



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Diseño de secuencia de
desapuntamiento de forjados
utilizando herramientas de
diseño paramétrico.**

Treball realitzat per:
AXEL DELGADO LUCAS

Dirigit per:
ROLANDO CHACÓN FLORES

Grau en:
Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 29 Juny 2022

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUMEN

El presente trabajo ha consistido en el diseño de un modelo paramétrico de un forjado de hormigón armado apuntalado, para su posterior análisis estructural, de tal manera que cada parámetro del diseño sea una entrada de datos y así poder obtener un modelo versátil que se adapte a las características de nuestra estructura.

El modelo paramétrico ha sido elaborado mediante el programa Rhinoceros/Grasshopper, en el cual Rhinoceros nos da el soporte gráfico en 3D, mientras que Grasshopper nos permite la programación paramétrica de toda la geometría. El análisis estructural ha sido realizado con un plug-in de Grasshopper llamado Karamba3D(1), el cual realiza todos los cálculos estructurales mediante métodos de elementos finitos.

El desarrollo del proyecto ha consistido en: simular el comportamiento de la estructura mediante un modelo digital y a su vez optimizar el uso de los puntales, tanto en su posición como en la cantidad que se van a emplear. De esta manera también se podría determinar en retrospectiva una obra que haya podido salir mal, ya sea debido a su diseño o a una mala ejecución.

Para determinar la eficiencia de los puntales, primero se ha observado en el modelo como afecta una disposición arbitraria de puntales a la distribución de cargas en el forjado, así como su deformación. Finalmente se ha utilizado un método comparativo entre distintos patrones de desapuntalamiento de tal manera que sea posible comprobar el comportamiento de la estructura paso a paso.

ÍNDICE

RESUMEN	2
1. OBJETIVOS	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
3. DISEÑO PARAMÉTRICO	7
3.1 GEOMETRÍA.....	7
3.2 ANÁLISIS ESTRCUTURAL.....	12
3.3 PYTHON SCRIPT	15
4. SECUENCIAS DE DESAPUNTALAMIENTO.....	18
5. RESULTADOS.....	21
5.1. SECUENCIA 1	23
5.1.1. FORJADO CUADRADO SIMPLEMENTE APOYADO	23
5.1.2. FORJADO CUADRADO CON APOYOS EMPOTRADOS	25
5.1.3. FORJADO RECTANGULAR SIMPLEMENTE APOYADO	27
5.1.4. FORJADO RECTANGULAR CON APOYOS EMPOTRADOS	29
5.2. SECUENCIA 2	32
5.2.1. FORJADO CUADRADO SIMPLEMENTE APOYADO	32
5.2.2. FORJADO CUADRADO CON APOYOS EMPOTRADOS	33
5.2.3. FORJADO RECTANGULAR SIMPLEMENTE APOYADO	35
5.2.4. FORJADO RECTANGULAR CON APOYOS EMPOTRADOS	36
6. CONCLUSIONES.....	37
7. BIBLIOGRAFÍA.....	41

1. OBJETIVOS

Durante la planificación de este proyecto, se definieron como objetivos principales los siguientes puntos:

- Mediante el uso de un modelo digital, simular el comportamiento de una estructura.
- Conocer la disposición óptima de los puntales, dada una geometría de forjado cualquiera, y encontrar el mejor patrón de desapuntalamiento que nos produzca unas deformaciones admisibles en el forjado.
- Desarrollar un método capaz de salvar tiempo en el diseño, abaratar costes y crear una estructura más segura en su fase constructiva.

Siguiendo estos objetivos se consigue crear un método que disminuirá errores en proyectos futuros y permitirá detectar los ya cometidos en proyectos anteriores.

2. MARCO TEÓRICO

Las simulaciones en el mundo de la ingeniería civil han cambiado totalmente la forma que tenemos de aproximar la solución de un problema. Estas nos permiten, mediante un modelo matemático virtual, en nuestro caso un modelo 3D, ver el comportamiento a tiempo real de nuestra estructura física creando su clon digital, adelantándonos así a cualquier problemática que pueda surgir e identificando a su vez cuál puede ser la causa de esta.

El diseño paramétrico en la ingeniería, a pesar de no estar muy extendido en los procesos de diseño, resulta ser un método muy valioso todo y requerir un esfuerzo adicional en etapas tempranas. Mediante este método, es posible crear un modelo versátil que se adapte a nuestras necesidades, de tal modo que cualquier parámetro del diseño puede ser introducido como input en nuestro modelo, y que este, actualice todos los cálculos pertinentes a los nuevos cambios. Así pues, nos otorga la opción de poder modificarlo en cualquier etapa de su ciclo de vida, posiblemente abaratando el coste, tanto de tiempo como de dinero, en relación a posibles modificaciones o rediseños que fueran necesarios en un futuro. Para que nuestro modelo sea versátil, se requiere un diseño robusto, que entienda las relaciones de todos los parámetros entre sí. Una vez conocidas estas relaciones, se abre la posibilidad del uso de técnicas de optimización numéricas, que serán una herramienta de gran utilidad en el criterio de diseño de nuestro modelo.

En este proyecto, después del diseño geométrico de nuestro forjado apuntalado, se han utilizado las herramientas de cálculo proporcionadas dentro de Grasshopper, por el plug-in Karamba3D, que usa el método de elementos finitos, para el análisis estructural.

El método de elementos finitos o MEF, es un método numérico que fue desarrollado por Richard Courant en 1943 y que posteriormente fue establecida una definición más amplia para el análisis numérico. Este método, pensado para ser utilizado en un ordenador, permitió la resolución de

ecuaciones diferenciales parciales asociadas a problemas físicos, como es en nuestro caso el cálculo de estructuras. (2)

A nivel didáctico, se han visto ciertas ventajas para los estudiantes a la hora de entender las relaciones de los distintos componentes de una estructura de hormigón y el encofrado. Según un estudio realizado por la *American Society for Engineering Education*, en 2021, se observó que, gracias al uso de herramientas de diseño paramétrico, estudiantes que carecían de la experiencia en diseño tridimensional y que a menudo necesitaban dedicarle mucho más tiempo al desarrollo de cualquier modelo, encontraban una herramienta realmente útil y automatizada para trabajar a su ritmo y entender dichos modelos 3D de manera más fácil e interactiva (3). A pesar de tener que dedicar más tiempo en la fase inicial del proyecto, lo que, en algunos casos, alumnos describieron como abrumador, finalmente encontraron en la metodología, una manera útil y divertida de visualizar y comprender todos los elementos de un forjado encofrado y todos sus elementos estructurales.

3. DISEÑO PARAMÉTRICO

El diseño paramétrico de este trabajo ha consistido básicamente en tres fases:

- Diseño de la geometría.
- Diseño de los elementos estructurales.
- Diseño de las secuencias de desapuntalamiento.

3.1 GEOMETRÍA

El diseño geométrico del proyecto ha tenido en cuenta la relación de los parámetros que lo componen, de tal manera que, de ser estos dependientes debidos a su relación intrínseca, estos sean expresados mediante la expresión parametrizada, es decir, que todo parámetro dependiente de otro será expresado con la misma variable. De esta manera se consigue obtener un diseño más robusto y más sencillo de modificar si así se necesita. Gracias a todas las relaciones paramétricas del diseño, no ha hecho falta el uso de ningún elemento auxiliar en Rhinoceros, todos los elementos han sido únicamente definidos en Grasshopper.

Para empezar el diseño hemos definido una superficie auxiliar mediante el nodo "Plane Surface", por defecto un cuadrilátero, con el vértice inferior izquierdo en el origen de coordenadas, y las dos primeras entradas de parámetros, "x" e "y", que definirán el número de unidades, en nuestro caso metros, en cada eje de nuestra parrilla. Para este plano auxiliar, se mueve la "altura de los puntales", mediante la herramienta "Move" con el input de la superficie y con el input de la dirección del desplazamiento dada por la herramienta "Unit Z", de tal manera que ya tenemos la base del forjado definida, tal y como podemos ver en la *figura 1*.

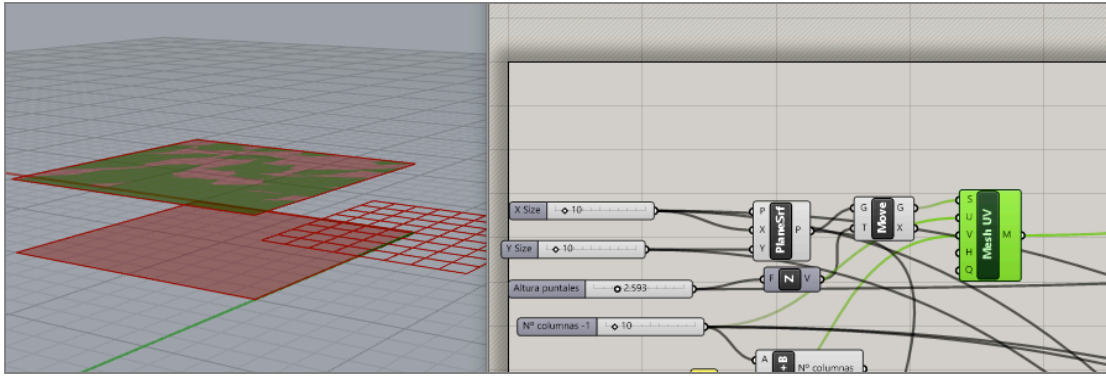


Figura 1. Extraída de Rhinoceros.

Esta superficie es finalmente transformada en una malla de puntos mediante “Mesh UV”, la cual tiene como inputs: la superficie que acabamos de definir y U y V, que a su vez son nuestros parámetros “N.º columnas -1” y “N.º filas -1”, como podemos ver en la *figura 2*.

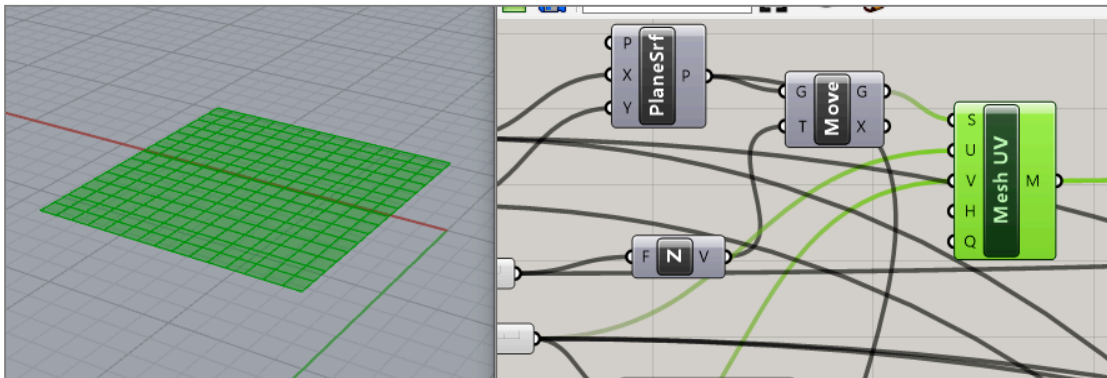


Figura 2. Extraída de Rhinoceros.

Una vez tenemos nuestra malla definida, la convertiremos en un forjado, mediante la herramienta “Mesh to Shell”. Le daremos como input nuestra malla y su correspondiente sección transversal mediante la herramienta “Cross Section”, en la cual seleccionaremos *ShellRC Std Const*, que corresponde a una sección de hormigón armado de sección transversal constante y le daremos como input el “Canto”, tal y como se puede ver en la *figura 3*.

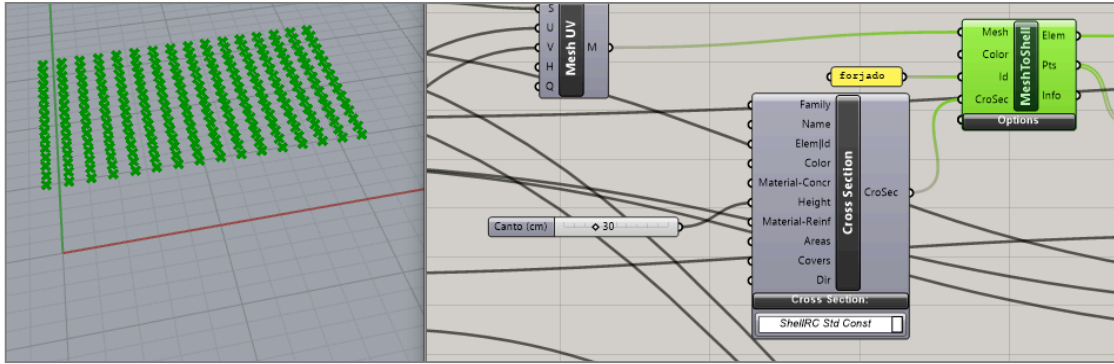


Figura 3. Extraída de Rhinoceros.

Una vez definido el forjado, utilizaremos el output “Points”, de “Mesh to Shell”, organizados en una lista única donde cada elemento de la lista es un vector, para definir la colocación de los puntales y la secuencia de desapuntalamiento.

Para ello, haremos uso de la herramienta “GhPython Script”, que nos permite programar con librerías básicas de Python desde Grasshopper. Obviaremos los procesos del nodo de Python por ahora, ya que entraremos en más detalle en otro capítulo, nos centraremos en los resultados obtenidos que hemos utilizado para el diseño geométrico. Por el momento, solo hace falta saber que, con los puntos obtenidos de la malla, tras operarlos dentro de Python obtenemos dos conjuntos de puntos como output del nodo: el conjunto “points”, que contiene todos los puntos en los cuales va a haber un puntal; y el conjunto apoyos_final, que contiene los puntos que definiremos como apoyos del forjado. Podemos ver ambos conjuntos en la *figura 4* y *figura 5*, respectivamente.

