



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Modelado y análisis en RFEM del puente Striatu

Modeling and analysis in RFEM of Striatu bridge

Autor/es

Álvaro de Miguel Rodríguez

Director/es

Elías Cueto Prendes

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza

2022



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe remitirse a seceina@unizar.es dentro del plazo de depósito)

D./D^a.

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

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

Zaragoza,

DE MIGUEL
RODRIGUEZ
Z ALVARO -
05442295N

Firmado digitalmente por DE MIGUEL RODRIGUEZ ALVARO - 05442295N
Fecha: 2022.08.31 12:09:52 +02'00'

Fdo:

ÍNDICE

1. MEMORIA

ANEXOS

1. ANEXO DE MODELADO Y ANÁLISIS



Trabajo Fin de Grado

Modelado y análisis en RFEM del puente Striatu

Memoria

Autor/es

Álvaro de Miguel Rodríguez

Director/es

Elías Cueto Prendes

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza

RESUMEN

El puente Striatus (Venecia) es un gran ejemplo de cómo la geometría influye en los esfuerzos que soporta una estructura, gracias a esta, el puente Striatus trabaja únicamente a compresión pura, con lo que el puente se ha podido construir con hormigón en masa, sin necesidad de armaduras de acero, ya que no hay esfuerzos de tracción y gracias a ello se han podido emplear impresoras 3D para fabricar las distintas piezas que componen el puente.

En este proyecto se ha analizado tanto el puente en su conjunto, como el de una de las piezas que componen el puente de forma aislada para ver los esfuerzos que se producen en ambas simulaciones y demostrar, así, como el puente trabaja únicamente a compresión pura y con ello la posibilidad de su método de construcción.

Para este proyecto, se realizará un modelo tanto del puente como de una de las piezas que lo componen, en el programa de elementos finitos RFEM, software de la empresa Dlubal, así como el empleo del código técnico aplicable a pasarelas peatonales. También se emplearán los conocimientos adquiridos durante la titulación y material disponible en Moodle de las asignaturas relacionadas con el proyecto. Una vez realizados los modelos, se hará una exposición y análisis de los resultados obtenidos.

Los documentos que componen el proyecto son:

I. Memoria

II. Anexo "Modelado y análisis"

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Índice

1. Introducción	2
2. Modelado	3
2.1 Modelado del puente completo	3
2.2 Modelado de la pieza del puente.....	4
3. Selección de cargas	5
4. Análisis de resultados.....	6
4.1 Análisis del puente completo.....	6
4.2 Análisis de la pieza del puente	11
5. Conclusiones.....	14
6. Bibliografía	15

1. Introducción

El objeto de este proyecto de fin de grado es justificar y demostrar la posibilidad del método de fabricación del puente Striatus mediante hormigón en masa, sin necesidad de refuerzos de armaduras de acero. Para ello se realizará un modelo en el programa de elementos finitos RFEM con su posterior análisis para demostrar que esto es posible y como esto se plasma en el puente.

El puente Striatus ha sido fabricado con hormigón en masa, sin necesidad de las tradicionales armaduras de acero necesarias para soportar los esfuerzos de tracción generados por la flexión gracias a su geometría. Demostrar esto será el objetivo del proyecto y como el trabajar con hormigón en masa se vuelve una realidad.

Aunque el puente va un paso más allá, tanto en su diseño como en su forma de ser construido. Gracias a la ausencia de armaduras y la posibilidad de trabajar solamente con hormigón en masa, el puente Striatus ha sido diseñado para ser fabricado en 53 piezas impresas mediante impresoras 3D que trabajan con hormigón en masa. Esto permite un diseño mucho más eficiente a la hora del empleo de material, con su consecuente ahorro de material y de emisiones de CO2 producidas en la fabricación de este y de otros materiales que no han sido necesarios en la fabricación del puente. Y aún más, el puente Striatus es completamente reciclable gracias a que ha sido fabricado en diferentes piezas las cuales no necesitan de unión entre ellas. Gracias a su geometría y como esta transmite los esfuerzos, el peso propio y las fuerzas sobre el puente es lo que mantiene unidas las 53 piezas que componen el puente Striatus.

Este proyecto comprende desde el modelado del puente en el programa RFEM, software de la empresa Dlubal, así como el modelado de una de las piezas del puente, la selección de cargas, cálculo de los modelos, análisis de resultados y conclusiones que se pueden extraer de las simulaciones.

Se han tenido en cuenta todas las normativas aplicables a pasarelas peatonales.

La finalidad de este proyecto es demostrar como la geometría influye en las cargas que soportan las estructuras, exponer la importancia de este hecho en la construcción del puente y en la posibilidad que esto abre a la hora de trabajar en nuevas estructuras solamente con hormigón en masa. También se expondrán las ventajas del método de construcción que se ha empleado.

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.
ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

2. Modelado

El puente Striatus es un puente compuesto de 53 piezas fabricadas con impresoras 3D de hormigón en masa, con una densidad de 2350 kg/m³. Estas piezas tienen un espesor de entre 50 y 350 mm y una masa de entre 217 y 783 kg. Tiene un área total de 216 m² y cubre una superficie de 50 m². Su altura máxima es de 3.5 m y la altura máxima bajo el puente es de 2.2 m.



Figura 1 Imagen real del puente

2.1 Modelado del puente completo

A la hora de realizar el modelo del puente completo, se ha tenido en cuenta un espesor medio de la pasarela de 200mm para simplificar tanto el modelado como el análisis. Ha sido necesario el modelado del puente en 2 piezas y no en una única debido a la compleja forma de este. El programa no era capaz de dibujar una superficie lo suficientemente aproximada como para poder hacerlo con una sola Spline después de dibujar las líneas de contorno del puente.

