

EVALUACIÓN Y REINTERPRETACIÓN DEL SISTEMA
ESTRUCTURAL DE LA CASA 50X50 DE MIES VAN DE ROHE
MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

Trabajo fin de grado Universidad de Granada / ETSAG Julio (2019-2020)

Autor: Christian José Delgado Piñel

Tutor: Fernando Gómez Martínez

INDICE

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES:

Introducción	3
Objetivo / Etapas	4
Mies el arquitecto universal / Contexto e influencias arquitectónicas.....	5
Concepción espacial del arquitecto	11
Estructura en su obra	12

PROYECTO CASA 50X50:

Análisis del proyecto / La casa 50X50	16
Historia del proyecto / Evolución de los modelos	20
Estructura de la casa 50x50	24

OPTIMIZACIÓN Y MODELADO:

Elección de los modelos	26
Presentación de los modelos	27
Cómo funciona la modelización	43
Cómo funciona la optimización	44

RESULTADOS Y ANÁLISIS:

Criterios de optimización.....	50
Resultados de dimensionado de los modelos:	
Fichas modelos con simetría total	51
Fichas modelos con doble simetría en malla y pilares no uniformes.....	76
Fichas modelos con pilares no simétricos	79
Fichas modelos con malla con un solo eje de simetría	82
Discusión	88

DESENLACE:

Conclusiones	95
--------------------	----

MENCIONES

Especial agradecimiento a Agustín Pérez García (Universidad politécnica de Valencia) por el asesoramiento y toda la ayuda prestada con la web de optimización, así como a Pau Lozano Lloret y Fernando Gómez Martínez por ayudarme y cederme una licencia del programa Architrave sin el que no hubiera sido posible llevar a cabo todo el trabajo de modelización.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Introducción

A lo largo de la historia, la estructura ha condicionado el espacio de la arquitectura que sustenta. Apareciendo con el paso de los años mejoras técnicas que han permitido “flexibilizar” esta relación entre el espacio y la estructura, empezando por los arcos y bóvedas que nos permitían cubrir un gran espacio mediante elementos a compresión, más adelante el desarrollo de las estructuras mediante pórticos que nos permitieron liberar las fachadas de su carácter estructural, posteriormente la aparición del acero que supuso menor peso en elementos y mayores luces, hasta llegar a las estructuras espaciales, cerchas y pretensado que nos han permitido salvar grandes luces con cantos relativamente pequeños. Con todos estos avances hemos conseguido liberar poco a poco el espacio de cualquier estructura y conseguir mayor polivalencia en nuestras construcciones, o al menos esa era la idea idílica.

No obstante el problema no es tan simple como separar el espacio de la estructura y liberarlo de ella, ya que este tiene una relación íntima con la estructura y a su vez ambos con la forma, se necesita pues una integración de estos tres valores: Espacio, Estructura y Forma¹.

En la obra de Mies Van Der Rohe veremos como aborda la cuestión arquitectónica reduciéndola a la esencia, “menos es más”. Es esta simpleza y ausencia de elementos innecesarios, la que permite generar una arquitectura polivalente, libre y en sintonía con la estructura.

Entre todas sus obras nos centraremos en un proyecto de vivienda unifamiliar que jamás fue construido, esta es la casa 50x50, producto de la motivación de Mies para crear un edificio flexible listo para reproducir en masa.

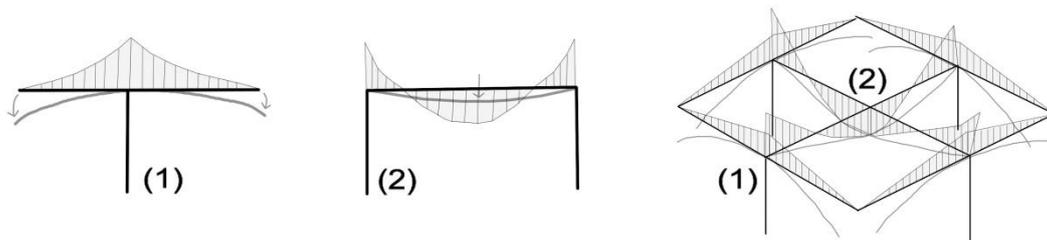
En esta obra, Mies comienza a establecer vínculos entre la forma y la estructura, al mismo tiempo que relaciona esta con el espacio, logrando una integración única entre las tres partes. Este producto no es resultado de una única propuesta, pues en los dibujos que Mies Van Der Rohe realiza para este proyecto (actualmente se pueden visualizar en su archivo) se muestra como el arquitecto trabaja entre multitud de opciones estructurales y espaciales, poniendo énfasis en darle el mejor funcionamiento posible y polivalencia para todos los grupos familiares, al mismo tiempo que intenta ensamblar la estructura con la forma y el espacio, sin olvidar nunca la reducción a lo estrictamente necesario.

¹ Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) */Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*



Objetivo

Este trabajo se centrará en la casa 50x50, obra no construida de Mies van der Rohe, se elige este proyecto por su estructura llamativa en relación con la simpleza que ofrece su geometría, se denota el fuerte criterio estructural que tiene el arquitecto al escoger esta geometría tridimensional donde a través de mezclar dos tipos de pórticos consigue una compensación en el centro de vano. Además por el hecho de no estar construida existen diversas versiones con las que se pueden trabajar, estas versiones se estudiarán y analizarán para ser optimizadas y calificadas con el objetivo de ver cuál es la versión más económica y cuanto merece la pena penalizar esa economía para lograr una buena arquitectura, para ello todas estas versiones serán modelizadas y estudiadas estructuralmente mediante programas informáticos, introduciendo variantes de la estructura según el caso.



Etapas del trabajo

En el primer capítulo del trabajo se analizará la figura de Mies van Der Rohe como arquitecto, introduciéndonos en su modo de pensar y de hacer las cosas, veremos sus influencias, su concepción estructural y su concepción espacial que nos ayudarán a entender el contexto artístico y humano de esta obra no construida.

En un segundo capítulo nos adentraremos a conocer la historia del proyecto, enumerando sus modelos más conocidos, analizaremos el proyecto y estudiaremos su estructura elemental

En un tercer capítulo se presentarán los modelos elegidos para el estudio y sus variantes, luego se explicará brevemente el funcionamiento de la herramienta optimizadora que se ha usado en este caso y el procedimiento para modelar cada variante.

En un cuarto capítulo se explicarán los criterios tomados a la hora de optimizar los modelos, y se presentarán los resultados obtenidos tras la optimización de todos los modelos y sus variantes.

Y finalmente en un quinto capítulo, tras el estudio realizado sobre Mies Van Der Rohe y su proyecto no construido de la casa 50x50, se sacarán las conclusiones pertinentes al análisis de los resultados obtenidos en la optimización de los modelos.



Mies Van Der Rohe el arquitecto universal

Contexto y sus influencias arquitectónicas

“Entre todos los grandes maestros de la arquitectura, Mies es sin lugar a dudas el más austero e introvertido, se podría decir que es el polo opuesto a Frank Lloyd”², una persona con don de gentes y que escribió y publicó muchas obras, este no es el caso de Mies, quien según su lema “menos es más”, el silencio hablaba por él, hoy día se tiene constancia de sus proyectos menos conocidos gracias a la existencia de su archivo, donado por su familia.

Alemán nacido en Aache en 1886, quién vivió mucho tiempo solo, encerrado en sí mismo, incluso estando casado siempre prefirió la soledad y el aislamiento. Encontramos parecidos entre el arquitecto y su obra arquitectónica, siendo una arquitectura introvertida, gélida y que de su depuración acababa siendo extraordinariamente rica y didáctica.

Mies siempre dio mucha importancia a la relación de la función y la técnica, teniendo grandes conocimientos de construcción y relacionando esos conocimientos siempre con su concepción de arquitectura, que era una síntesis entre transición y modernidad, en su obra Mies buscaba una continuidad con el mundo clásico, en estas ideas vemos influencias del arquitecto Karl Friedrich Schinkel, arquitecto que influyó notablemente en numerosos maestros del movimiento moderno.

Maria Ludwig Michael Mies es el nombre original del arquitecto, que posteriormente fue cambiado a Ludwig Mies van der Rohe. Mies no tuvo muy buena formación, era hijo de un cantero tallista de lápidas, Mies era buen dibujante, y conocía bien los materiales y la estereotomía de la piedra por haber trabajado con su padre, pero no tenía un gran conocimiento arquitectónico. Después de construir su primera casa, la casa Riehl Mies se centró totalmente en la arquitectura, antes de este encargo Mies había estado trabajando en el estudio de Bruno Paul diseñando muebles gracias a su formación en artes y oficios adquirida como cantero, la influencia de Bruno se ve en la monumentalidad de la casa Riehl



Imagen de la casa Riehl año 1907
Fuente: <https://i.pinimg.com/>

² Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March
/ *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.*

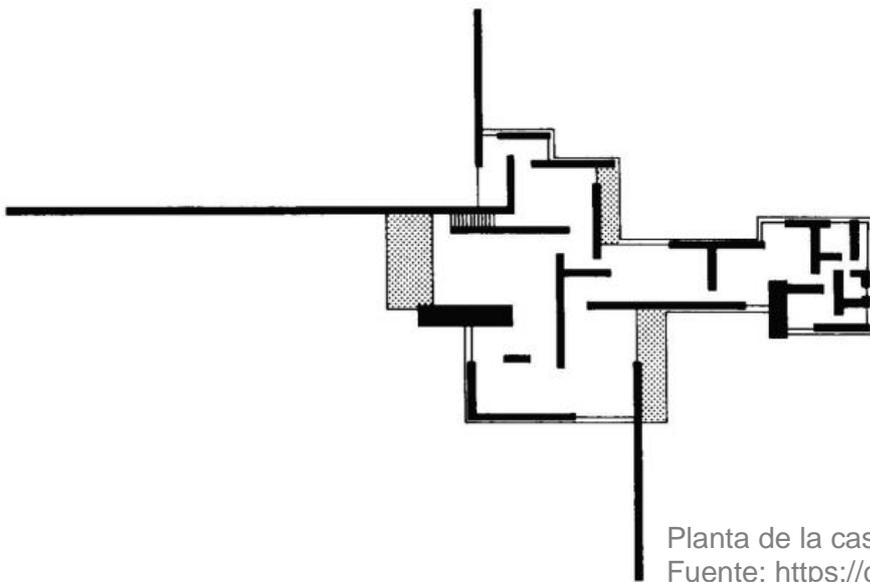
En 1908 Mies entra a trabajar en el gran despacho, el de Peter Behrens, allí había dos ramas: los arquitectos más técnicos como Gropius que se dedicaban a construir fábricas y edificios más complejos y medidos, y por otro lado había otra rama donde trabajaban los arquitectos más artistas dedicados a construir casas y oficinas, Mies claramente trabajó en esta segunda rama del estudio. Gropius y Mies nunca establecieron buena amistad por su distinta concepción de la arquitectura entre otras cosas, Gropius concebía la arquitectura como una máquina y pensaba que las ideas de Mies no estaban en consonancia con la arquitectura industrial de la época. Al mismo tiempo obra de Behrens se iba contaminando poco a poco de las ideas de Mies, arquitectura moderna pero llena de convencionalismo.