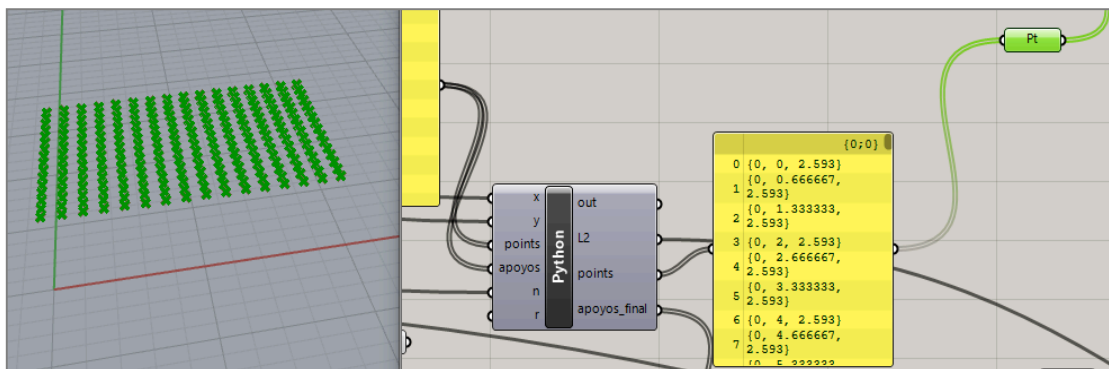


Figura 4. Extraída de Rhinoceros.

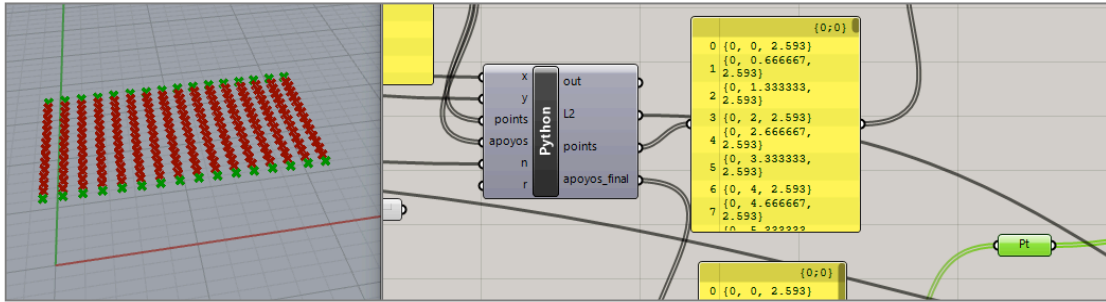


Figura 5. Extraída de Rhinoceros.

Con el conjunto de puntos “points” extraídos de Python, generamos, mediante la herramienta “Line SDL”, un segmento que sale de cada punto, que se corresponderá con el eje longitudinal de los puntales. Como inputs tenemos: los puntos “points”; la dirección z, nuevamente mediante la herramienta “Unit Z”, aunque esta vez unido con “Reverse” para indicar que es en sentido negativo al eje de coordenadas Z; y la longitud, que en este caso será nuestro parámetro “altura de puntales”. Podemos observar lo descrito en la *figura 6*.

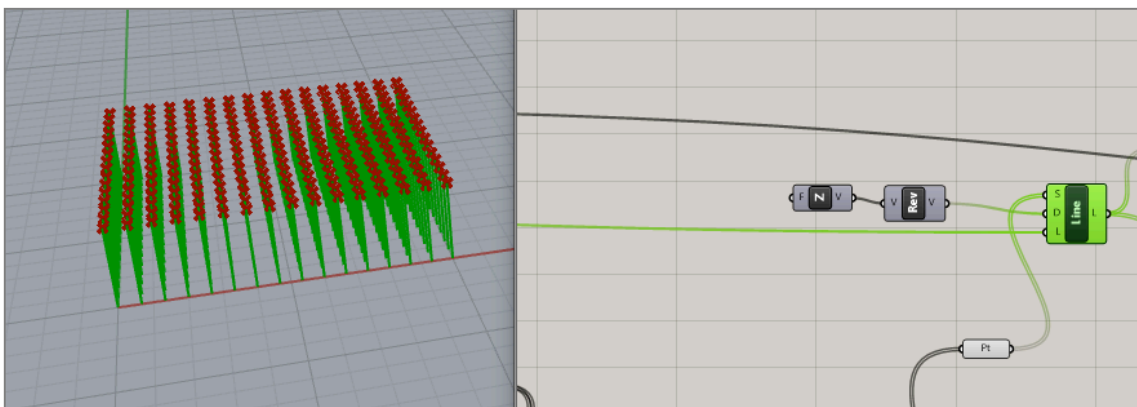


Figura 6. Extraída de Rhinoceros.

Ahora, con el conjunto de líneas del output de “Line SDL”, por un lado, gracias a la herramienta “End Points” obtenemos los puntos finales del segmento que nos servirán para definir los apoyos de los puntales, mediante la herramienta “Support”, desde la cual nos permite también definir las condiciones de los apoyos y en nuestro caso, bloquearemos translaciones y rotaciones en los tres ejes, como podemos observar en la *figura 7*.

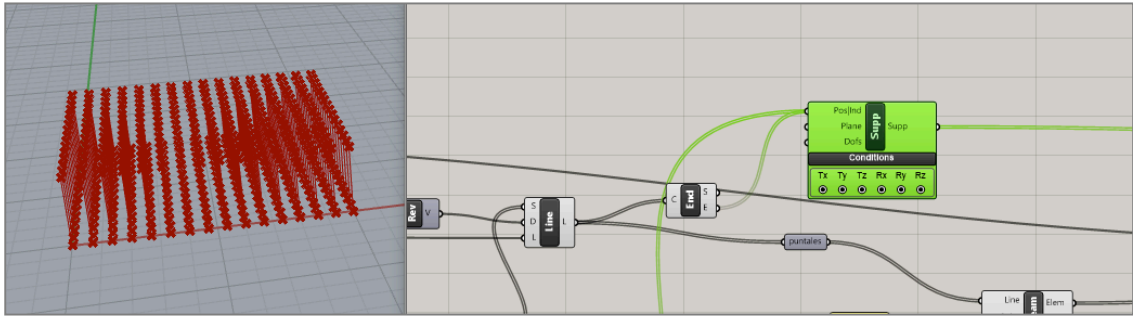


Figura 7. Extraída de Rhinoceros.

Por otro lado, con la herramienta “Line to Beam” podemos definir cada línea como un elemento estructural, un puntal en este caso, así como definir su sección transversal con la herramienta “Cross Section”, donde seleccionaremos “O-Section”, y le daremos el input del material mediante la herramienta “Material Selection”, donde escogeremos acero en ambos desplegables, y el input del diámetro del puntal, tal y como se puede ver en la figura 8.

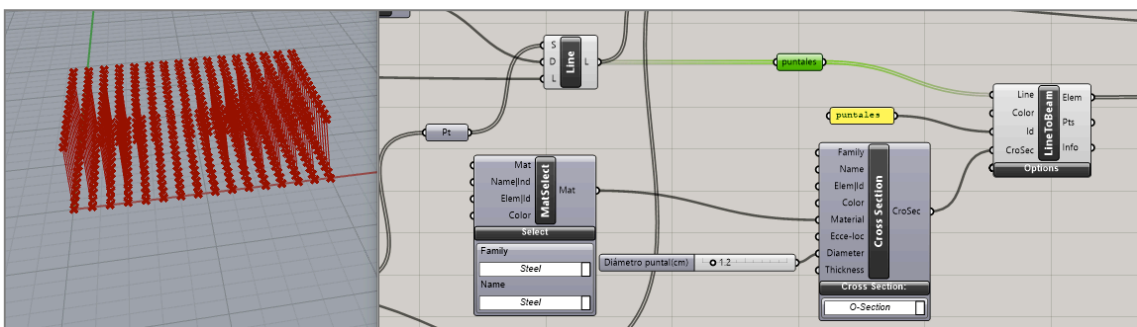


Figura 8. Extraída de Rhinoceros.

3.2 ANÁLISIS ESTRCUTURAL

Ahora que tenemos definida la geometría de nuestra estructura de forma paramétrica, queda definir nuestra carga y ensamblar todos los elementos en un solo modelo.

Para definir la carga, que en nuestro caso es una carga uniformemente distribuida, usaremos la primera superficie que definimos y la moveremos arbitrariamente hacia arriba en la dirección z, con las herramientas “Unit Z” y “Move”. Seguidamente, usaremos la herramienta “Area” junto con “Scale” y haremos una transformación homotética desde el centroide de la superficie, con un factor de escala mayor que uno, y lo conectaremos como input de la herramienta “Mesh UV”. De este modo, conseguiremos una malla que será siempre mayor en superficie a la que usamos previamente para definir nuestro forjado. El número de nodos definidos por “U” y “V”, será nuestro input, a mayor grande sean sus valores, mayor precisión tendrá la malla de nuestra carga. Todo este proceso puede ser visto en la *figura 9*.

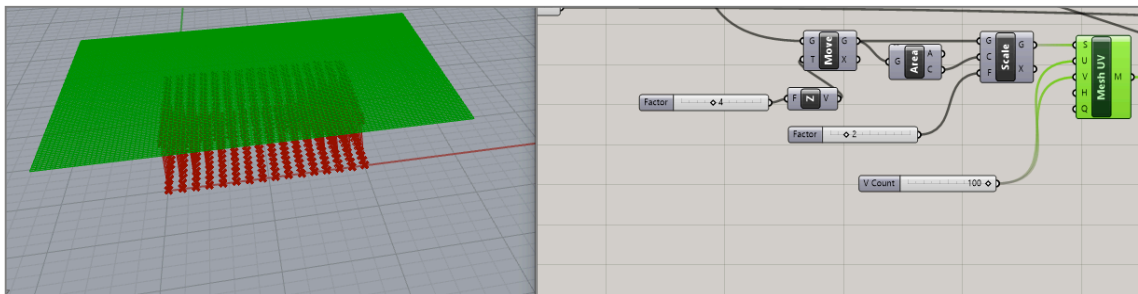


Figura 9. Extraída de Rhinoceros.

Una vez con nuestra malla, mediante la herramienta “Loads”, podemos definir qué tipo de carga queremos utilizar, su magnitud y dirección. Seleccionaremos “MeshLoad Const”, ya que nuestra carga está distribuida uniformemente en toda la superficie del forjado, y tendremos como input: el vector “Unit Z” por el factor de escala que es, nuestro parámetro de salida de Python “L2” e kN/m^2 , multiplicado por -1 para que sea en sentido negativo; y nuestra malla recién generada, tal y como podemos ver en la *figura 10*.

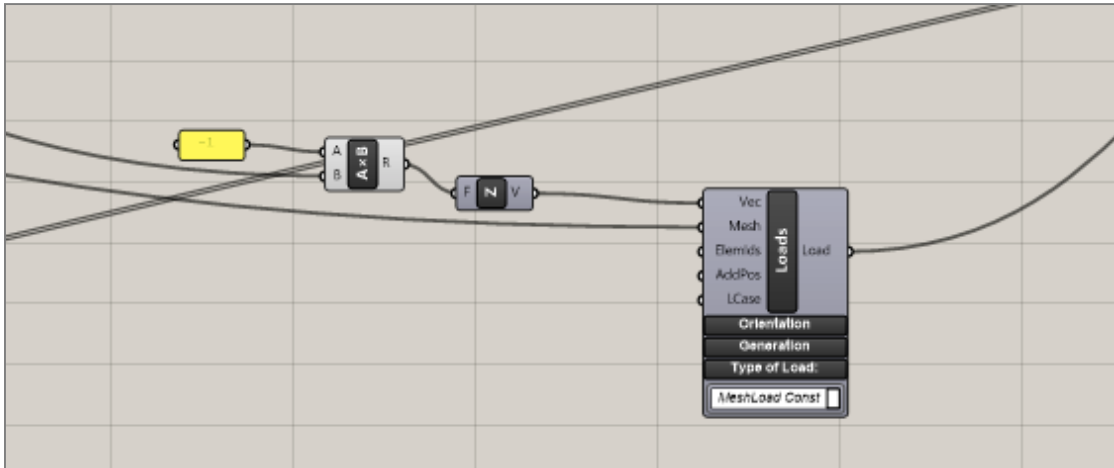


Figura 10. Extraída de Rhinoceros.

Ahora que ya tenemos todos los elementos de nuestro modelo definidos, solo queda ensamblarlos. Para ello usaremos la herramienta “Assemble Model”. Los inputs serán: los apoyos, los puntales y el forjado, y nuestra carga. Para hacerlo, conectaremos todos los elementos en contenedores individuales. Mediante las herramientas de Karamba3D: “Support”, para los apoyos; “Element”, para el forjado y los puntales; y “Load” para nuestra carga. Haremos clic derecho en cada uno de ellos para usar la opción “Flatten” lo cual organizará todos los datos contenidos en una sola lista, esto puede evitar errores de conectividad.

Seguidamente, conectaremos el “Model” de output de “Assemble” y lo conectaremos al input de la herramienta “Analyze”, que es la que se encargará de hacer los cálculos estructurales mediante el método de elementos finitos, dada nuestra geometría, nuestras condiciones de contorno y nuestra carga. Volveremos a usar el output “Model” de “Analyze” y lo conectaremos al input de “ModelView”. Al hacerlo, tendremos al fin la opción de visualizar nuestro modelo, su deformada, las cargas aplicadas y las reacciones, entre otras opciones de visualización. Podemos ver todo lo descrito en la *figura 11*.

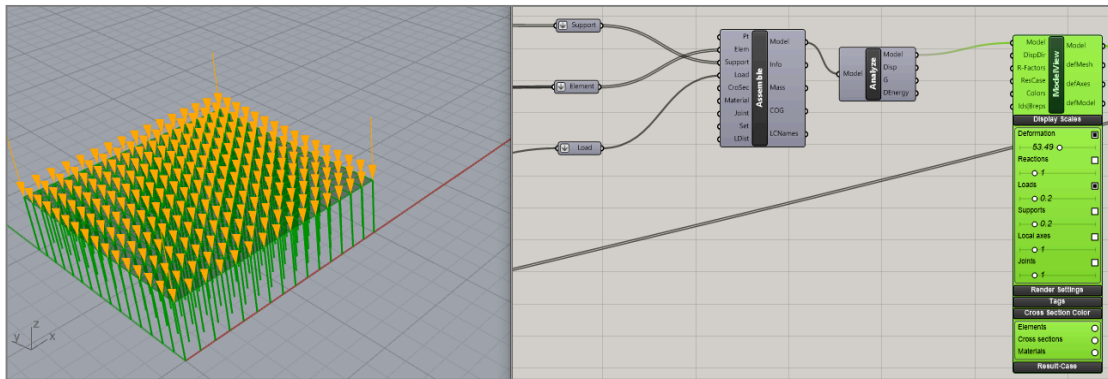


Figura 11. Extraída de Rhinoceros.