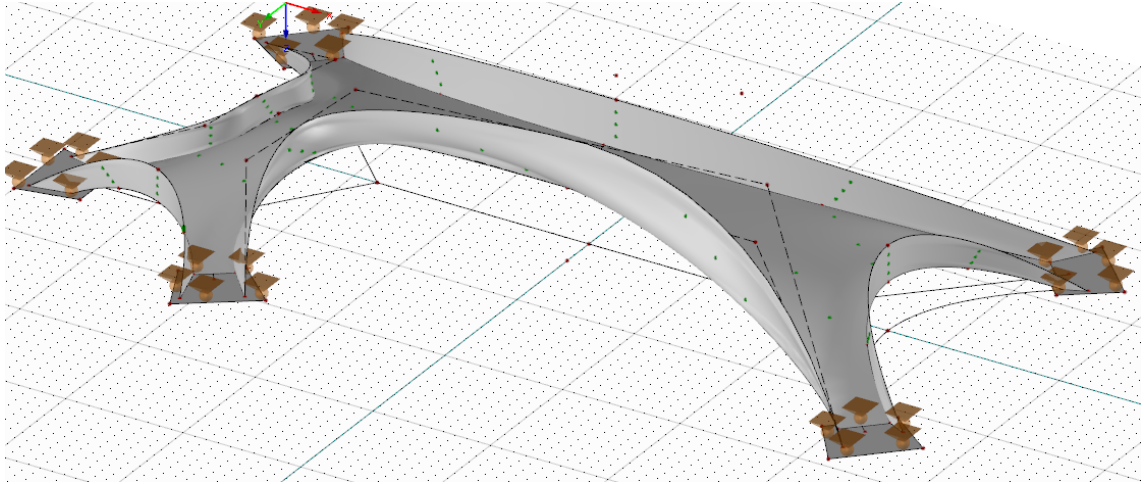


Figura 2 Modelo del puente completo

En el Anexo – Modelado y análisis se explica más detalladamente el proceso de modelado.

2.2 Modelado de la pieza del puente

La pieza que ha sido modelada se ha seleccionado de entre las 53 piezas que componen el puente al ser considerada una de las más representativas y que evita en cierta manera los problemas derivados de la simulación del modelo como se comenta en el Anexo – Modelado y análisis, sobre todo zonas de concentración de tensiones debidas a puntos angulosos debido a la complejidad que supone la forma del puente a la hora de ser mallada.



Figura 3 Pieza real modelada

Álvaro de Miguel Rodríguez

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

A la hora de modelar la pieza del puente, se han tenido unas medidas aproximadas, en función de la imagen real ya que no se han podido obtener planos ni medidas detalladas de esta.

En el Anexo – Modelado y análisis se explica más detalladamente el proceso de modelado.

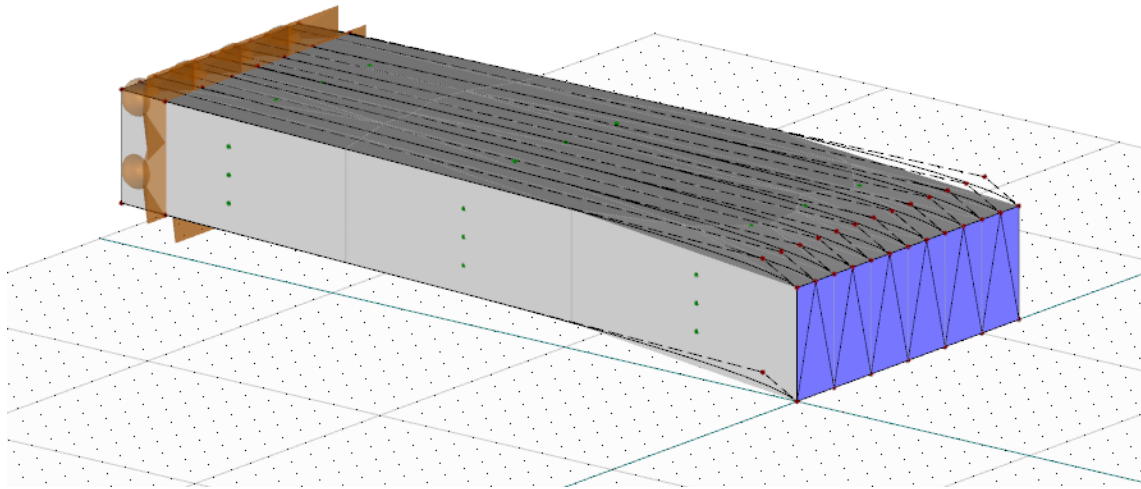


Figura 4 Modelo de la pieza del puente

3. Selección de cargas

El puente se ha simulado con 3 cargas:

- Peso propio, 5kN/m². Considerando el espesor y la densidad del hormigón.
- S.c.u. 5kN/m² . Obtenido del documento IAP – 11.
- Nieve 1kN/m². Según Eurocódigo para la zona en la que se encuentra el puente.

La obtención de las cargas se explica con más detalle en el Anexo – Modelado y análisis.

4. Análisis de resultados

4.1 Análisis del puente completo

Tabla 1 Resultados de cálculo del puente completo

	Nx (kN/m)	Ny (kN/m)	Nxy	Mx (kNm/m)	My (kNm/m)	Mxy (kNm/m)	Uz (mm)
Valor máximo positivo	225	741.2	943.87	6.55	7.32	2.47	9.1
Valor máximo negativo	1763.6	1867.53	544.87	7.64	8.81	4.82	0.5

En la Tabla 1 se puede ver de forma rápida y clara las diferencias entre los de los esfuerzos axiales y los momentos que soporta el puente, ahora se mostrarán las figuras para que se pueda observar la forma en que estos se distribuyen a lo largo del puente y poder comentarlos de una forma más clara y visible.

