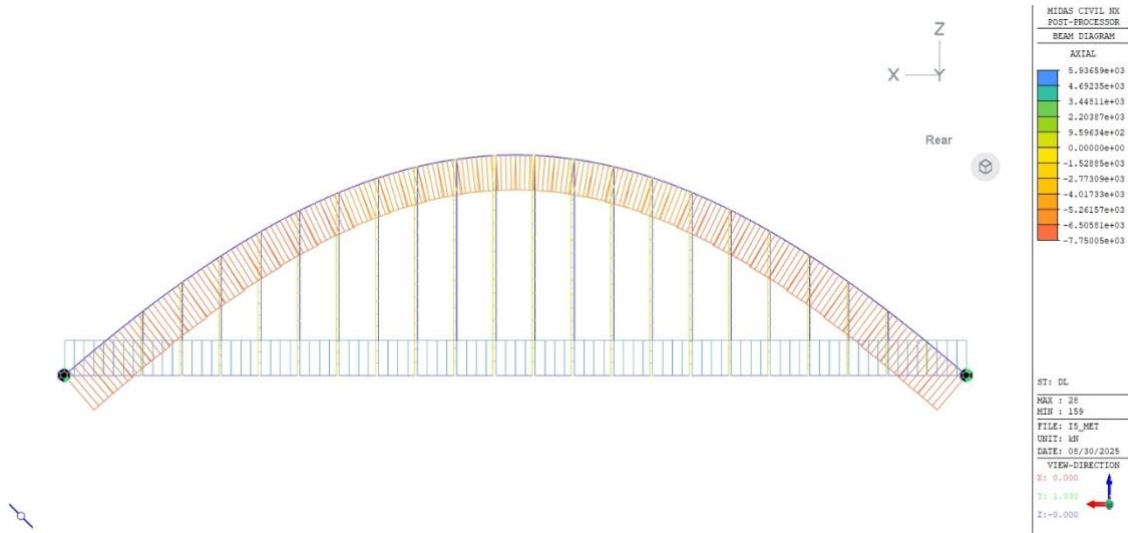


Figura 267. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración

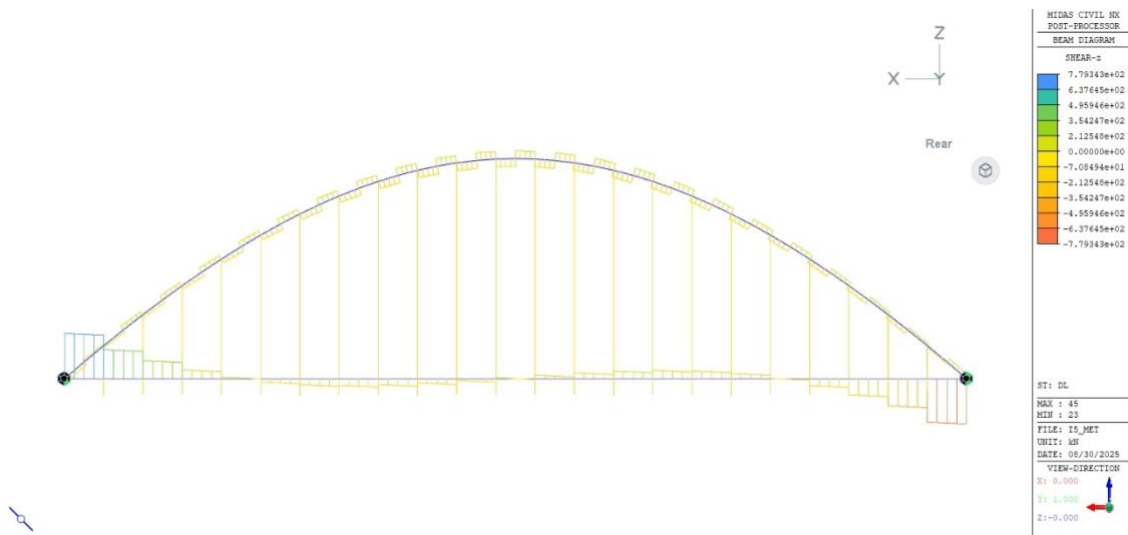


Figura 268. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 5



Figura 269. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 5

Las tensiones obtenidas en esta fase se muestran a continuación:

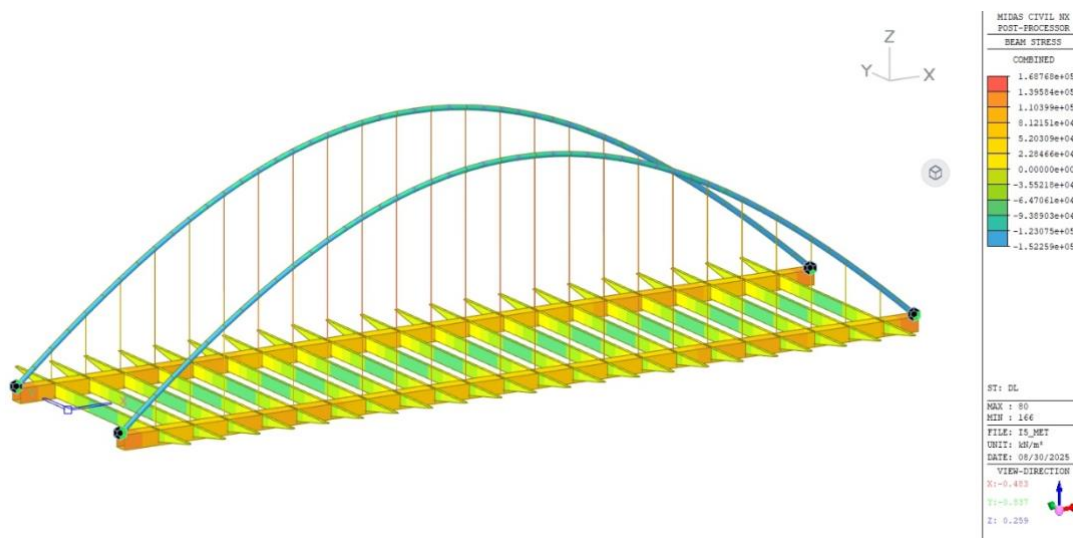


Figura 270. Tensiones en fase metálica para la iteración 5

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento en esta fase.

Tabla 54. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 5

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-5935	-7750	142	-142	142	-143	-107	-152
Vigas Rectangulares	5935	5935	779	-779	1747	-4235	138	54
Transversales	0	-17	28	-28	738	-560	65	-86
Cables	542	212	0	0	0	0	169	68

15.1.5.2. SOBRECARGA

Las reacciones obtenidas en la fase de sobrecarga se muestran en la siguiente figura:

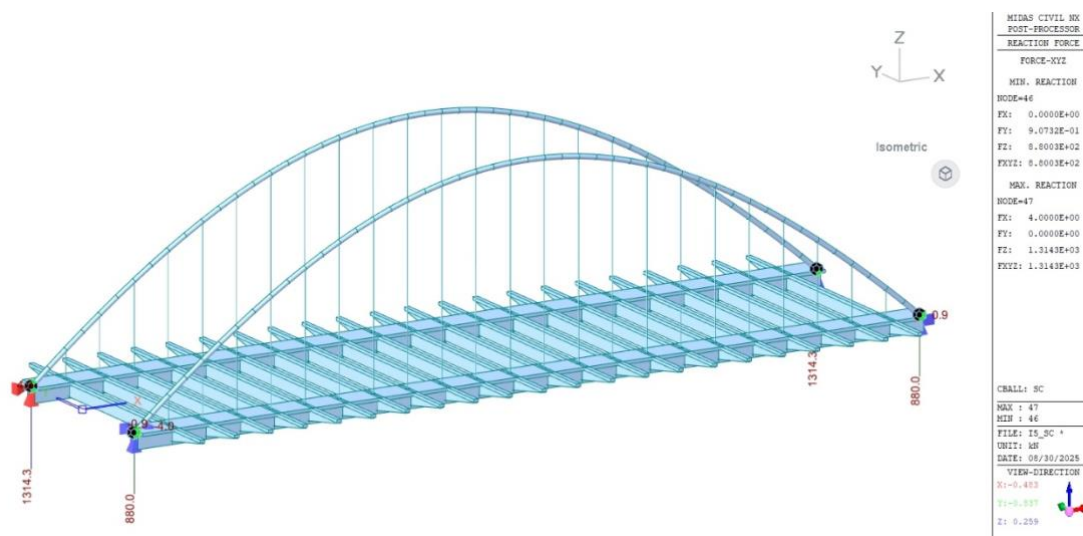


Figura 271. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5

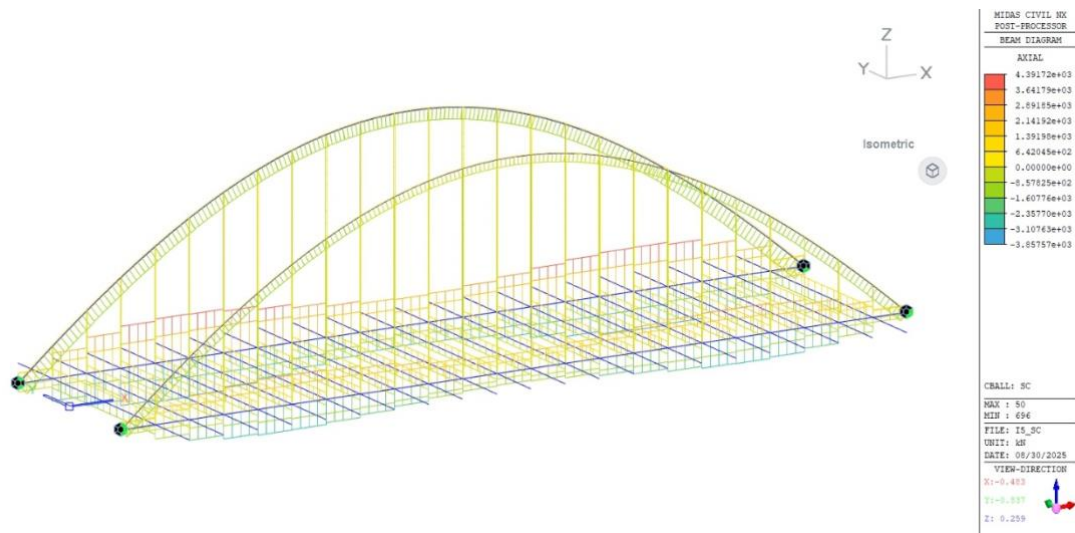


Figura 272. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5

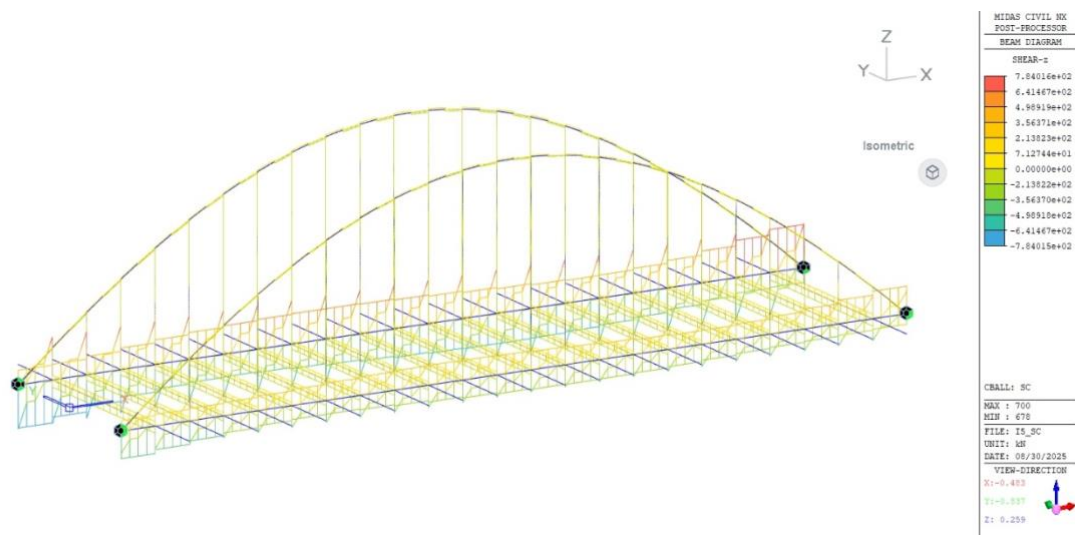


Figura 273. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5

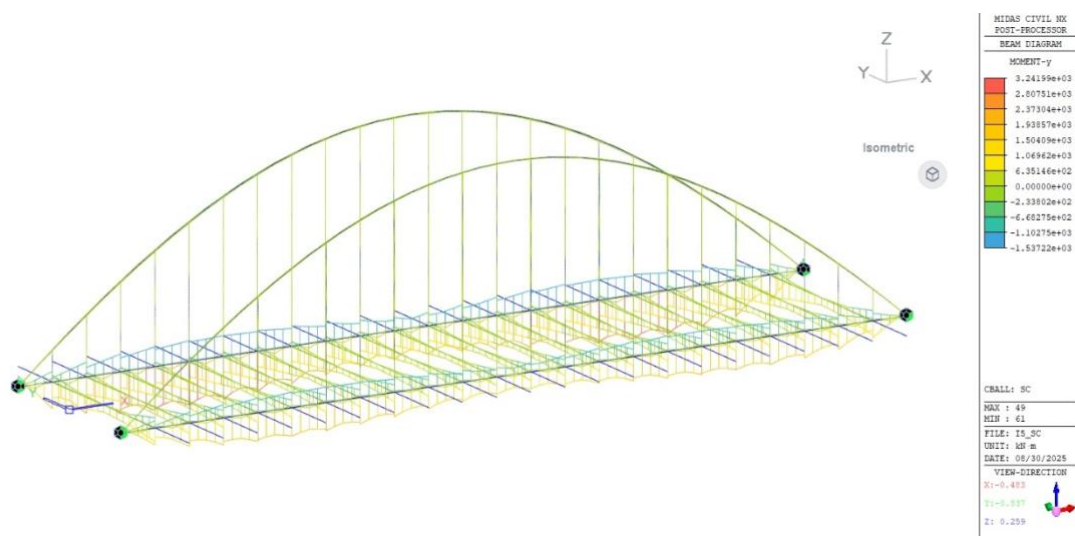


Figura 274. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5

Las tensiones obtenidas en esta fase son las siguientes.

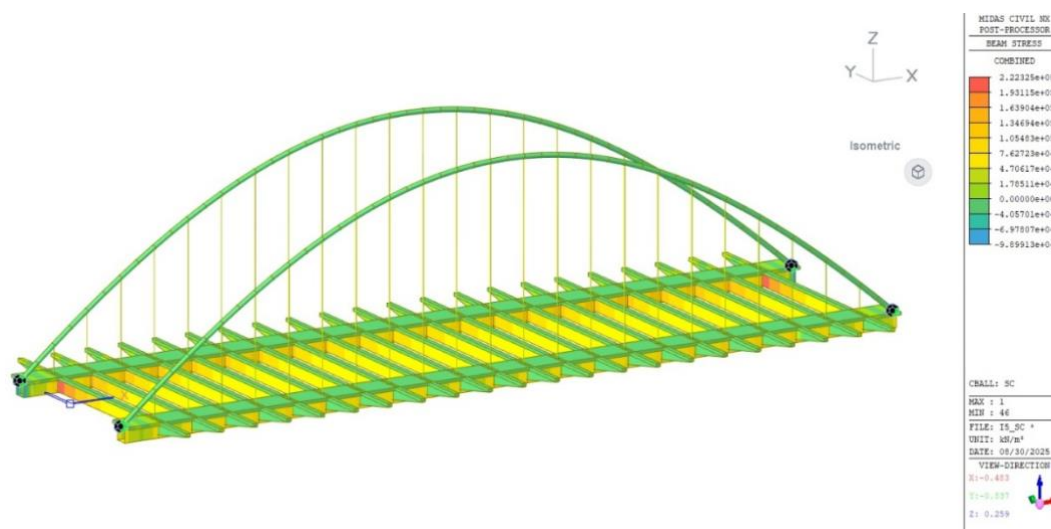


Figura 275. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 5

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento de la estructura resistente de axiles, cortantes, momentos y tensiones.

Tabla 55. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 5

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	113	-1502	33	-33	95	-63	-17	-38
Vigas Rectangulares	4360	-1907	768	-768	3542	-1537	141	-99
Transversales	972	0	80	-128	1639	-751	223	0
Cables	117	0	0	0	0	0	40	11

15.1.5.3. CARGA PERMANENTE

La siguiente figura recoge las reacciones obtenidas en el caso de carga permanente.

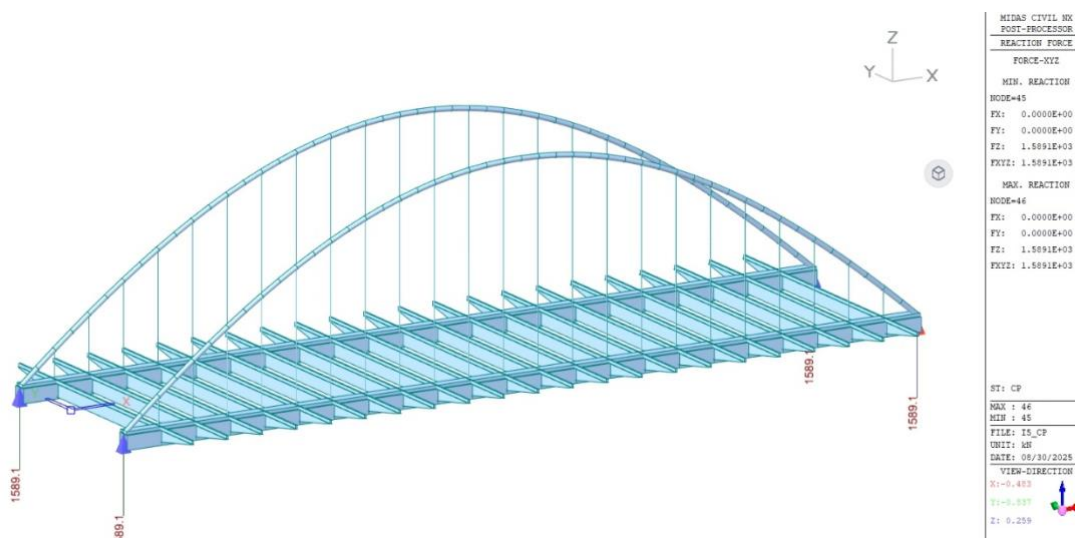


Figura 276. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 5

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos se muestran a continuación.