Para finalizar, conectaremos el output de “ModelView” con las herramientas “Beam View” y “Shell View”, las cuales nos permitirán visualizar distintos parámetros de los puntales y el forjado, entre ellos su deformada y su sección transversal. Se pueden ver algunas de estas visualizaciones en la figura 12 y la figura 13.

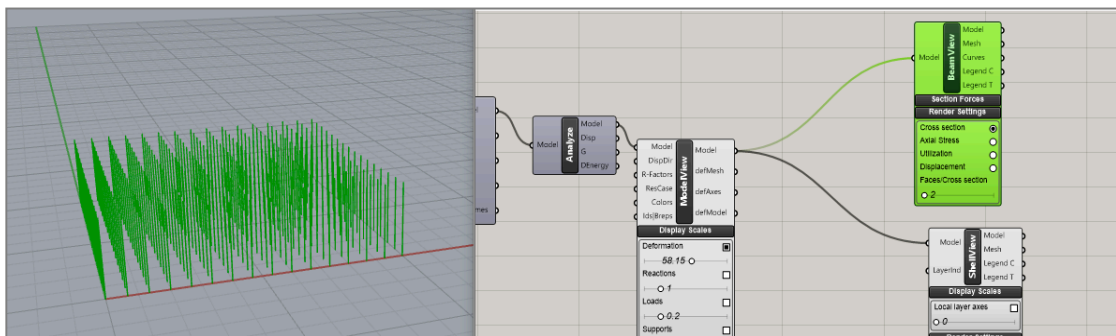


Figura 12. Extraída de Rhinoceros.

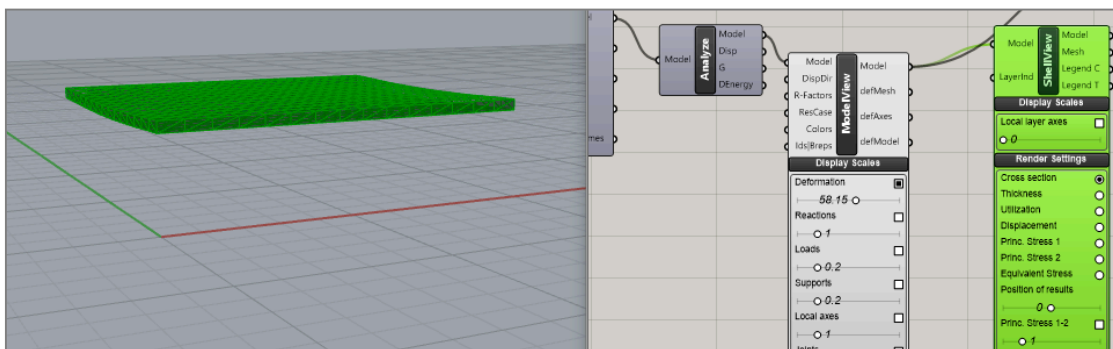


Figura 13. Extraída de Rhinoceros.

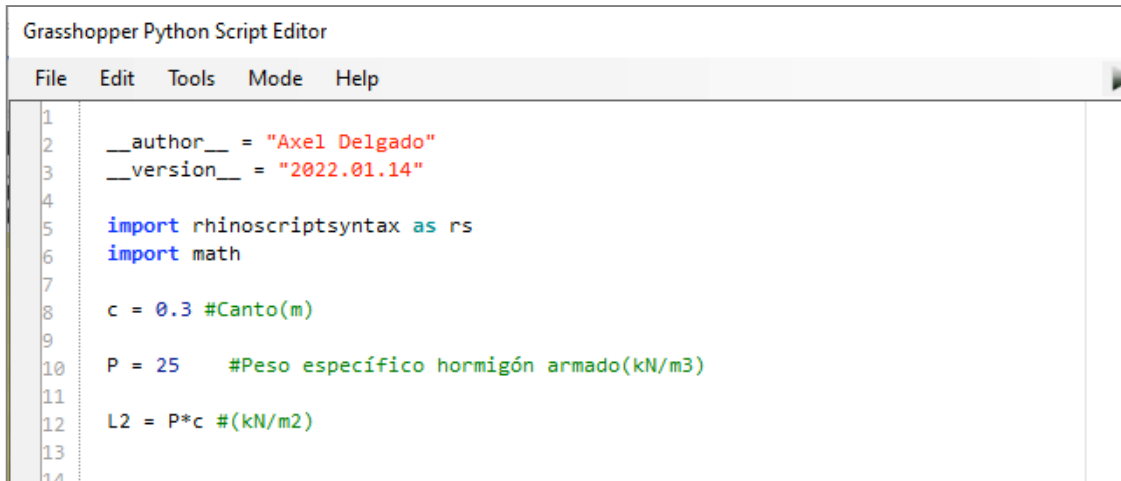
3.3 PYTHON SCRIPT

En este capítulo, veremos las funciones de la herramienta de “Python Script” en nuestro diseño paramétrico. Cabe explicar que este nodo puede declarar variables desde el propio código, o bien, como input desde Grasshopper.

Se han importado dos librerías de Python necesarias para este código, las cuales son: “rhinoscriptsyntax”, necesaria para las sintaxis entre elementos de Rhinoceros; y “math” para poder hacer uso de ciertas funciones matemáticas.

Nuestros inputs para Python son: los parámetros de diseño “x” e “y”; “points” como el conjunto de puntos generados por la malla; “apoyos” como el mismo conjunto de puntos generados por la malla, pero declarado con otro nombre para poder operar con ellos de manera diferente; “m” como el número de filas; “n” como el número de columnas y “r” que es una variable que nos será de utilidad para definir la secuencia de desapuntalamiento.

Las variables definidas dentro de Python, nos servirán básicamente para definir la carga uniformemente distribuida en la superficie del forjado. De aquí obtendremos el output “L2”, que corresponde con el valor de la carga en kN/m^2 , tal y como podemos ver en la *figura 14*.



```
Grasshopper Python Script Editor
File Edit Tools Mode Help
1
2 __author__ = "Axel Delgado"
3 __version__ = "2022.01.14"
4
5 import rhinoscriptsyntax as rs
6 import math
7
8 c = 0.3 #Canto(m)
9
10 P = 25 #Peso específico hormigón armado(kN/m3)
11
12 L2 = P*c #(kN/m2)
13
14
```

Figura 14. Extraída de Grasshopper.

Las siguientes líneas de código, nos sirven para definir los apoyos del forjado. En nuestro caso, se ha escogido que solo los lados del cuadrilátero paralelos al “eje x” estén empotrados y los dos otros lados libres. La razón detrás de esto, es conseguir que la estructura esté en equilibrio una vez se hayan quitado parte de los puntales, básicamente, como todos sabemos, un forjado no se mantiene levitando por arte de magia.

Como podemos ver en la *figura 15*, de nuestro input de puntos “apoyos”, extraemos su número de puntos con la función “len()” y la declaramos como la variable “l”. Esto nos permite crear dos subconjuntos del conjunto “apoyos”, “apoyos_1” y “apoyos_2” cuya unión es el conjunto que nos interesa.

```
14
15     l = len(apoyos)
16
17     apoyos_1 = apoyos[0:l:m]
18
19     apoyos_2 = apoyos[m-1:l:m]
20
21     apoyos_final = apoyos_1 + apoyos_2
22
```

Figura 15. Extraída de Grasshoper.

El subconjunto “apoyos_1” es el conjunto de todos los puntos formados desde el primer elemento, cuyo índice en programación es típicamente 0, hasta llegar a “l”, con un paso de longitud “m”, nuestro número de filas. Podemos ver este subconjunto en la *figura 16*.

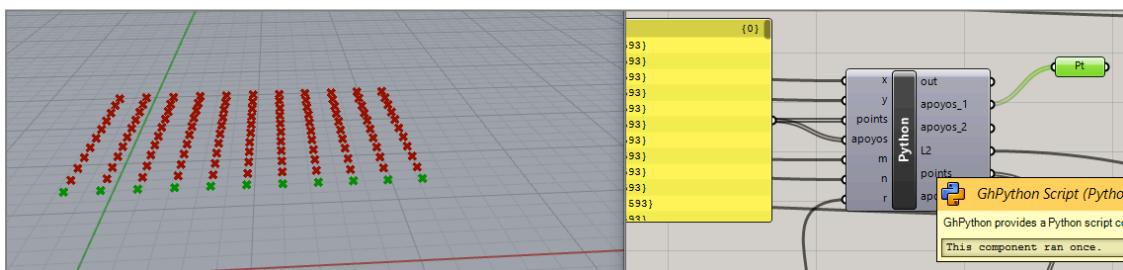


Figura 16. Extraída de Rhinoceros.

Del mismo modo, el subconjunto “apoyos_2”, es el conjunto de todos los puntos formados partiendo del elemento “m-1” hasta “l”, con un paso “m”. Podemos ver dicho subconjunto en la *figura 17*.

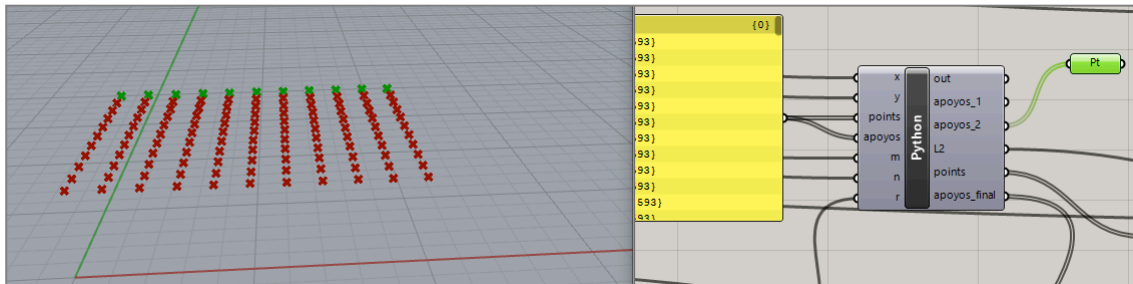


Figura 17. Extraída de Rhinoceros.

De esta manera, con la unión de estos dos conjuntos, obtenemos nuestro conjunto “apoyos_final” como la unión de estos, tal y como podemos ver en la *figura 18*.

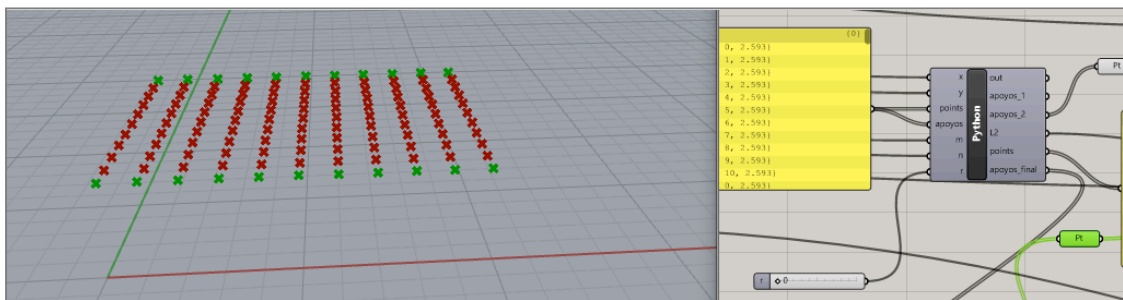


Figura 18. Extraída de Rhinoceros.

4. SECUENCIAS DE DESAPUNTALAMIENTO

Las siguientes líneas del código están dedicadas plenamente a los algoritmos necesarios para generar las secuencias de apuntalamiento.

Se plantean 2 patrones distintos, uno simétricos y otro antisimétricos. Así cabe esperar que la respuesta de nuestra estructura sea simétrica o antisimétrica. Se han elegido dos secuencias de desapuntalamiento que se originen desde las columnas exteriores

La idea central es entender el comportamiento de nuestra estructura frente a los distintos patrones y encontrar la secuencia de desapuntalamiento que menos deforme el forjado y, por ende, la más segura.

La variable “r”, anteriormente mencionada en el capítulo 3.3 *Python script*, resultará especialmente útil a la hora de definir las secuencias de desapuntalamiento. Así pues, podemos ver en la figura 19, el código de Python que nos define la primera secuencia.

```
28  
29  
30     points = points[r:-r] # secuencia 1  
31  
32  
33
```

Figura 19. Extraída de Grasshoper.

Esta función pretende definir los índices de los elementos que forman el conjunto de puntos, en función de la variable “r”, de modo que, por ejemplo, para $r = 2$, hemos eliminado los dos primeros elementos y los dos últimos elementos de nuestro conjunto, con lo cual, esta sería una secuencia antisimétrica.

Podemos ver en la figura 20, nuestro conjunto de puntos para $r = 2$, con “m” y “n” igual a 4. A medida que “r” incrementa, se van eliminando los puntos siguiendo el mismo patrón.

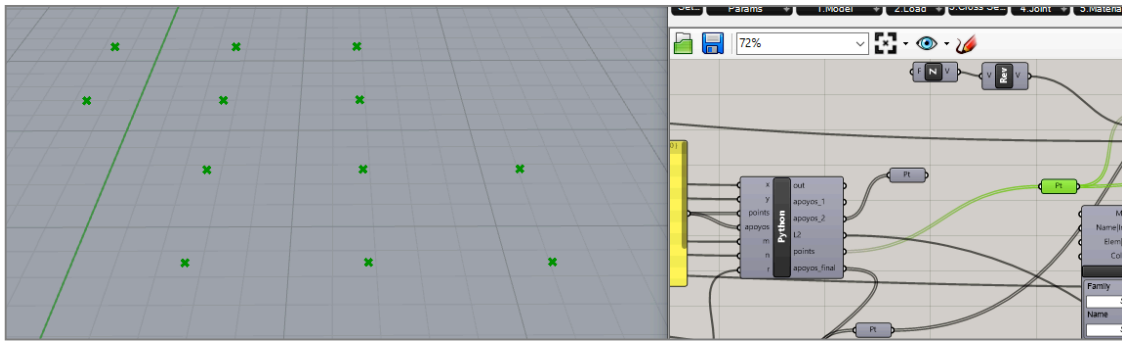


Figura 20. Extraída de Rhinoceros.