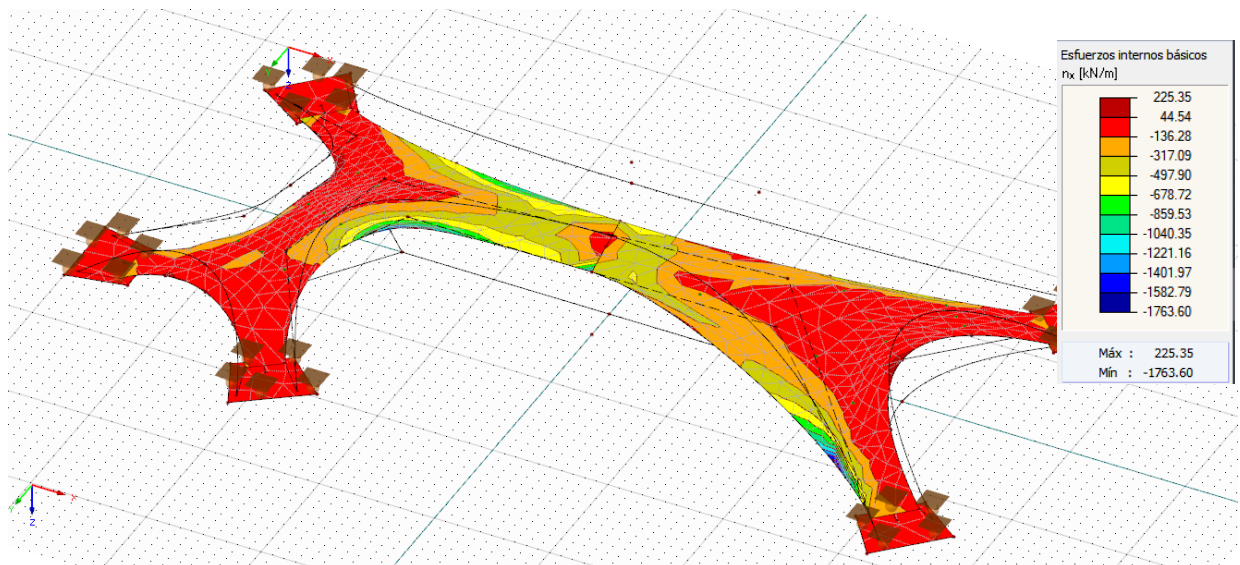


Figura 5 Distribución de axiles en X

En la figura 5 se puede ver la distribución de los esfuerzos axiales en X y la leyenda con los valores de estos que aparecen bajo las cargas comentadas anteriormente. Se puede ver una distribución bastante homogénea si descartamos las zonas de concentración de tensiones debidas a puntos angulosos.

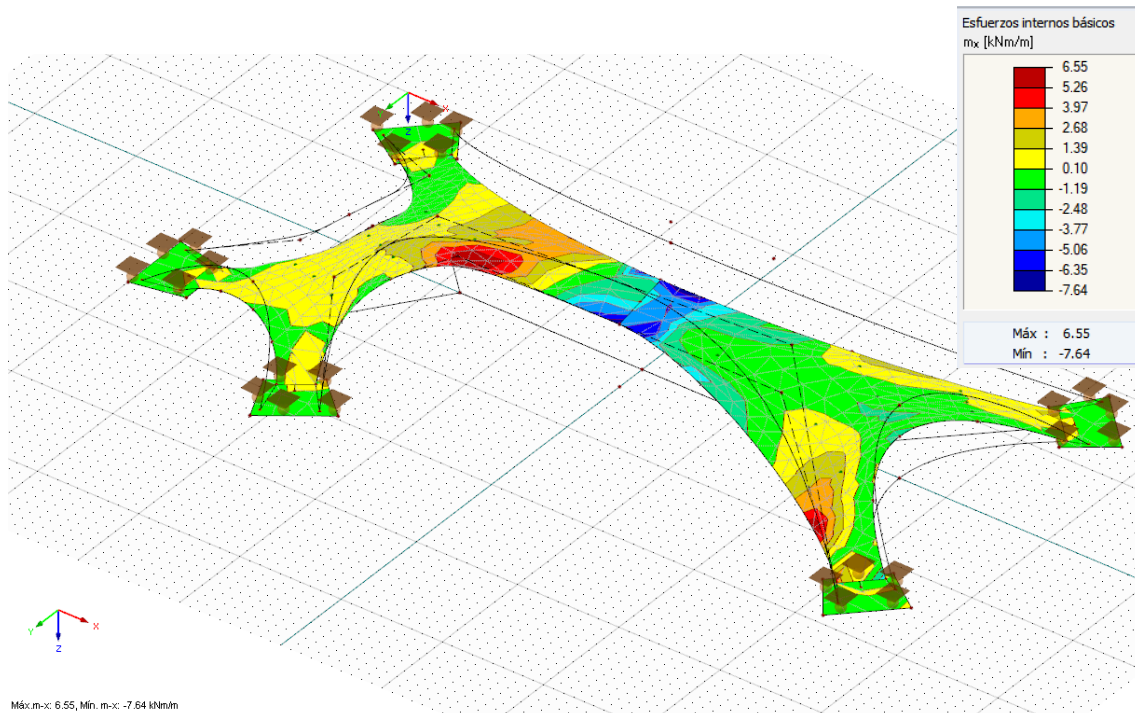


Figura 6 Distribución de momentos en X

En la figura 6 se pueden observar los momentos que se producen en el eje X, los puntos angulosos provocan algunas zonas con mayores momentos, sin embargo, si se observa la leyenda para los valores de estos, se puede ver que incluso los valores más elevados son mínimos comparados con los esfuerzos axiales que aparecen en el puente.