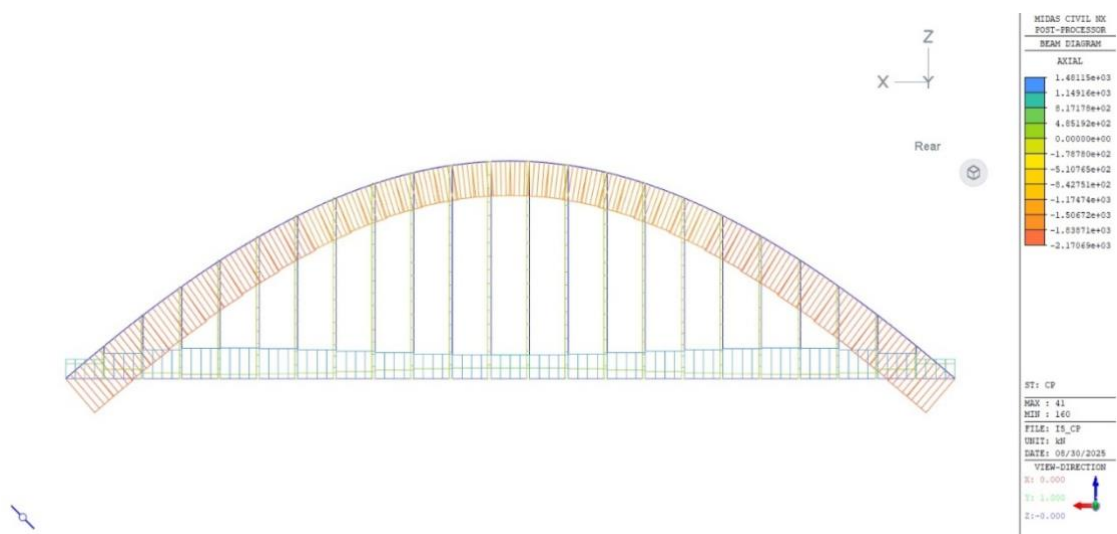


Figura 277. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 5

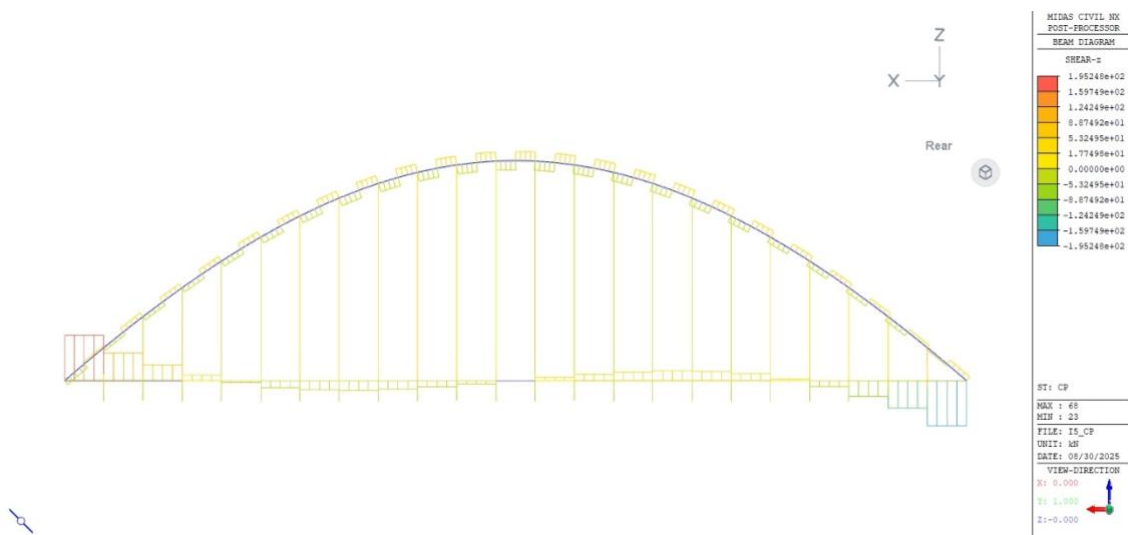


Figura 278. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 5

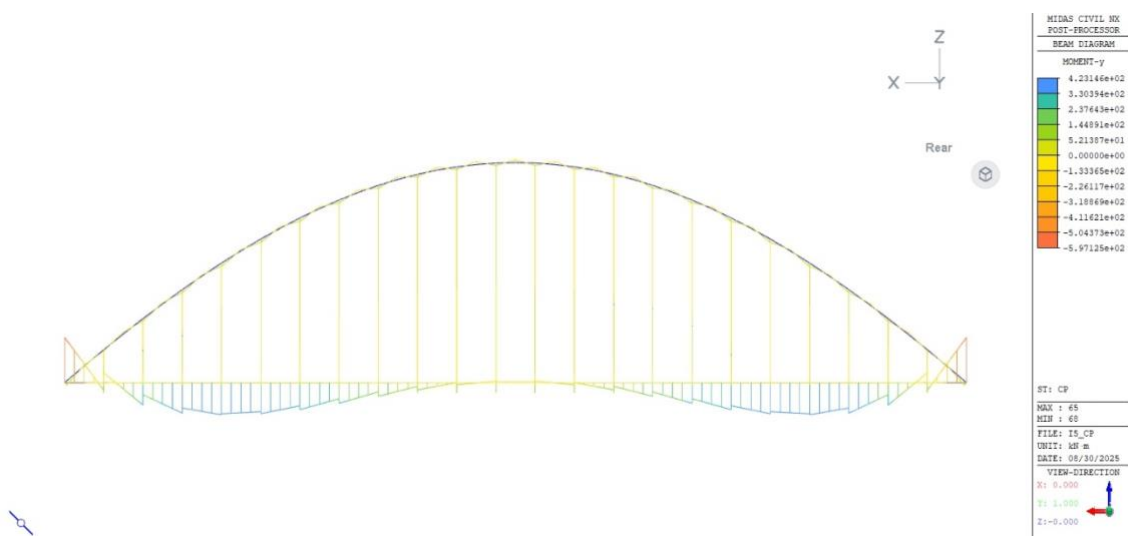


Figura 279. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 5

Las tensiones en la estructura resistente son las siguientes:

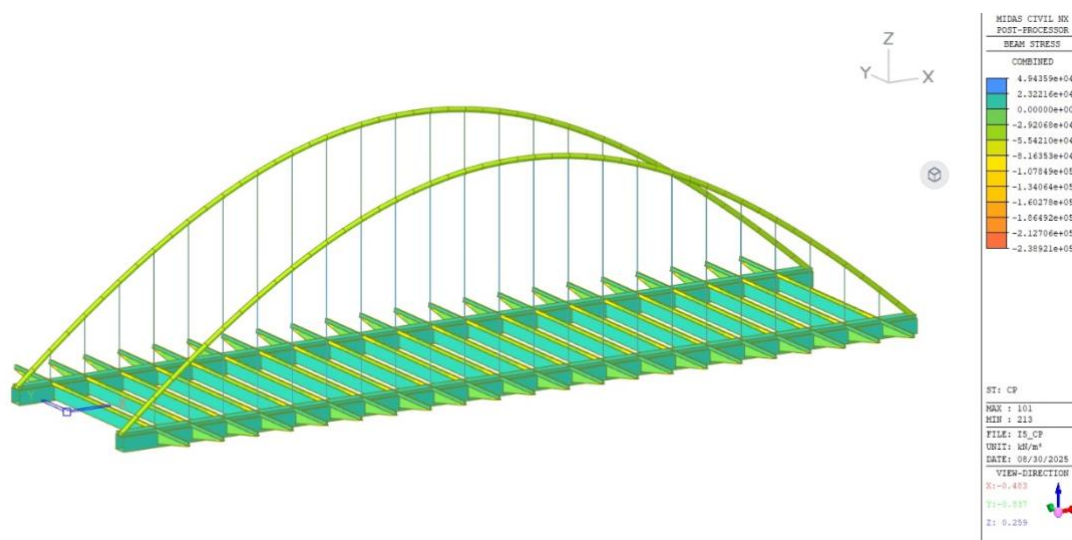


Figura 280. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 5

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados en cada elemento.

Tabla 56. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 5

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1666	-2170	39	-39	44	-39	-30	-47
Vigas Rectangulares	1481	952	185	-195	423	-597	22	11
Transversales	47	-22	87	-87	135	-268	8	8
Cables	159	67	0	0	0	0	50	22

15.1.5.4. CANTIDADES DE MATERIAL

En la siguiente tabla se recogen las cantidades necesarias de cada material para la construcción de la estructura resistente de la iteración 5.

Tabla 57. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 5

S355 (kg)	309935
S460 (kg)	15073
HA-35 [m ³]	794

15.1.5.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Finalmente, en este apartado se recogen los valores obtenidos en los diferentes casos de carga, así como la combinación de estos.

Se muestra, en primer lugar, una tabla con los valores de las reacciones obtenidas en cada caso y en la combinación de estos.

Tabla 58. Reacciones totales en la iteración 5

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	5763
SC	1314
CP	1589
Suma	8666

Por último, la siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento, así como la combinación de estos.

Tabla 59. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 5

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-5935	-7750	142	-142	142	-143	-107	-152
	Vigas Rectangulares	5935	5935	779	-779	1747	-4235	138	54
	Transversales	0	-17	28	-28	738	-560	65	-86
	Cables	542	212	0	0	0	0	169	68
SC	Arco	113	-1502	33	-33	95	-63	-17	-38
	Vigas Rectangulares	4360	-1907	768	-768	3542	-1537	141	-99
	Transversales	972	0	80	-128	1639	-751	223	0
	Cables	117	0	0	0	0	0	40	11
CP	Arco	-1666	-2170	39	-39	44	-39	-30	-47
	Vigas Rectangulares	1481	952	185	-195	423	-597	22	11
	Transversales	47	-22	87	-87	135	-268	8	8
	Cables	159	67	0	0	0	0	50	22
Suma	Arco	-7488	-11422	214	-214	281	-245	-154	-237
	Vigas Rectangulares	11776	4980	1732	-1742	5712	-6369	301	-34
	Transversales	1019	-39	195	-243	2512	-1579	296	-78
	Cables	818	279	0	0	0	0	259	101

Como se observa en los resultados de tensiones, todos los valores se encuentran por debajo del límite de tensiones impuesto, por lo que esta geometría resulta. Sin embargo, se ha decidido seguir iterando para comprobar si se puede optimizar aún más el modelo, ya que existe aún algo de margen hasta el límite de tensiones propuesto.

15.1.6 ITERACIÓN 6

Para la siguiente iteración, se han comprobado los esfuerzos y tensiones para una reducción a 18 cables y vigas transversales.

Tabla 60. Parámetros utilizados en la iteración 6

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		0,5	m
Vigas rectangulares	H	1,4	m
	B	1,4	m
Nº transversales y péndolas		18	a cada lado

La geometría correspondiente a estos valores es la que se muestra a continuación.

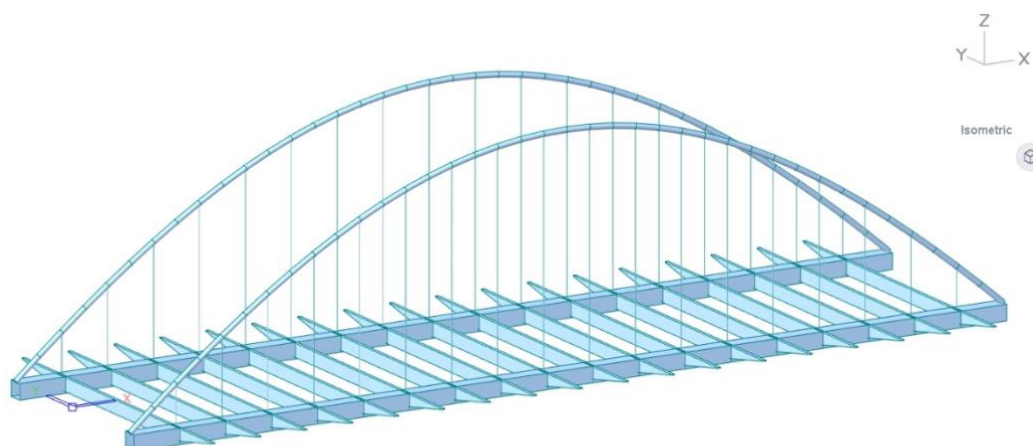


Figura 281. Estructura metálica en la iteración 6

15.1.6.1. FASE METÁLICA

Las reacciones obtenidas en la fase metálica se muestran a continuación.

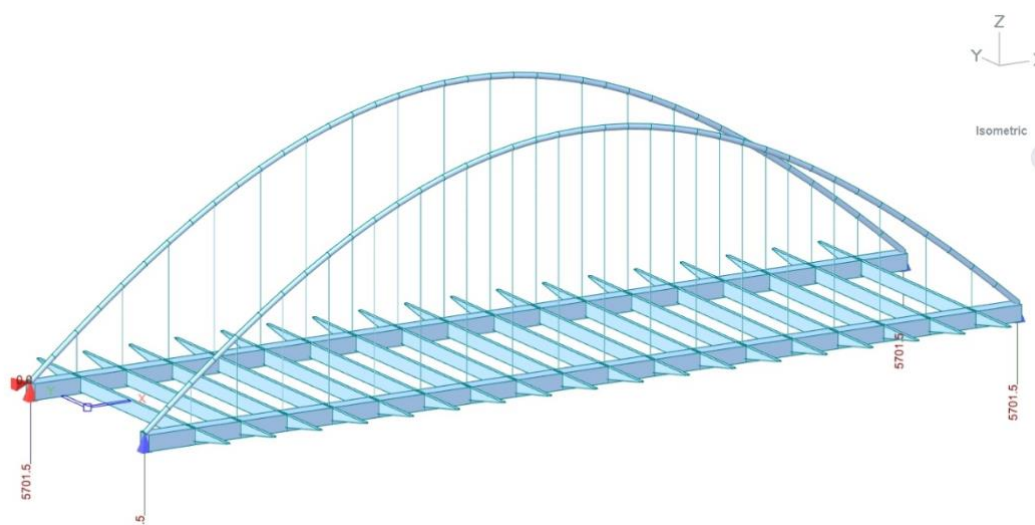


Figura 282. Reacciones en la fase metálica para la iteración 6

Se muestran en las siguientes figuras los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en la fase metálica.

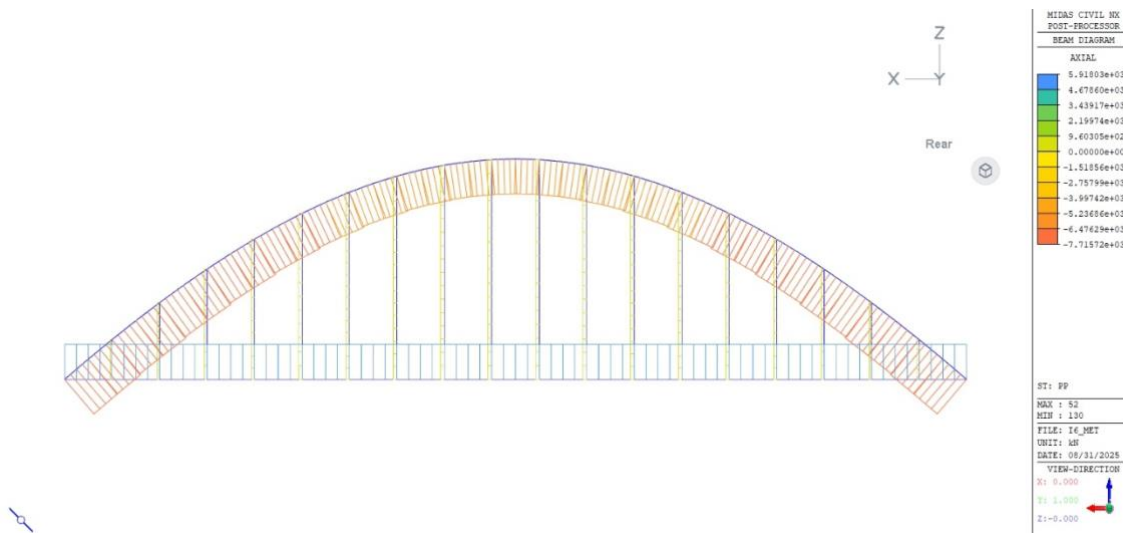


Figura 283. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 6

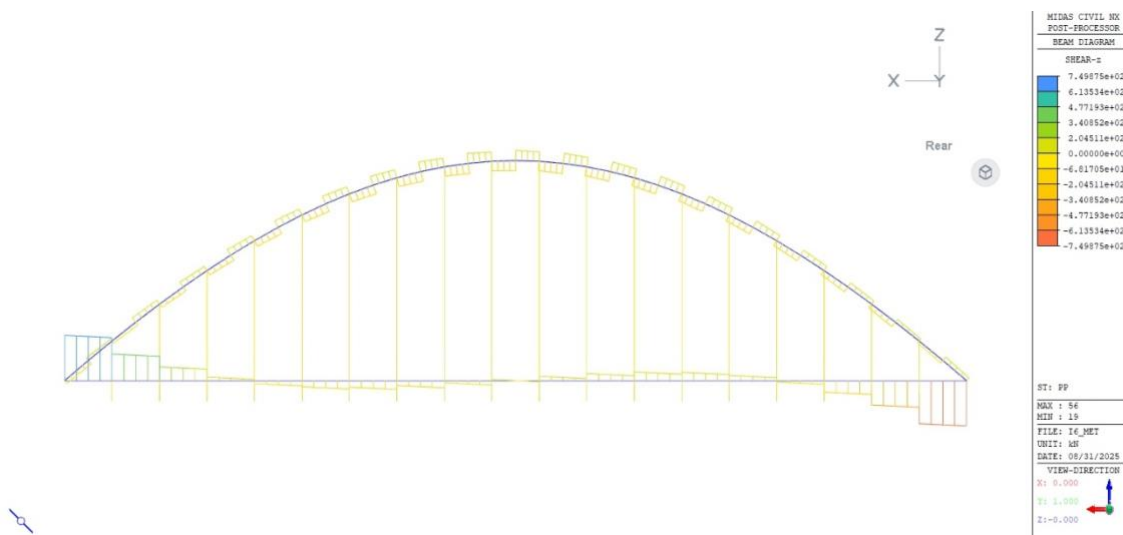


Figura 284. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 6

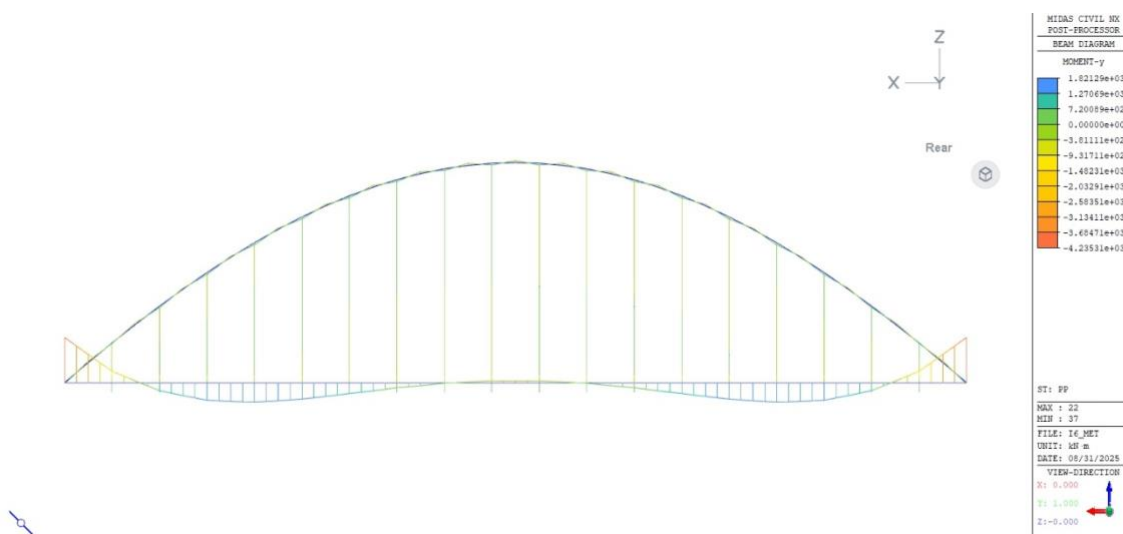


Figura 285. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 6

Las tensiones obtenidas en este caso de carga se muestran en la siguiente figura.

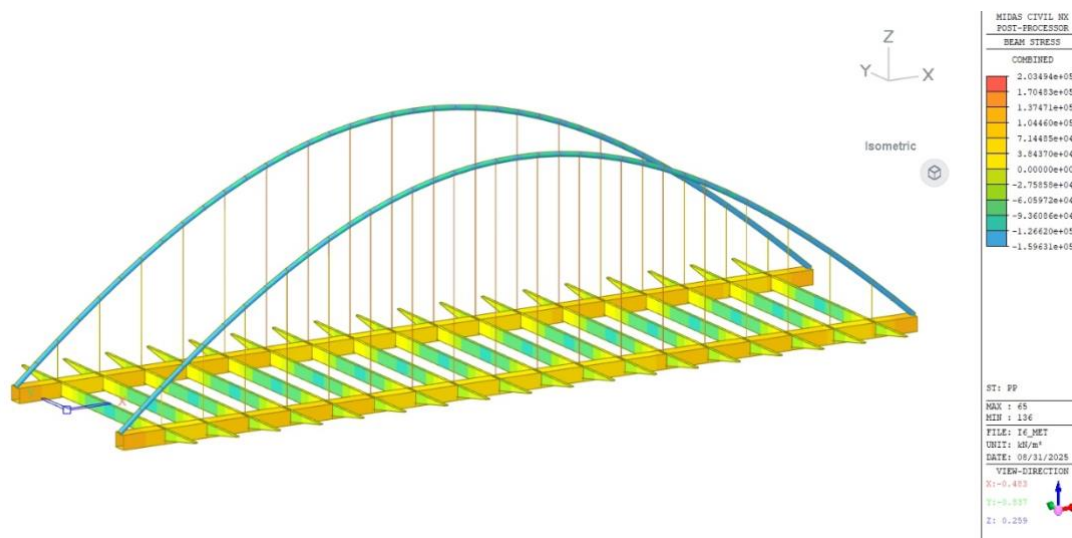


Figura 286. Tensiones en fase metálica para la iteración 6

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos.

Tabla 61. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 6

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-5917	-7716	171	-171	185	-200	-107	-160
Vigas Rectangulares	5917	5917	750	-750	1821	-4235	138	57
Transversales	0	-20	34	-34	887	-680	79	-103
Cables	653	285	0	0	0	0	203	91

15.1.6.2. SOBRECARGA

Las reacciones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso se muestran a continuación.