La segunda secuencia, es la versión simétrica de la primera. Así pues, esta secuencia consiste en ir extrayendo puntos del conjunto de columnas opuestas, siempre de abajo a arriba, es decir, en el sentido positivo del “eje y”. Es por esto mismo, que la programación de esta secuencia depende de la paridad del número de columnas.

Como podemos ver en la figura 21, el código es esta vez un poco más complejo. Este, consiste en un “bucle for”, donde hay un salto en la iteración si no se cumple ninguna de las siguientes condiciones: que el número de puntos en el conjunto “points” sea mayor a “m”; o bien, que “n” sea impar.

De cumplirse alguna de las dos, la iteración elimina el primer elemento de nuestro conjunto, que es el primer elemento de la primera columna, y elimina el primer elemento de la última columna.

```
for i in range(r):
    ....if len(points) > m or n % 2 == 0: #secuencia 2
    .....del points[0]
    .....del points[-((m-i-1)%m +1)]
    ....else:
    .....del points[0]
    .....del points[0]
```

Figura 21. Extraída de Grasshoper.

De no cumplirse, quiere decir que o bien nos quedan un número de columnas impares, o bien nuestro número de elementos es menor a “m”. En este caso, se eliminarán dos puntos siguiendo el mismo orden, de abajo a arriba.

En la figura 22, podemos ver el caso en el que “m” y “n” son igual a 4 y “r” es igual a 2.

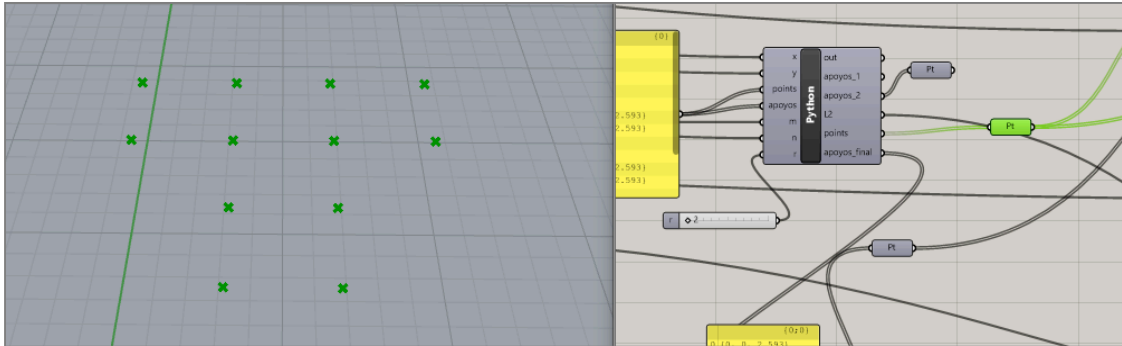


Figura 22. Extraída de Rhinoceros.

Podemos ver en la figura 23 un caso en el que “n” es impar, igual a “m” e igual a 7 y “r” es igual a 2.

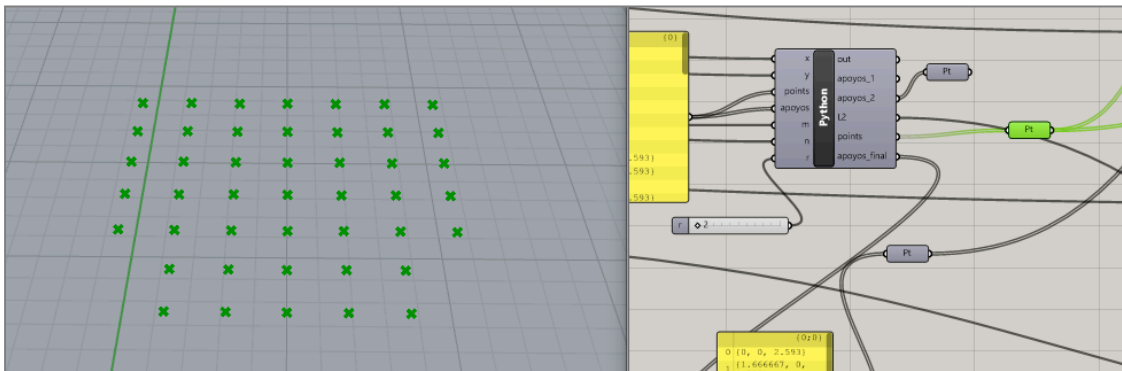


Figura 23. Extraída de Rhinoceros.

En la figura 24, podemos ver el mismo caso, pero con $r = 22$, en donde ya se han extraído 44 puntos y tan solo quedan 5 restantes y solo queda una columna central.

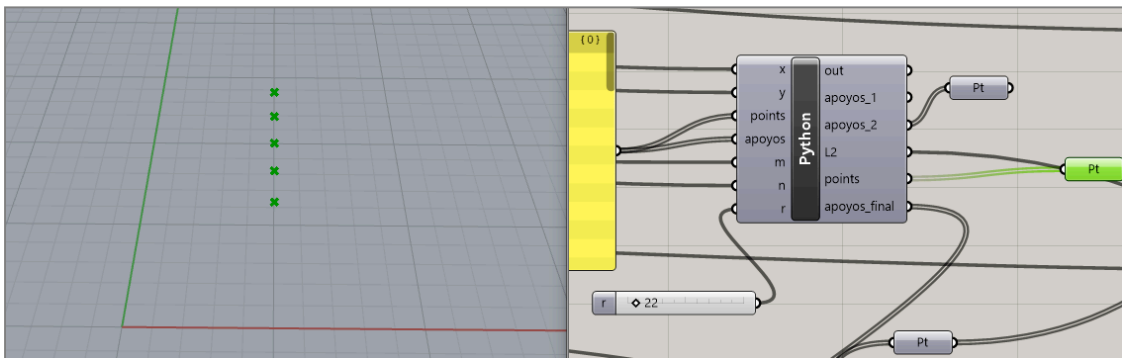


Figura 24. Extraída de Rhinoceros.

5. RESULTADOS

Primeramente, decir, que se ha basado la extracción de los resultados, en la combinatoria de cada parámetro que al modificarse de un resultado singular que nos pueda ser de interés, es decir, como por ejemplo nuestro forjado cuando tiene forma cuadrada, o cuando la tiene rectangular; ver las diferencias entre distintas dimensiones de nuestros parámetros geométricos estructurales, frente a las diferentes secuencias de desapuntalamiento.

Para poder comparar resultados entre simulaciones con distintos parámetros, tenemos que tener en cuenta que parámetros no hemos podido modificar con el fin de obtener resultados bajo las mismas condiciones. Así pues, el canto de la sección transversal del forjado es uno de estos parámetros fijos, ya que, al intentar parametrizarlo de manera automática en los cálculos, resultaba en procesos iterativos en los que Grasshopper no computa, al menos hasta donde yo conozco.

Otro parámetro que se ha mantenido constante, aunque por otras razones, es la sección transversal de los puntales, o su diámetro. Simplemente, resultaba más práctico hacer una comparativa de distintos escenarios manteniendo el diámetro de los puntales constante, aunque es posible ver como varía el comportamiento de la estructura en función de este.

Cabe destacar, que el forjado que se simula en Grasshopper/Karamba3D, en este caso de hormigón armado, es un forjado obviamente ideal y que tiene su resistencia característica del hormigón. Así pues, este tiene una deformación que depende de la distancia entre sus apoyos y una deformación base, la cual se verá reducida por cada puntal que coloquemos.

También cabe destacar, que para que las deformaciones de los modelos fueran perceptibles, se ha aplicado un factor de escala de 50 en todos los casos, a efectos visuales.

Para comparar cada caso de manera objetiva, se ha utilizado la media del descenso en cada nodo o punto que definen el forjado, así que todos los

casos comparados deben tener el mismo número de nodos para asegurar que cuentan con la misma precisión, y que los resultados no se verán afectados por el número de puntos que tomamos.

Para calcular la media de los descensos en cada nodo, se ha conectado el output “Modelo” del nodo “Beam View” a la herramienta “Nodal Displacements”. De esta, se ha extraído la coordenada “z”, que nos muestra los desplazamientos de cada nodo, usando la herramienta “Deconstruct”, que nos permite separar en listas distintas las coordenadas que nos interesen. En la *figura 25* se puede apreciar todo este proceso.

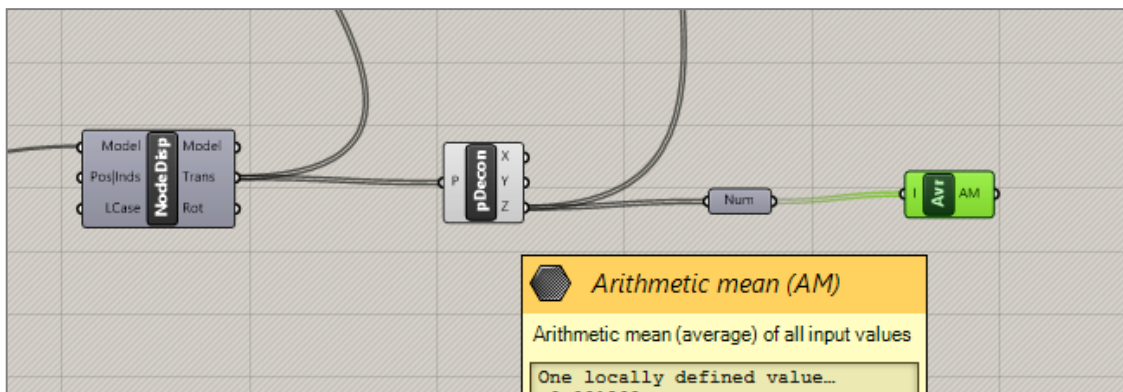


Figura 25. Extraída de Rhinoceros.

Seguidamente se ha convertido la lista de números en “number data type” usando el contenedor “Number” con la opción “Set Multiple Numbers”, ya que por defecto el data type es un “string”, es decir, lo detecta como texto, y se ha conectado seguidamente a la herramienta “Average” para calcular la media.

Así pues, siguiendo indicaciones de la normativa, de tener los puntales separados 1,5 m como máximo, estaremos siempre en el rango de un puntal cada metro. Entonces, “m” tiene que ser mayor que “y” dividido entre 1.5, del mismo modo “n” tiene que ser mayor que “x” dividido entre 1.5.

Se mostrarán seguidamente los diagramas de colores, en función del desplazamiento nodal. Y finalmente, el desplazamiento medio de todos los nodos, como valor numérico.

Para comparar los resultados con la deformación base de cada caso, se mostrará primero un caso base sin puntales, y después se mostrarán 3 pasos intermedios antes de llegar al estado sin puntales.

Finalmente, para los casos en los que el forjado este simplemente apoyado, se ha fijado la rotación en el “eje z” de cada apoyo, para garantizar así que estamos en un problema estático, de otra manera habría nodos que se moverían libremente causando deformaciones.

Dicho esto, los resultados han sido organizados por la permutación de los distintos casos dada cada secuencia.

5.1. SECUENCIA 1

5.1.1. FORJADO CUADRADO SIMPLEMENTE APOYADO

Se ha escogido $m = n = 7$ para $x = y = 10$ m.

Caso sin puntales

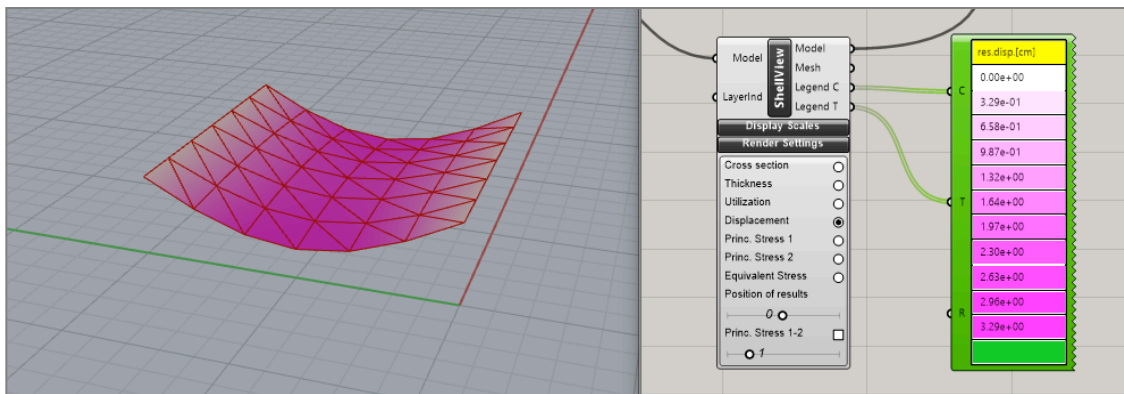


Figura 26. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -15,5 mm.

Caso r = 0

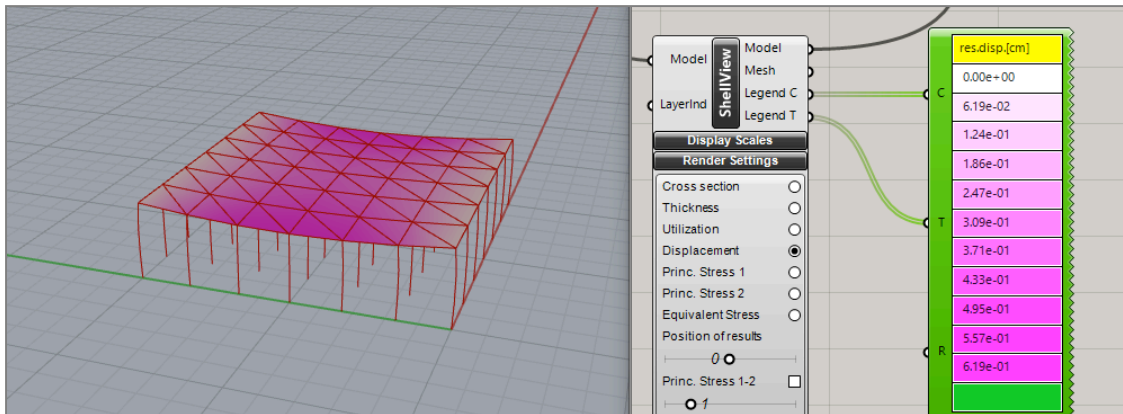


Figura 27. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,9 mm.