Con estas 2 figuras, ya se pueden observar las grandes diferencias entre los momentos y los esfuerzos axiales que soporta el puente. Se esperan resultados similares tanto para el eje Y como para los esfuerzos en XY.

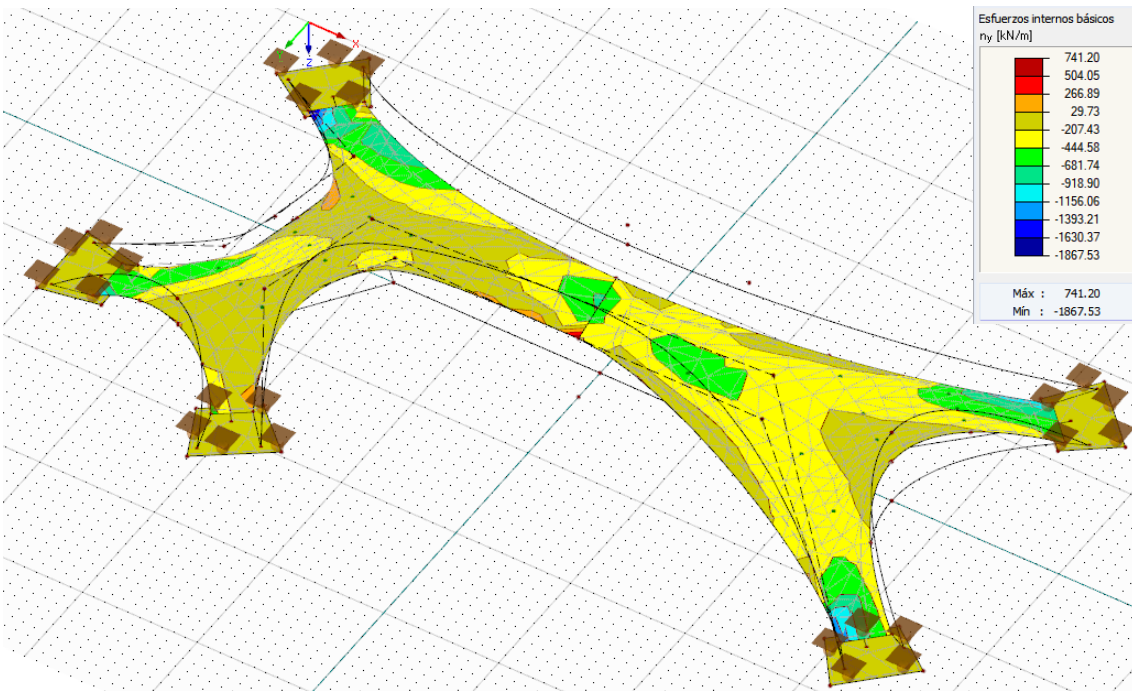


Figura 7 Distribución de axiles en Y

En la figura 7 se puede ver la distribución de axiles en Y, además de la leyenda con los valores máximos y mínimos. Igual que sucedía para el eje X, la distribución es bastante homogénea y en ese caso los valores extremos se observan en las esquinas del final del puente. Estos valores se pueden descartar, ya que la unión entre el puente y sus bases se realizará de otro modo en el modelo real además de ser valores provocados por los puntos de esquina. Para el resto del puente los valores son bastante constantes.

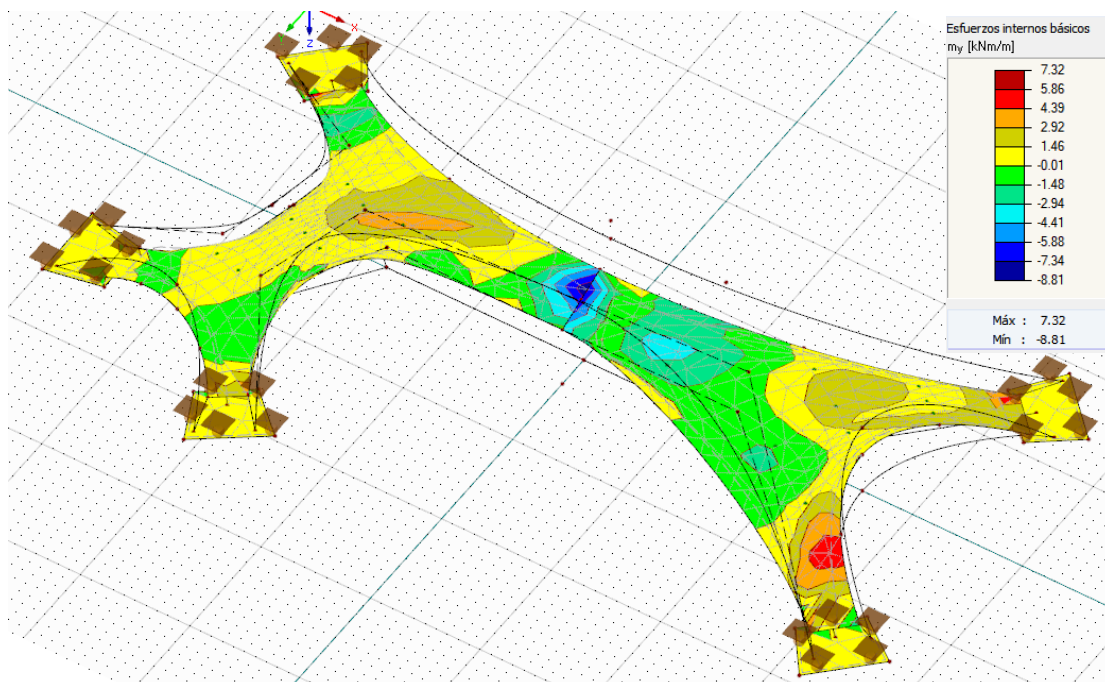


Figura 8 Distribución de momentos en Y

Alvaro de Miguel Rodríguez

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

Al ver la distribución de momentos en Y con su leyenda de valores, muy similares a los valores de los momentos en X, se puede decir que el puente, una vez realizada la simulación, cumple con su cometido y consigue gracias a su geometría reducir los momentos que las cargas generan sobre él y transmite de una manera extraordinaria los esfuerzos en forma de axil hacia las bases de este.