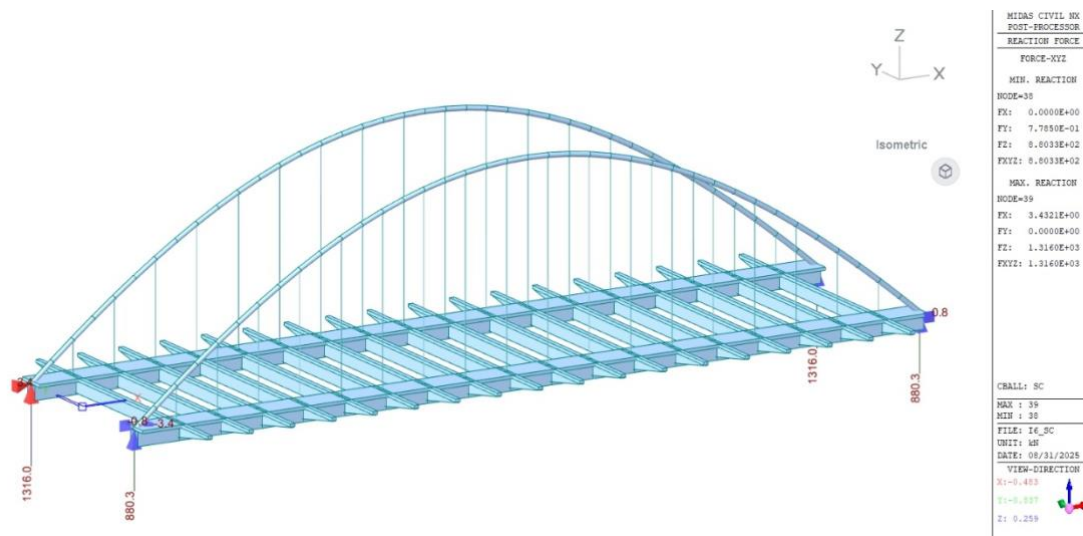


Figura 287. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos se muestran en las siguientes figuras.

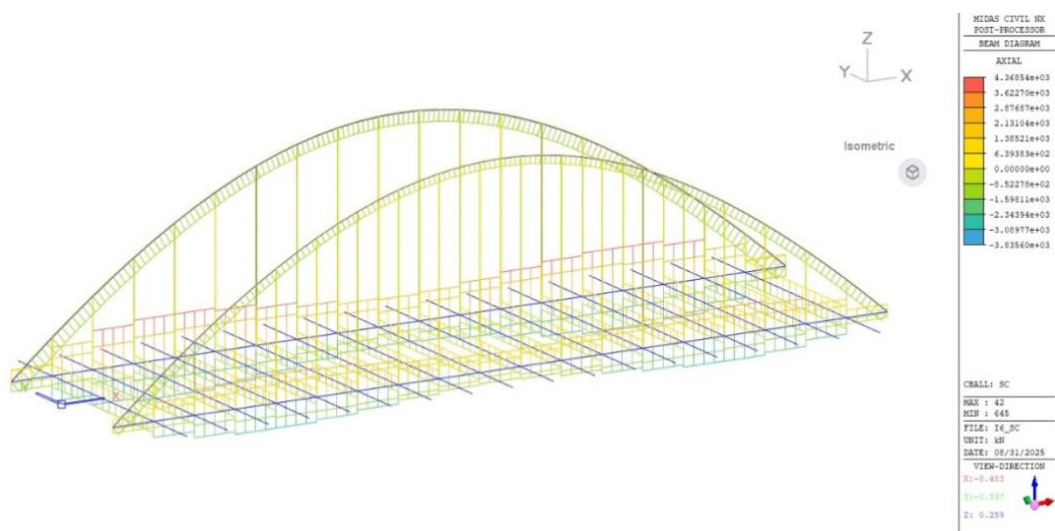


Figura 288. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6

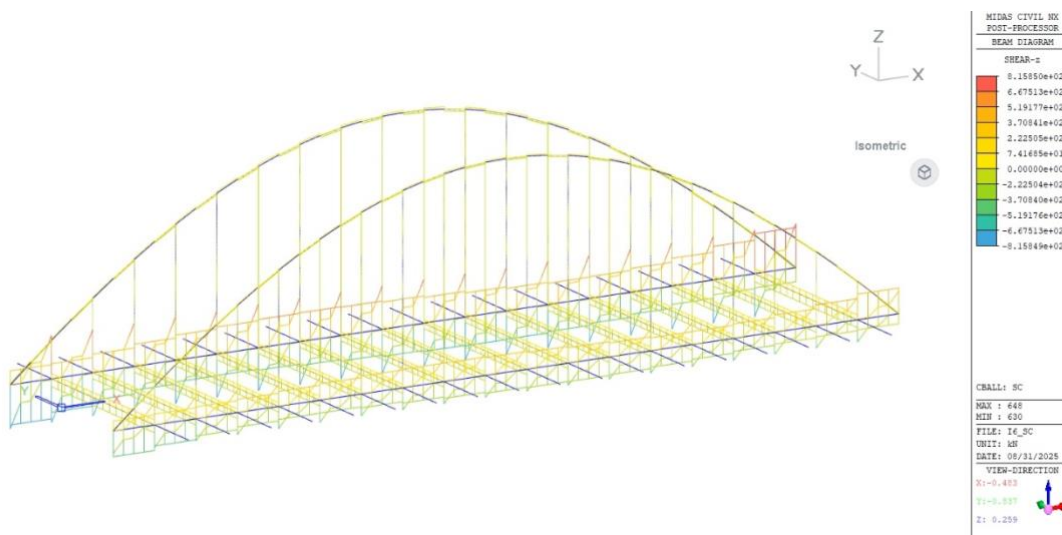


Figura 289. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6

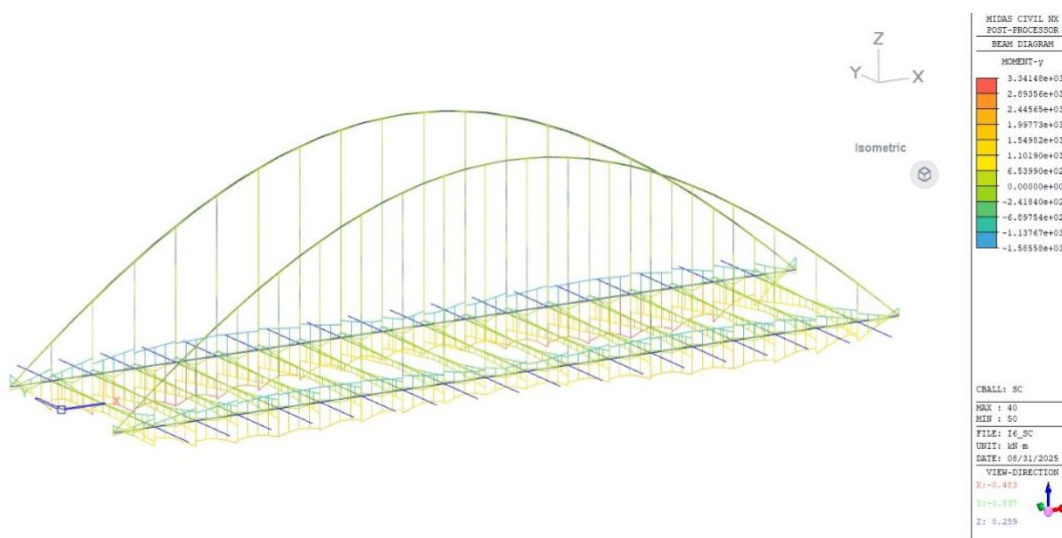


Figura 290. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6

Las tensiones halladas en este caso de carga se muestran en la siguiente figura.

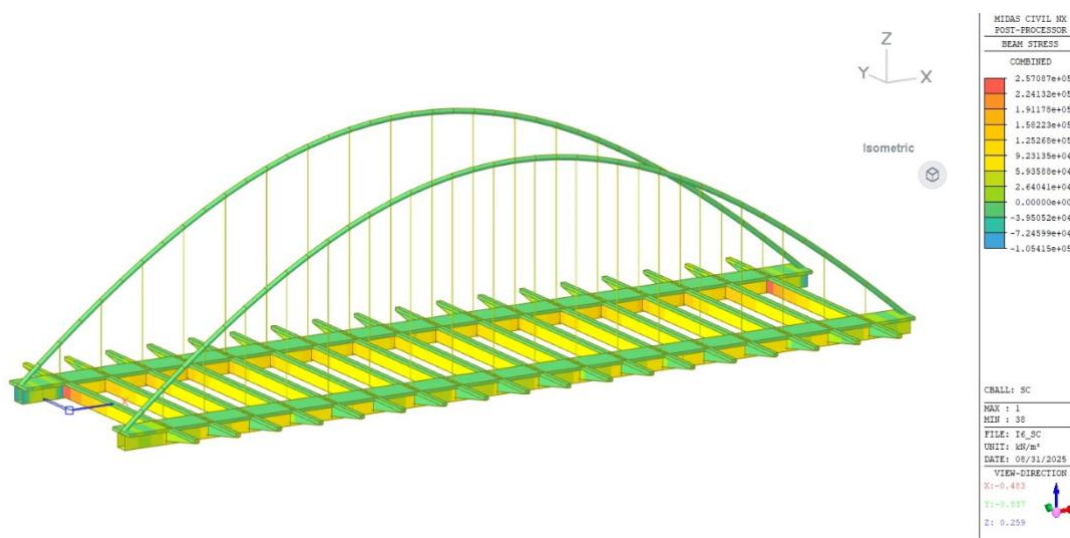


Figura 291. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 6

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 62. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 6

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	117	-1502	39	-39	103	-73	-17	-39
Vigas Rectangulares	4369	-1934	742	-742	3345	-1586	141	-105
Transversales	1136	0	91	-148	1893	-854	257	0
Cables	141	0	0	0	0	0	47	13

15.1.6.3. CARGA PERMANENTE

Las reacciones obtenidas en el caso de carga permanente se muestran a continuación.

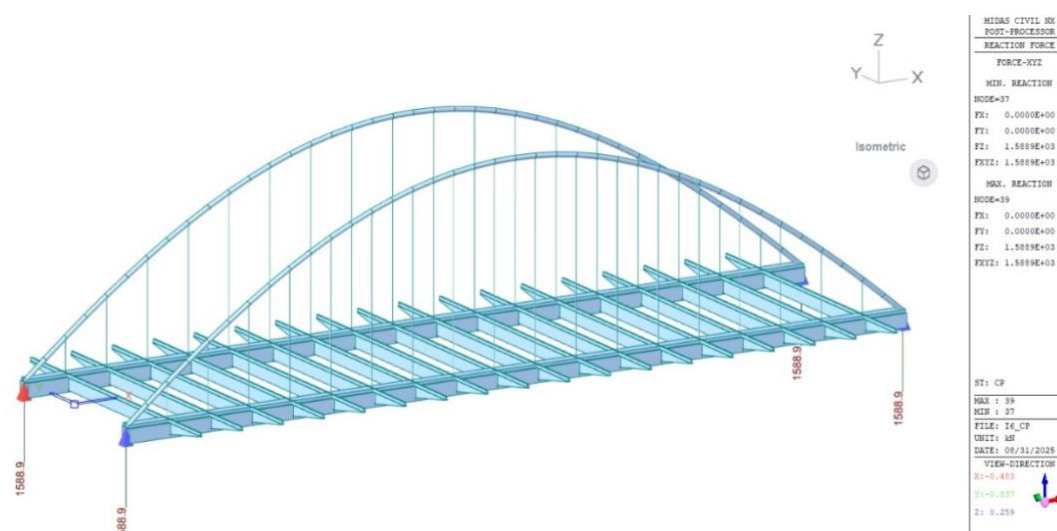


Figura 292. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 6

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos se muestran en las siguientes figuras.

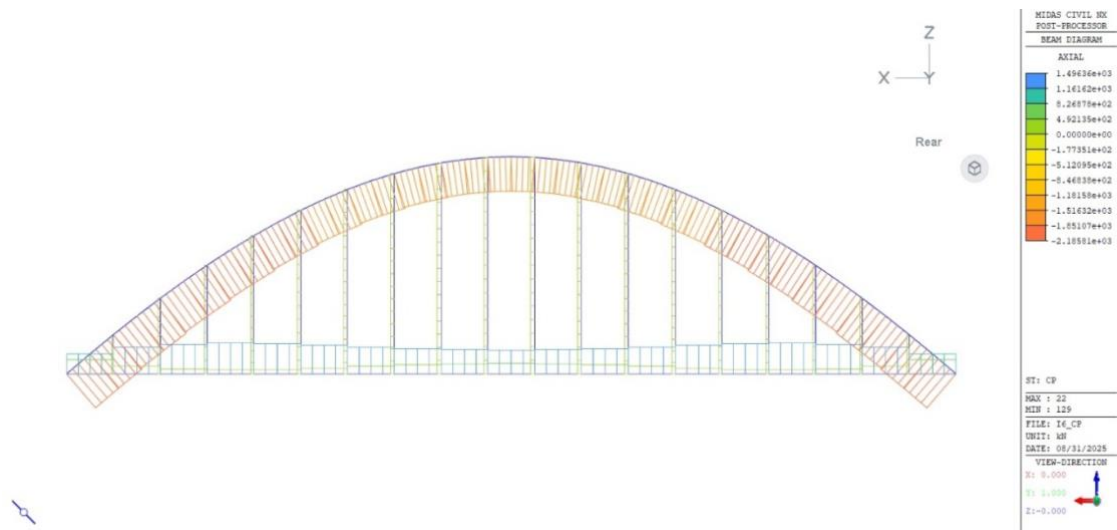


Figura 293. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 6

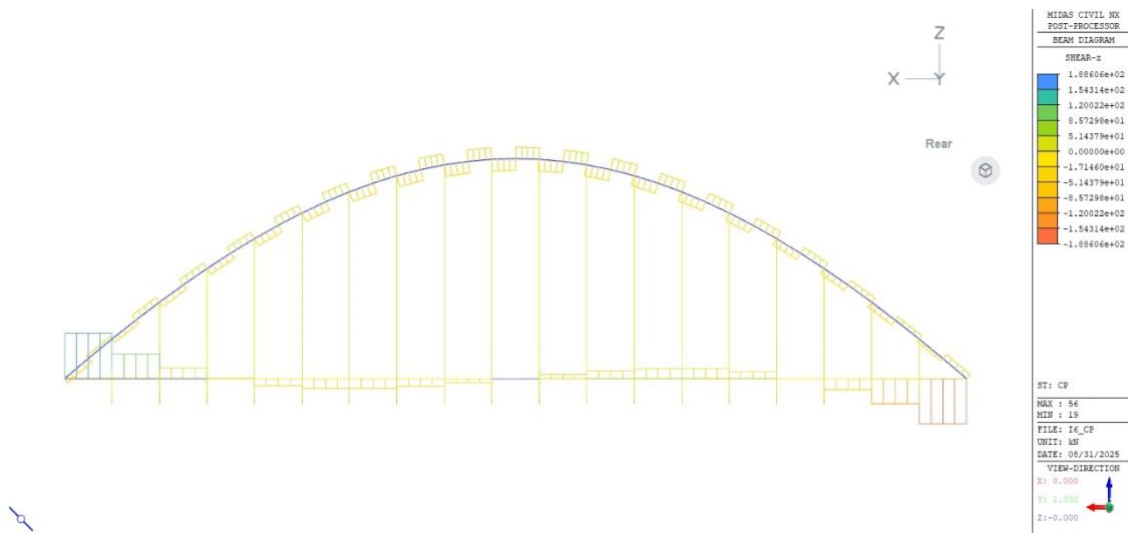


Figura 294. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 6

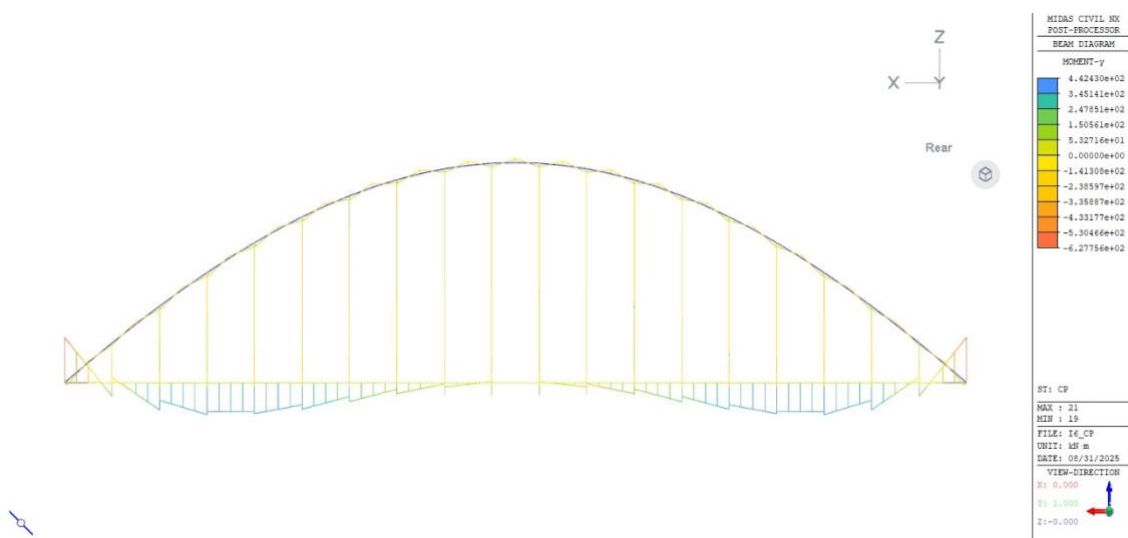


Figura 295. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 6

Las tensiones obtenidas en este caso de carga se muestran en la siguiente figura.

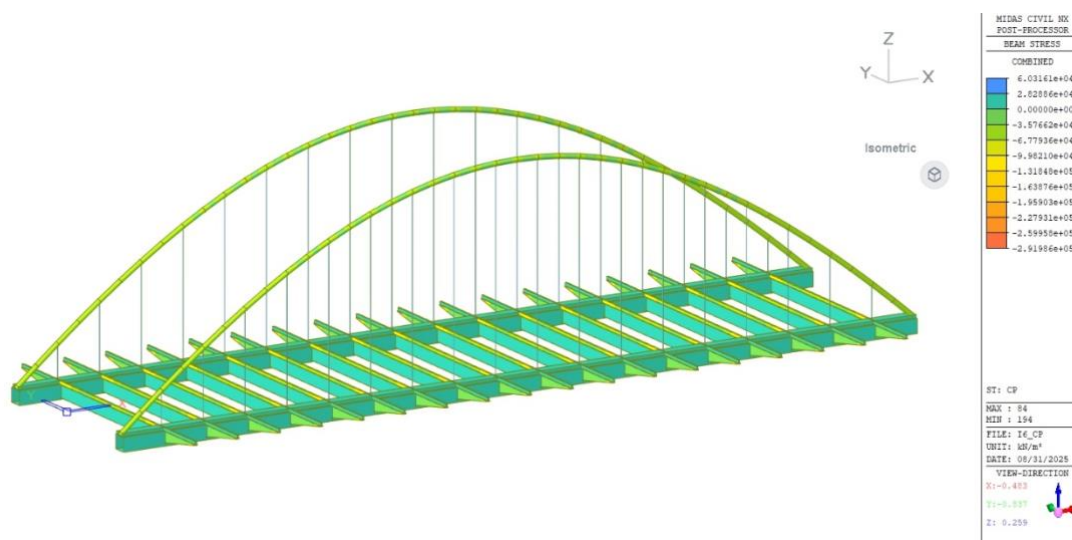


Figura 296. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 6

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos hallados en cada elemento de axiles, cortantes, momentos y tensiones en esta fase.

Tabla 63. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 6

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1680	-2186	48	-48	53	-57	-30	-48
Vigas Rectangulares	1496	985	189	-189	443	-628	22	11
Transversales	58	-27	106	-106	165	-328	10	8
Cables	194	91	0	0	0	0	61	22

15.1.6.4. CANTIDADES DE MATERIAL

A continuación, se muestran las cantidades de acero S355 y S460, así como de hormigón armado HA-35, necesarias para la elaboración de la estructura resistente de esta iteración.

Tabla 64. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 6

S355 (kg)	287449
S460 (kg)	12441
HA-35 [m³]	794

15.1.6.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, en este apartado se muestra un resumen de los valores obtenidos en cada fase analizada, así como la combinación de estos.