El gran encargo llegó al estudio de Behrens , una casa para la familia Kröller-Müller, una familia adinerada, que pretendía construir una villa, a esta familia les gustó mucho el estilo de Mies y le propusieron dejar el estudio para hacerle la casa, Mies finalmente le levantó el encargo a Peter Behrens y en 1912 salió del estudio con este gran encargo, que finalmente no llegó a realizar por indecisión de la familia. De este modo Mies comenzó a trabajar por libre.

Mies abre su propio estudio en Berlín, formó una familia con Ada Bruhn y tuvieron dos hijas, en un principio Mies pensaba seguir su propia corriente neoclásica, pero un viaje a los países bajos hizo que cambiasen sus prioridades, allí conoció la obra de Berlage, que curiosamente fue el arquitecto que finalmente construyó la villa Kröller-Müller, de la obra de Berlage Mies toma la concepción de la estructura como hecho arquitectónico y se pronuncia hacia la sinceridad constructiva.

En 1914 debido a la primera guerra mundial Mies tiene que marchar a Rumania, las relaciones con su familia se complicaron y se separó de ella.

En 1922 entró a formar parte de la “Novembergruppe”, en ese momento cambió su nombre por Mies Van der Rohe, Por estas fechas junto a un grupo de Neoplasticistas como Lissitzky y Van Doesbourg crearon la revista G donde quedará fuertemente influenciado por el movimiento neoplasticista, esta influencia la podemos ver en su obra de la casa de ladrillo, esta influencia es observable en el lenguaje de planos libres sin macla, esta corriente neoplástica también es reconocible en el pabellón de Barcelona, una de las más importantes obras de Mies construida en 1928.³



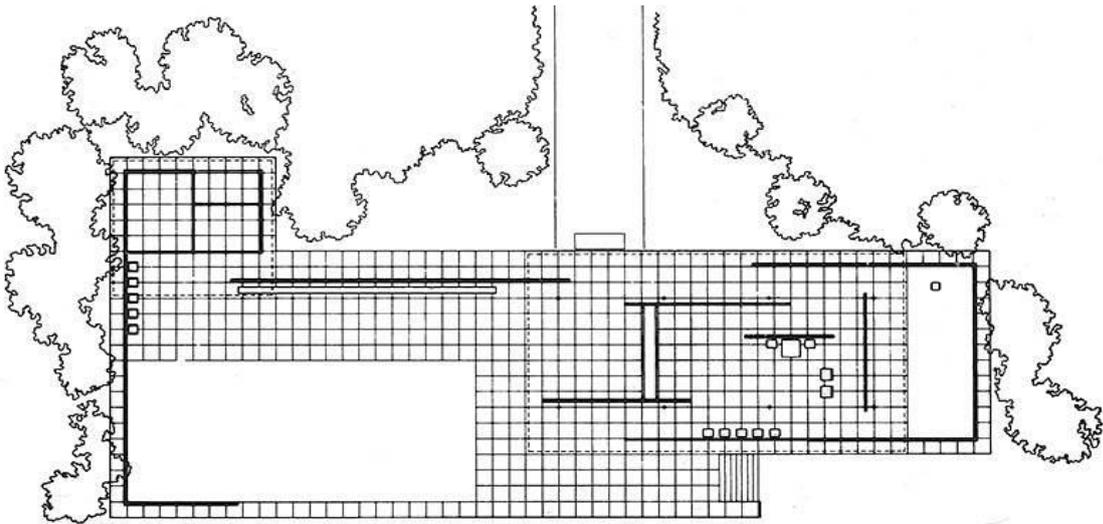
Planta de la casa de ladrillo año 1924
Fuente: <https://cajondearquitecto.com/>

³ Información extraída de Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.*

La obra de Frank Lloyd Wright también influyó en Mies a pesar de que fueron polos opuestos, podemos ver como la fluidez del espacio de las obras de Wright penetran en obras como el citado pabellón de Barcelona, siendo un recorrido fluido en toda su extensión.

Mies conoció a la especialista en exposiciones Lilly Reich en la exposición alemana de la Werkbund, quien sería su segunda esposa. Lilly Reich era la directora de esta exposición de la cual posteriormente Mies fue nombrado arquitecto jefe donde trabajó junto a Lilly⁴.

Mies y Lilly trabajarán juntos en numerosos proyectos de los más importantes en la obra de Mies correspondiente a su primera etapa o etapa alemana, como son el pabellón de Barcelona o la casa Tugendhat.⁵



Planta del pabellón de Barcelona año 1929 Fuente: <https://www.lomography.es/>



Imagen de la casa Tugendhat año 1929 Fuente: <https://artchist.blogspot.com/>

⁴ Información extraída de Colomé Montañés, Enrique (2014) / Material, espacio y color en Mies van der Rohe. Café Samt & Seide: Hacia una propuesta Estructural. / Tesis doctoral E.T.S. Arquitectura UPM / Archivo Digital UPM.

⁵ Información extraída de Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.

Poco a poco el nazismo se iba implantando en Alemania, en el año 1930 Gropius huyó de Alemania dejando la Bauhaus Dessau sin director, puesto que ocupó Mies en su lugar, durante esa época Mies solo desarrollará su trabajo como profesor junto a Lilly Reich dejando su producción arquitectónica a un lado, en la Bauhaus estaban cada vez más presionados ya que los alemanes concebían a la Bauhaus como una organización izquierdista. En 1933 los alemanes cierran la Bauhaus y Mies entra en una etapa de pausa creativa que duró casi 10 años, en este tiempo intentó reconciliarse con los nazis presentándose a concursos como el del pabellón alemán de Bruselas y adoptando el lenguaje que ellos requerían junto al suyo propio, pero ellos no compraban el lenguaje moderno, ya que concebían casi exclusivamente casas neo-vernáculos y monumentos de orden clasicista.

En 1937 después de no conseguir adaptarse al nuevo entorno alemán, Mies se desplaza a estados unidos, allí hace contacto con Frank Lloyd quien le ayudó a establecerse allí.

En américa a Mies le ofrecieron primeramente el decanato de Harvard, pero sin embargo se lo dieron finalmente a Gropius, por suerte para Mies, también le ofrecieron el decanato del Massachusetts Institute of Technology (MIT), donde le pedirán proyectar el campus.

En 1939 Llegó la segunda guerra mundial que hizo que se dejara de construir, en esta época Mies trabaja en proyectos teóricos, como las casas de ladrillo.

El flujo de trabajo de Mies consistía en producir pocos dibujos pero pensar de forma extraordinariamente intensa, Mies podía estar mirando una maqueta horas y producía 2 o 3 dibujos cuya depuración era inmensa.

Tras la segunda guerra mundial Mies construirá su primera casa en américa, la casa Farnsworth, donde llevó la construcción y la estructura a su esencia, convirtiéndose en una obra maestra, sin embargo posteriormente su cliente, la doctora Farnsworth encontraría numerosos defectos a la hora de habitar la casa que le llevaron a demandar al arquitecto.⁶



Imagen de la casa Farnsworth año 1946-1950 Fuente: <https://www.jaime-hernandez.com/>

⁶ Información extraída de Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe*.

Mies intentó llevar estas mismas ideas racionalistas utilizadas en la casa Farnsworth a su proyecto no construido de la casa 50x50, que será la obra que analizaremos posteriormente con más intensidad.

En América Mies conoció a Herbert Greenwald, un promotor que le influyó notablemente a la hora de plantear el prototipo de la casa 50x50, y que será quien le dé trabajo durante los 15 años siguientes, en los cuales Mies construirá sobre todo bloques en altura (como el Lake Shore Drive) muchos de ellos residenciales y donde se inventará una nueva forma de habitar, consistente en cajas de vidrio superpuestas. Es como si hubiésemos superpuesto unos espacios similares al de la casa Farnsworth en altura. En este punto Mies encontró un lenguaje que le funcionaba para aplicar a todo tipo de arquitectura

Mientras tanto Mies seguía construyendo el campus del MIT, le tocaba construir la facultad de arquitectura, el Crown Hall donde de nuevo utilizó, su lenguaje universal aprendido, pero esta vez con más tamaño, un edificio sin pilares en el interior y con cerchas de gran canto.⁷



Estructura del Crown Hall en construcción
Fuente: <http://arquipozcodia.blogspot.com/>

Imagen del edificio Crown Hall año 1950-1956
Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/>



⁷ Información extraída de Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.*

Mies construyó numerosos edificios en América, como por ejemplo el Seagram, que sirvió de modelo posteriormente para edificios en altura de oficinas.

Por esta época y gracias a sus numerosos trabajos, Mies se hizo muy conocido y popular, llenando América de edificios suyos, se convirtió en lo que él quería, en un arquitecto universal que podía hacer cualquier tipo de edificio siguiendo su modelo de arquitectura y sus leyes aprendidas, con la virtud de poder resolver cualquier edificio sea cual sea su tipología o tamaño.

A pesar de su fama, Mies aún no había hecho ningún edificio importante en Alemania, no será hasta 1965 cuando Mies ya estaba bastante mayor, que le llegó la hora de dejar su legado en Alemania con el edificio de la Neue National Gallery.

En este proyecto podemos ver a un Mies obsesionado cada vez más por las grandes luces, es cierto que no es su última obra, pero por su importancia y por ser una de las últimas se le atribuye el culmen de su carrera como arquitecto, coronando al mismo tiempo su edificio con una cubierta apoyada de casetones de vigas de acero, como hará también en la casa 50 x 50.

La Neue National Gallery es un edificio muy contemporáneo en sí, pero al mismo tiempo con un clasicismo innato, donde Mies muestra la evolución definitiva de su concepción estructural, dejando completamente libre el interior y llevándose la estructura de pilares metálicos al perímetro del edificio.⁸



Imagen del edificio Neue National Gallerie año 1968
Fuente: <https://www.plataformaarquitectura.cl/>

⁸ Información extraída de Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.*

Concepción espacial del arquitecto

Para Mies el espacio era algo fundamental, buscaba la esencia en él, Mies utiliza espacios fluidos donde el propio mobiliario crea una delimitación de los ámbitos habitables, en general Mies generaba unos espacios “vacíos” por ejemplo en el pabellón de Barcelona lo que llenaba el espacio eran los propios flujos de los visitantes y la estructura de pilares cruciformes que será un elemento muy importante en la definición de los espacios miesianos

El pilar cruciforme diluía el impacto de la estructura cuando la ubicaba en el interior del espacio, permitiendo gracias a las cruces que el pilar tuviese menos peso visual.

El espacio en la obra de Mies se caracteriza por ser abstracto, como ocurre notablemente en la casa Farmsworth donde los paneles de vidrio diluyen totalmente el exterior del interior y lo hacen un lugar casi inhabitable a pesar de la enorme depuración espacial que el arquitecto consigue en el interior, nuevamente utilizando los muebles como distribuidores de estancias y dejando núcleos húmedos donde aumenta la intimidad.