Por último, se mostrarán los resultados para los valores en XY, lo que dará una visión aún mejor de cómo trabaja el puente.

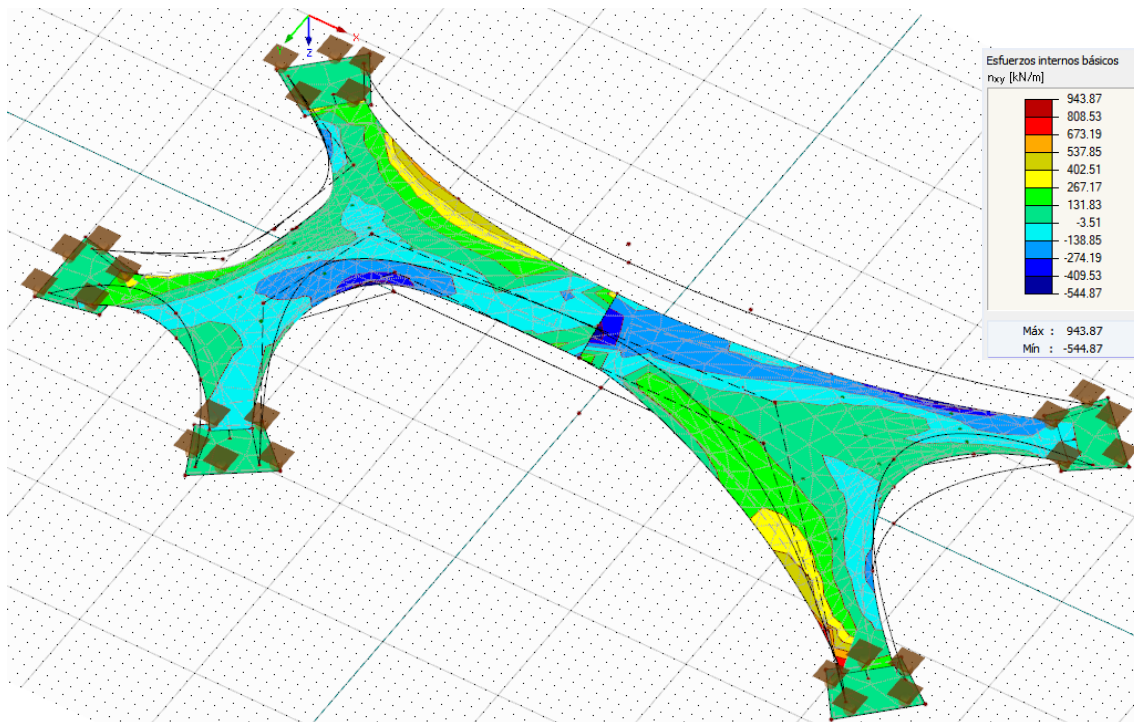


Figura 9 Distribución de esfuerzos en XY

Pese a que los valores puedan parecer muy grandes para estos esfuerzos, si se observa con detenimiento el diagrama, se puede ver que los valores dominantes están comprendidos entre 267.17 kN/m y -138.85 kN/m, los valores tan grandes que aparecen en el diagrama son debidos a los puntos de esquina y zonas de contacto entre distintas partes del modelo que no se deben tener en cuenta a la hora de estudiar los resultados en cuanto a la resistencia del puente.