La siguiente tabla recoge las reacciones obtenidas en cada caso de carga y la resultante de la combinación de estos.

Tabla 65. Reacciones totales en la iteración 6

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	5702
SC	1316
CP	1589
Suma	8607

Finalmente, la siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axil, cortante, momento y tensiones hallados en cada caso de carga, además de la combinación de estos.

Tabla 66. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 6

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-5917	-7716	171	-171	185	-200	-107	-160
	Vigas Rectangulares	5917	5917	750	-750	1821	-4235	138	57
	Transversales	0	-20	340	-340	887	-680	79	-103
	Cables	653	285	0	0	0	0	203	91
SC	Arco	117	-1502	39	-39	103	-73	-17	-39
	Vigas Rectangulares	4369	-1934	742	-742	3345	-1586	141	-105
	Transversales	1136	0	91	-148	1893	-854	257	0
	Cables	141	0	0	0	0	0	47	13
CP	Arco	-1680	-2186	48	-48	53	-57	-30	-48
	Vigas Rectangulares	1496	985	189	-189	443	-628	22	11
	Transversales	58	-27	106	-106	165	-328	10	8
	Cables	194	91	0	0	0	0	61	22
Suma	Arco	-7480	-11404	258	-258	341	-330	-154	-247
	Vigas Rectangulares	11782	4968	1681	-1681	5609	-6449	301	-37
	Transversales	1194	-47	537	-594	2945	-1862	346	-95
	Cables	988	376	0	0	0	0	311	126

A la vista de los resultados, la reducción del número de vigas transversales ha sido excesiva, por lo que esta geometría no resulta válida para la limitación de tensiones de diseño.

15.1.7 ITERACIÓN 7

La siguiente iteración se ha realizado aumentando el número de vigas transversales, para lograr reducir las tensiones que se producen en estas, y reduciendo la base de las vigas rectangulares, con el objetivo de optimizar la sección.

Tabla 67. Parámetros utilizados en la iteración 7

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		0,5	m
Vigas rectangulares	H	1,4	m
	B	1,2	m
Nº transversales y péndolas		20	a cada lado

La geometría correspondiente a esta iteración se muestra a continuación.

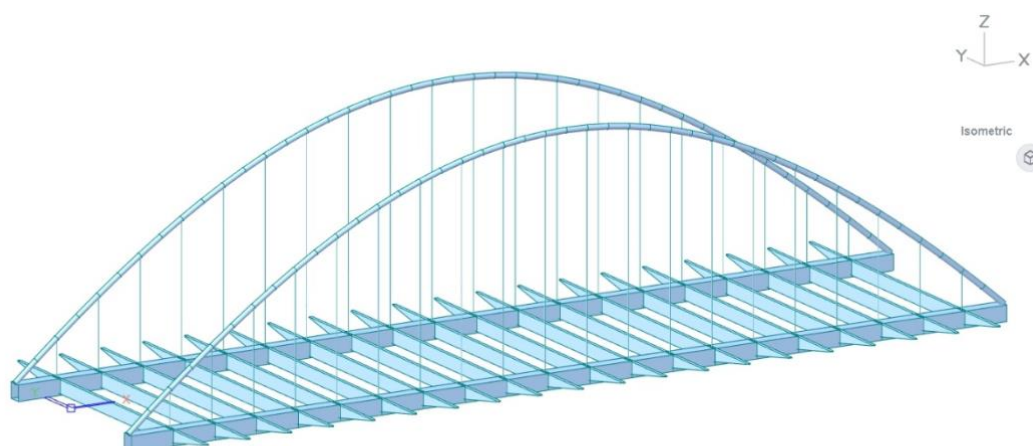


Figura 297. Estructura metálica en la iteración 7

15.1.7.1. FASE METÁLICA

Las reacciones obtenidas en la fase metálica se muestran en la siguiente figura.

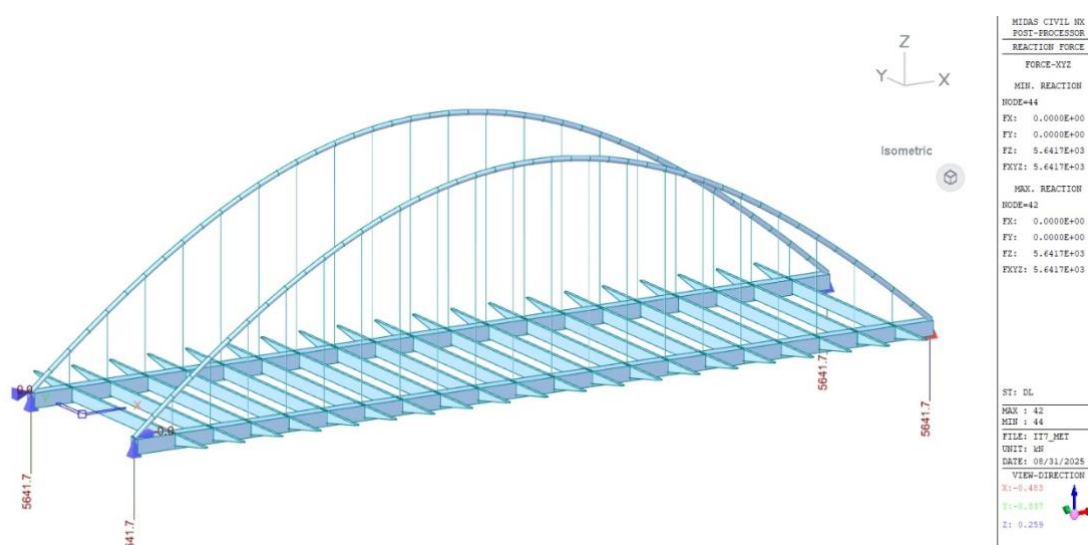


Figura 298. Reacciones en la fase metálica para la iteración 7

A continuación, se muestran los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en la fase metálica.

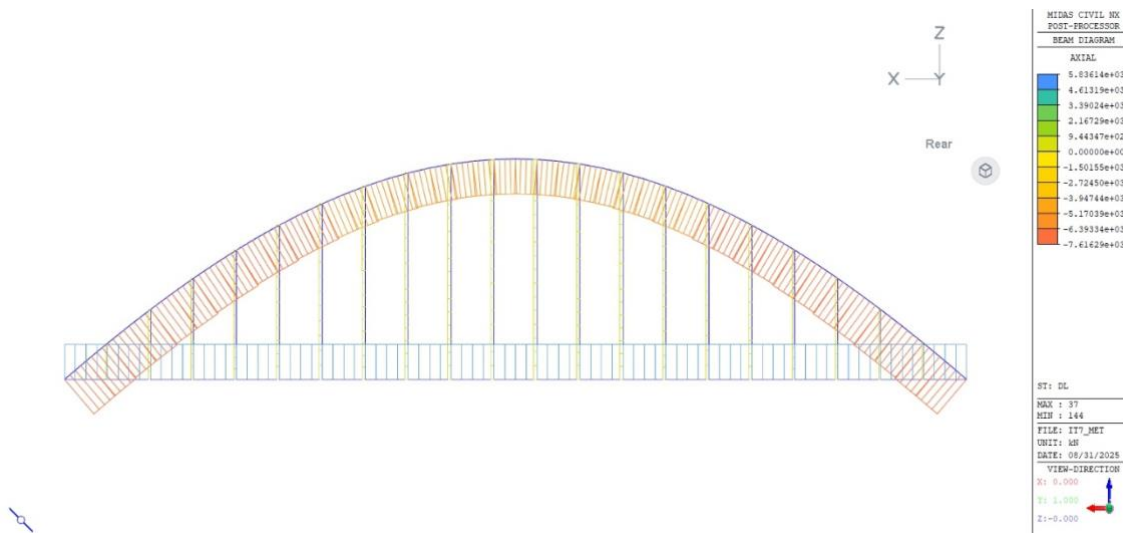


Figura 299. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 7

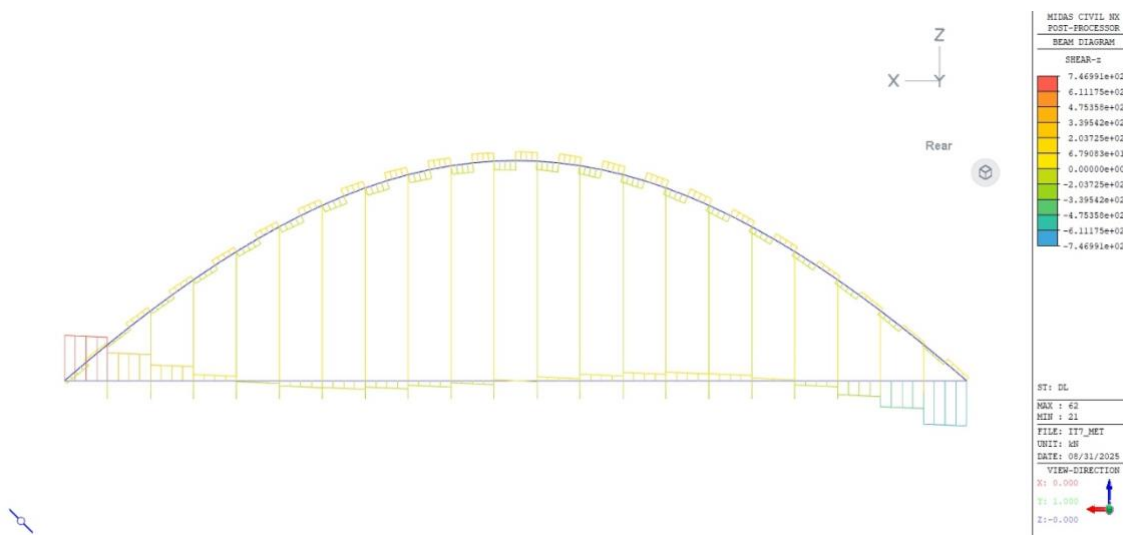


Figura 300. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 7

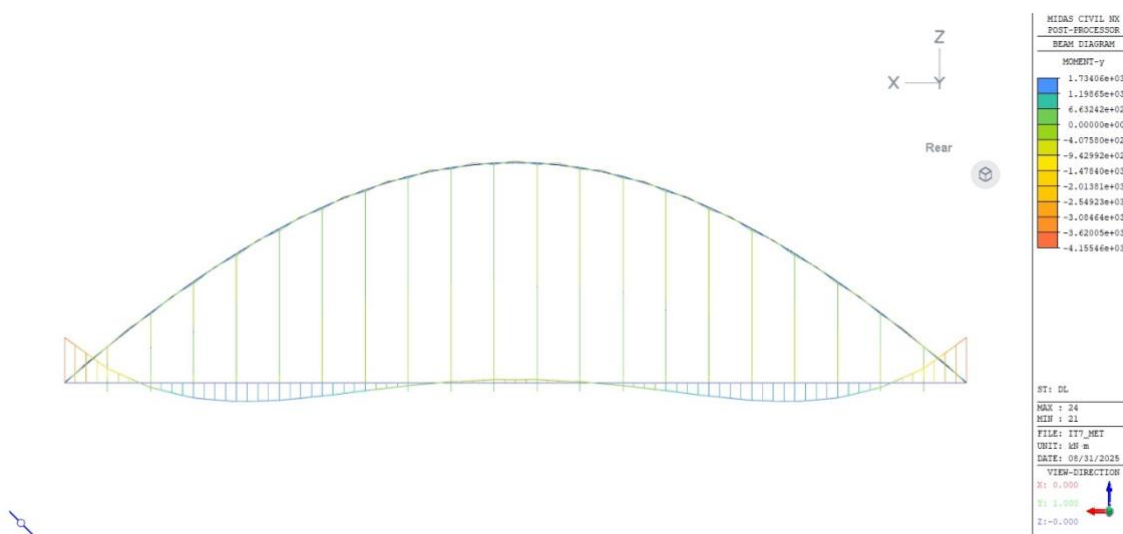


Figura 301. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 7

Las tensiones correspondientes a este caso de carga se muestran en la siguiente figura.

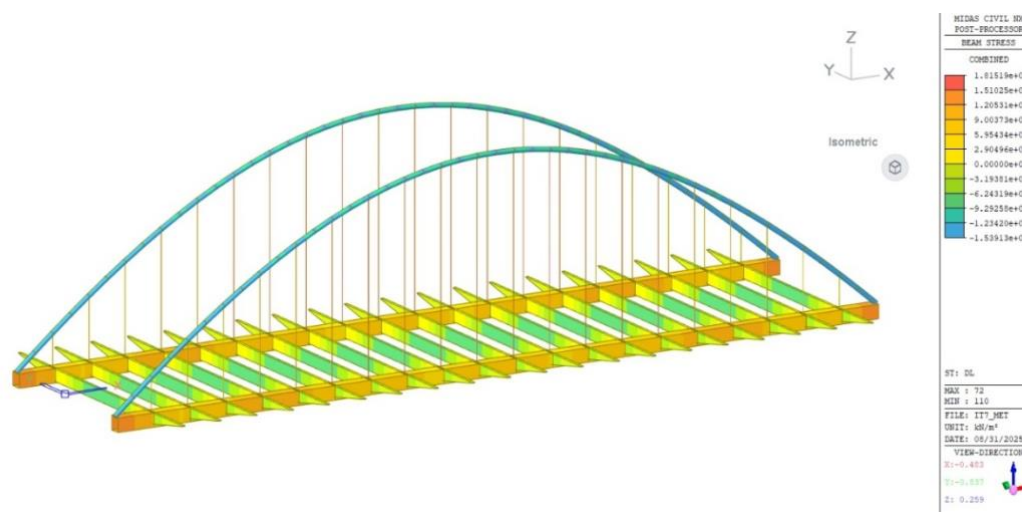


Figura 302. Tensiones en fase metálica para la iteración 7

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 68. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 7

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-5835	-7616	152	-152	162	-169	-105	-154
Vigas Rectangulares	5836	5836	747	-747	1734	-4156	150	57
Transversales	0	-18	302	-302	794	-594	69	-92
Cables	583	282	0	0	0	0	182	77

15.1.7.2. SOBRECARGA

Las reacciones correspondientes al caso de sobrecarga de uso se muestran en la siguiente figura.



Figura 303. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos.

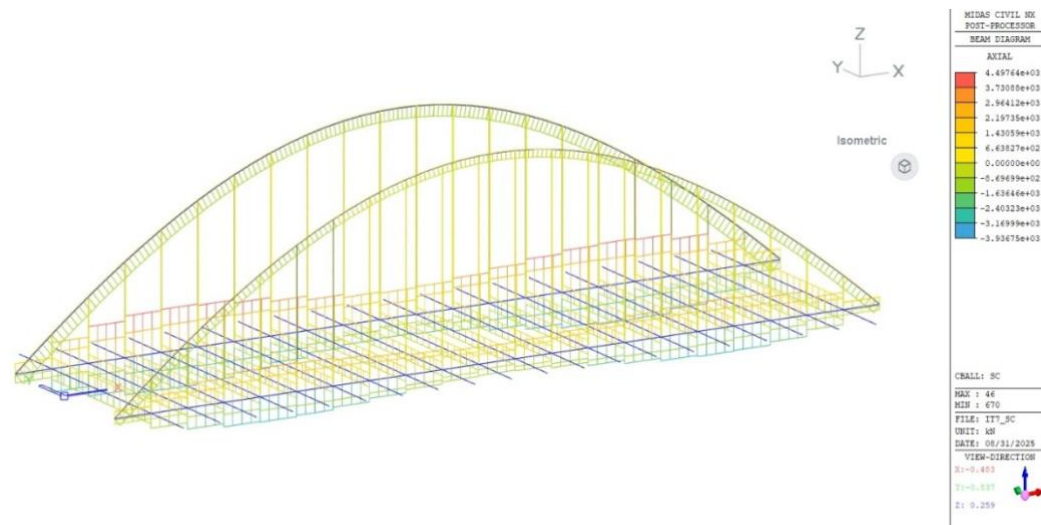


Figura 304. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7

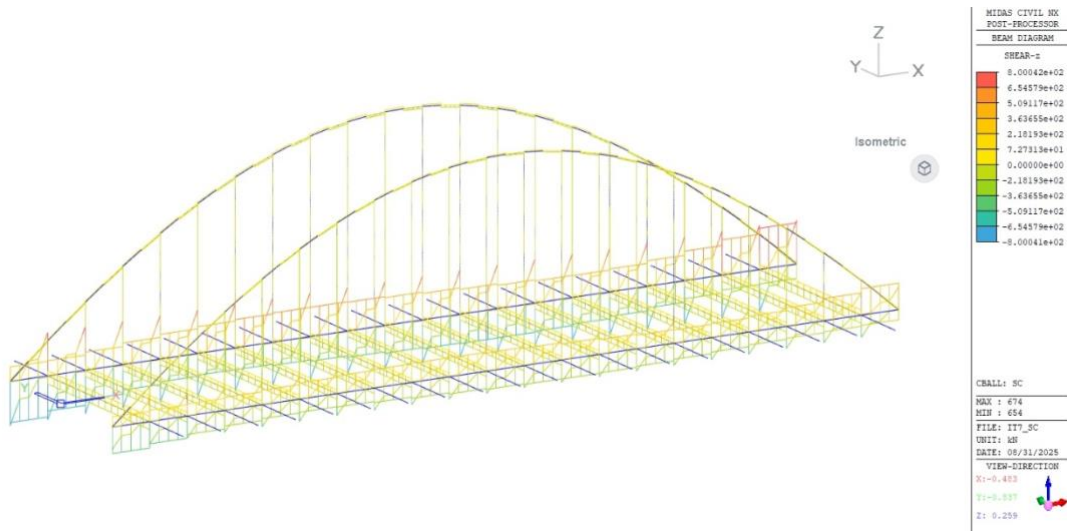


Figura 305. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7

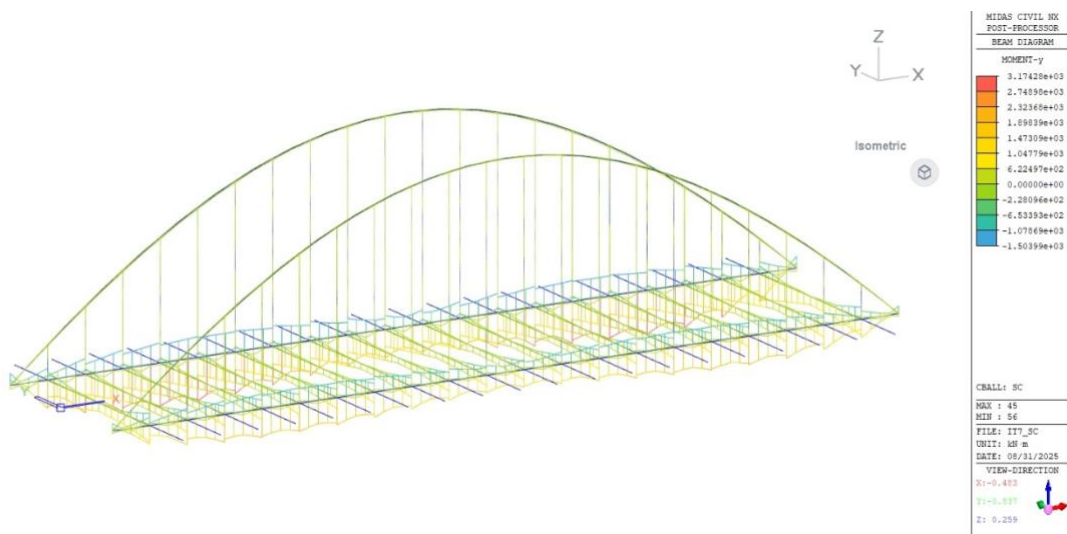


Figura 306. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7

Las tensiones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso se muestran a continuación

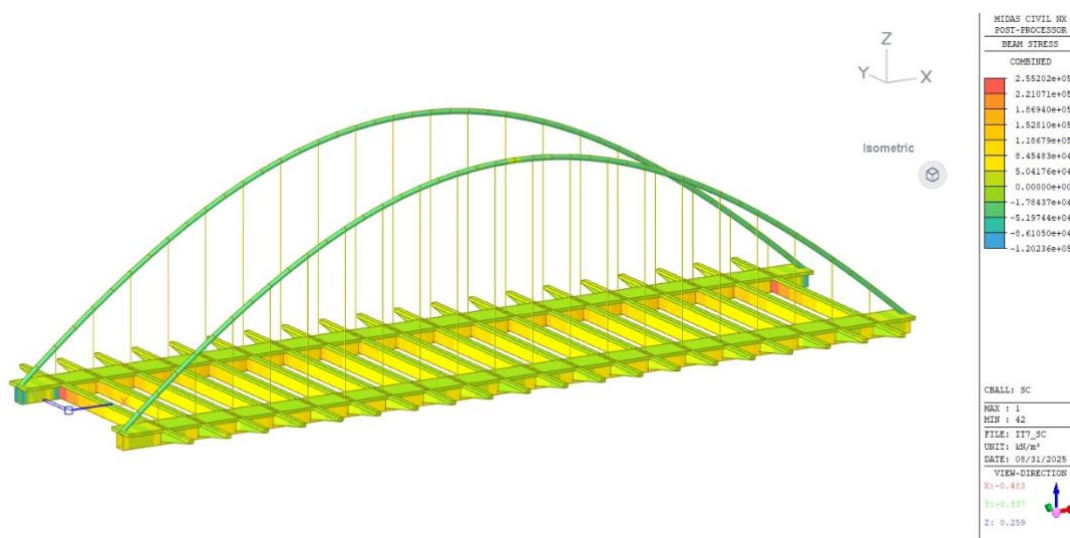


Figura 307. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 7

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en este caso de carga en cada elemento.