Caso r = 10

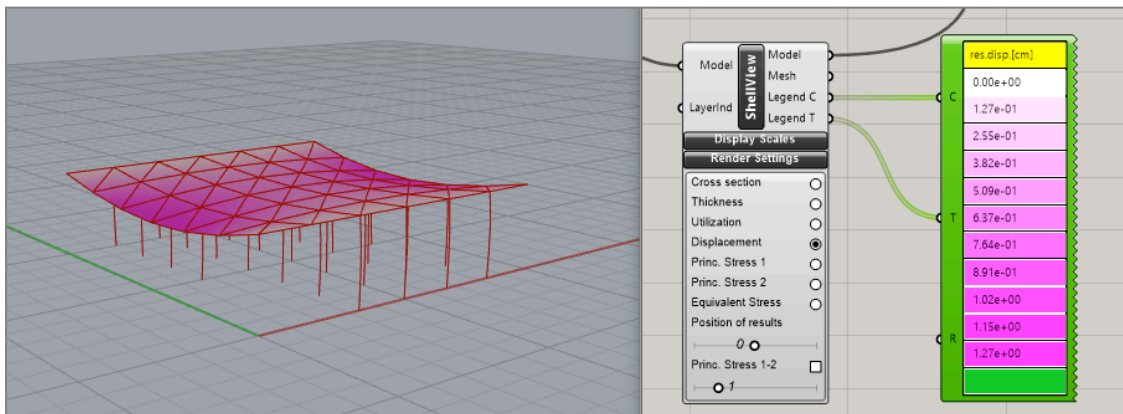


Figura 28. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,9 mm.

Caso r = 20:

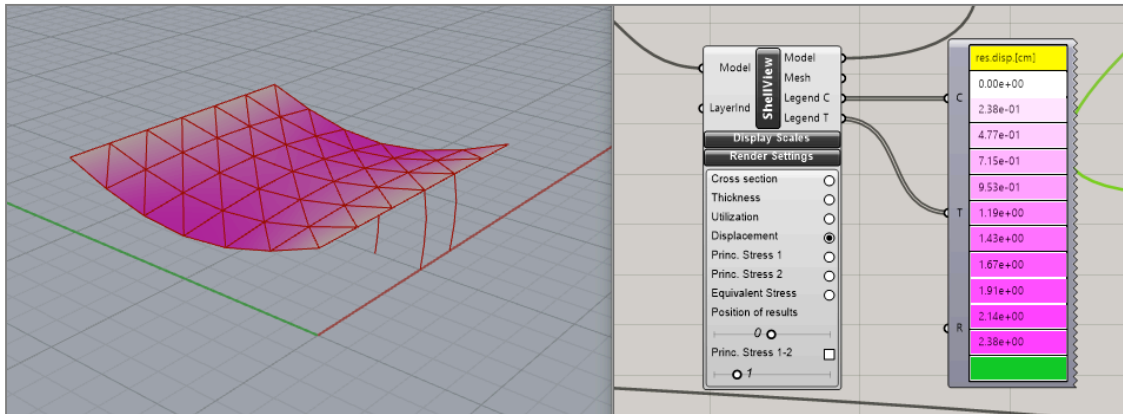


Figura 29. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -8,6 mm.

5.1.2. FORJADO CUADRADO CON APOYOS EMPOTRADOS

Se ha escogido $m = n = 7$, para $x = y = 10$ m

Caso sin puntales

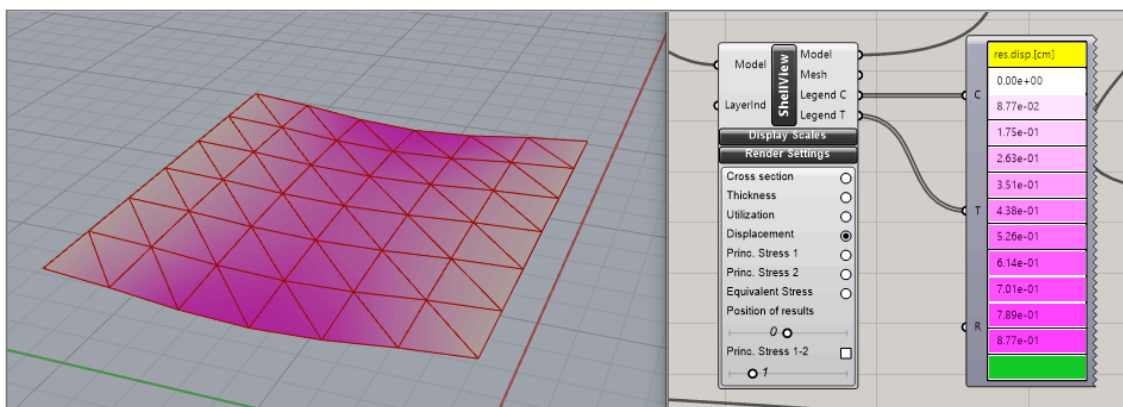


Figura 30. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,8 mm.

Caso r = 0

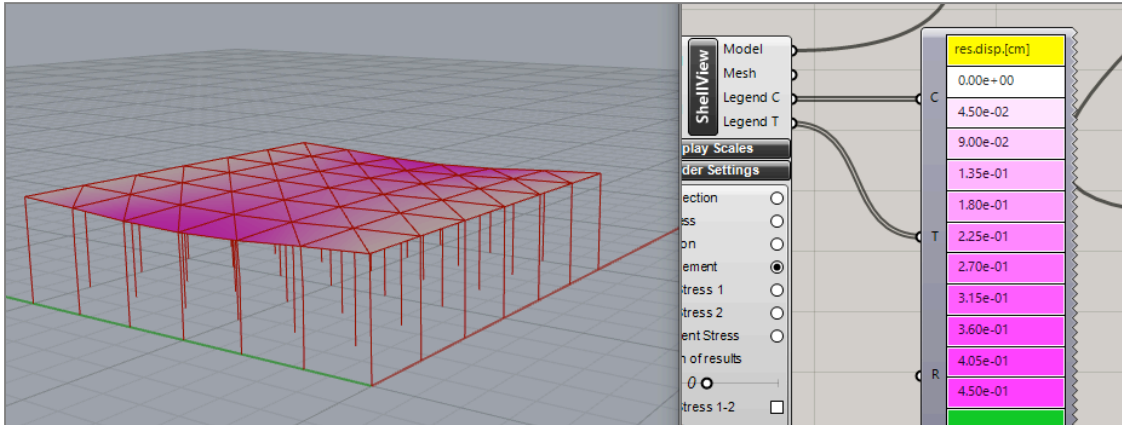


Figura 31. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,6 mm.

Caso r = 10

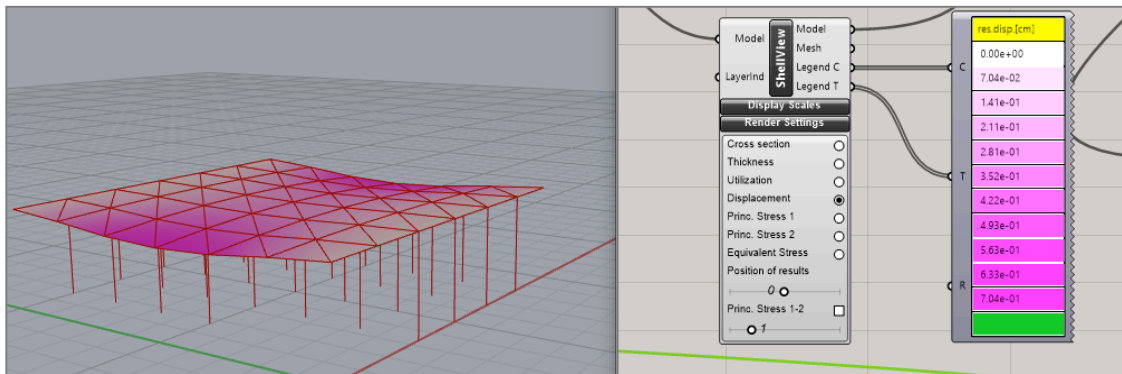


Figura 32. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -1,2 mm.

Caso r = 20

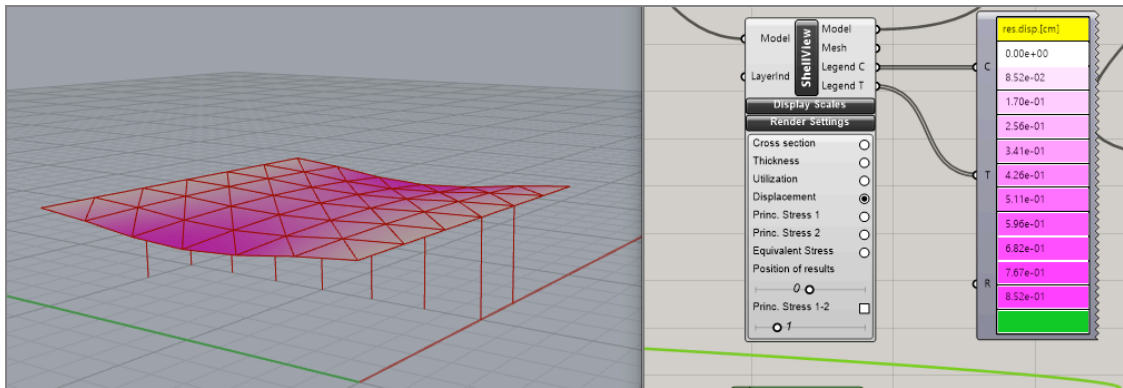


Figura 33. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,2 mm.

5.1.3. FORJADO RECTANGULAR SIMPLEMENTE APOYADO

Se ha escogido $x = 12$, $y = 7$, con $m = 5$ y $n = 8$.

Caso sin puntales

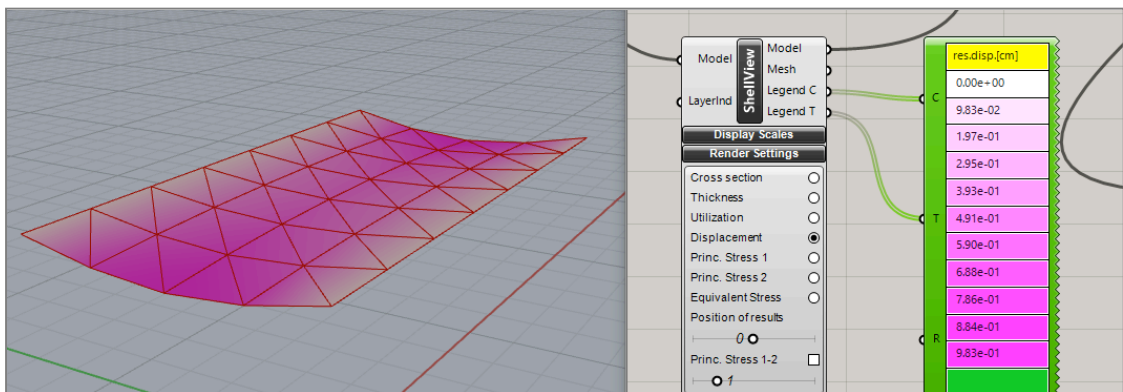


Figura 34. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -3,4 mm.

Caso r = 0

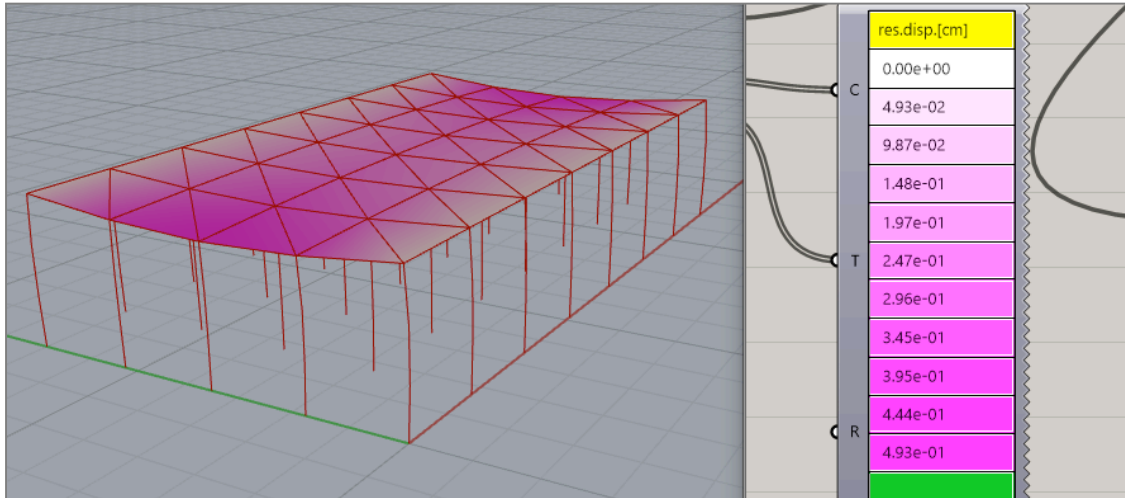


Figura 35. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,8 mm.