Tenemos que hablar de la esquina en la obra de Mies, ya que en mucha de sus obras tiene gran importancia y el arquitecto logra separarla de la estructura usando paños de vidrio, consiguiendo un espacio abstracto donde el fuera y el dentro quedan separados únicamente por la geometría de la carpintería del vidrio⁹



Imagen del edificio Neue National Gallerie donde se muestra la desmaterialización de la esquina gracias al vidrio y la carencia de estructura
Fuente: <https://seordelbiombo.blogspot.com/>

⁹ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

Estructura en su obra

Mies construyó numerosas obras, pero nos centraremos en las más importantes en cuanto a la evolución de la estructura en su obra.

Mies van der Rohe utiliza una misma tipología estructural para resolver distintos programas (Carter 1974), al mismo tiempo también planteaba distintas soluciones estructurales para el mismo programa, esto es porque Mies pensaba que el programa no es algo estático como la estructura y necesitaba dar solución al problema de la relación entre distintos programas y estructura.

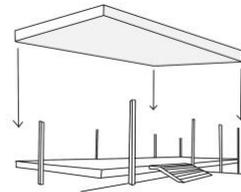
Mies creó un concepto moderno de flexibilidad, dejando solo la esencia para que de ese modo la universalidad fuese eterna.

Podemos agrupar los edificios de Mies en tres grupos principales: los edificios de gran altura con armazón estructural (Lake shore drive), los edificios de baja altura con armazón estructural (Illinois institute of technology) y por último los edificios de planta libre. (Casa farmsworth). Nos centraremos en esta última categoría para desarrollar el estudio de la casa 50x50¹⁰.

A su vez, Peter Carter clasifica los edificios de planta libre de Mies en tres grupos principales:

1-Edificios con cubierta rectangular apoyada en los pilares perimetrales:

-Casa farmsworth



2-Edificios con cubierta rectangular en la cara interior de las cerchas o los pórticos vistos:

-Restaurante cantor drive (Berlín)

-Crown hall (Illinois)

-Teatro nacional de Mannheim



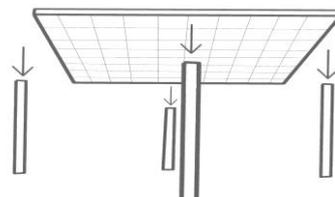
3-Edificios con una estructura de cubierta cuadrada compuesta por una retícula ortogonal de vigas o cerchas apoyadas en los pilares perimetrales:

-Neue national gallery (Berlín)

-Casa 50x50

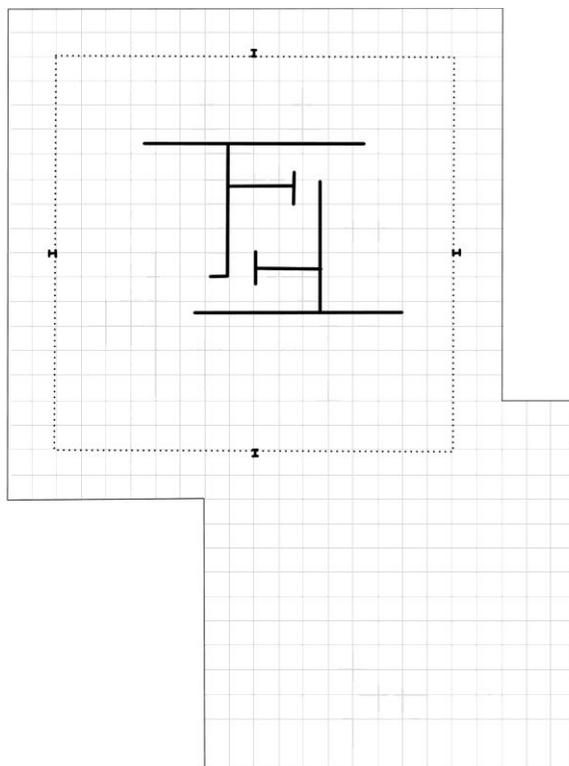
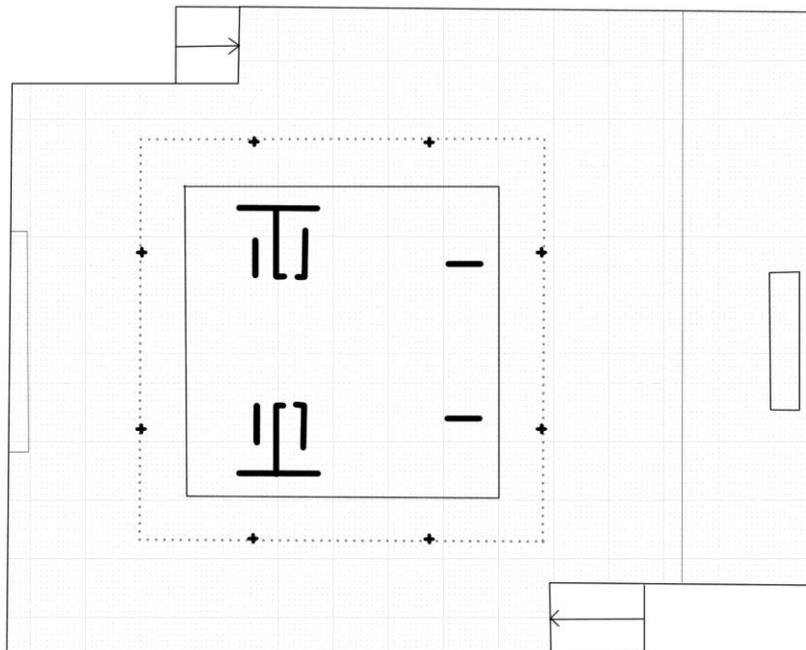
-Convention hall (Chicago)

-Edificios de oficinas ron bacardi (cuba)



¹⁰ Información extraída de Carter, Peter (1974) / Mies van der Rohe at work / ediciones Phaidon Press 1999

En el proyecto de la Neue National Gallery podemos ver un acercamiento muy próximo al proyecto no realizado de la casa 50x50, sin embargo ambos programas se distancian mucho, residencial en 50x50 y expositivo en la NNG, albergando sin embargo el mismo concepto estructural de planta libre, sin pilares en las esquinas, con cubierta cuadrada apoyada y de una sola planta¹¹.



Plantas de la casa 50x50 y
Neue National Gallerie

¹¹ Información extraída de Santatecla Fayos, José, Lizondo Sevilla, Laura, García Requejo, Zaida (2018) / *Relaciones entre arquitectura y estructura. Arquitectura estructural en Mies van der Rohe.*

La estructura en la obra de Mies sigue una evolución lineal, que va en la búsqueda de su universalidad, poco a poco aleja la estructura del edificio al mismo tiempo que la estructura gana importancia en su obra.

Esta evolución se puede apreciar en sus obras si son observadas cronológicamente, en un inicio Mies ubica la estructura dentro del propio edificio, como en el pabellón de Barcelona o en la casa Riehl. Esta ubicación de la estructura produce una relación entre la estructura y el espacio, pero una relación de necesidad, es decir el espacio necesita la estructura y no puede ser modificado sin depender de un cambio en la estructura, esto en absoluto es lo que persigue Mies.

Más adelante Mies proyecta ubicando la estructura en el perímetro del edificio, esta posición libera el interior del edificio y permite mucha más versatilidad, pero a pesar de ello, la fachada queda dependiente de la estructura y los huecos vuelven a depender de la ubicación de la estructura, este caso es apreciable en la casa 50x50 o en la casa Farmsworth por ejemplo.

El paso definitivo en la ubicación de la estructura en la obra de Mies será ubicarla en el exterior del perímetro del cerramiento del edificio, en esta posición Mies consigue liberar el espacio interior y que la estructura no sea partícipe de las decisiones de huecos o distribución interior. Este caso es apreciable en obras como la Neue National Gallery¹².



La estructura de Mies también evoluciona en lo relativo a los materiales y la visibilidad de la estructura, utilizando inicialmente en sus primeras casas estructura oculta en muros de ladrillo y estructura de pórticos de hormigón armado hasta llegar a valorar la importancia que esta tiene en relación con el espacio, esto le lleva a querer sacarla al exterior aprovechando para mostrarla y ponerla en valor, un valor material.

Utilizaba perfiles laminados de acero, los cuales le permitían mucha más elegancia en la estructura de sus obras y acabados más puros, simples y ligeros que los que le podían llegar a dar los muros de ladrillo y el hormigón.

Se puede decir que Mies en su camino a la universalidad, comienza a buscar un espacio independiente de la estructura y para conseguir esto utiliza inevitablemente estructuras que definen el propio proyecto, como son las vigas del Crown Hall o el forjado reticular del Neue National Gallery, al intentar depurar el proyecto a su esencia se da cuenta de que lo único que no puede eliminar es la propia estructura, siendo la estructura lo que queda por reducción en sus obras y convirtiéndose en el todo del edificio.

¹² Información extraída de Cervilla García, Alejandro (2015) / *El lenguaje de la estructura: Mies van der Rohe y la construcción con acero y hormigón* / Tesis doctoral E.T.S. Arq. UPM / Archivo Digital UPM.

PROYECTO CASA 50X50

Análisis del proyecto Casa 50x50

El proyecto de casa 50x50 nace como una experimentación de Mies para dar respuesta a un problema de vivienda social como hemos visto anteriormente, Mies nunca había prestado especial atención a estos temas relacionados con la producción en masa de viviendas, pero la influencia de su compañero y promotor Herbert Greenwald hizo que se plantease estos temas, además incentivado aún más por el contexto histórico después de la segunda guerra mundial donde los problemas y planteamientos sobre la vivienda social estaban en auge, muchos arquitectos trabajaron en idear modelos para reconstruir las ciudades, entre ellos Mies imaginaba construir en masa esta casa y deseaba que pudiese cumplir todo tipo de expectativas y programas para los diferentes grupos familiares, la idea era crear un modelo de vivienda moderna que no fuese hecha por artesanos con aspectos individualistas, sino por elementos “prefabricados” y fáciles de reproducir como son las piezas de su estructura metálica y los paños de vidrio que se ensamblaban en ella.



Recreación de la casa 50x50

(Autor: Luciana Fornari Colombo Fuente: <https://www.vitruvius.com.br/>)

En este proyecto vemos muchas cualidades propias de la obra de Mies como son la depuración máxima, limitando el proyecto a unos pilares que sustentan una cubierta apoyada y a los propios paños de vidrio, nada más. Esto genera una abstracción muy común en la obra de Mies donde el espacio se desmaterializa y los pocos elementos que generan el espacio parecen casi una fantasía, pero que en realidad tienen todo el sentido constructivo.

También vemos como la sinceridad constructiva se hace relevante nuevamente, Mies crea un diálogo entre lo constructivo y lo estético donde el sistema de forjado reticular produce un espacio libre y diáfano, al mismo tiempo genera un valor al espacio dado por el propio sistema constructivo y el material que lo conforma¹³.