Tabla 69. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 7

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	107	-1508	35	-35	104	-72	-17	-39
Vigas Rectangulares	4497	-2013	748	-748	3151	-1498	153	-120
Transversales	1128	0	92	-148	1878	-853	255	0
Cables	129	0	0	0	0	0	43	16

15.1.7.3. CARGA PERMANENTE

Las reacciones obtenidas en el caso de carga permanente se muestran a continuación

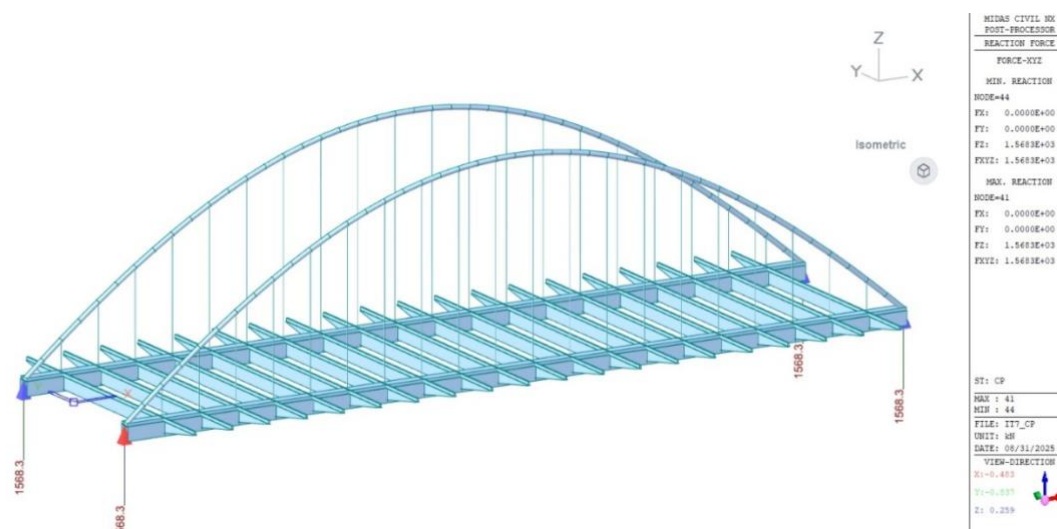


Figura 308. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 7

Los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos se muestran a continuación.

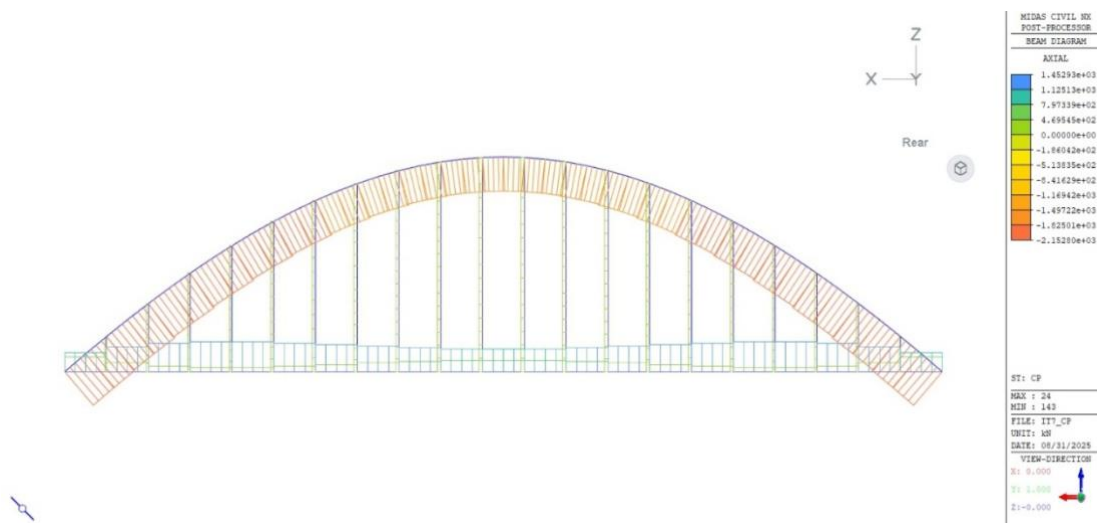


Figura 309. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 7

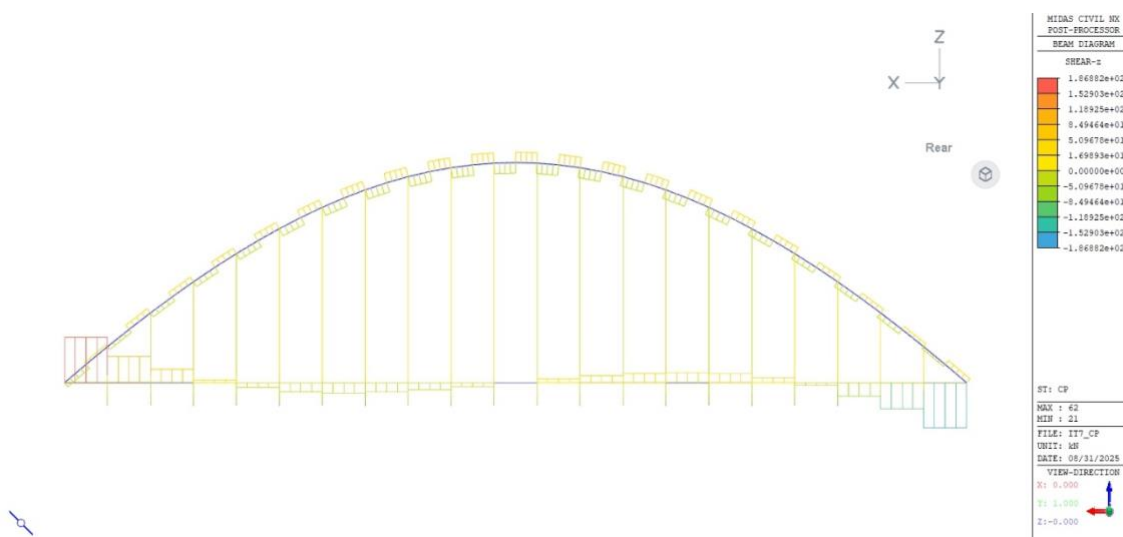


Figura 310. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 8

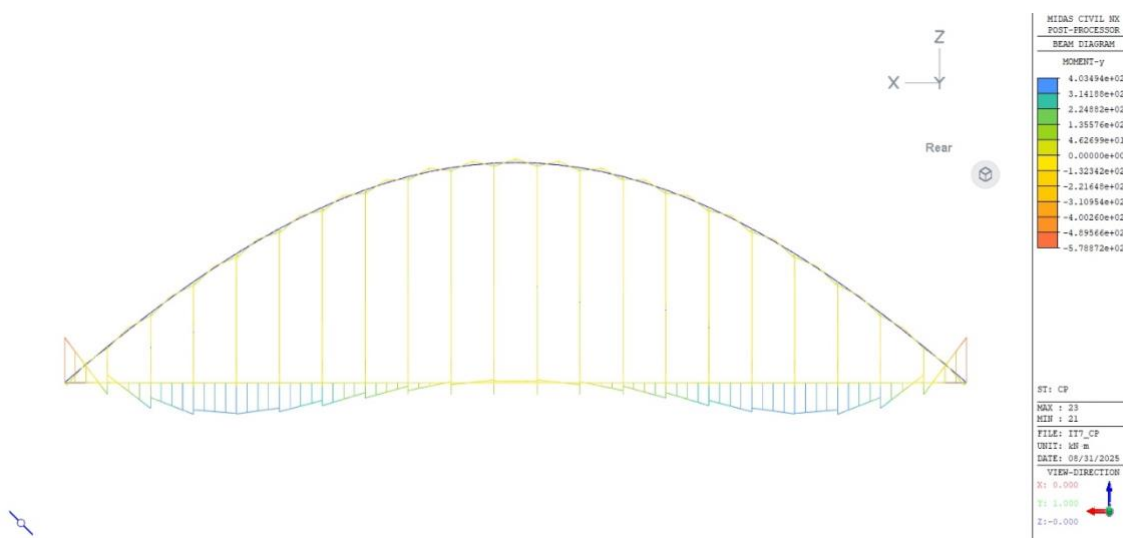


Figura 311. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 7

Las tensiones obtenidas en el caso de carga permanente se muestran en la siguiente figura.

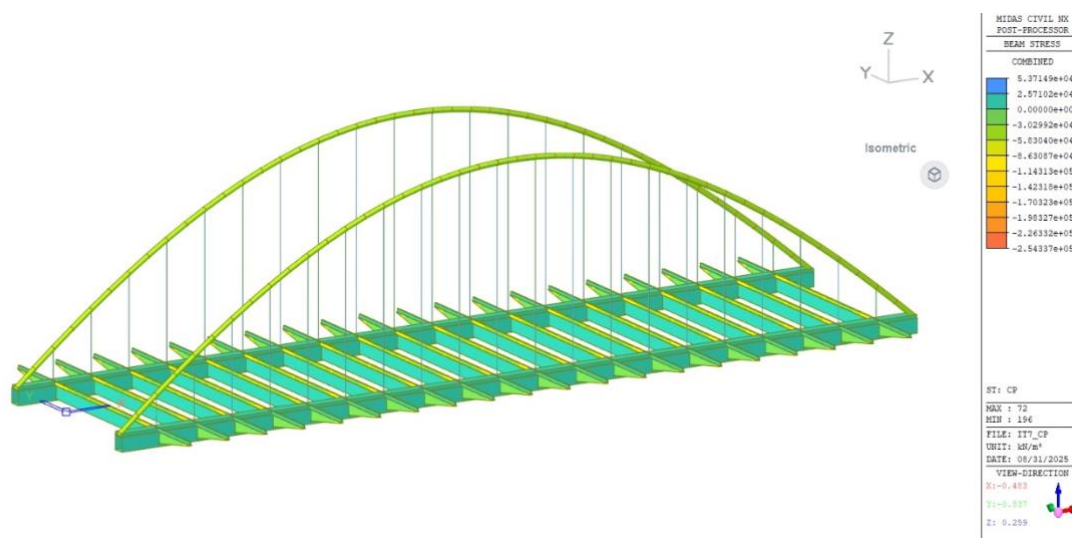


Figura 312. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 7

La tabla que se muestra a continuación recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento en este caso de carga.

Tabla 70. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 7

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1653	-2153	43	-43	45	-47	-30	-47
Vigas Rectangulares	1453	928	187	-187	404	-579	23	10
Transversales	52	-24	94	-94	145	-289	9	9
Cables	173	78	0	0	0	0	54	25

15.1.7.4. CANTIDADES DE MATERIAL

La cantidad de material necesario para la obtención de la estructura resistente correspondiente a la iteración 7 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 71. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 7

S355 (kg)	286996
S460 (kg)	13758
HA-35 [m ³]	784

15.1.7.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, en este apartado se recoge un resumen de los valores obtenidos, así como el valor correspondiente a la resultante de la suma de todos ellos.

En primer lugar, se muestran en la siguiente tabla los valores de las reacciones verticales obtenidas en cada caso de carga y la combinación de estos.

Tabla 72. Reacciones obtenidas en la iteración 7

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	5642
SC	1316
CP	1569
Suma	8527

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en los diferentes casos de carga, así como su combinación.

Tabla 73. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 7

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-5835	-7616	152	-152	162	-169	-105	-154
	Vigas Rectangulares	5836	5836	747	-747	1734	-4156	150	57
	Transversales	0	-18	302	-302	794	-594	69	-92
	Cables	583	282	0	0	0	0	182	77
SC	Arco	107	-1508	35	-35	104	-72	-17	-39
	Vigas Rectangulares	4497	-2013	748	-748	3151	-1498	153	-120
	Transversales	1128	0	92	-148	1878	-853	255	0
	Cables	129	0	0	0	0	0	43	16
CP	Arco	-1653	-2153	43	-43	45	-47	-30	-47
	Vigas Rectangulares	1453	928	187	-187	404	-579	23	10
	Transversales	52	-24	94	-94	145	-289	9	9
	Cables	173	78	0	0	0	0	54	25
Suma	Arco	-7381	-11277	230	-230	311	-288	-152	-240
	Vigas Rectangulares	11786	4751	1682	-1682	5289	-6233	326	-53
	Transversales	1180	-42	488	-544	2817	-1736	333	-83
	Cables	885	360	0	0	0	0	279	118

Como se puede observar, los valores de las tensiones en las vigas rectangulares y transversales sobrepasan ligeramente el límite tensional establecido, por lo que esta geometría no resulta válida.

15.1.8 ITERACIÓN 8

Para la siguiente iteración, se ha aumentado ligeramente la base de las vigas transversales y se ha incrementado en una unidad la cantidad de vigas transversales y péndolas, para tratar de hallar la solución óptima para la limitación de tensiones planteada.

Tabla 74. Parámetros utilizados en la iteración final

Flecha de los arcos		20,0	m
Diámetro de los arcos		0,5	m
Vigas rectangulares	H	1,4	m
	B	1,3	m
Nº transversales y péndolas		21	a cada lado

La geometría correspondiente a esta iteración se muestra en la siguiente figura.

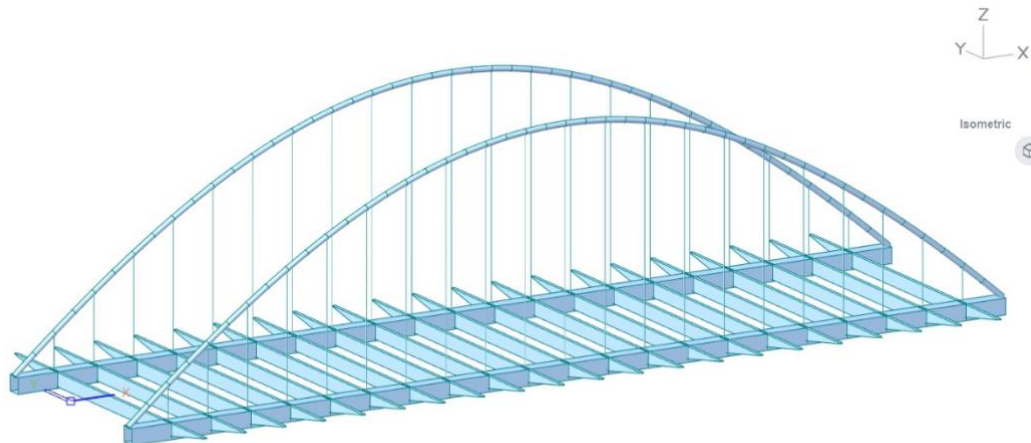


Figura 313. Estructura metálica en la iteración 8

15.1.8.1. FASE METÁLICA

Las reacciones obtenidas en la fase metálica se muestran a continuación.

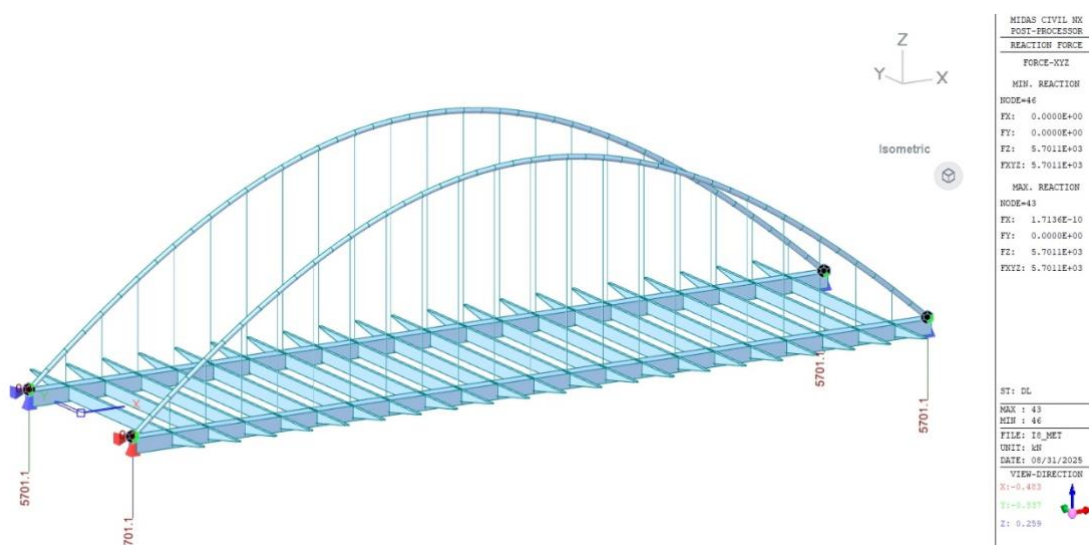


Figura 314. Reacciones en la fase metálica para la iteración 8

Se muestran ahora los diagramas de axiles, cortantes y momentos obtenidos en este caso de carga.