Caso r = 10

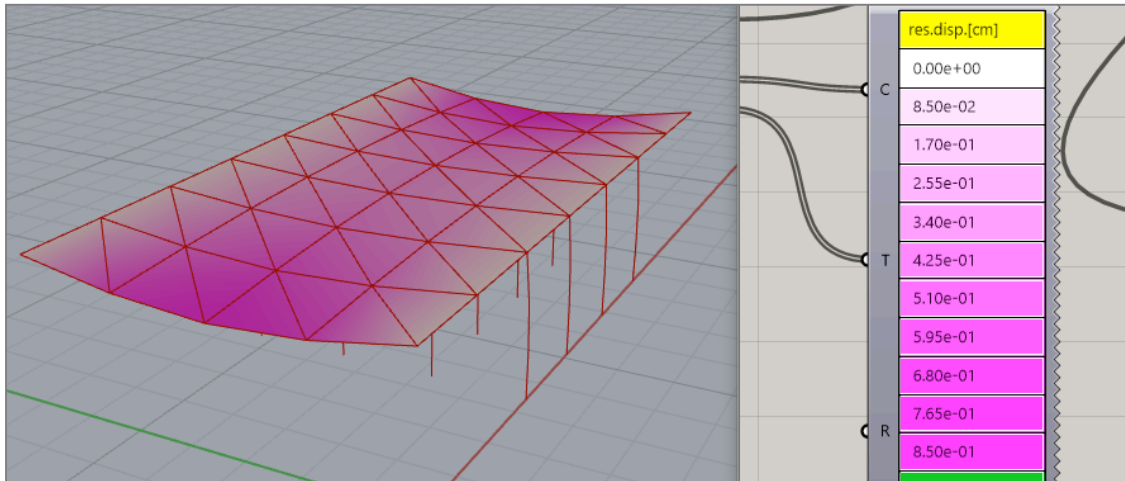


Figura 36. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -1,7 mm

Caso r = 17

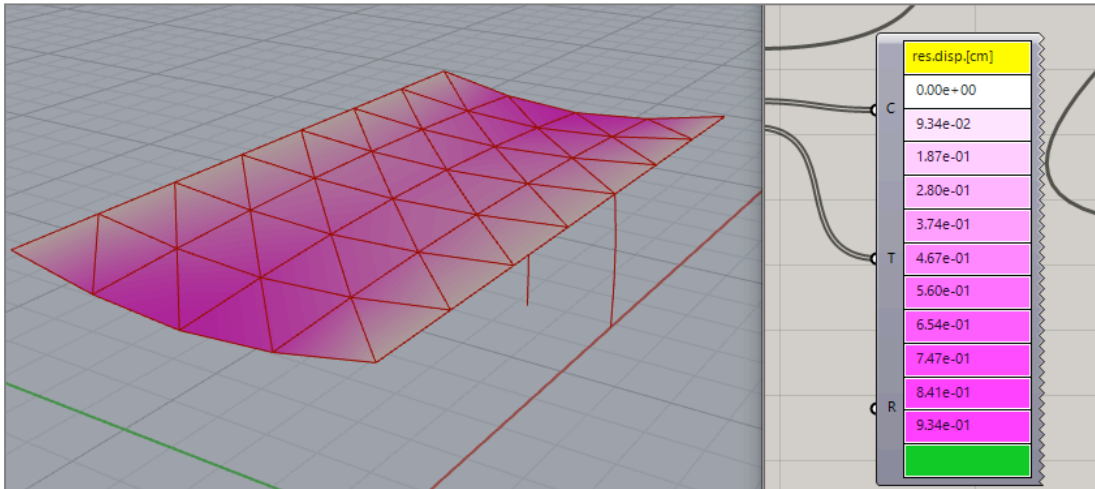


Figura 37. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,6 mm.

5.1.4. FORJADO RECTANGULAR CON APOYOS EMPOTRADOS

Igual que en el caso anterior: Se ha escogido $x = 12$, $y = 7$, con $m = 5$ y $n = 8$

Caso sin puntales

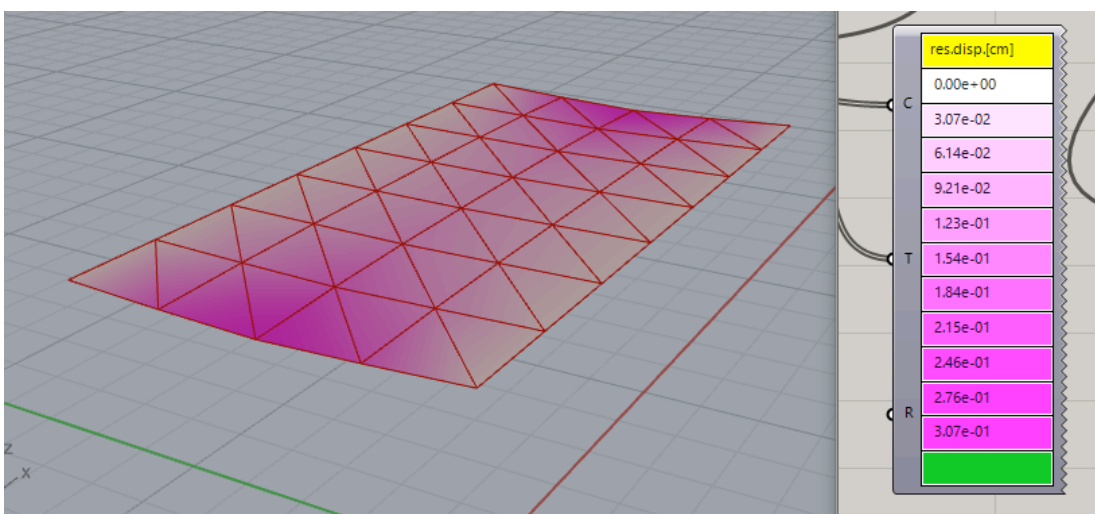


Figura 38. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,7 mm.

Caso r = 0

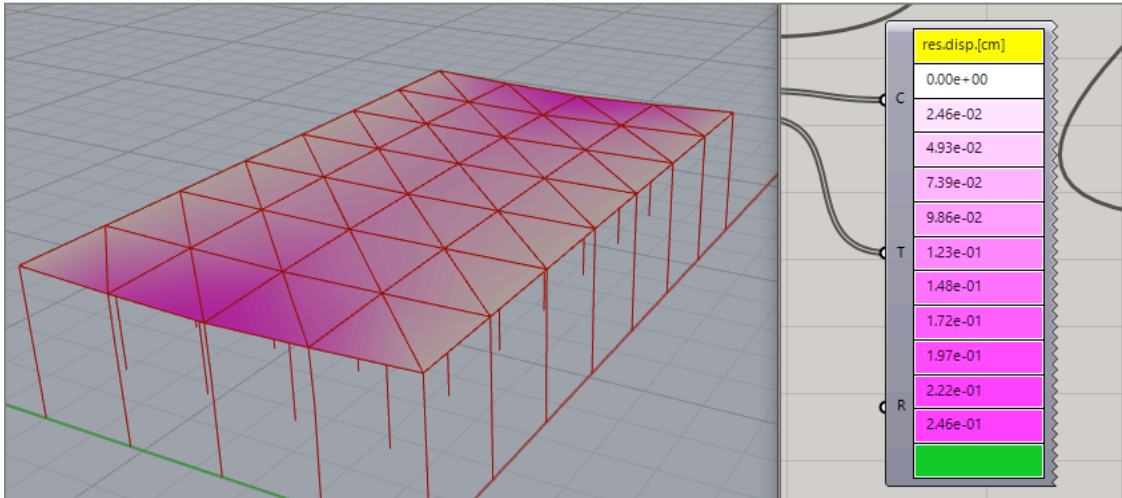


Figura 39. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,3 mm.

Caso r = 10

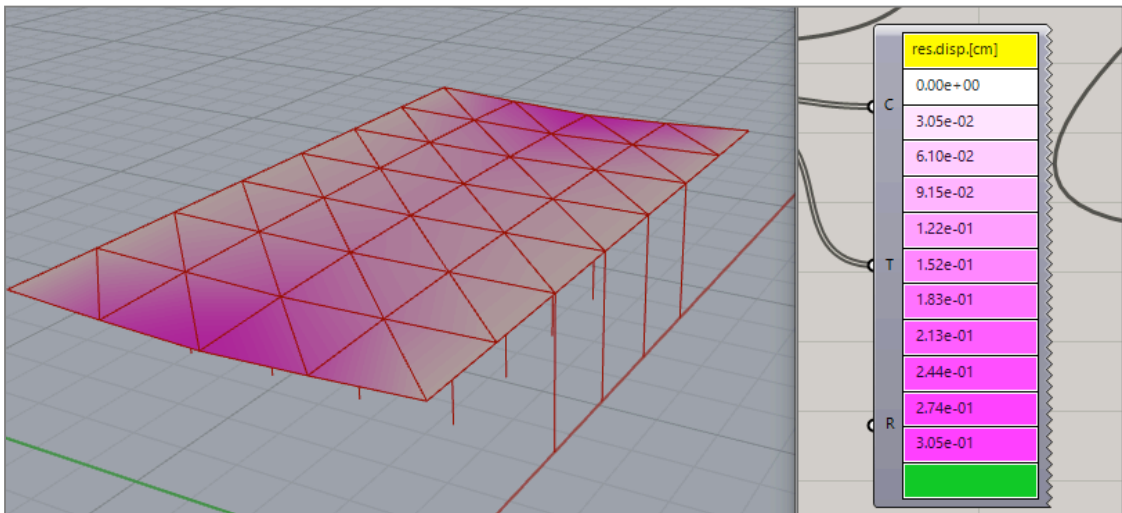


Figura 40. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,4 mm.

Caso r = 17

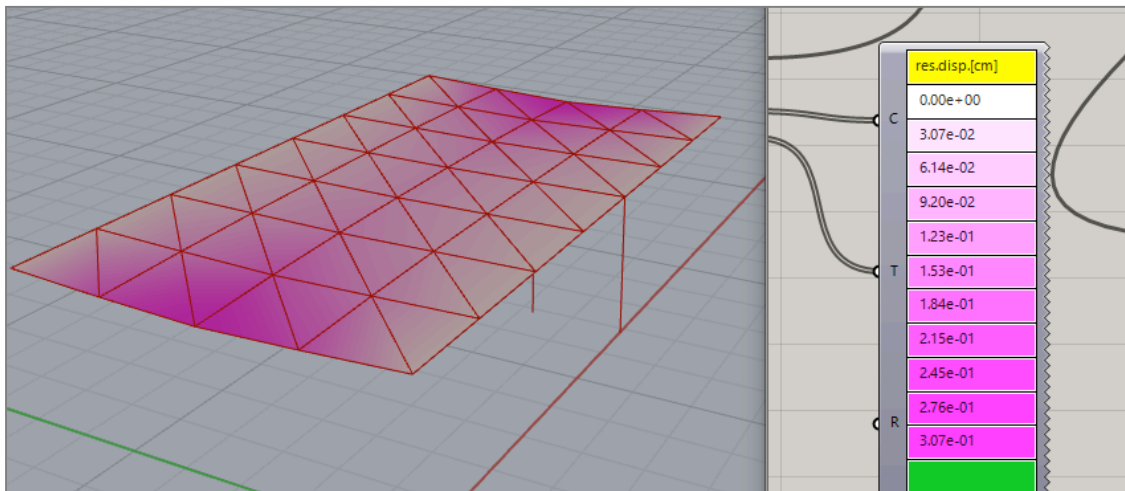


Figura 41. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,6 mm.

5.2. SECUENCIA 2

5.2.1. FORJADO CUADRADO SIMPLEMENTE APOYADO

Se ha escogido $m = n = 7$ para $x = y = 10$ m.

Caso $r = 0$

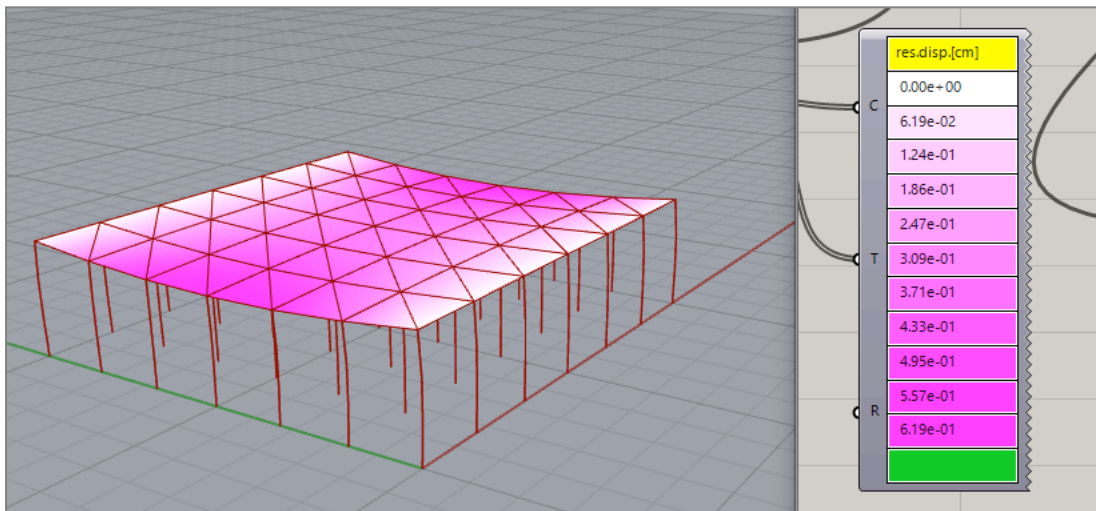


Figura 42. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -1,2 mm

Caso $r = 10$

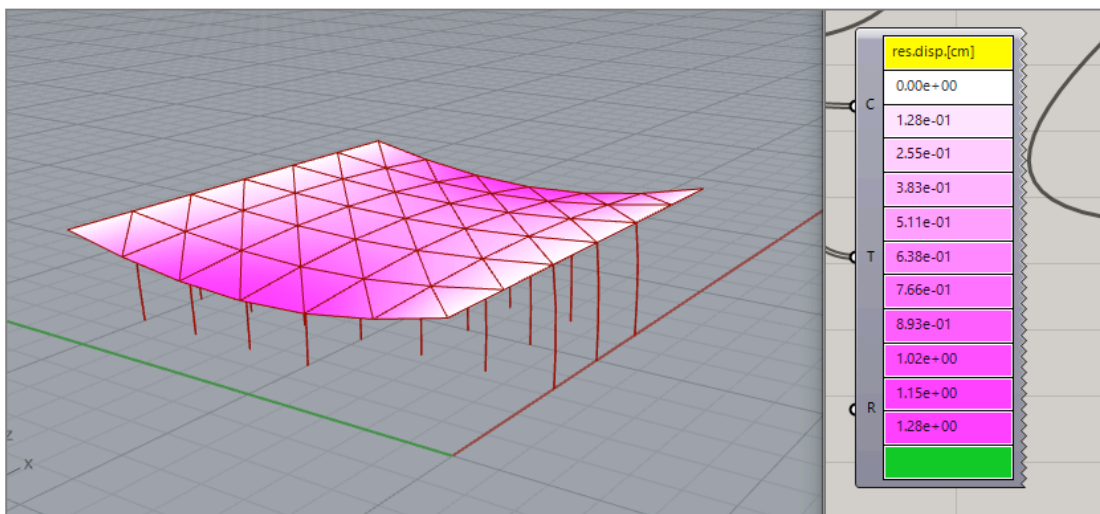


Figura 43. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,9 mm.