¹³ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

Mies en este proyecto aplica todos los conocimientos adquiridos en anteriores proyectos consiguiendo especialmente en este un equilibrio entre espacio, estructura y forma y es que la pureza de la geometría cuadrada casa perfectamente con la elección estructural y el espacio se nutre de las decisiones de donde ubicar los pilares y de cómo está dispuesta la estructura, todo junto genera una amalgama de decisiones nada fortuitas que desarrollan un proyecto teórico de los más equilibrados en la obra Miesiana.



Recreación del espacio interior de la casa 50x50
Mantovani Genari (2015)

Realmente este proyecto no tiene emplazamiento alguno, ya que es una obra teórica donde Mies genera un plano de apoyo que supone la suma de dos cuadrados, de forma parecida a como lo hace en la casa Farmsworth.

La estructura sigue un desarrollo similar al de la casa Farmsworth, Mies lleva los pilares al perímetro desocupando el espacio interior y dejando las esquinas en voladizo, libres de pilares

En cuanto al espacio, es distribuido totalmente mediante el mobiliario, añade además un núcleo central que se encuentra totalmente desvinculado de la estructura, de modo que puede variar su posición o incluso ser eliminado, los muebles que distribuyen el espacio no llegan hasta la altura total del techo como se puede apreciar en la imagen superior dejando de este modo un espacio mucho más fluido que si cerrase por completo el espacio.

El espacio interior también se encuentra vinculado con la cubierta apoyada, esto se consigue gracias a que Mies utilizó un módulo para generar el proyecto y a partir de él genera una geometría absolutista de la que parte la generación de la estructura del techo, y al mismo tiempo surge la distribución de los espacios y la textura del suelo¹⁴.

¹⁴ Información extraída de Mantovani Genari, Eduardo (2015) / *Mies Two-Way Span*
/ Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña.



Recreación de la entrada de la casa 50x50
Mantovani Genari (2015)



Recreación de la casa 50x50
Mantovani Genari (2015)

En cuanto a esa geometría, Mies quiso dar una respuesta eficiente y sencilla ya que tras la guerra era algo muy necesario, Mies parte de la retícula y a partir de ella genera toda la geometría de este proyecto.

Los datos geométricos se obtienen de Mantovani (2007), los cuales han sido muy útiles para la posterior modelización del proyecto:

La geometría de la versión más conocida del proyecto no construido de la casa 50x50 alberga una altura de 3,5052m (11,5') y altura libre de 3,048 (10') con una superficie total de 214,0486m²

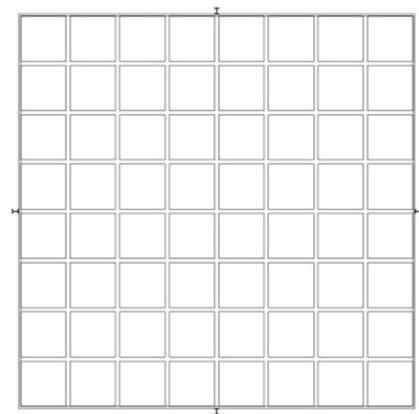
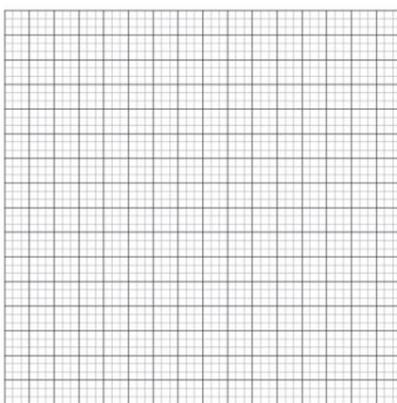
La luz de la estructura es de 14,6304m (48') {siendo las dimensiones de la planta de 48'x48'} mientras que la luz de los voladizos es de 7,3152m (24'), es decir con los pilares ubicados exactamente en el centro de la luz. En el centro contiene un núcleo de madera que articula las distintas distribuciones del espacio

El proyecto cuenta con otros módulos más pequeños basados en la retícula inicial que plantea Mies, estos organizan la arquitectura, siendo 8x8 módulos de 1,82m (6') que corresponden a la estructura de la cubierta, a su vez presenta 16x16 módulos de 0,9144m (3') estos módulos marcan la organización del espacio y las piezas de solería del pavimento

La estructura es de acero, las vigas que forman la cubierta tienen sección en I de 0,225m (0,75') de alto, los bordes de esta cubierta son vigas de perfil C de 0,45m (1,5') de alto.

En cuanto a los pilares, en el planteamiento ideal de Mies, estos tienen sección en I semejante a las vigas que forman el entramado de cubierta, los coloca de manera que todos son simétricos en ambos ejes del cuadrado¹⁵.

Sabiendo todo esto y con toda la información obtenida de los planos y bocetos del archivo de Mies, se pueden extrapolar muchos datos para la modelización y optimización del resto de versiones, incluidas las menos conocidas.



División modular de la casa 50x50 en la izquierda 16x16 módulos que marcan la distribución espacial, a la derecha 8x8 módulos que marcan la distribución estructural (Mantovani Genari 2006)

¹⁵ Información extraída de Mantovani Genari, Eduardo (2006-2007) / *Casa 50x50 Ludwig Mies van der Rohe* / Trabajo fin de master Universidad Politécnica de Cataluña.

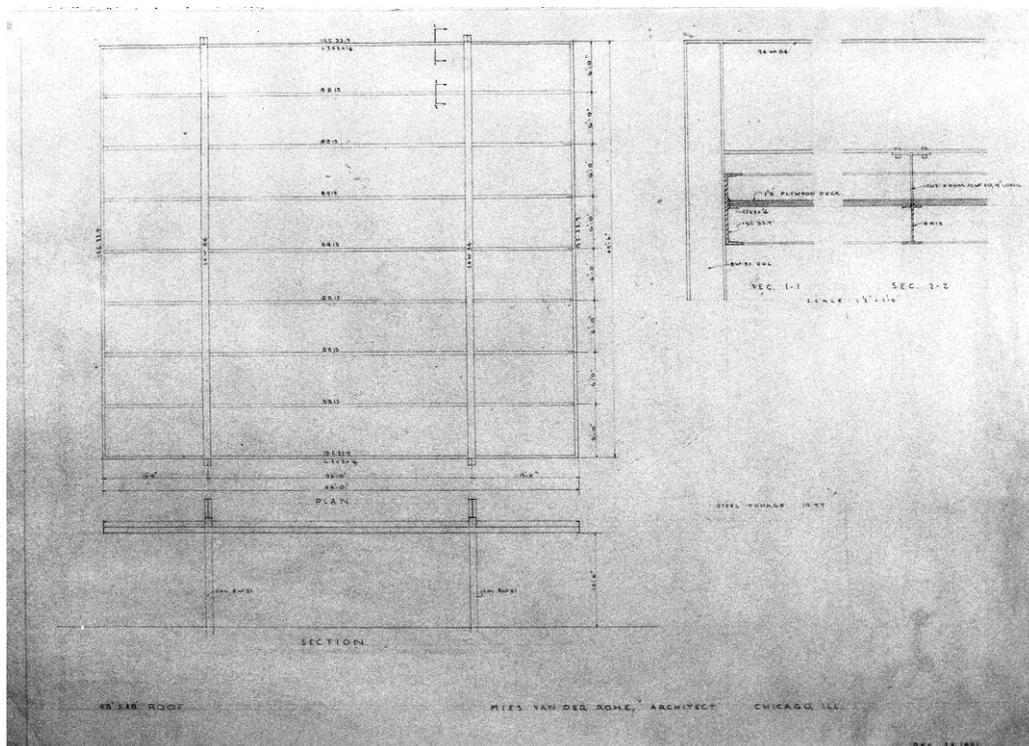
Historia del proyecto / Evolución de los modelos

La época en la que Mies Van Der Rohe trabaja en este proyecto será entre los años 1951-1952, se tiene constancia de ello por la fecha de sus dibujos. De todas sus obras, esta será la primera en la que combine una planta libre con cubierta cuadrada apoyada, una tipología que crea un espacio muy concreto extremadamente vinculado a su estructura.

En la casa 50x50 mies propone una simplificación estructural y espacial de la casa Farmsworth como mencionamos anteriormente, la cual se había construido justo antes de esta obra, será en esta donde por primera vez pase a utilizar una estructura bidireccional, por este motivo se entiende que esta obra es una obra de transición entre la casa Farmsworth y la Neue National Gallerie¹⁶.

La iniciativa del proyecto de la casa 50x50, nace por la interacción del promotor Herbert Greenwald con Mies Van Der Rohe. Será este colaborador quien depositará en mies la semilla sobre pensar en construir viviendas en masa que al mismo tiempo pudiesen satisfacer las necesidades de cualquier familia, con un espacio y una estructura polivalente. Por este motivo surgen varios modelos y prototipos de esta misma obra, que no buscan otra cosa que abrir el abanico de posibilidades para habitar el edificio.

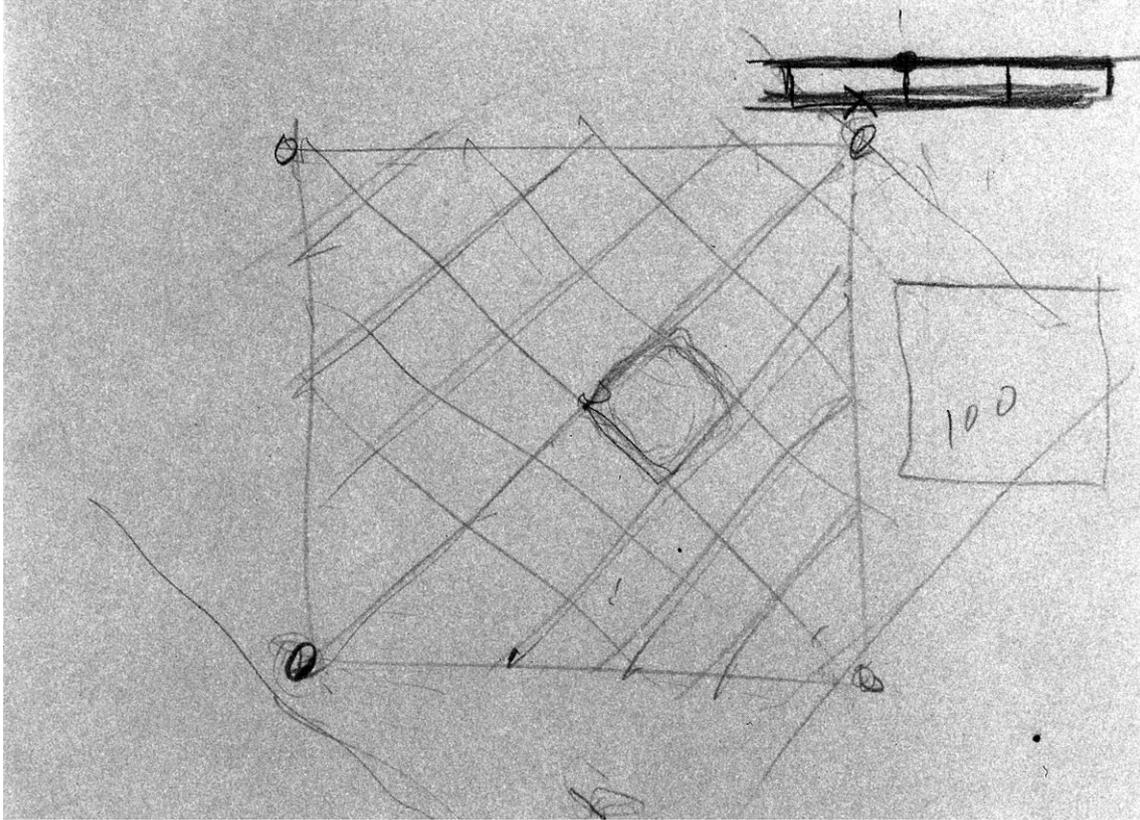
La mayoría de estos modelos optaban por la forma cuadrada, el más famoso es el modelo cuadrado para 3 personas, existe sin embargo una versión rectangular que tomaba como solución estructural vigas de gran canto y forjado unidireccional.