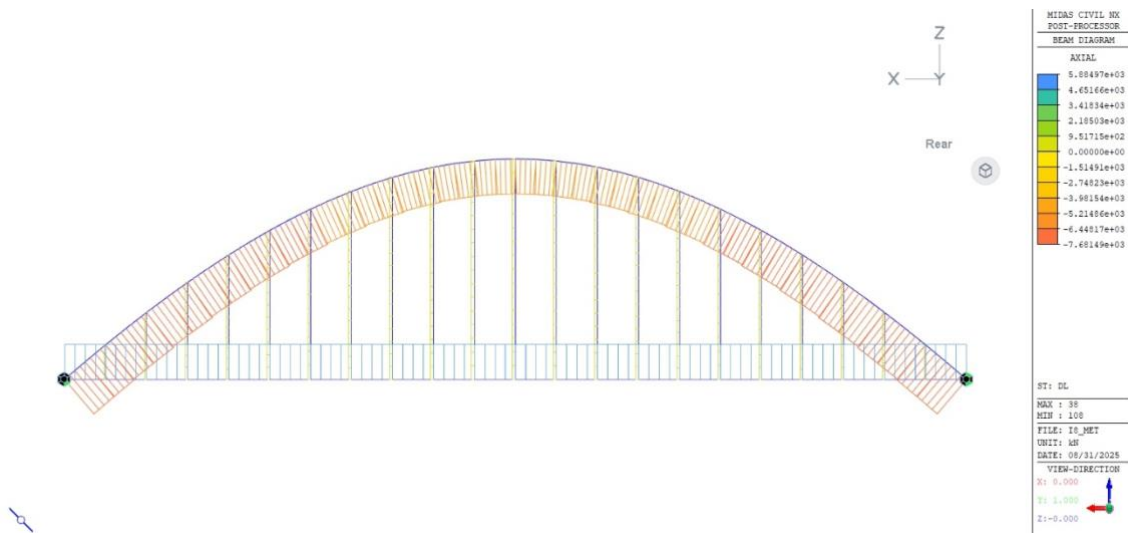


Figura 315. Diagrama de axiles en fase metálica para la iteración 8

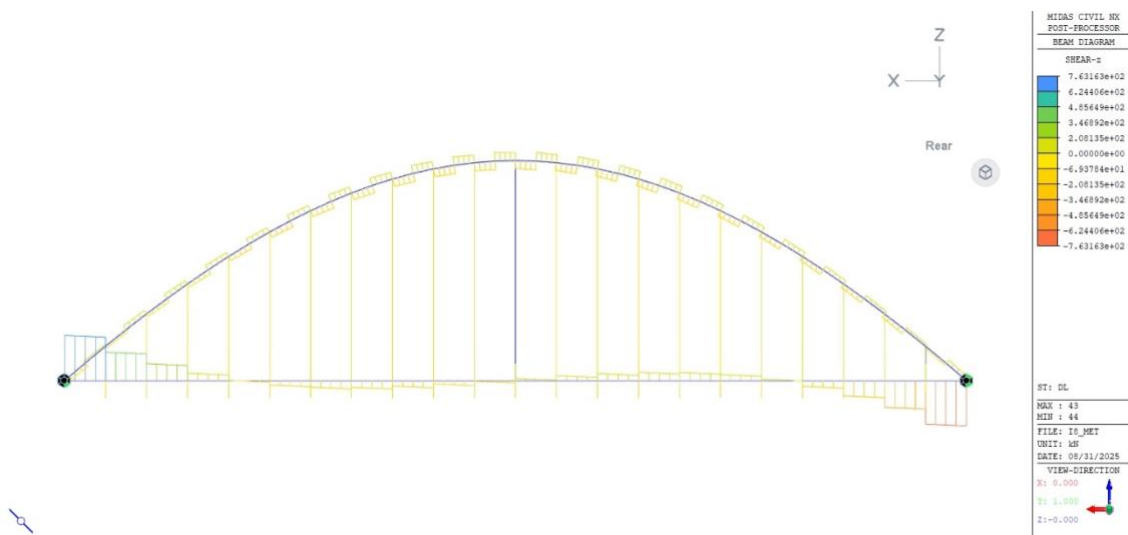


Figura 316. Diagrama de cortantes en fase metálica para la iteración 8

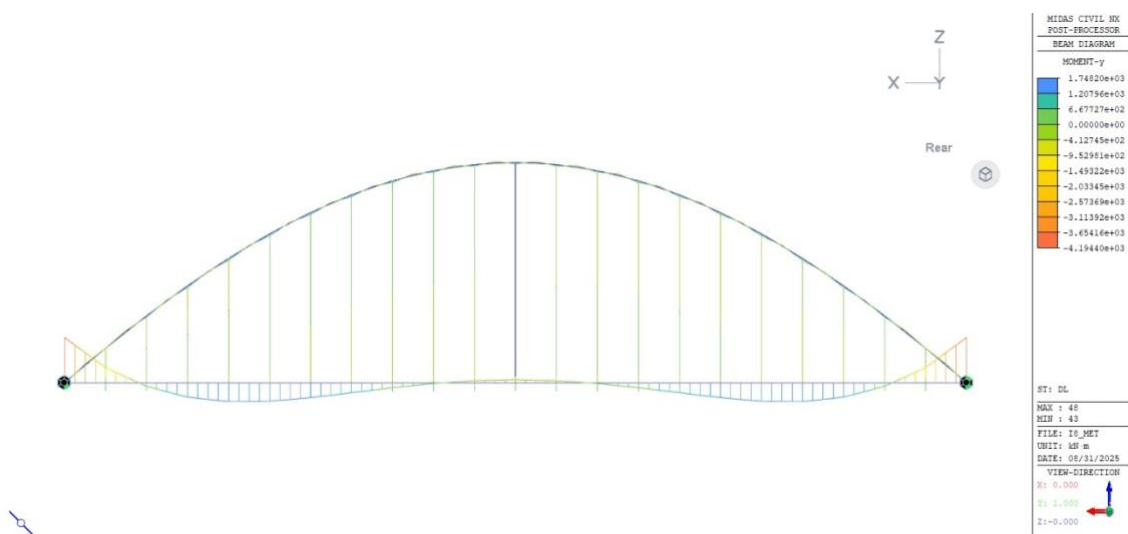


Figura 317. Diagrama de momentos en fase metálica para la iteración 8

Las tensiones obtenida en la fase metálica se muestran a continuación.

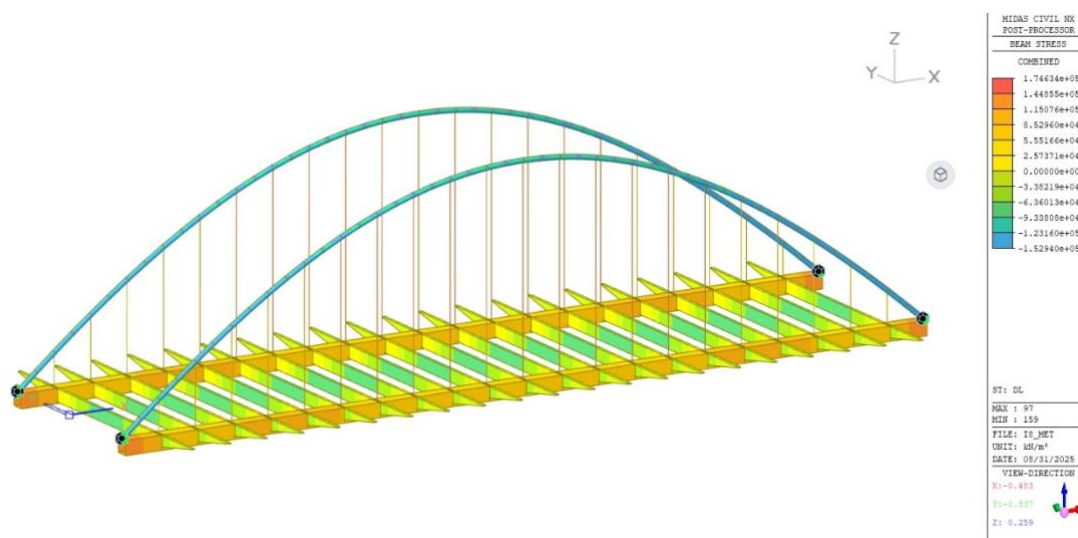


Figura 318. Tensiones en fase metálica para la iteración 8

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones obtenidos en cada elemento en la fase metálica.

Tabla 75. Valores máximos y mínimos en cada elemento para la fase metálica en la iteración 8

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-5890	-7682	147	-147	152	-154	-106	-153
Vigas Rectangulares	5884	5884	763	-763	1747	-4194	144	57
Transversales	0	-18	290	-290	765	-576	67	-89
Cables	562	227	0	0	0	0	175	73

15.1.8.2. SOBRECARGA

Las reacciones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso se muestran en la siguiente figura.

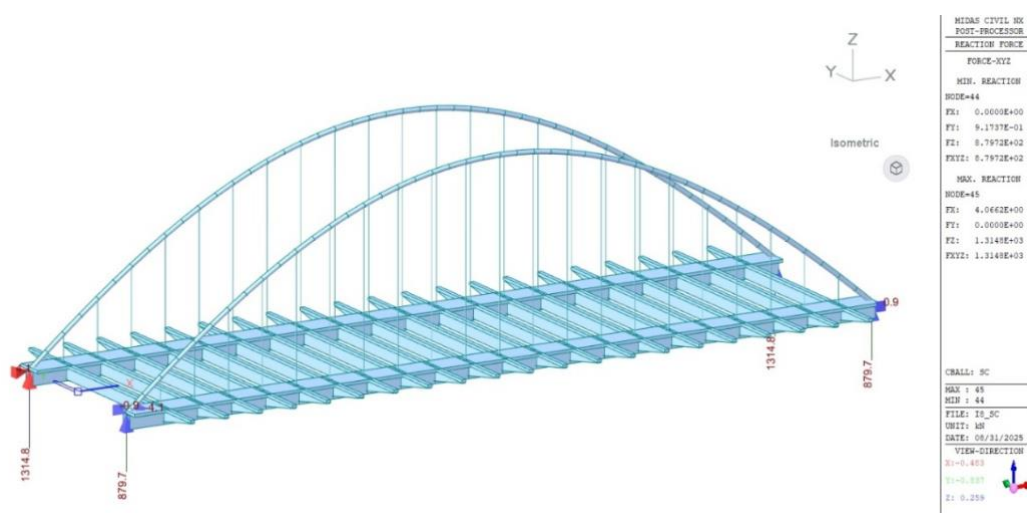


Figura 319. Reacciones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8

Las siguientes figuras recogen los diagramas de axiles, cortantes y momentos.

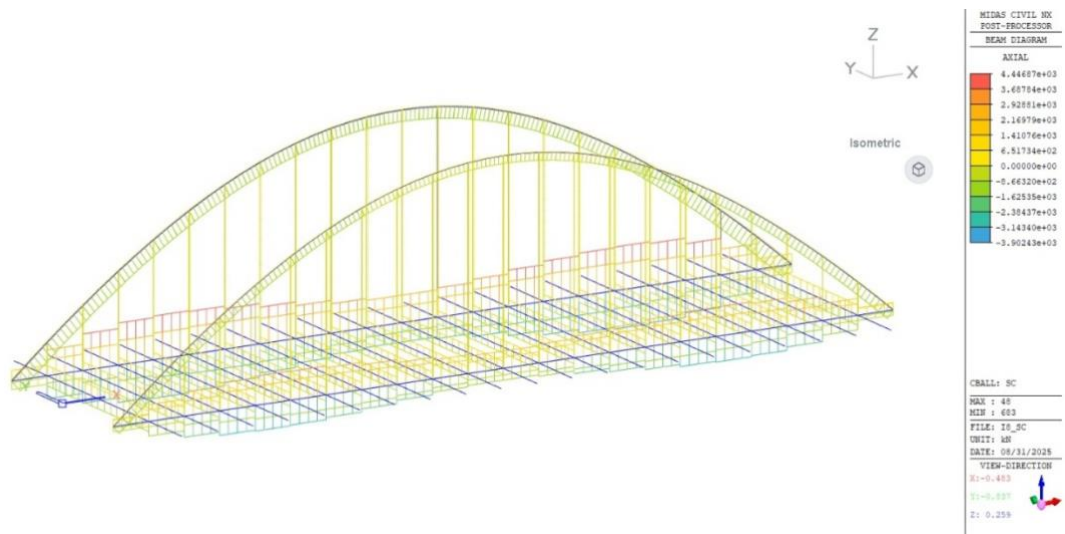


Figura 320. Diagrama de axiles en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8

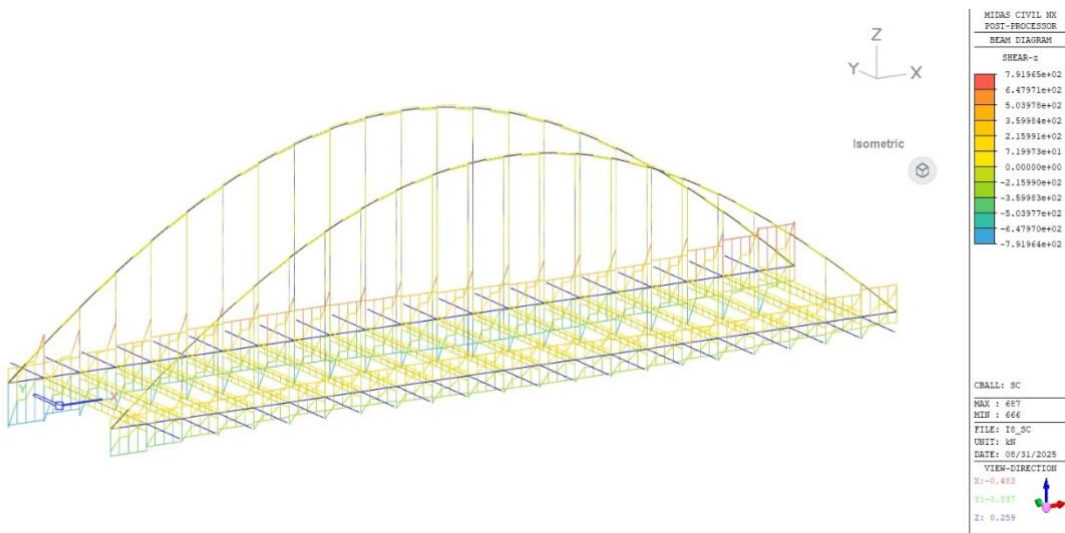


Figura 321. Diagrama de cortantes en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8

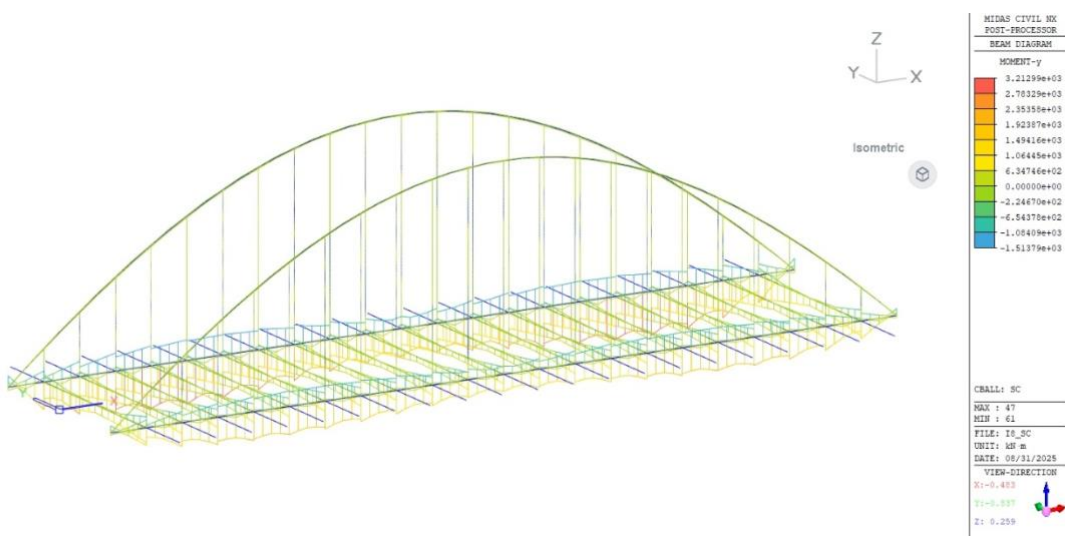


Figura 322. Diagrama de momentos en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8

Las tensiones obtenidas en el caso de sobrecarga de uso se muestran a continuación.

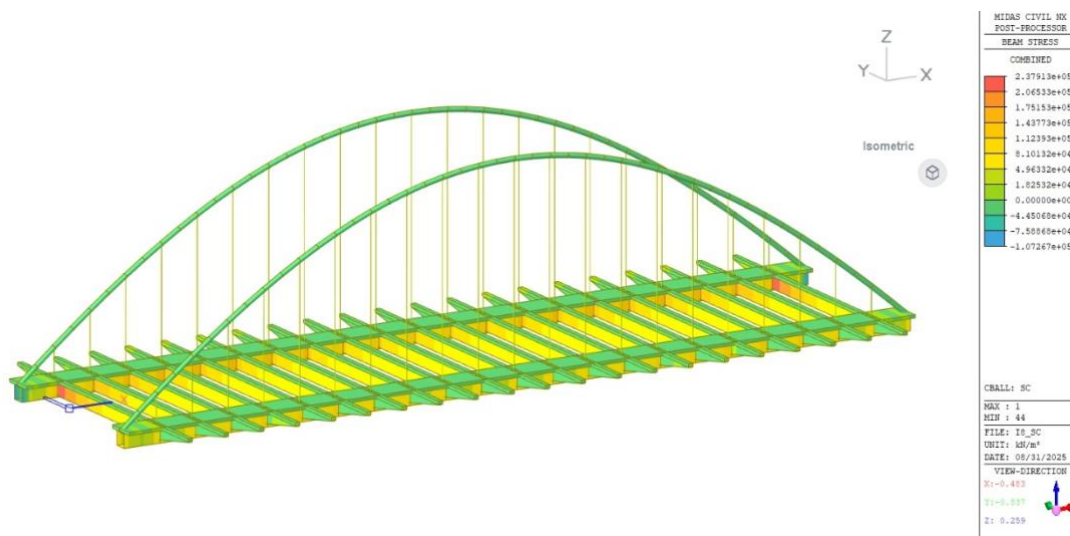


Figura 323. Tensiones en el caso de sobrecarga de uso para la iteración 8

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes y momentos encontrados en cada elemento para este caso de carga.

Tabla 76. Valores máximos y mínimos encontrados en cada elemento en la fase de sobrecarga de uso para la iteración 8

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	110	-1505	34	-34	100	-68	-17	-38
Vigas Rectangulares	4447	-1950	758	-758	3194	-1514	147	-107
Transversales	1045	0	86	-138	1753	-800	238	0
Cables	123	0	0	0	0	0	41	11

15.1.8.3. CARGA PERMANENTE

Las reacciones obtenidas en la fase de carga permanente se muestran a continuación.

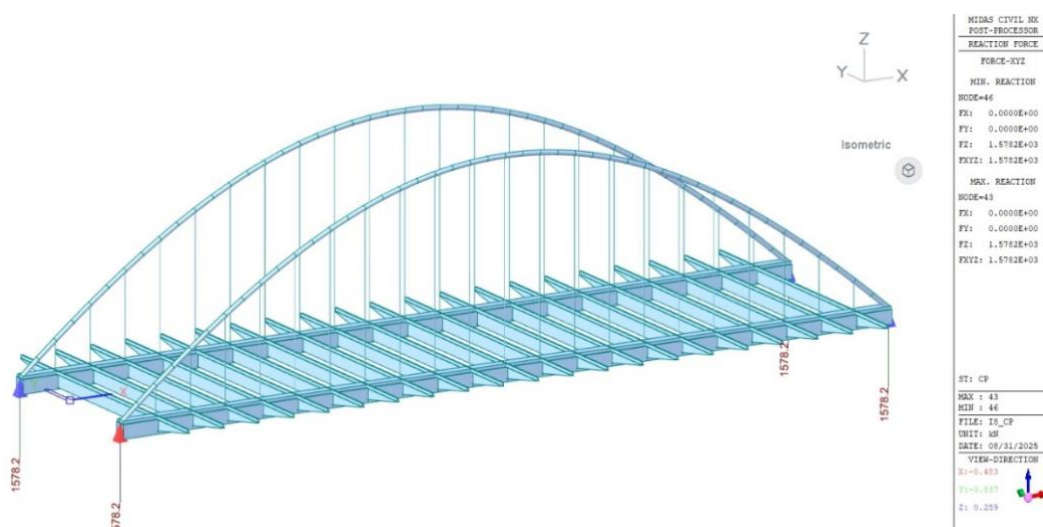


Figura 324. Reacciones en el caso de carga permanente para la iteración 8

Las siguientes figuras recogen los diagramas de axiles, cortantes y momentos.