Caso $r = 20$

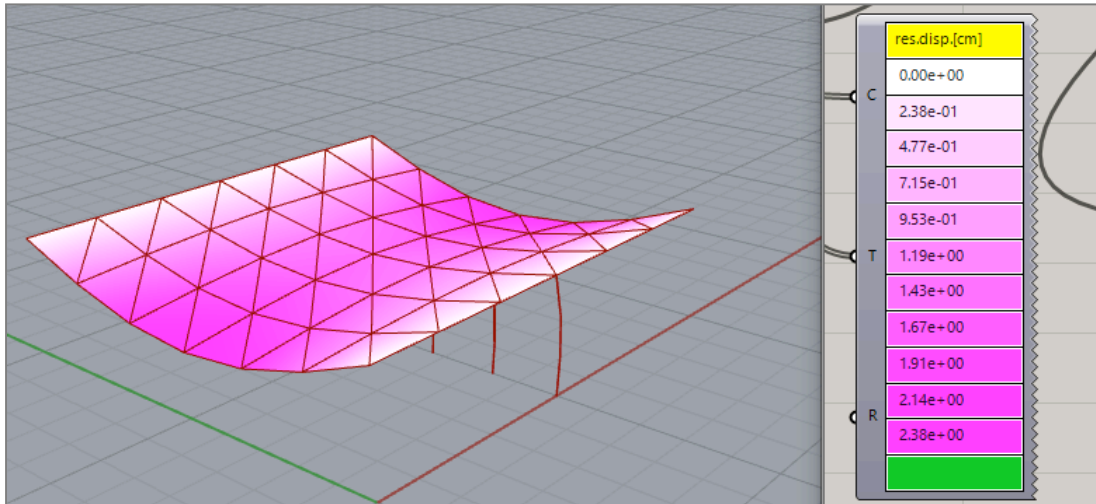


Figura 44. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -8,5 mm

5.2.2. FORJADO CUADRADO CON APOYOS EMPOTRADOS

Como en el caso anterior, $m = n = 7$ para $x = y = 10$ m

Caso $r = 0$

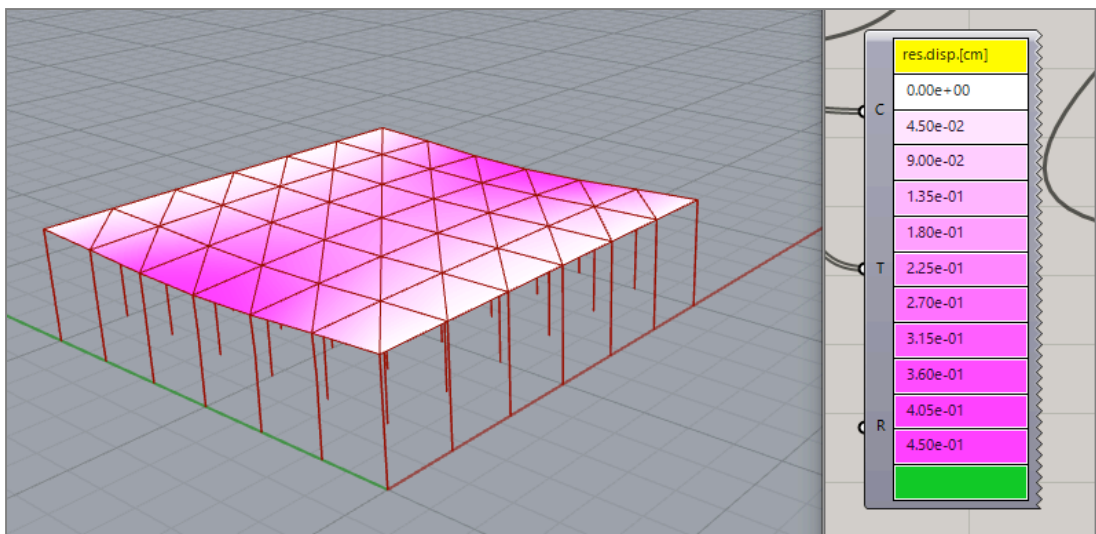


Figura 45. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,7 mm.

Caso r = 10

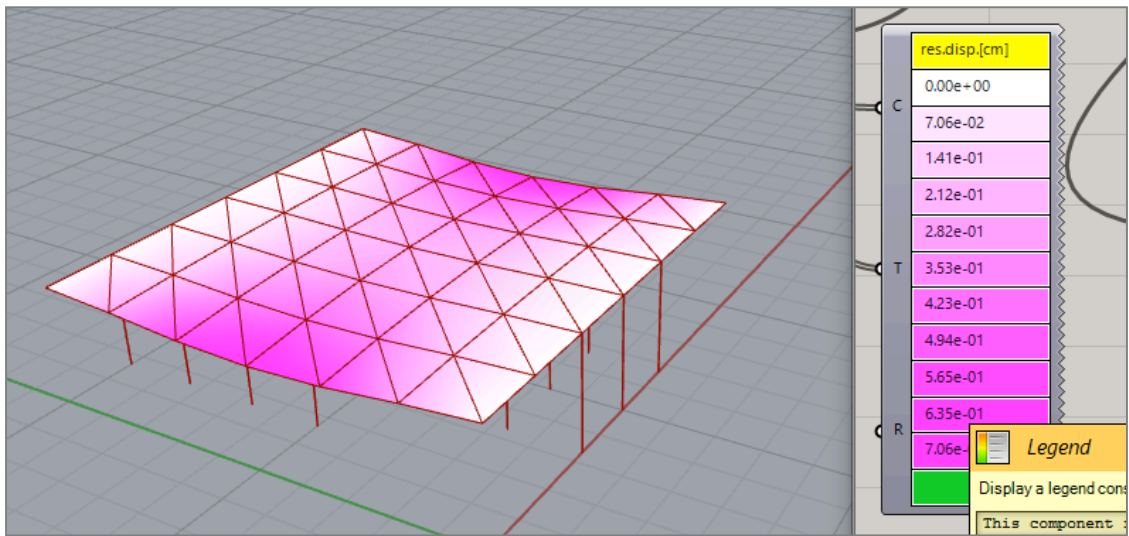


Figura 46. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -1,3 mm.

Caso r = 20

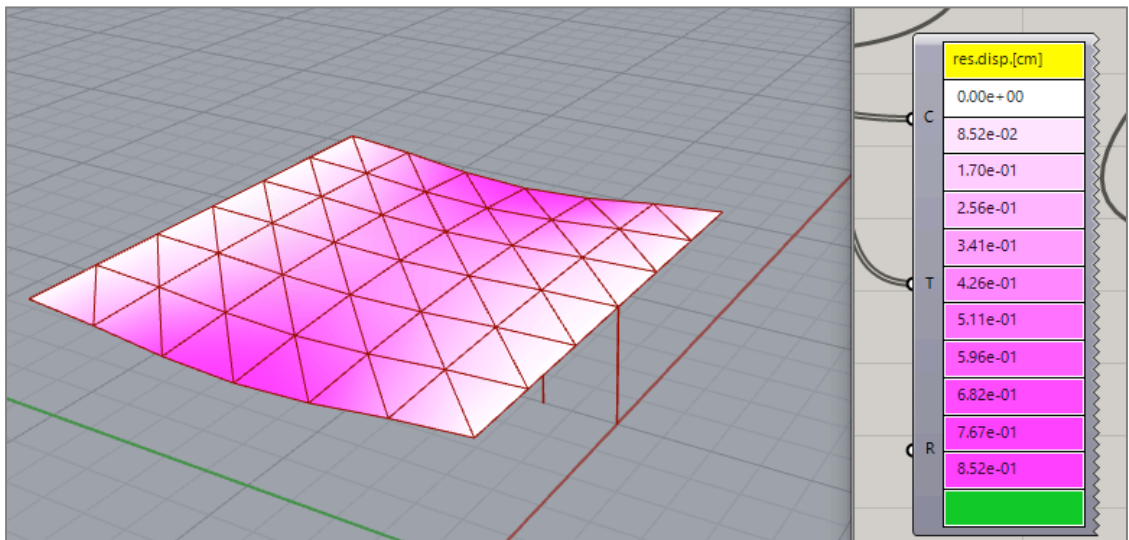


Figura 47. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,2 mm.

5.2.3. FORJADO RECTANGULAR SIMPLEMENTE APOYADO

Se ha escogido $x = 12$, $y = 7$, con $m = 5$ y $n = 8$.

Caso $r = 10$

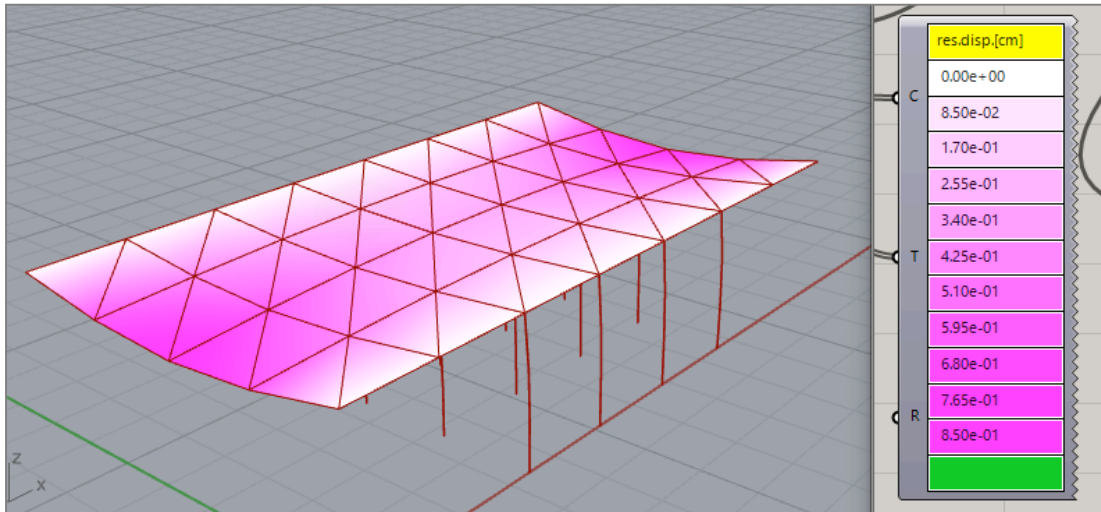


Figura 48. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -1,7 mm.

Caso $r = 17$

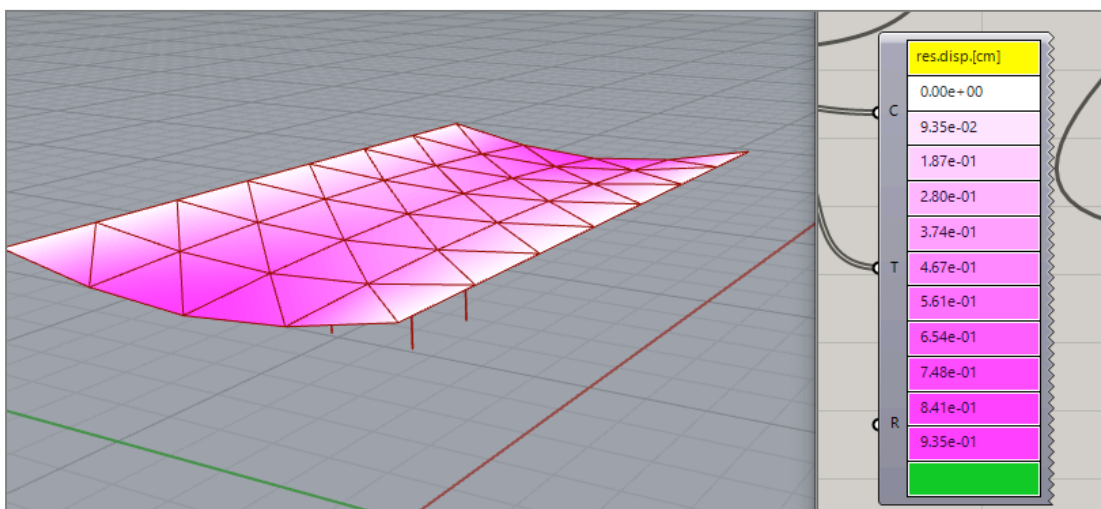


Figura 49. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -2,6 mm.

5.2.4. FORJADO RECTANGULAR CON APOYOS EMPOTRADOS

Como en el caso anterior, $x = 12$, $y = 7$, con $m = 5$ y $n = 8$.

Caso $r = 10$

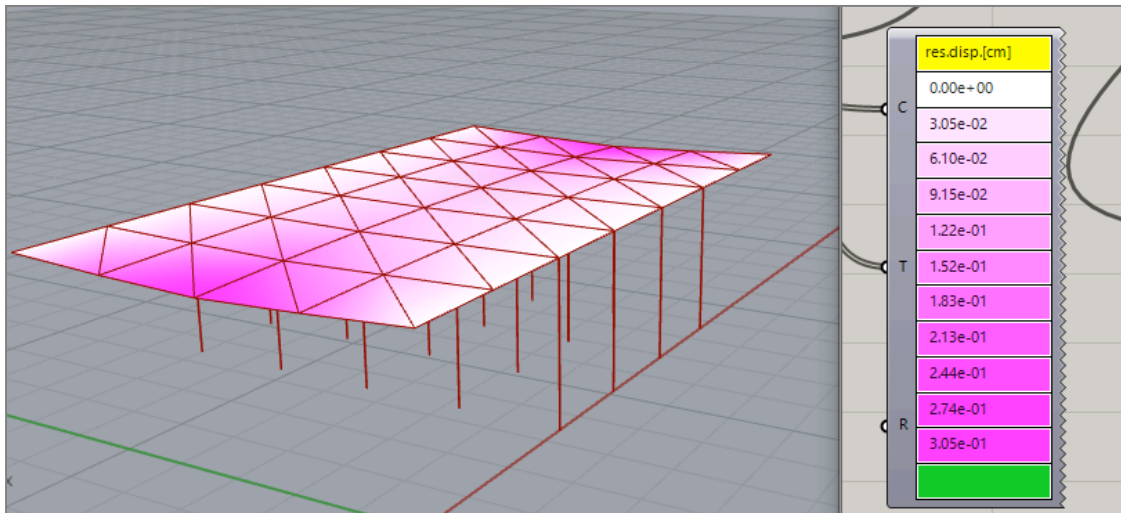


Figura 50. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,4 mm.