Versión de la casa 50x50 forjado unidireccional y planta cuadrada (Díaz Segura et al 2018)

¹⁶ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

Otro modelo bastante conocido de la casa 50x50 es aquel que tiene la planta cuadrada con forjado bidireccional y pilares en las esquinas, la malla reticular se encontraba girada 45° y aunque tenía un mejor comportamiento estructural, su aspecto no era el más idóneo para las ideas simples y puras de Mies.

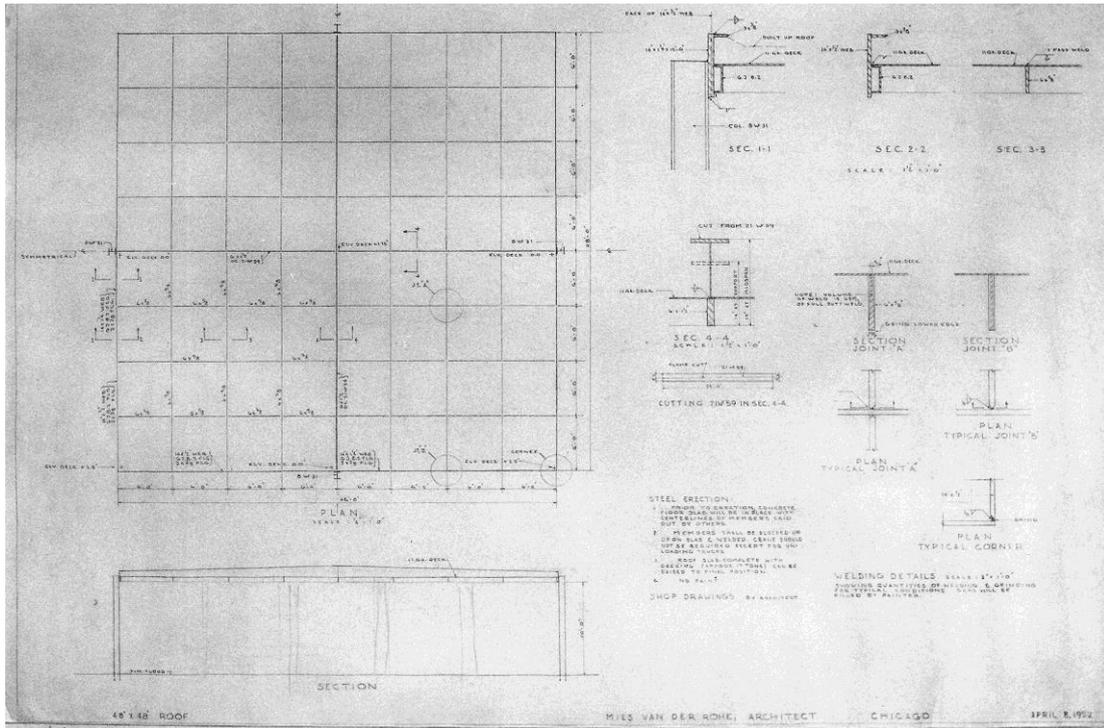


Versión de la casa 50x50 con forjado bidireccional girado 45° y pilares en las esquinas (Díaz Segura et al 2018)

Otro esquema estructural de Mies fue el de pilares enfrentados dos a dos en dos de las caras del cuadrado, dejando las otras dos libres, este modelo se descartó porque pierde su coherencia entre estructura y forma, al debilitar la geometría estática y bidireccional del cuadrado.

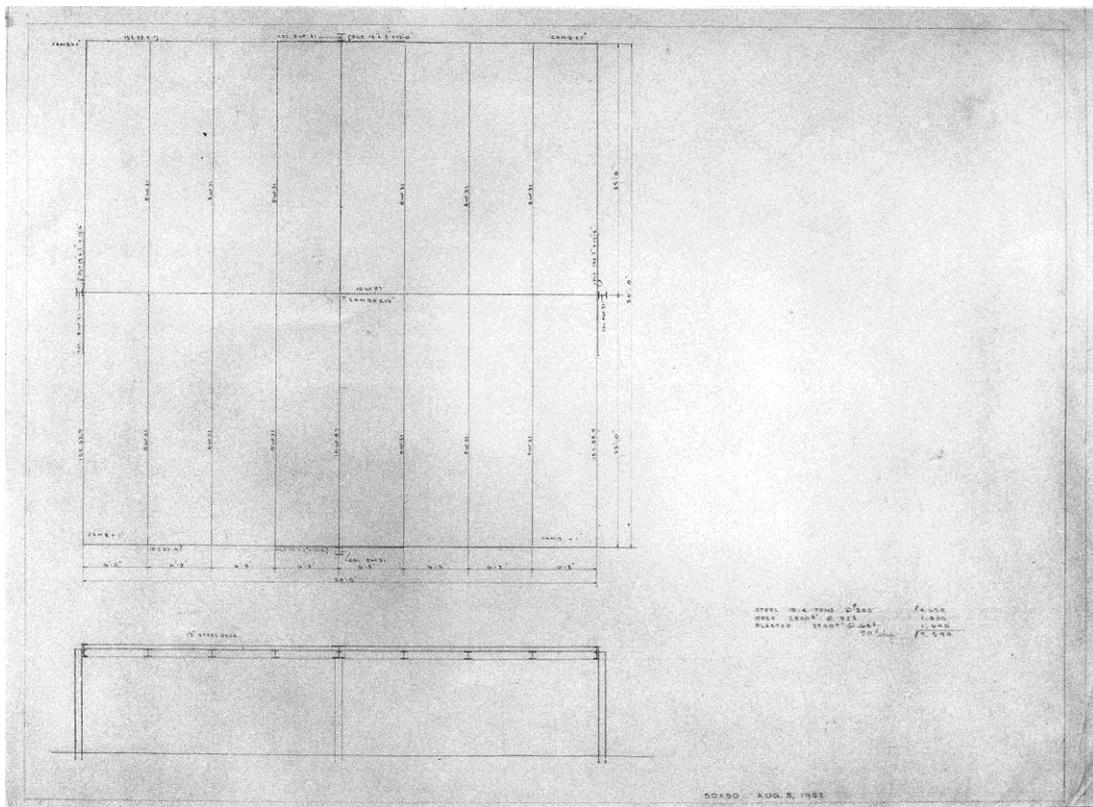
Mies también probó a usar chapas planas de 15,2cm(6') de canto y 1,5cm (5/8') de espesor cada 1,83m (6pies), como era insuficiente canto para el forjado, arriba se engarzaban dos perfiles de gran canto en T, estas vigas se unían a los pilares mediante el zuncho perimetral y se intersectaban en el centro geométrico del cuadrado, con todo esto Mies consigue que los voladizos compensen la deformación central del forjado, todas las uniones se plantean soldadas de ese modo da un acabado mucho más limpio de su obra, el problema de este boceto es la pérdida de jerarquía en el forjado, concibiendo dos tipos de vigas y las vigas en T que quedaban vistas arriba¹⁷.

¹⁷ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*



Versión de la casa 50x50 con vigas de refuerzo en T (Díaz Segura et al 2018)

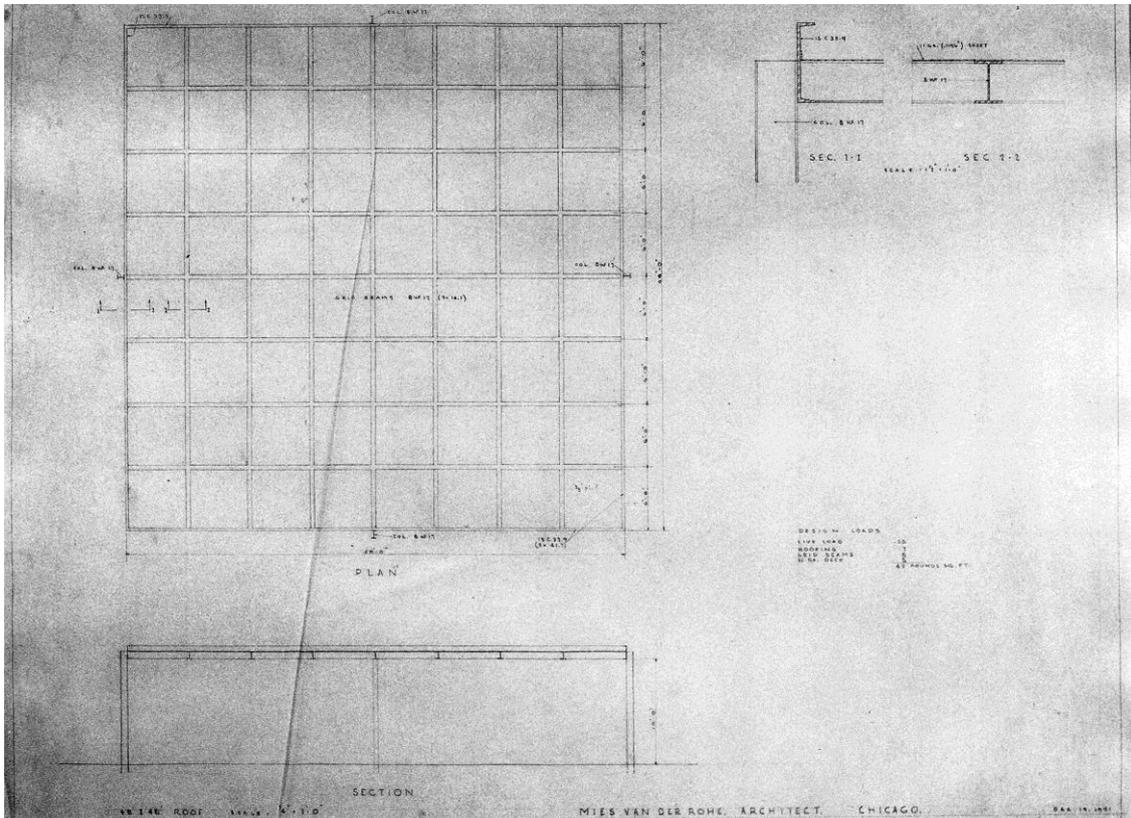
Semanas despues Mies pasa del bidireccional al unidireccional, y cambia el peralte de las vigas, pero sigue existiendo la jerarquía entre ellas, ya que solo cambia la dimensión y la forma¹⁸.