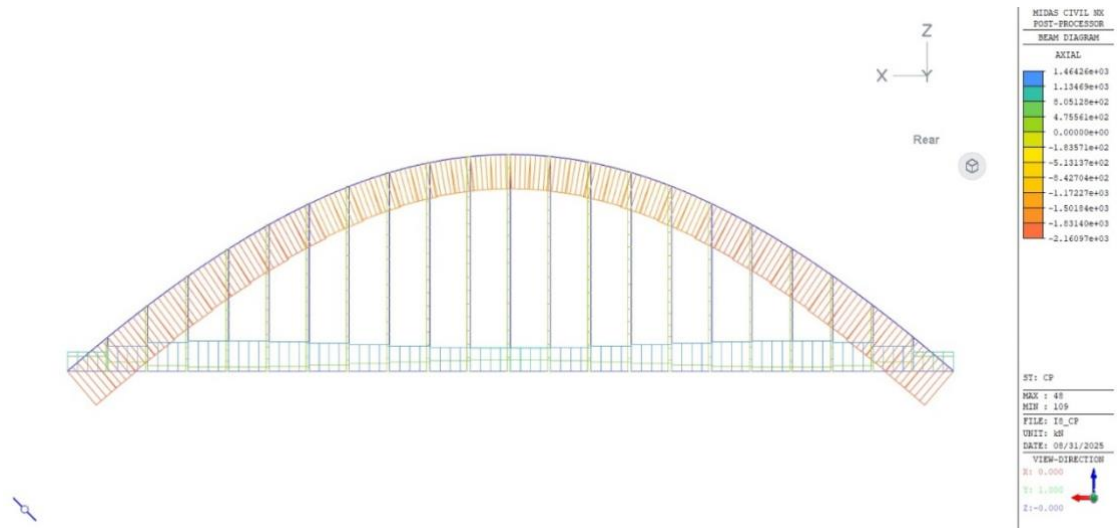


Figura 325. Diagrama de axiles para el caso de carga permanente en la iteración 8

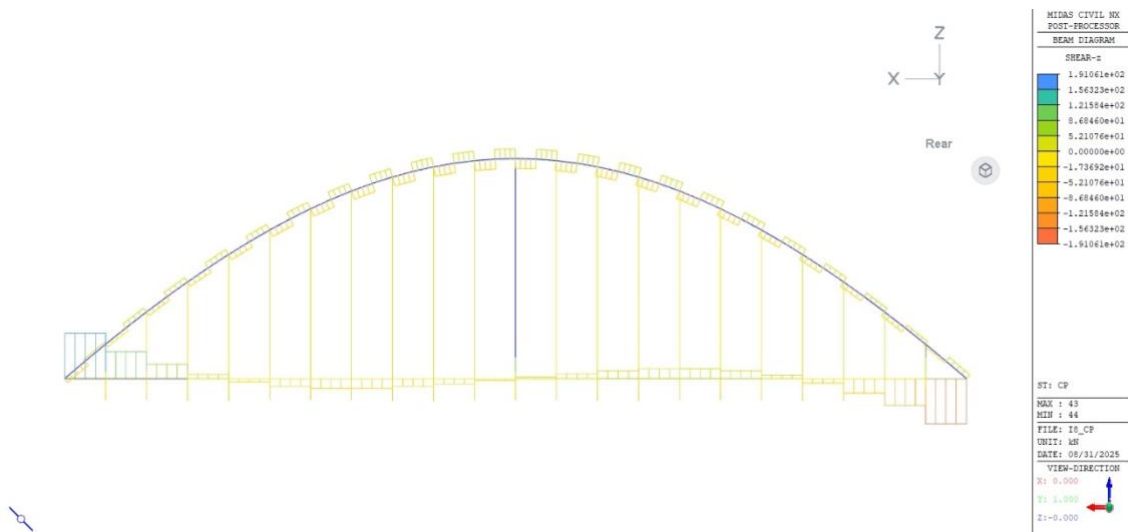


Figura 326. Diagrama de cortantes para el caso de carga permanente en la iteración 8

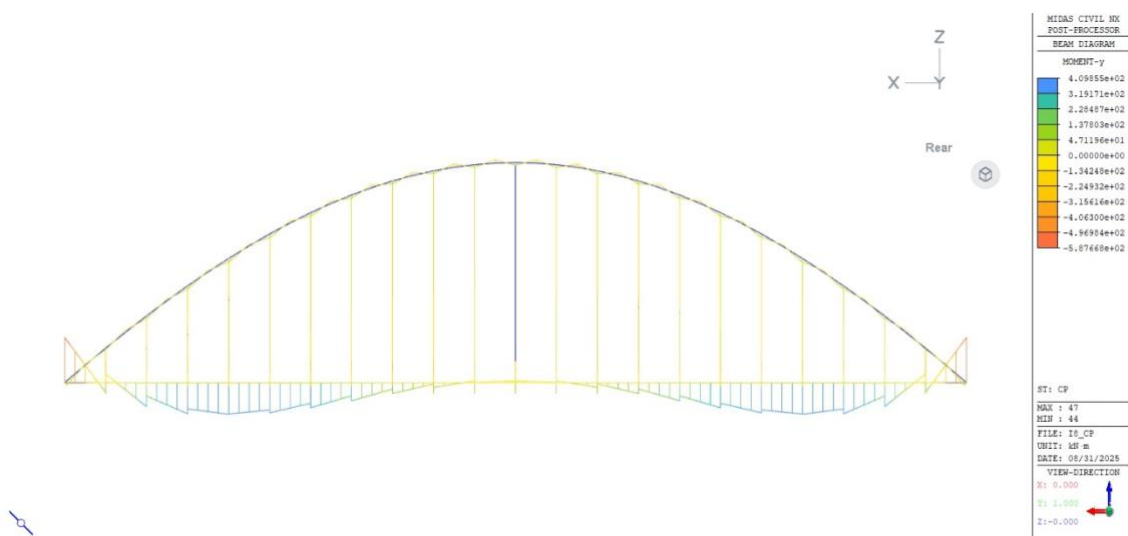


Figura 327. Diagrama de momentos para el caso de carga permanente en la iteración 8

Las tensiones obtenidas en este caso de carga se muestran a continuación.

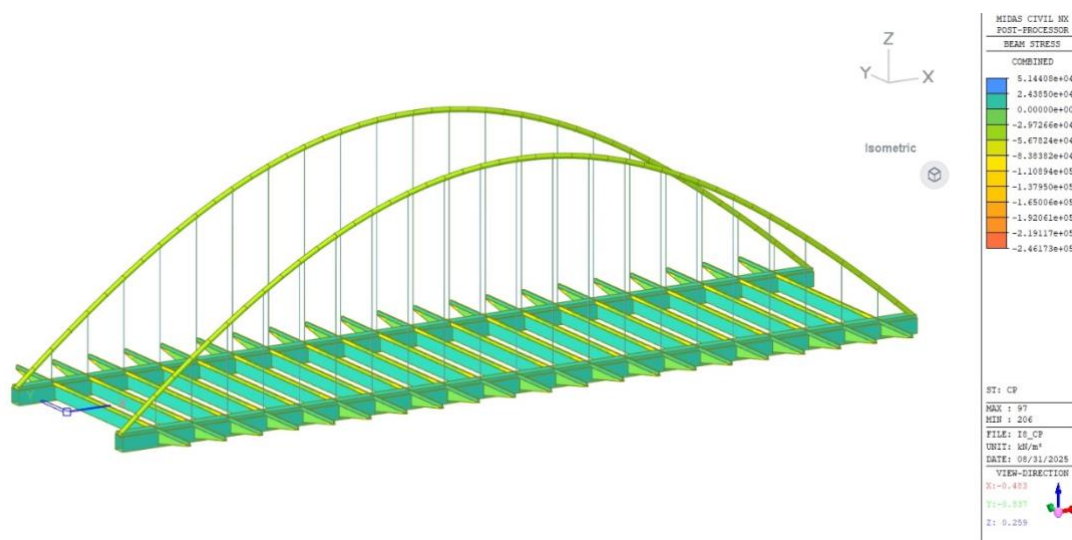


Figura 328. Tensiones en el caso de carga permanente para la iteración 8

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones hallados en cada elemento en el caso de carga permanente.

Tabla 77. Valores máximos y mínimos en los elementos en el caso de carga permanente para la iteración 8

	Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
Arco	-1660	-2161	42	-42	44	-43	-30	-47
Vigas Rectangulares	1460	940	191	-191	406	-588	23	10
Transversales	50	-23	90	-90	140	-278	9	9
Cables	165	72	0	0	0	0	52	23

15.1.8.4. CANTIDADES DE MATERIAL

La cantidad de material necesaria para la elaboración de la geometría correspondiente a esta iteración se muestra en la siguiente figura.

Tabla 78. Cantidad de S355, S460 y HA-35 utilizado para la iteración 8

S355 (kg)	298430
S460 (kg)	14415
HA-35 [m ³]	789

15.1.8.5. RESUMEN Y COMBINACIÓN DE CARGAS

Por último, este apartado recoge un resumen de los valores hallados en cada caso de carga, así como el valor resultante de la combinación de estos.

Se muestran en la siguiente tabla las reacciones obtenidas en cada caso de carga y el valor resultante de su combinación.

Tabla 79. Reacciones totales en la iteración 8

	Ry [kN]
PP Secc. Metálica	5701
SC	1315
CP	1578
Suma	8594

La siguiente tabla recoge los valores máximos y mínimos de axiles, cortantes, momentos y tensiones encontrados cada elemento para cada caso de carga, así como el valor resultante de la combinación de estos.

Tabla 80. Valores máximos y mínimos hallados en cada elemento para la iteración 8

		Axil [kN]		Cortante [kN]		Momento [kN * m]		Tensiones [MPa]	
		Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín
PP Met.	Arco	-5890	-7682	147	-147	152	-154	-106	-153
	Vigas Rectangulares	5884	5884	763	-763	1747	-4194	144	57
	Transversales	0	-18	290	-290	765	-576	67	-89
	Cables	562	227	0	0	0	0	175	73
SC	Arco	110	-1505	34	-34	100	-68	-17	-38
	Vigas Rectangulares	4447	-1950	758	-758	3194	-1514	147	-107
	Transversales	1045	0	86	-138	1753	-800	238	0
	Cables	123	0	0	0	0	0	41	11
CP	Arco	-1660	-2161	42	-42	44	-43	-30	-47
	Vigas Rectangulares	1460	940	191	-191	406	-588	23	10
	Transversales	50	-23	90	-90	140	-278	9	9
	Cables	165	72	0	0	0	0	52	23
Suma	Arco	-7440	-11348	223	-223	296	-265	-153	-238
	Vigas Rectangulares	11791	4874	1712	-1712	5347	-6296	314	-40
	Transversales	1095	-41	466	-518	2658	-1654	314	-80
	Cables	850	299	0	0	0	0	268	107

Como se observa en los resultado, todos los valores se encuentran dentro del límite de tensiones en servicio establecido. Con estos resultados, se concluye que esta solución es adecuada y, además, óptima para las condiciones establecidas.

15.1.8.6. COMPROBACIÓN DEL ARCO A PANDEO

Pese a que la geometría del puente parece optimizada, la esbeltez del arco ha hecho necesario comprobar su resistencia a pandeo, puesto que se encuentra sometido a compresiones y tiene una sección transversal algo pequeña.

Esta comprobación se ha realizado para dos geometrías: la sección metálica en el caso previo al hormigonado del arco y la sección a tiempo infinito con la resultante de la combinación de axiles de las tres fases de carga analizadas previamente.

Los axiles obtenidos en el caso de carga de arco sin hormigonar se muestran en la siguiente figura.

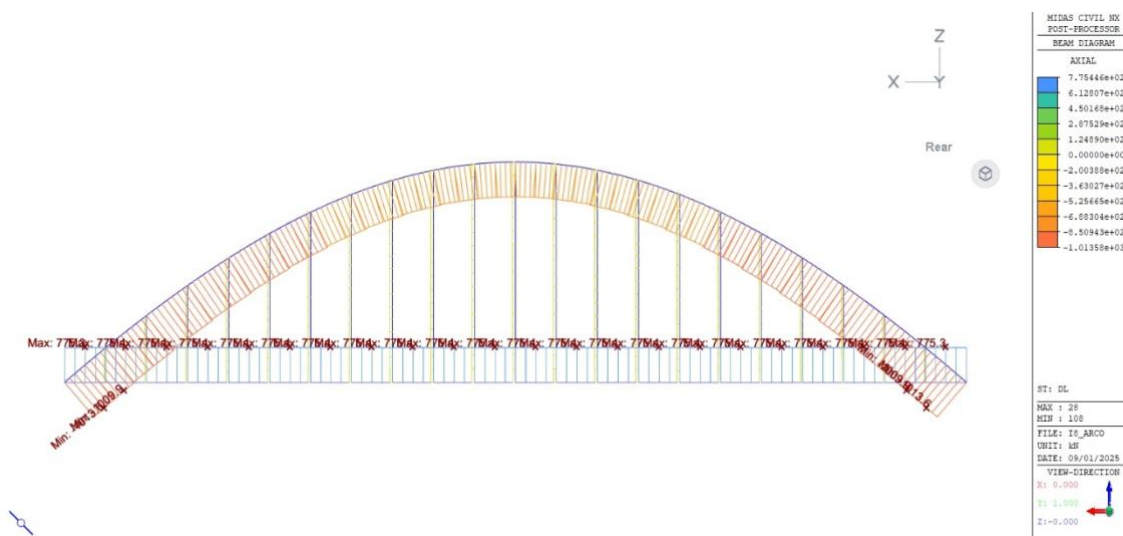


Figura 329. Axiles en el caso de arco metálico

El axil máximo en el arco es de -1014 kN. Los cálculos de la sección a pandeo se muestran a continuación.

La carga crítica de pandeo se define mediante la siguiente ecuación:

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 * E * I}{L^2}$$

donde

- E Módulo de elasticidad
- I Momento de inercia de la sección transversal
- L Longitud total del elemento

El momento de inercia de un aro se obtiene de la siguiente manera:

$$I_x = \int_0^{2\pi} (r * \sin(\alpha))^2 * r * e * d\alpha = r^3 * e * \int_0^{2\pi} \sin^2(\alpha) d\alpha = \pi * r^3 * e$$

donde

- r Radio de la circunferencia
- α Ángulo
- e Espesor del aro. En este caso, 0,02 m

Sustituyendo estos valores en la ecuación anterior, así como la longitud total del arco de 93 metros y la carga máxima de compresión de 1014 kN, se obtiene lo siguiente:

$$P_{crit} \leq \frac{\pi^3 * r^3 * e * E}{L^2} \rightarrow r \geq \sqrt[3]{\frac{1014 \text{ kN} * (93 \text{ m})^2}{\pi^3 * 0,02 \text{ m} * 2,1 * 10^8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}} = 0,407 \text{ m} \rightarrow D \geq 81,4 \text{ cm}$$

En el caso de la sección transversal a tiempo infinito, el área de hormigón se puede obtener de la siguiente forma:



$$A_h = \frac{\pi * r^2}{21} \approx 2 * \pi * r * e_h \rightarrow e_h = \frac{r}{42}$$

donde

r radio de la sección

e_h espesor del aro de hormigón

El axil de la combinación de acciones resulta en una compresión de 11348 kN, por lo que sustituyendo valores en la carga crítica de pandeo se obtiene el radio mínimo:

$$P_{crit} \leq \frac{\pi^3 * r^3 * \left(e_a + \frac{r}{42}\right) * E}{L^2} \rightarrow 11348 \leq \frac{\pi^3 * r^3 * \left(0,02 + \frac{r}{42}\right) * 2,1 * 10^8}{93^2} \rightarrow$$
$$\rightarrow r \geq 0,732 \text{ m} \rightarrow D \geq 1,47 \text{ m}$$

Estos resultados muestran que, para esta geometría, el arco pandearía. Por lo tanto, esta iteración no resulta válida.



16 REFERENCIAS

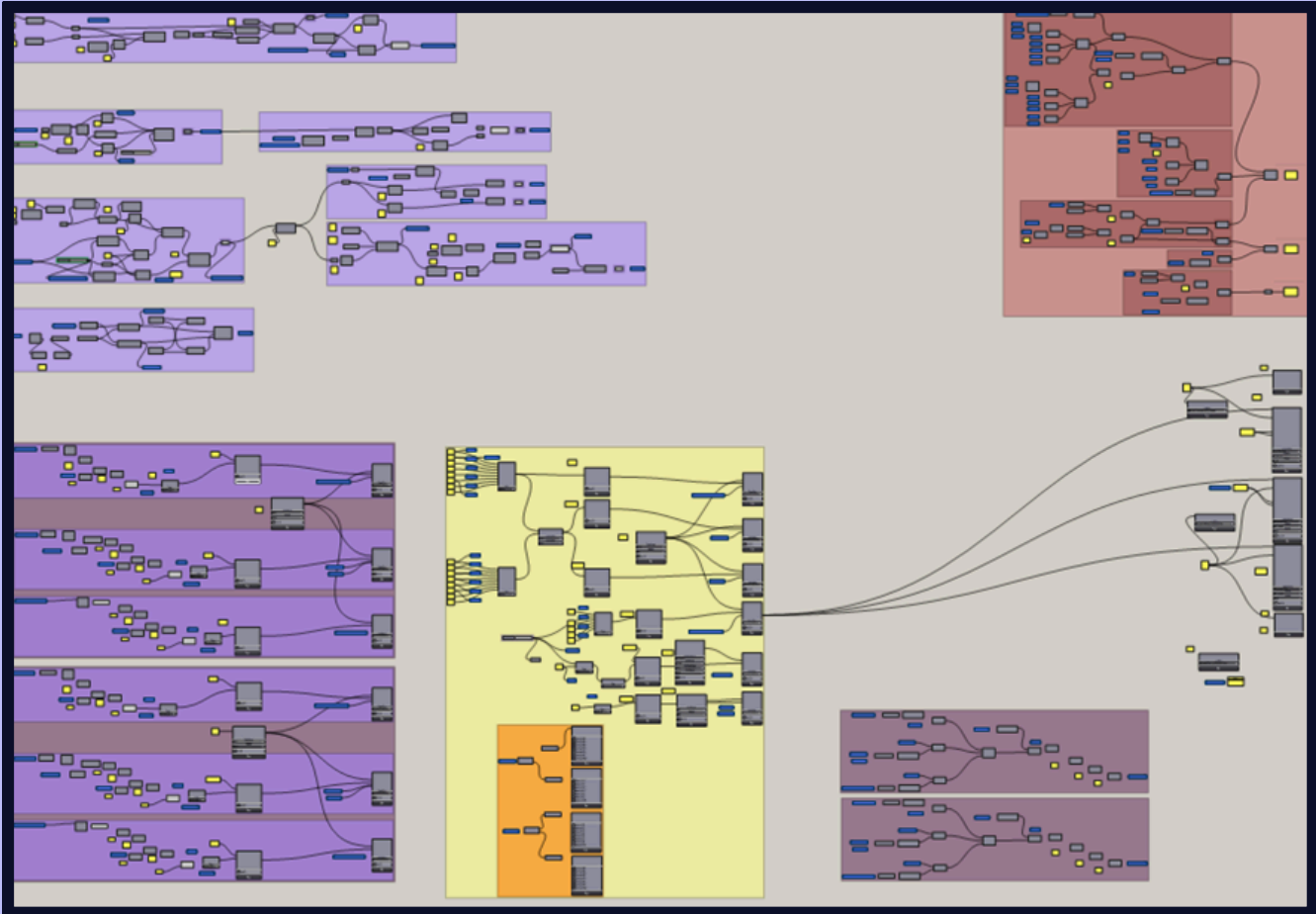
- [1] G. I. d. A. Arquitectónico, «Iván,» s.f.. [En línea]. Available: <https://www.glosarioarquitectonico.com/glossary/iwan/>.
- [2] Vitruvio, Los diez libros de arquitectura, Iberia, 1997. Obra original publicada el 15 a.C..
- [3] M. Á. Sabadell, «Arquitectura curva: evolución del arco,» *Muy Interesante*.
- [4] C. F. Casado, La Arquitectura del Ingeniero, Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2005.
- [5] L. B. Alberti, De re aedificatoria, 1443-1452.
- [6] A. Filarete, Trattato di Architettura, 1461-1467.
- [7] L. D. Vinci, Códice Arundel (Códice A), Instituto de Francia, s. XV-XVI.
- [8] A. Palladio, I quattro libri dell'architettura, 1570.
- [9] E. T. Miret, Razón y Ser de los Tipos Estructurales, Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja: CSIC, 1957.
- [10] J. T. Ruiz, «Una visión de las estructuras a partir de sus enseñanzas. De cómo hacer las cosas sencillas,» *Revista de Obras Públicas*, nº 3594, p. 83-89, 2018.
- [11] S. Tourism, «El puente de Salginatobel: monumento mundial,» MySwitzerland, s.f.. [En línea]. Available: <https://www.myswitzerland.com/es-es/descubrir-suiza/el-puente-de-salginatobel-monumento-mundial/>.
- [12] Extremadura.com, «La Junta y el Ayuntamiento de Alcántara explorarán líneas de trabajo para el reconocimiento internacional del puente histórico de la localidad,» 2 diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.extremadura.com/noticias/2019/12/02/la-junta-y-el-ayuntamiento-de-alcantara-exploraran-lineas-de-trabajo-para-el-reconocimiento-internacional-del-puente-historico-de-la-localidad>.
- [13] M. d. T. y. M. Sostenible, «Puente arco sobre el Tajo (Extremadura),» Blog del Ministerio de Transportes, s.f.. [En línea]. Available: <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/blog-transportes/puente-arco-sobre-el-tajo-extremadura>.
- [14] C. G. d. Zorrotzaurre, «Puente San Ignacio-Zorrotzaurre,» [En línea]. Available: <https://www.zorrotzaurre.com/puente-san-ignacio-zorrotzaurre-mas-informacion/>.
- [15] J. D. Dana, A System of Mineralogy, White, Gallaher & White, 1837.



- [16] S. Earnshaw, «On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether,» *ransactions of the Cambridge Philosophical Society*, nº 7, pp. 97-112, 1842.
- [17] Ferrovial, «Antoni Gaudí y las tecnologías emergentes,» Ferrovial Blog, 6 febrero 2017. [En línea]. Available: <https://blog.ferrovial.com/es/2017/02/antoni-gaudi-y-las-tecnologias-emergentes/>.
- [18] Á. H. Riaza, «Simulaciones procedurales e interactivas. Caso de estudio: Frei Otto,» 2024.
- [19] A. Erioli, «Architectural design in the age of enhanced artificiality,» 2021. [En línea]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/354463840_Architectural_Design_in_the_Age_of_Enhanced_Artificiality.
- [20] R. O. García, «Modelo paramétrico y análisis estructural comparativo puente arco de La Regenta,» Santander, 2021.
- [21] E. C. f. Standardization, «Eurocode 1: Actions on structures,» Brussels, 2019.
- [22] E. C. f. Standardization, «Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures,» Brussels, 2019.