Caso $r = 17$

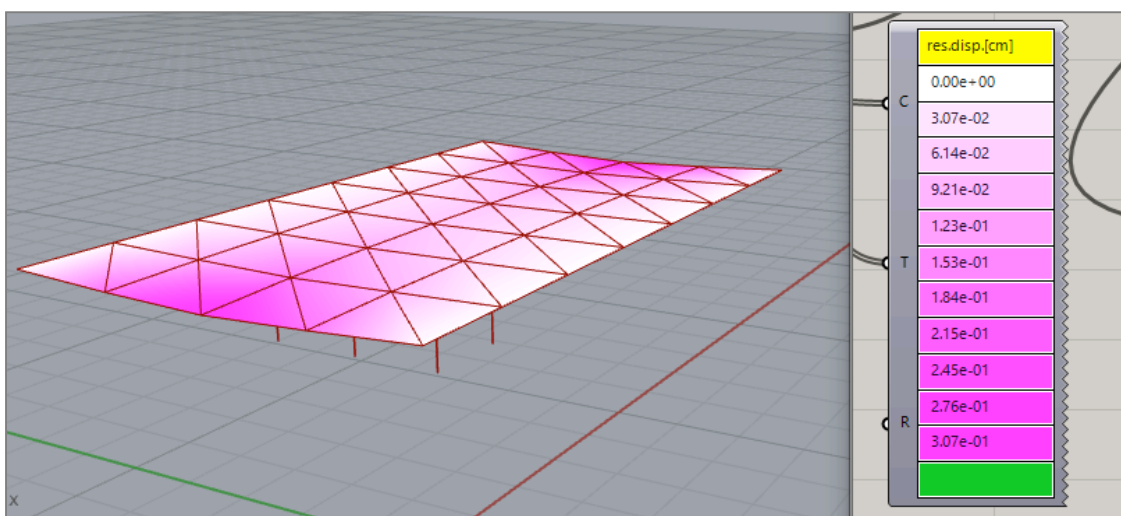


Figura 51. Diagrama de colores del desplazamiento nodal. Extraída de Rhinoceros.

El desplazamiento nodal medio es de -0,6 mm.

6. CONCLUSIONES

Tras estos meses de trabajo utilizando Grasshopper como herramienta de diseño paramétrico, me he dado cuenta que no solo es un recurso útil, versátil y práctico para el diseño, sino que también te ayuda a entender las relaciones entre distintos parámetros de una manera mucho más profunda.

La mayor dificultad para la ejecución de este trabajo, ha sido la barrera de aprendizaje que tienes tan grande, en los inicios de empezar con el diseño paramétrico, pero que una vez superada, se te abren muchas más vías con las que poder crear algo conceptual, teniendo cierta base teórica. Una vez entiendes claramente como se relacionan tus parámetros de diseño, puedes hacer verdaderas virguerías.

En cuanto a los datos obtenidos con las dos secuencias de desapuntalamiento, primero vamos a comparar dichos datos en los casos que hemos mantenido todos los parámetros iguales, pero sí hemos variado las condiciones en los apoyos.

Primeramente, vamos a ver la comparativa entre el forjado cuadrado simplemente apoyado y su análogo empotrado, en función del crecimiento de “r” para la secuencia 1. Tal y como podemos ver en la gráfica de la *figura 52*.

Cabe decir, que tal y como hemos definido “r” en nuestro código, para valores de “r” mayores a la mitad del número de puntales, todos nuestros puntales han sido eliminados por el algoritmo, así pues, estaríamos ante el caso sin puntales.

Como bien podemos observar en la gráfica (figura 52), el descenso nodal medio, incrementa en módulo a medida que lo hace “r”, hasta llegar al caso sin puntales. Parece tener un comportamiento lineal. Y podemos ver la coherencia entre los distintos casos, puesto que el caso con empotramientos permite muchas menos deformaciones, de ahí que la curva del caso empotrado tengo mucha menos pendiente.

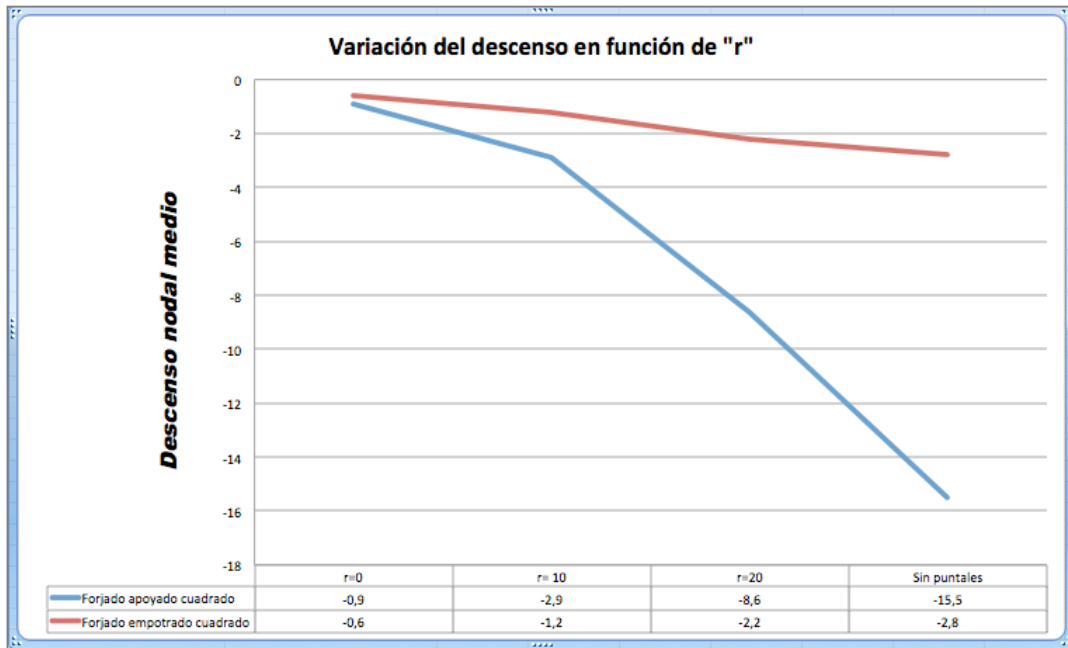


Figura 52. Secuencia 1.

Como podemos ver en la *figura 53*, del mismo modo pasa en los casos en los que “x” es distinto de “y”. Siguiendo un comportamiento lineal, el módulo del descenso nodal medio aumenta a medida que lo hace “r”. Y como esperábamos, la pendiente del caso empotrado es mucho menos pronunciada comparada con el caso de apoyos simples.

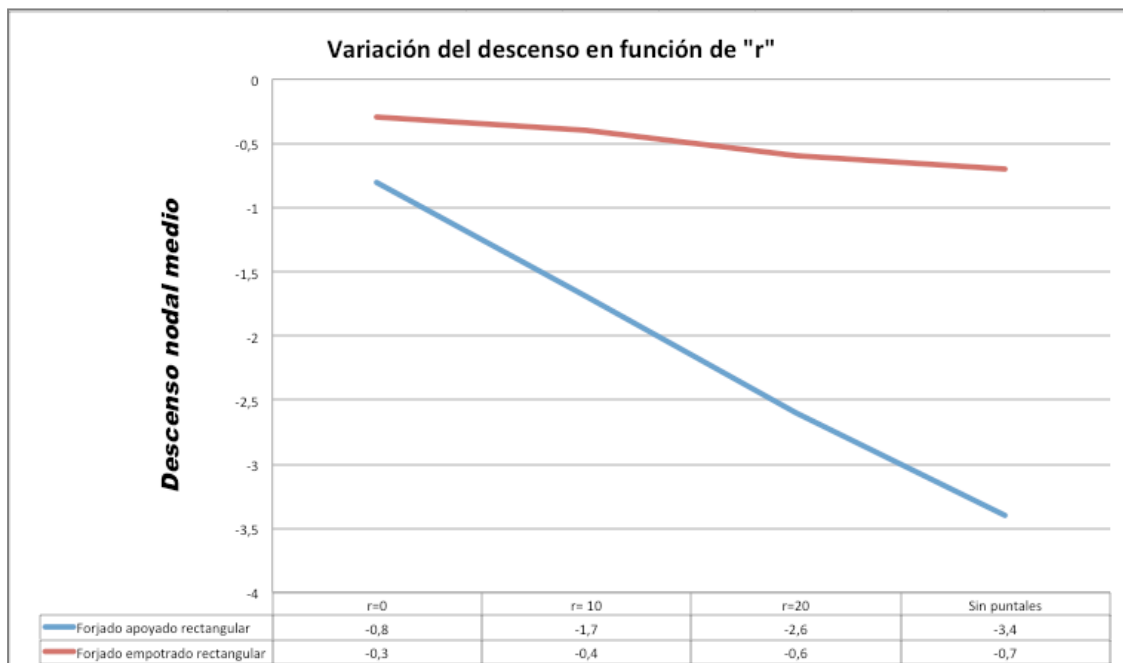


Figura 53. Secuencia 1.

A continuación, veremos las mismas comparativas, pero esta vez para la secuencia 2. Primeramente, veremos la comparativa entre el forjado simplemente apoyado cuadrado y el forjado con apoyos empotrados, tal y como podemos ver en la *figura 54*.

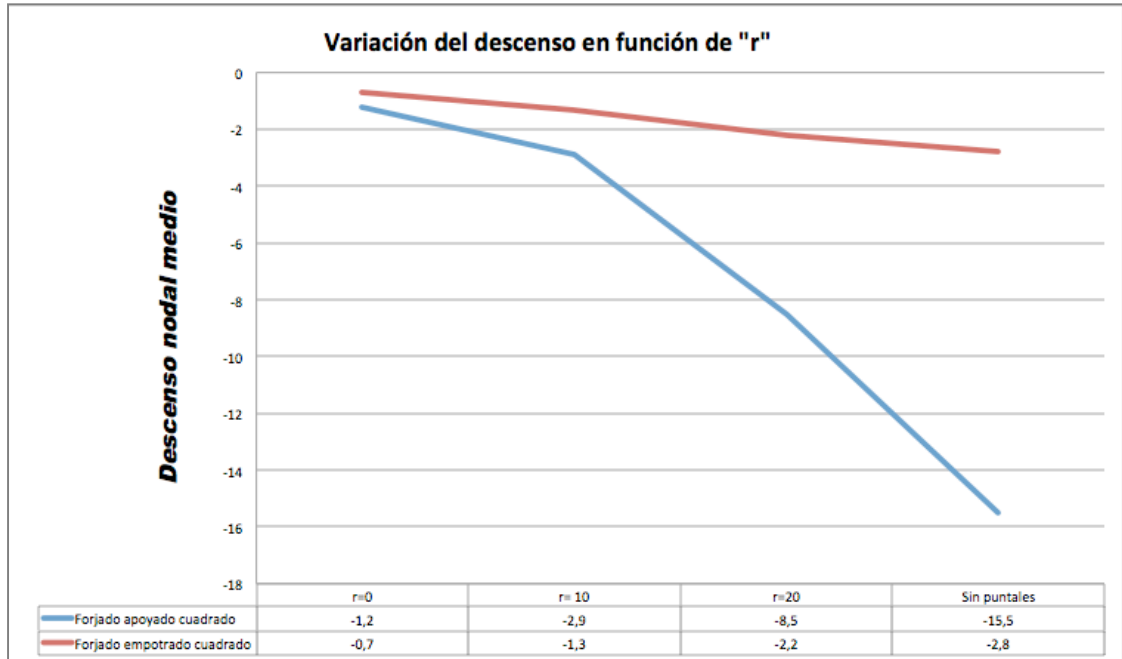


Figura 54. Secuencia 2.

Lo más interesante que comentar de esta gráfica, es comparándola con la homónima de la secuencia 1. En cuanto a términos absolutos del descenso nodal medio, parece que siguen la misma ley. Los gráficos son prácticamente idénticos, así que no se puede concluir nada relevante de ellos, salvo decir que sea la secuencia de desapuntalamiento simétrica o antisimétrica, parece no afectar en absoluto al descenso nodal medio.

Lo que si podemos hacer, es comparar la distribución de los descensos en el forjado. Comparando las figuras plasmadas en los resultados, podemos ver que no hay una notable diferencia en la distribución de los descensos. En la secuencia 1, los forjados deformados quizás presentan una distribución más ligeramente homogénea de los descensos a lo largo de su superficie, que si los comparamos con la secuencia 2.

Parece ser que la secuencia 2 de desapuntalamiento, concentra más los descensos en la franja central del forjado, de lo que lo hace la 1, y deja menos deformación en las zonas donde está apoyado. Aunque realmente a efectos prácticos, son prácticamente idénticos.

Podemos concluir para los casos que hemos probado, que ambas secuencias de desapuntalamiento obtienen resultados muy parecidos, y que es difícil situar una por encima de la otra.

Esto puede que sea debido a la escala en la que hemos trabajado, o simplemente a que realmente, las respuestas estructurales frente a las dos secuencias de desapuntalamiento sean muy parecidas.

Esto podría ser resuelto en futuras investigaciones, incluyendo en un proyecto de este ámbito, procesos de optimización iterativos para la sección transversal del forjado y de los puntales, lo cual se escapa al alcance de este trabajo, pero que podría alumbrar más luz a este tema.

Lo que sí puedo decir con certeza, es que la simulación, mediante herramientas de diseño paramétrico, son y serán muy útiles en el campo de la ingeniería, para seguir aprendiendo del comportamiento de nuestro mundo físico, así como para ampliar el horizonte de nuestro conocimiento, mediante las matemáticas.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Preisinger C. Linking structure and parametric geometry. *Archit Des.* 2013 Mar;83(2):110–3.
2. Williamson F. Richard Courant and the finite element method: A further look. *Hist Math.* Academic Press; 1980 Nov 1;7(4):369–78.
3. Adhikari S, Collins J, Loreto G, Nguyen TD. The Use of Parametric Modeling to Enhance the Understanding of Concrete Formwork Structures. *ASEE Annu Conf Expo Conf Proc.* 2021;