Versión de la casa 50x50 vigas de refuerzo y forjado unidireccional (Díaz Segura et al 2018)

¹⁸ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

La solución definitiva, que es la que estudiaremos principalmente, consiste en no jerarquizar el entramado de la estructura horizontal, se concibe como una amalgama de perfiles de la misma sección, con un perfil en U perimetral que funciona para rematar las pendientes de la cubierta



Versión de la casa 50x50 con vigas perimetrales en U (Díaz Segura et al 2018)

Este modelo con las vigas en U debilitaba claramente la deformación de los voladizos, pero da respuesta a las necesidades de equilibrio, homogeneidad y jerarquía.

Mies buscaba una falta de jerarquía, la cual se establece al imponer que todos los elementos estructurales pertenecientes al mismo grupo fuesen iguales, por ejemplo las vigas que forman los casetones son todas iguales, si existiese una de distinto tamaño o dimensión se generaría un gerarquía en el proyecto que rompería la simpleza del mismo y destacaría entre todas sus partes rompiendo la fuerte simetría existente en la estructura.

Mies quería llegar más allá e imponer que los elementos estructurales pertenecientes a otros grupos también fuesen semejantes, de este modo reduciría aún más la complejidad, abstractamente plantea la posibilidad de que los pilares sean perfiles semejantes a los que forman el entramado del forjado.

La disposición bidireccional del forjado es sin duda la más correcta para la forma cuadrada, ya que su funcionamiento óptimo es una distribución simétrica en los dos ejes como el cuadrado que forma la planta de la casa 50x50¹⁹.

¹⁹ Información extraída de Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018) / *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

Estructura de la casa 50x50

Como hemos mencionado anteriormente esta estructura está íntimamente relacionada con la de la casa Farmsworth y es que ambos proyectos son coetáneos, la importancia de la estructura de la casa 50x50 reside en su simpleza y en la relación con su forma, Mies consigue generar una estructura totalmente óptima para su replicación en masa donde los elementos estructurales son imprescindibles y mantienen su sección homogénea en toda la obra.

Los módulos de 8x8 piezas marcan la distribución de la estructura de la cubierta que será la que defina el carácter estructural del proyecto, apoyándose sencillamente en los 4 pilares ubicados en el centro de cada vano y deformándose en las esquinas funcionando como un voladizo.

La estructura es un elemento fundamental que sustenta todo el proyecto, ya que esta se encuentra basada en el módulo antes mencionado de 8x8, dependiente de la retícula ortogonal que es la que genera todo el proyecto y la geometría de los módulos, de este modo la relación es intensiva y nada está fuera de lugar sino que todo condiciona al proyecto

Mies utiliza recursos para que la estructura sea patente y visible en todo el proyecto como son particiones a base de muebles que no llegan al techo o la existencia de los extensos paños de vidrio que permiten visibilizar la estructura de los pilares que quedan por detrás de este sin intersectarlos, pero haciéndose notar en el paisaje interior del proyecto.

Toda esta preocupación por la visualización y participación de la estructura en el espacio arquitectónico hace que sea un proyecto muy característico en el que el “casi nada” que tiene, sea principalmente la estructura y su geometría, imponiéndose a cualquier otro elemento secundario y estableciendo el principal carácter de la obra²⁰.



Proyecto del artista madrileño Iñigo Manglano Ovalle donde muestra la estructura de la casa 50x50 reduciendo a la mitad su escala e invirtiendo el edificio, de modo que el suelo ahora es techo y el mobiliario cuelga, de este modo pretende expresar las ideas que transmite el edificio a un espectador.

Imagen: <https://www.edgargonzalez.com/2012/03/27/mies-van-der-rohe-50-x-50-house-inigo-manglano-ovalle/>

²⁰ Información extraída de Mantovani Genari, Eduardo (2015) / *Mies Two-Way Span* / Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña.

OPTIMIZACIÓN Y MODELADO

Elección de los modelos

En el trabajo desarrollado se ha escogido información representativa para trabajar con ella de manera abstracta, ya que mucha información del proyecto no es precisa, por ello para evitar divagaciones sobre las cargas reales, limitaciones de flecha de la época y resistencia de materiales y tipo de perfiles, se ha optado por modelizar el proyecto de tal forma como si estuviese construido hoy día en España, según normativa española y con perfiles laminados actuales de manera que se parezca lo máximo posible a la idea original.

Para su estudio se van a utilizar una serie de modelos, no todos son fieles a los modelos reales, ya que muchos son de invención propia, combinaciones entre los existentes o modelos con ligeras variaciones, Obtenemos de esta manera gran cantidad de modelos inéditos y muy interesantes para su estudio y comparación con los más conocidos.

Con todos estos modelos se pretenden abarcar múltiples soluciones posibles para esta casa unifamiliar no construida, de forma que se muestre un abanico de posibilidades lo más amplio y diverso posible para poder entrar en valoraciones posteriormente.

Clasificación de los modelos

Los modelos que se van a presentar se dividen en 4 grupos fundamentales:

-Modelos con simetría total (V-2M2P)

Estos modelos tienen una malla simétrica en sus dos ejes y los pilares están ubicados de forma simétrica con respecto al centro, con doble simetría o simetría central.

-Modelos con doble simetría en malla y pilares no uniformes (V-2M1P)

Estos modelos tienen una malla con simetría en sus dos ejes, mientras que los pilares no mantienen posición idéntica en todas sus caras.

-Modelos con pilares no simétricos (V-0P)

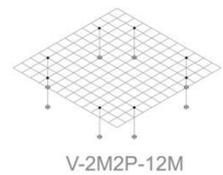
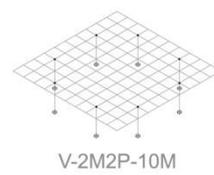
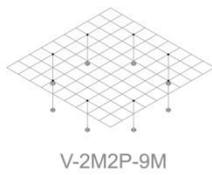
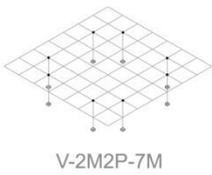
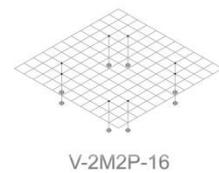
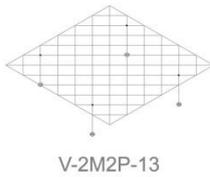
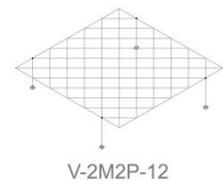
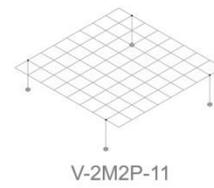
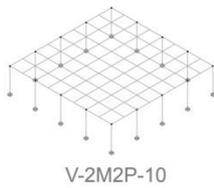
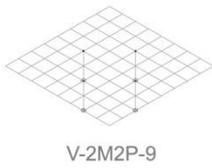
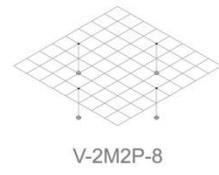
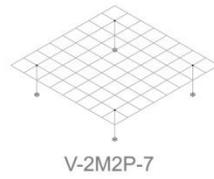
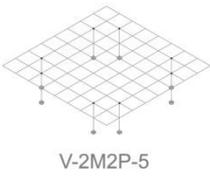
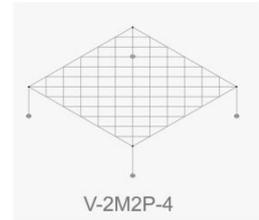
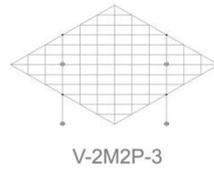
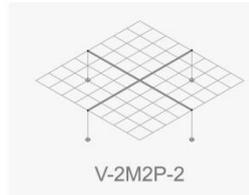
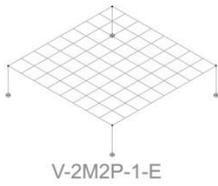
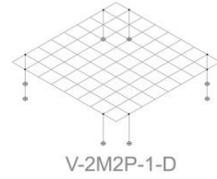
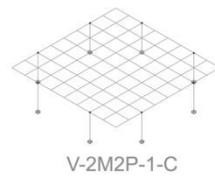
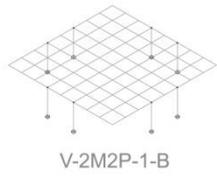
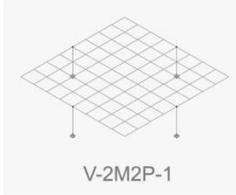
Estos modelos poseen pilares ubicados de forma tal que no cuentan con ningún eje de simetría

-Modelos con malla con un solo eje de simetría (V-1M)

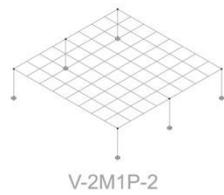
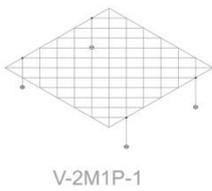
Estos modelos tienen una malla con un solo eje de simetría exclusivamente

En la página siguiente se muestra una tabla a modo de esquema general donde se recogen todos los modelos clasificados según su grupo, los que contienen un fondo gris corresponden a los modelos más conocidos desarrollados por Mies en sus dibujos.