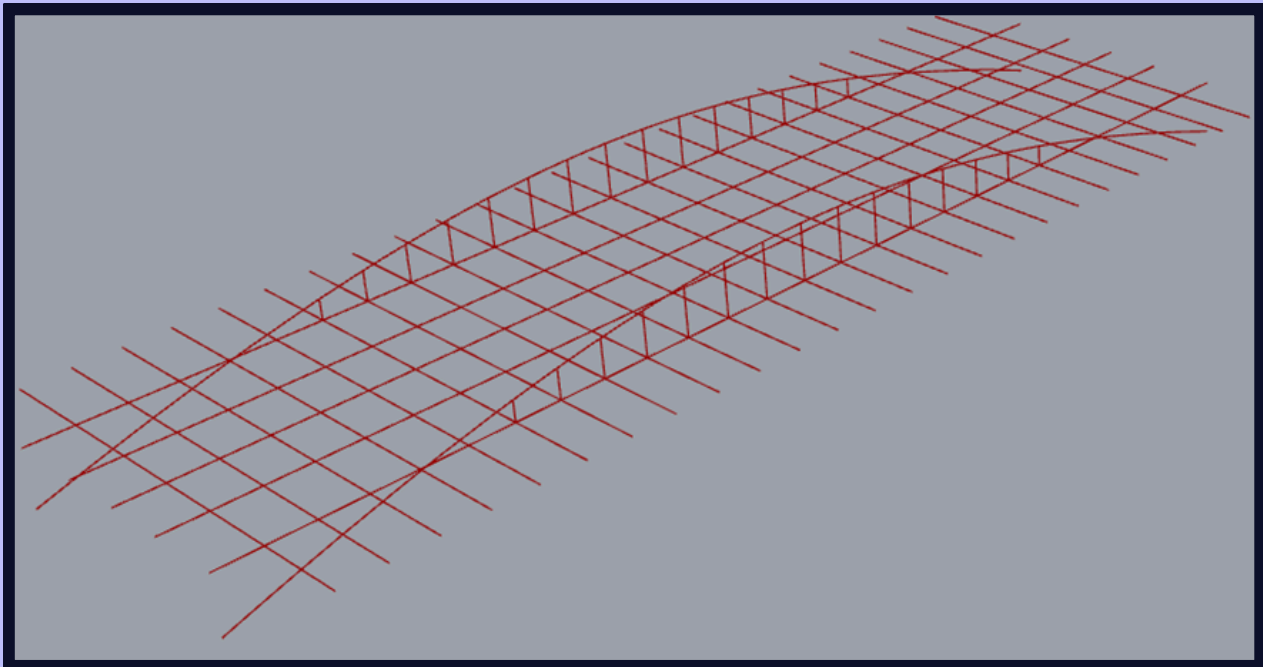
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

- El objetivo de este trabajo es el análisis de la aplicación de técnicas paramétricas en el diseño de arcos para puentes.
- Se ha aplicado esta metodología al caso del Puente de San Ignacio en Bilbao.
- Se ha elaborado un modelo del puente existente con tablero intermedio y una alternativa de arco con tablero inferior, iterada hasta lograr su optimización.



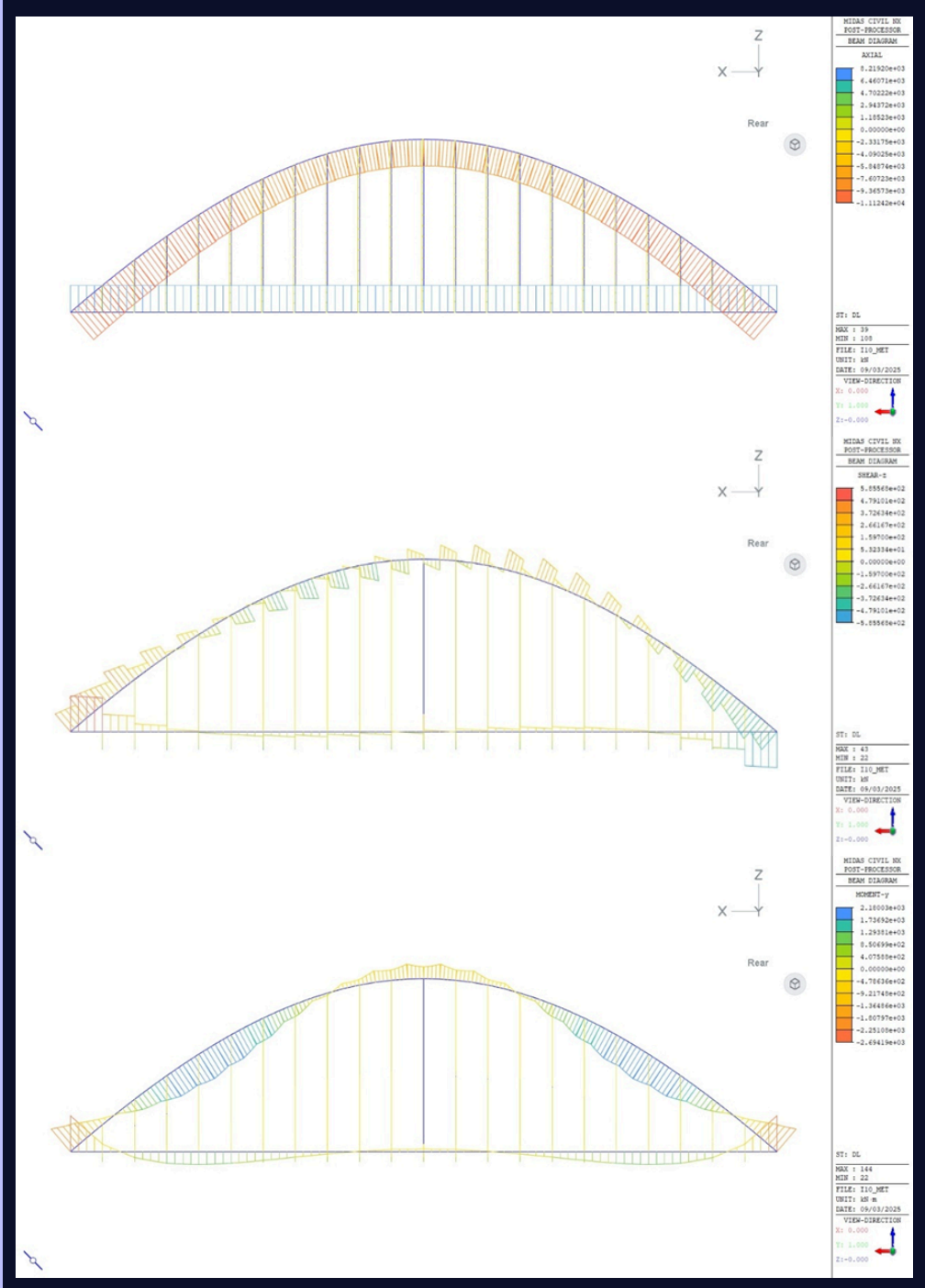
PUENTE DE SAN IGNACIO

- Tipología actual: arco con tablero intermedio.
- Dimensiones: 82 metros de luz y 30 metros de anchura.
- Problema: grandes esfuerzos horizontales en los estribos.
- Propuesta: arco con tablero inferior → el tablero actúa como tirante y los apoyos sólo recogen las reacciones verticales.



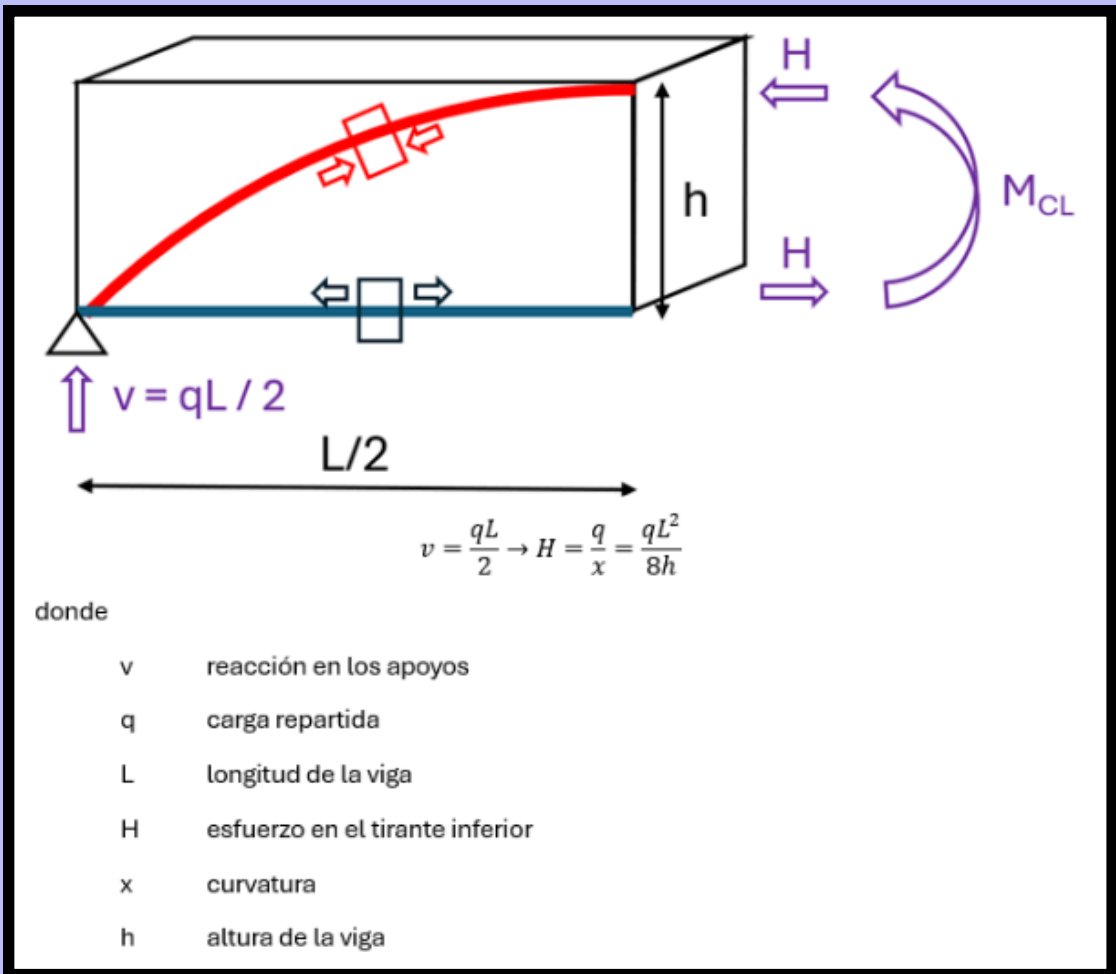
ITERACIONES

- 9 iteraciones con ajustes progresivos.
- Iniciales → exceso de material, tensiones elevadas y pandeo.
- Final → flecha 20 m, arco Ø 1,6 m, vigas 1,2x1,6 m, 21 péndolas a cada lado y vigas transversales en cada par de estas.

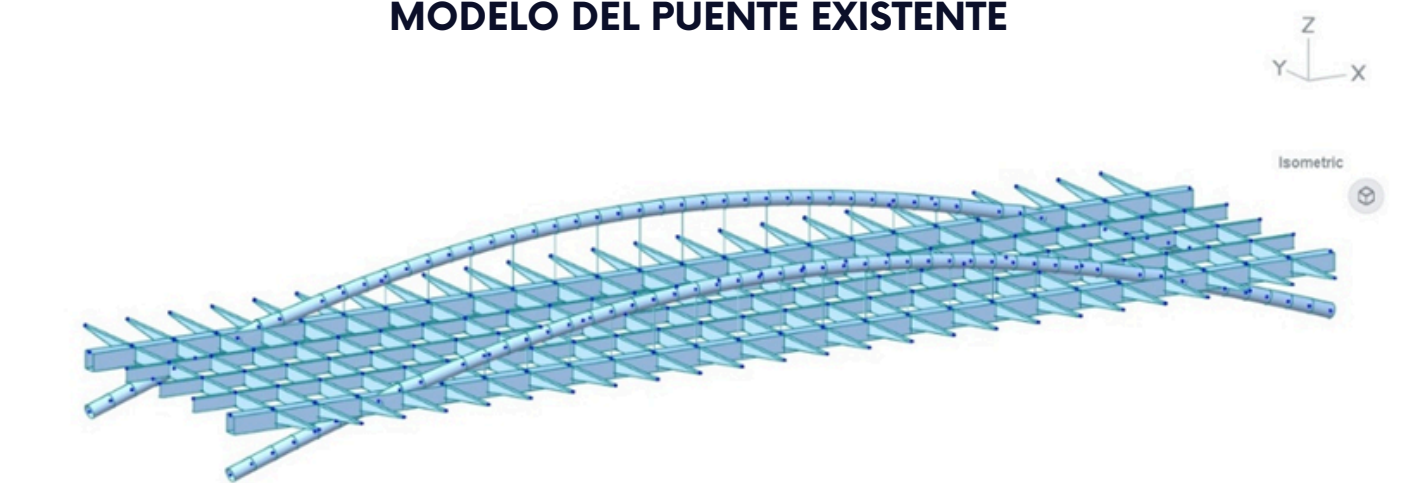


EL ARCO COMO ELEMENTO ESTRUCTURAL

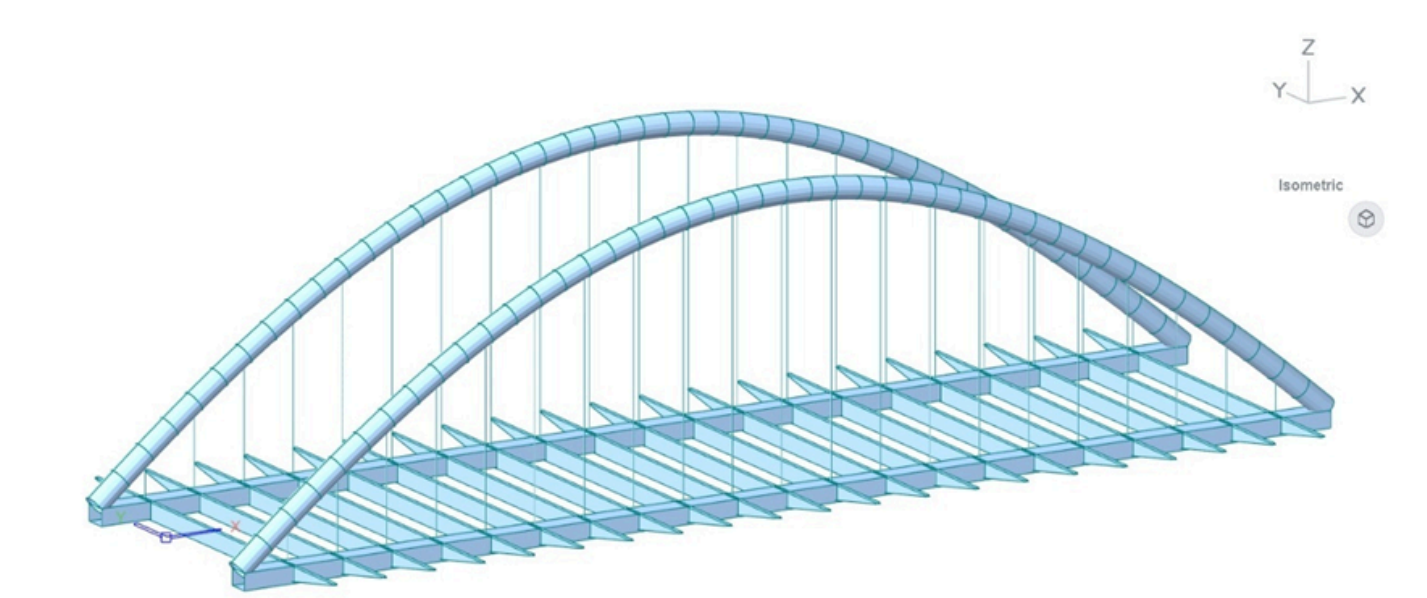
- El arco ha sido utilizado por distintas civilizaciones desde hace 6000 años.
- Algunos de los personajes más importantes de la historia, como Leonardo da Vinci, Palladio o Alberti, estudiaron esta forma y trataron de aportar una definición.
- El arco constituye el antifunicular de la ley de flectores originada por una carga repartida. Es precisamente dicha carga la que determina la dirección del esfuerzo, o línea de presión, haciendo que esta coincida con la directriz del arco. Este comportamiento permite que los arcos trabajen "por forma", es decir, principalmente a esfuerzo axial.



MODELO DEL PUENTE EXISTENTE



NUEVA PROPUESTA



RESULTADOS PRINCIPALES

- Reducción de esfuerzos en los apoyos.
- Tensiones dentro de los límites.
- Estabilidad frente al pandeo comprobada.
- Ahorro de material: menor consumo de acero y hormigón → menos CO₂ emitido.

	Tensiones [MPa]	
	Máx	Mín
Arco	-36	-92
Vigas Rectangulares	267	94
Transversales	285	-14
Cables	280	117

ODS RELACIONADOS



METODOLOGÍA DE TRABAJO

- Flujo de diseño:



Grasshopper
Parametrización

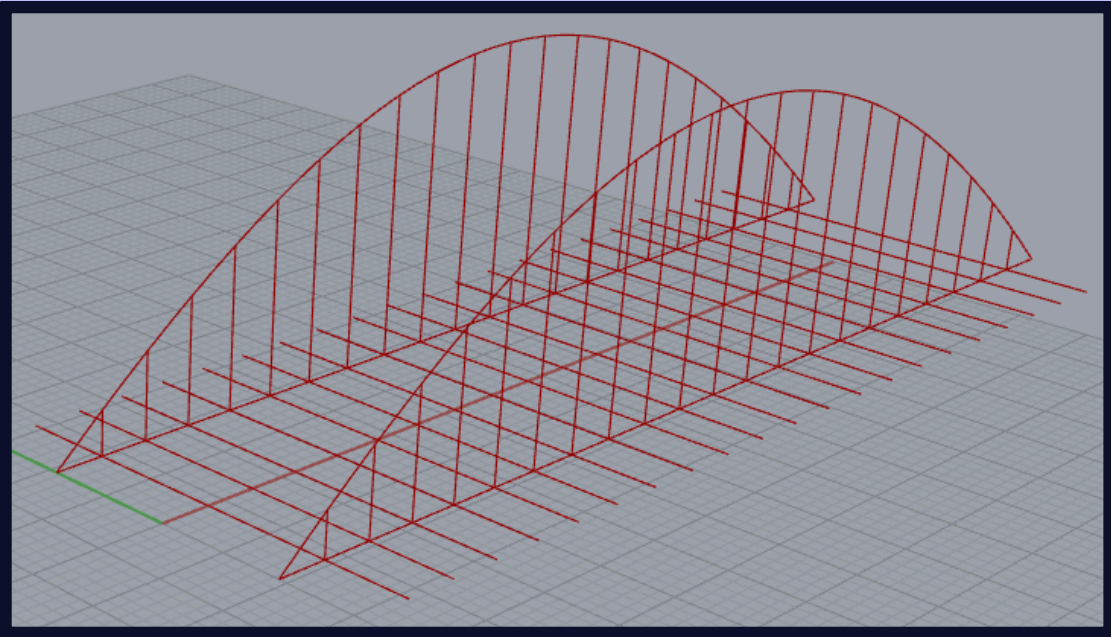


Rhinoceros
Modelado 3D



Midas Civil NX
Análisis Estructural

- Parámetros seleccionados para la iteración:
 - Flecha del arco: entre L/4 y L/6.
 - Sección transversal del arco y de las vigas longitudinales
 - Número de péndolas y de vigas transversales



- Minimización de recursos necesarios para una limitación de tensiones igual a 0,9 veces el límite elástico del material.
- Análisis en servicio de tensiones como la suma de tres fases: fase metálica, sobrecarga de uso y carga permanente.

CONCLUSIONES

- El arco con tablero inferior es más eficiente que la tipología actual.
- La reducción de la flecha del arco implica un incremento en los esfuerzos de la estructura como consecuencia del aumento de la componente horizontal del axil.
- El pandeo juega un papel clave en el dimensionamiento del arco.
- El modelado paramétrico conectado a un software de cálculo facilita el diseño y la optimización.
- La propuesta es estructuralmente segura, sostenible y alineada con los ODS.
- Esta metodología es aplicable a futuros proyectos de infraestructura urbana.