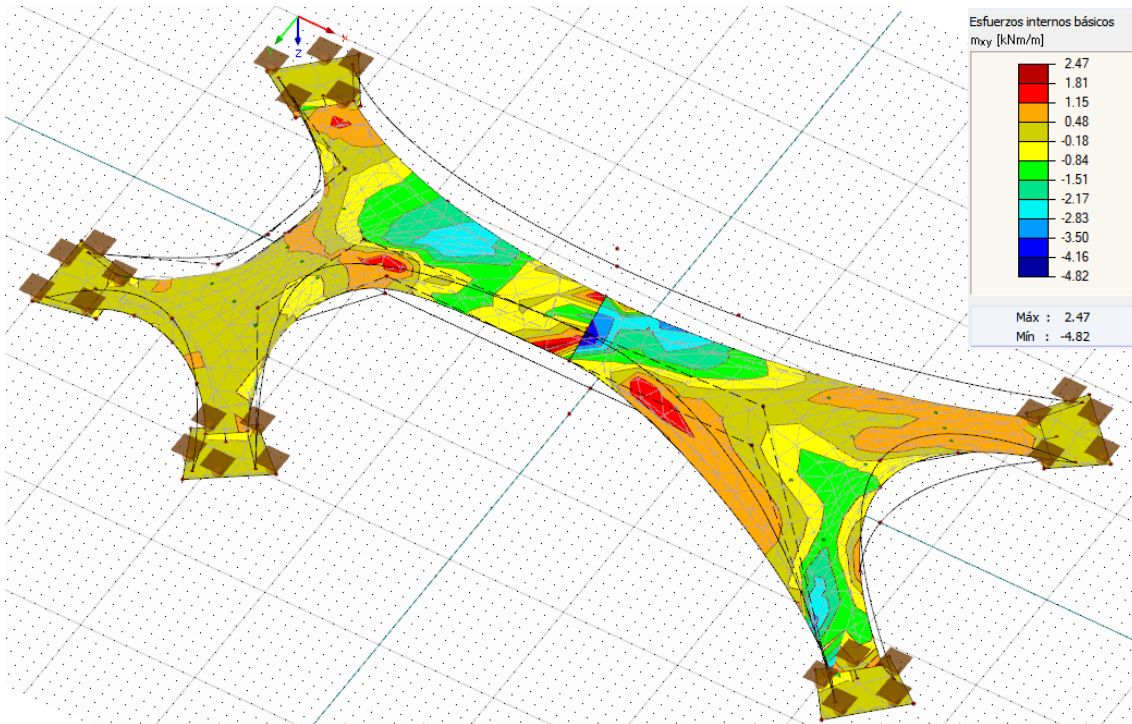


Figura 10 Distribución de momentos en XY

En la leyenda de la figura 10 se puede ver como estos valores son mucho menores, prácticamente nulos comparados con los valores obtenidos para los esfuerzos en XY. Esto confirma lo que se puede observar tanto para el eje X como para el eje Y. Los esfuerzos axiales son claramente dominantes sobre los momentos generados sobre la estructura.

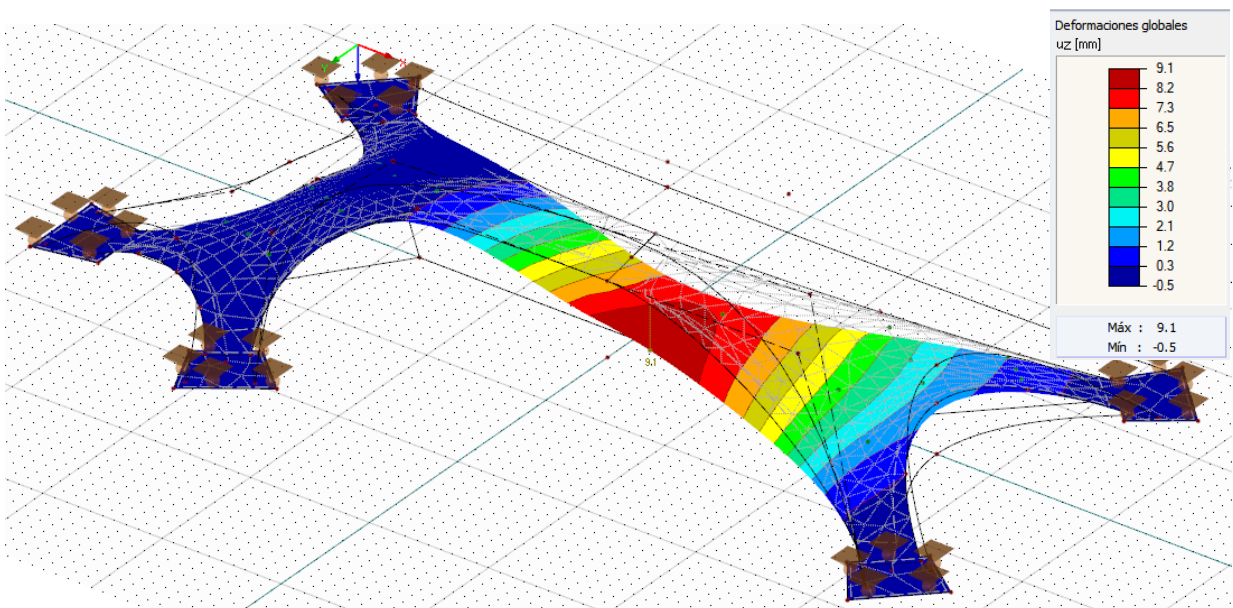


Figura 11 Deformaciones en Z

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

Para las deformaciones, se da un valor máximo de 9.1 mm en el eje z, siendo el valor máximo para este de 12mm según la IAP-11. En este sentido el puente trabaja sin problema.

A la vista de los resultados obtenidos en los primeros cálculos del puente completo, se puede ver como el puente cumple con su cometido. Los esfuerzos axiales son muy superiores a los esfuerzos de flexión, que son prácticamente despreciables.

En el Anexo - Modelado y análisis se muestran en mayor detalle todos los resultados de las simulaciones.

4.2 Análisis de la pieza del puente

Para el análisis de la pieza del puente se han tenido en cuenta 2 posibilidades, como se expone en el Anexo – Modelado y análisis, para poder realizar un análisis más completo de cómo trabaja la pieza por separado. Esto se debe a que no se tiene la posibilidad de simular la pieza con las cargas en ambas caras del eje x, como trabajaría en la realidad, sin restringir el movimiento en alguno de los 2 ejes, lo que supondría que estos apoyos ficticios restringen las deformaciones que se puedan producir debidas a los esfuerzos que soporta la pieza.