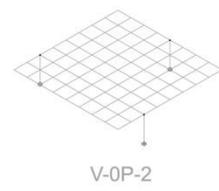
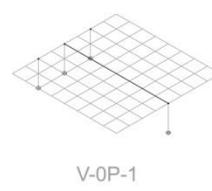
V-2M2P



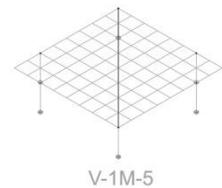
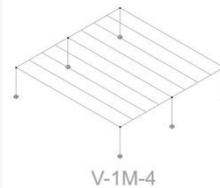
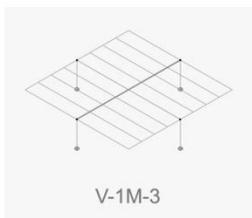
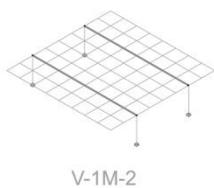
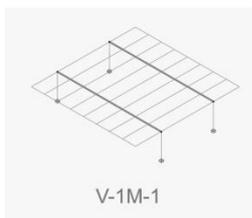
V-2M1P



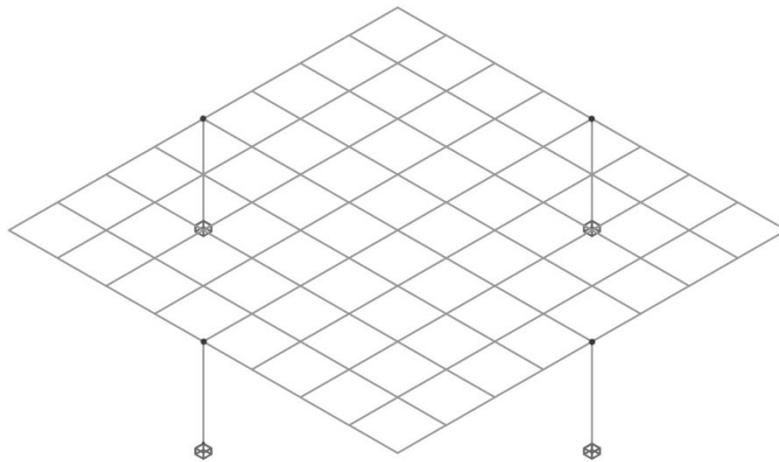
V-0P



V-1M



V-2M2P-1

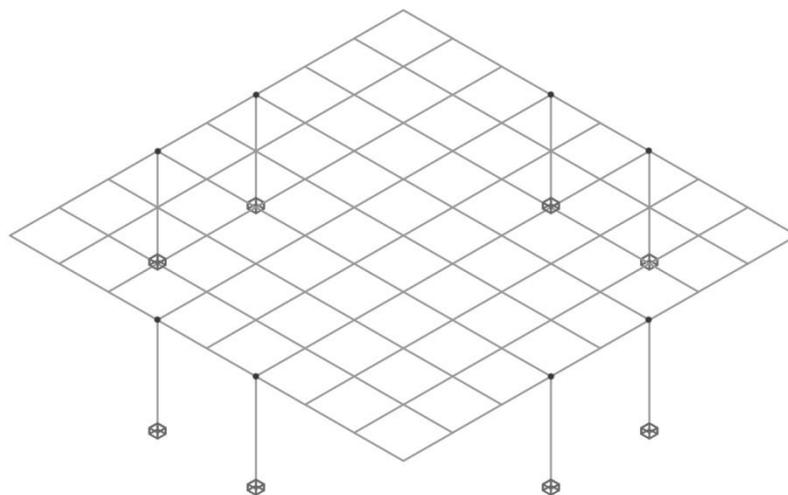


Este es el modelo más conocido, 4 pilares en el perímetro, ubicados en el centro de cada vano, dejando las esquinas en voladizo y liberándolas de la estructura, forjado bidireccional

De este modelos saldrán otras variantes donde se desplacen los pilares perimetralmente, de esta forma se analizará cual es la posición más idónea de los pilares para este modelo.

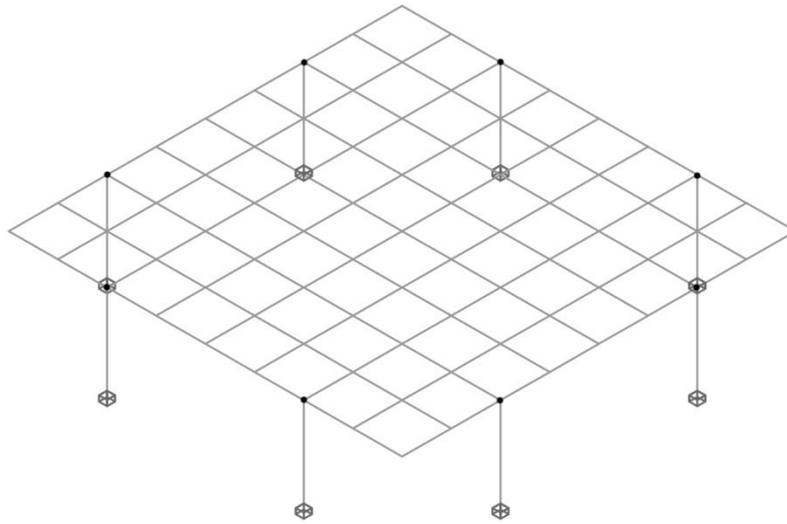
A continuación se mostrarán las variantes que parten de este modelo (V-D01) donde los pilares son desplazados perimetralmente:

V-2M2P-1-B



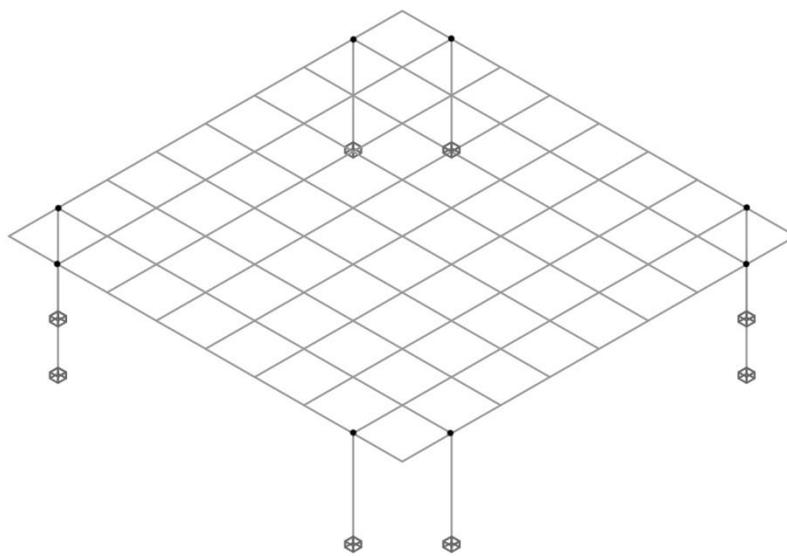
2 Pilares desplazados del central de cada vano perimetral una cuadrícula

V-2M2P-1-C



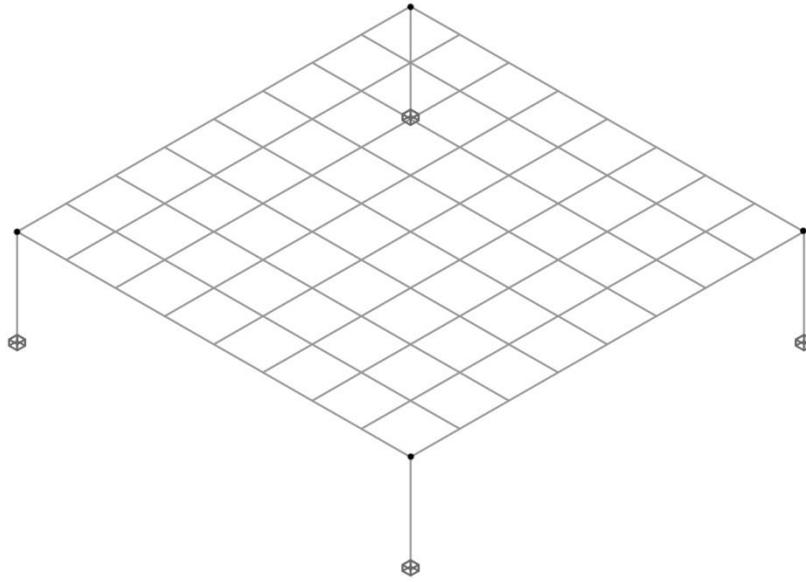
2 Pilares desplazados del central de cada vano perimetral dos cuadrículas

V-2M2P-1-D



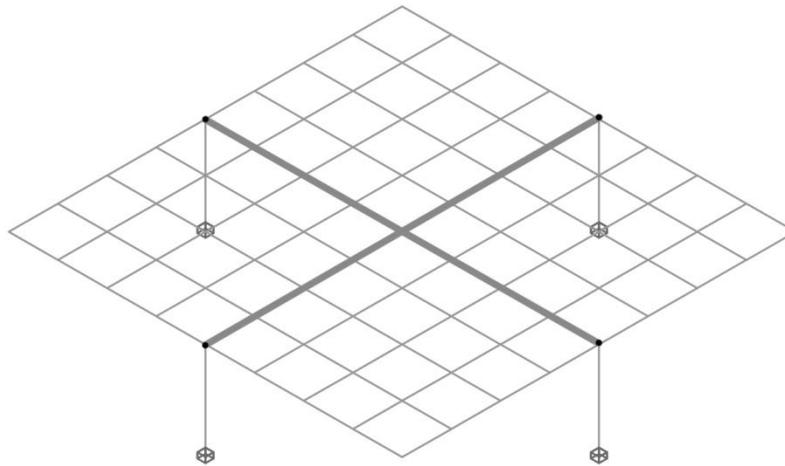
2 Pilares desplazados del central de cada vano perimetral tres cuadrículas

V-2M2P-1-E



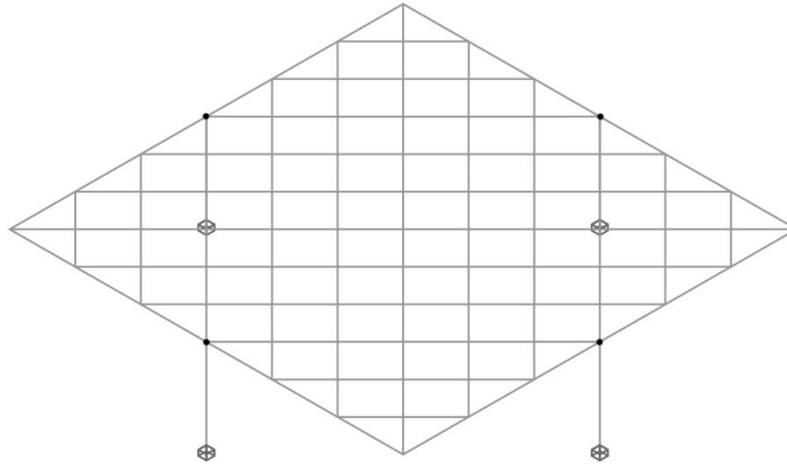
Pilares ubicados en las esquinas

V-2M2P-2



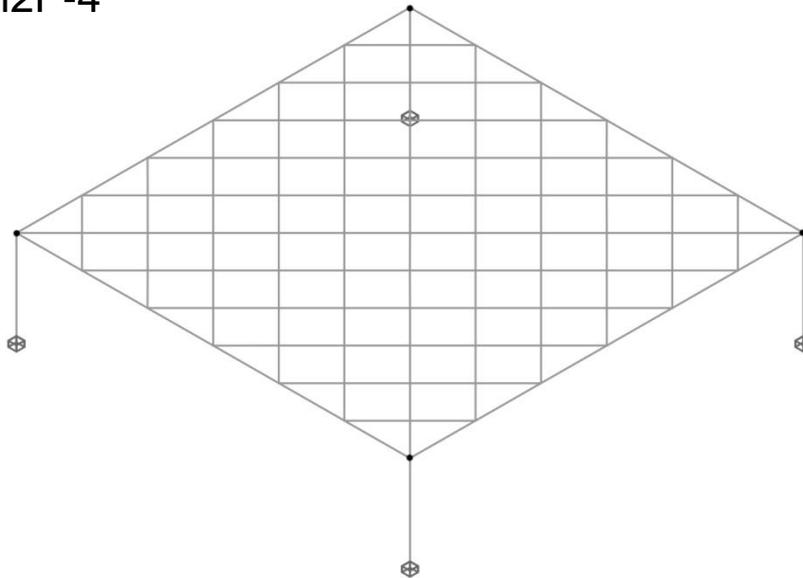
Este modelo utiliza la misma disposición de pilares que el modelo inicial (V-2M2P-1), también utiliza forjado bidireccional, la diferencia radica en que las vigas que acometen a los pilares son vigas de canto regular, de forma que los esfuerzos quedarán contenidos lo máximo posible en la cruz central.