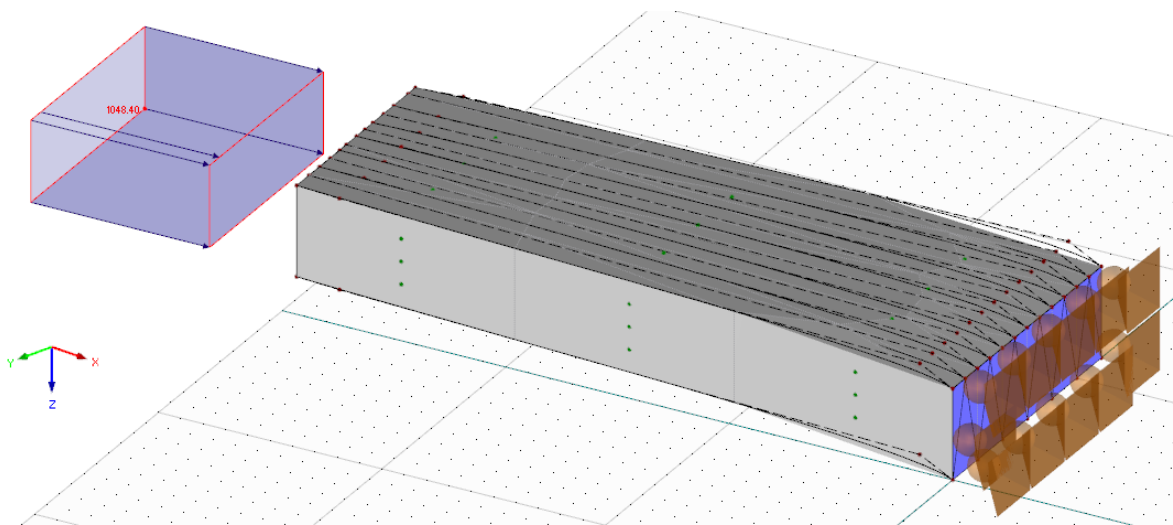


Figura 12 Modelo de pieza del puente con carga en la cara 1

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

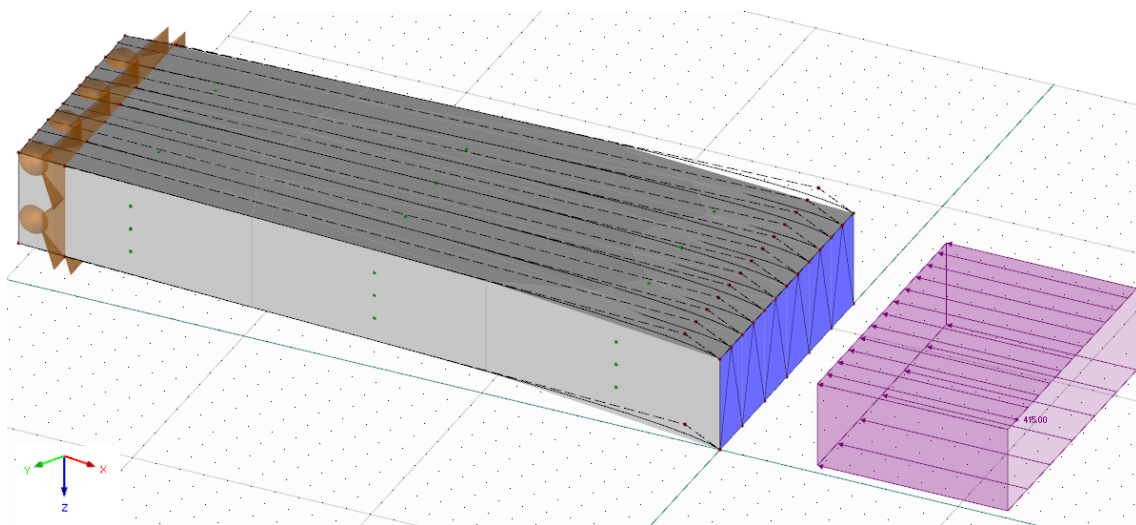


Figura 13 Modelo de la pieza del puente con carga en la cara 2

En las figuras 6 y 7 se pueden ver las 2 situaciones de carga de la pieza del puente que se ha modelado. Para la obtención de las cargas superficiales de cada una de las situaciones se ha realizado un cálculo detallado en el Anexo – Modelado y análisis que da como resultado unas cargas de 1048 kN/m² para la cara 1 y 415 kN/m² para la cara 2. Obtenidas a partir de la simulación del puente completo, como no podría ser de otra forma.

Tabla 2 Resultados de cálculo con carga en cara 1

	Nx (kN/m)	Mx (kNm/m)	Uz (mm)
Valor máximo positivo	5.33	0.65	0
Valor máximo negativo	28.81	0.51	0

Para la primera simulación de la pieza con la carga en la cara 1, se puede ver el valor dominante del esfuerzo de compresión. Los valores para los momentos que aparecen son prácticamente despreciables, derivados de las condiciones de la propia simulación.

La pieza está trabajando con un valor máximo de 28.81 kN/m lo que da un valor aproximado de unos 0.12Mpa, si se tiene en cuenta la resistencia del hormigón en masa que se ha empleado para la construcción del puente, según su densidad, un hormigón C30, con una resistencia de 30Mpa, podemos decir que las piezas resistirán los esfuerzos sin ningún problema.

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.

ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.

Tabla 3 Resultados de cálculo con cargas en cara 2

	Nx (kN/m)	Mx (kNm/m)	Uz (mm)
Valor máximo positivo	23.89	1.18	0.2
Valor máximo negativo	54.42	0.98	0

Como sucede para los resultados de la cara 1, los valores dominantes son los esfuerzos axiales. Para este segundo caso de carga, se puede ver una diferencia respecto al anterior, aquí sí aparecen pequeñas deformaciones e incluso unos valores de tracción ya considerables. Esto se debe a las condiciones de la simulación, sin embargo, siguen siendo valores pequeños respecto a la resistencia del hormigón. Para el valor máximo de compresión, 54.42 kN/m, se tendrían unos 0.27Mpa, muy lejos de la resistencia del hormigón, 30Mpa.

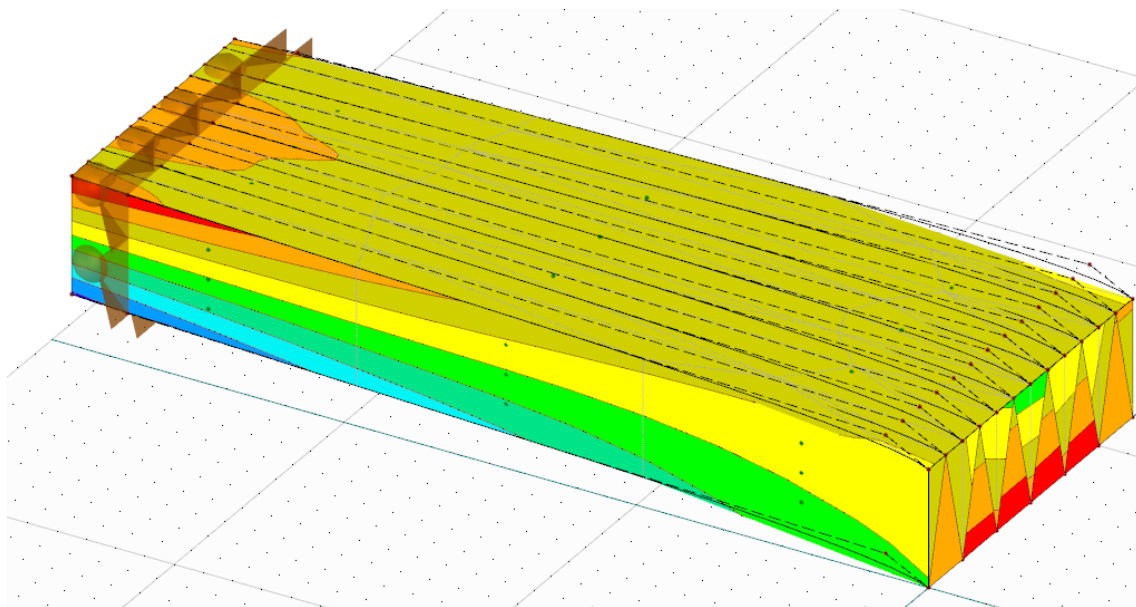


Figura 14 Distribución de tensiones para carga en cara 2

Para ilustrar mejor aún todo esto, se muestra la Figura 8, en la que se puede ver la distribución de tensiones axiales para el cálculo con carga en la cara 2, valores máximos positivos en rojo y valores máximos negativos en azul. Se puede ver como los esfuerzos máximos, al igual que sucedía en el caso de la simulación del puente completo, se dan en los puntos de esquina, si se observan los valores que predominan en la pieza, son los valores medios, en tonos amarillos, entre -11.70kN/m y -4kN/m. Como es de esperar, los valores dominantes en la pieza son los valores de compresión, con lo que se puede decir que la pieza trabaja como se espera.

En el Anexo – Modelado y análisis se muestran con más detalle los resultados de ambos casos de carga.

5. Conclusiones

Una vez que se han visto los resultados de todos los cálculos, tanto del puente completo como de una de las piezas más representativas por separado, podemos decir que el puente cumple con su cometido, los esfuerzos de compresión son los esfuerzos dominantes y que los esfuerzos de flexión sean prácticamente nulos. Gracias a su geometría se ha conseguido que el puente trabaje únicamente con esfuerzos de compresión, evitando así el uso de armaduras de acero que son necesarias para soportar los esfuerzos de flexión con los que tan mal trabaja el hormigón.

Debido a que no son necesarias las armaduras de acero al no aparecer grandes esfuerzos de flexión el puente ha podido ser construido únicamente con hormigón en masa. Lo que ha permitido el uso de impresoras 3D que trabajan con este material para la fabricación de las piezas del puente. Y no solo eso, además, gracias al empleo de estas, se ha podido optimizar el diseño de cada una de las piezas para conseguir un gran ahorro de material con su consecuente ahorro de emisiones de CO₂, tanto en la fabricación del propio hormigón como en el de otros materiales que no son necesarios gracias a su diseño, como las armaduras de acero.

El puente Striatus sienta un precedente a la hora de trabajar con hormigón, ya que además de todo lo expuesto, el puente, formado por 53 piezas independientes, es totalmente reciclable, ya que no se ha empleado ningún tipo de material a la hora de unir las piezas entre sí, su geometría y la forma en la que se reparten los esfuerzos gracias a esta mantienen las piezas unidas entre sí sin necesidad de uniones y es posible desarmar y armar el puente cuantas veces sea necesario y para ello no se necesita ningún material adicional.

Hoy en día, cada vez se le da más importancia a la integración de las estructuras con el medio ambiente y a construir estas de una forma más sostenible. En este sentido, el puente Striatus recoge todo ello, es una estructura pensada y diseñada para ser un precedente a la hora de trabajar con hormigón cuidando al máximo el medio ambiente, tanto en su forma de ser fabricado como en su posibilidad para ser trasladado a cualquier lugar sin que esto suponga una nueva inversión de materiales, conlleve un gran estrés para la zona en la que se monte o una gran contaminación por el empleo de maquinaria para ser montado y desmontado.

Esperemos que más arquitectos sigan este ejemplo y empleen la filosofía y las técnicas que muestran el puente Striatus.

MEMORIA.

MODELADO Y ANÁLISIS EN RFEM DEL PUENTE STRIATUS.
ÁLVARO DE MIGUEL RODRÍGUEZ.



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

6. Bibliografía

- Apuntes de la asignatura de Resistencia de materiales, Ingeniería Mecánica.
- Apuntes de la asignatura de Estructuras de hormigón, Ingeniería Mecánica.
- Eurocódigo
- Norma IAP-II
- Página web del puente Striatus: <https://www.striatusbridge.com/>
- Página web de la empresa Dlubal: <https://www.dlubal.com/es>