V-2M2P-3



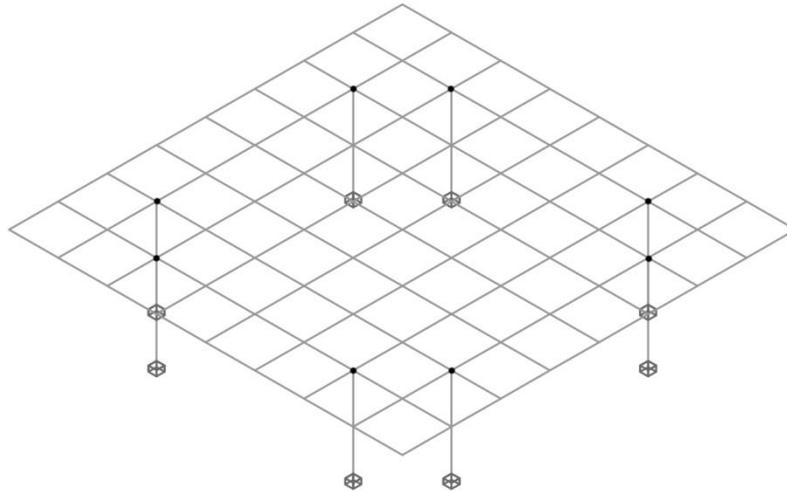
Este modelo es una sub-variante del anterior, su diferencia se encuentra en la trama de forjado bidireccional, esta se encuentra girada 45°

V-2M2P-4



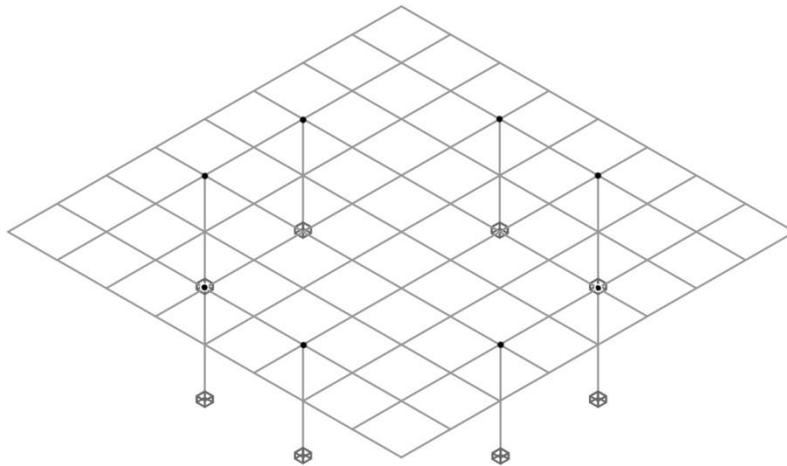
Este modelo tiene sus pilares perimetrales en las esquinas y utiliza un forjado bidireccional que se encuentra girado a 45°

V-2M2P-5



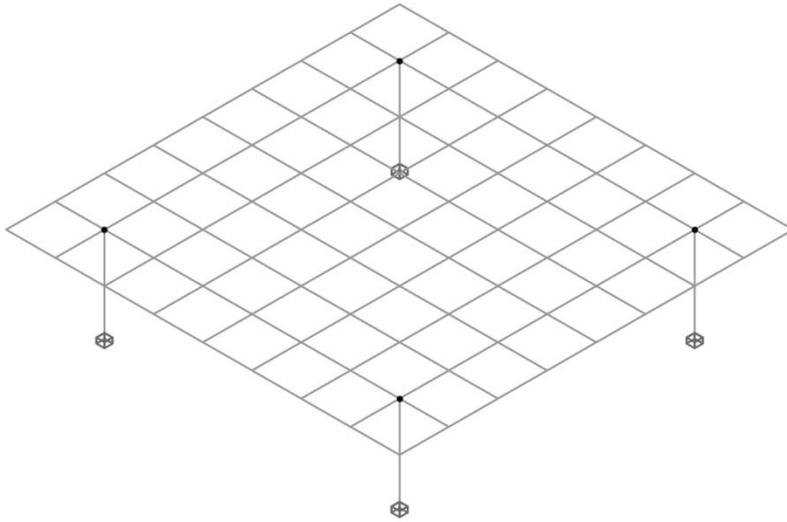
Este modelo deja el perímetro en voladizo, retrasando sus pilares perimetrales la distancia de un módulo, sitúa dos pilares en cada cara de forma que la esquina se libera la distancia de un módulo desde cada pilar, el forjado es bidireccional

V-2M2P-6



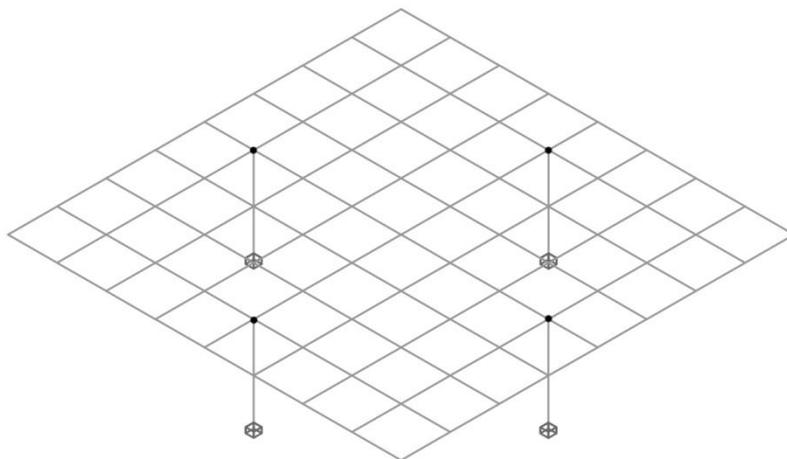
Este modelo es muy parecido al anterior, los pilares esta vez dejan un módulo más de separación en la esquina, el forjado es bidireccional nuevamente.

V-2M2P-7



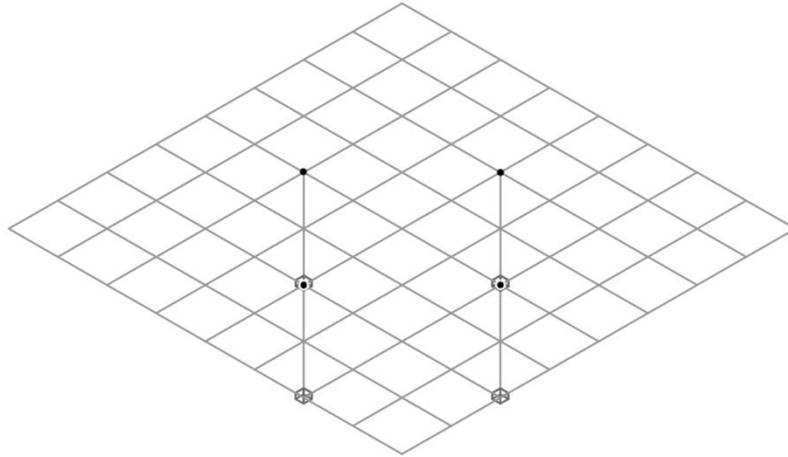
Este modelo también deja el perímetro en voladizo, pero esta vez los pilares son ubicados formando un cuadrado interior, el forjado es bidireccional

V-2M2P-8



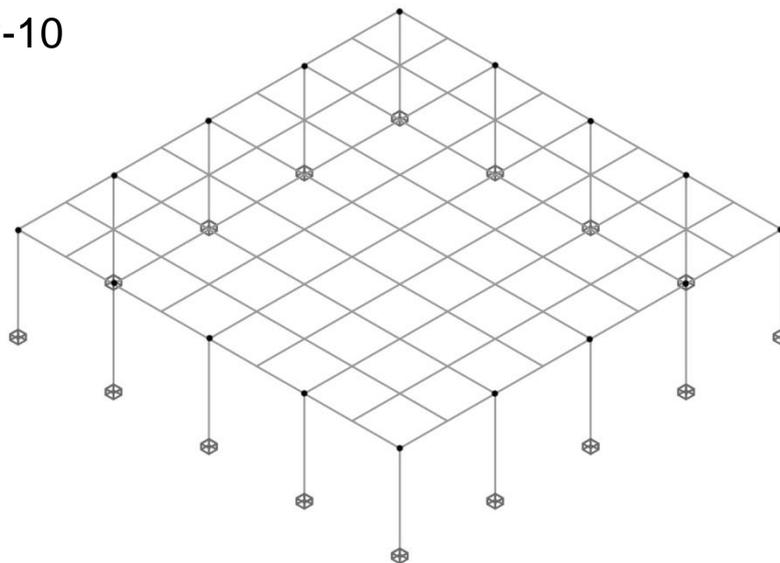
Este modelo variante del anterior, intenta utilizar la idea de generar voladizos que compensen el momento flector en el centro de la malla, los pilares se ubican como en el primer modelo para evitar la formación de esquinas.

V-2M2P-9



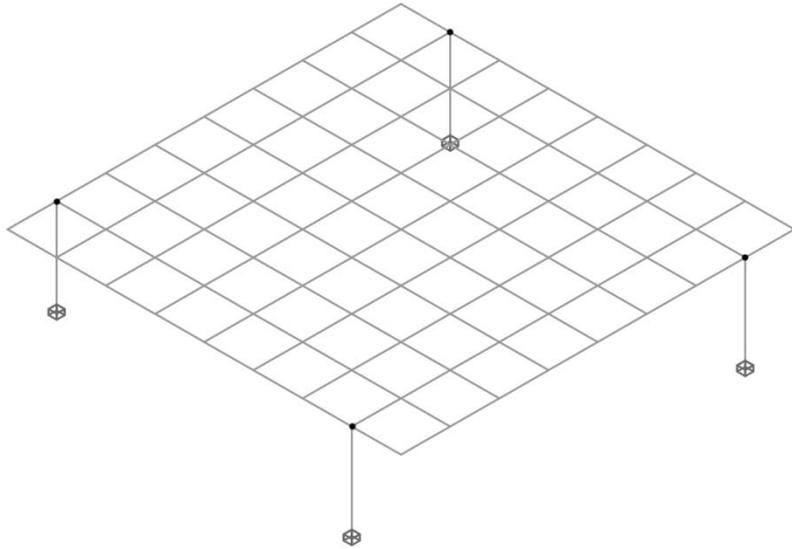
Este modelo es un intento de acercarse a la variante anterior a una solución mejor, ya que el pilar se encuentra justo en $L/2$ desde el extremo del voladizo hasta el centro, la disposición es idéntica al anterior.

V-2M2P-10



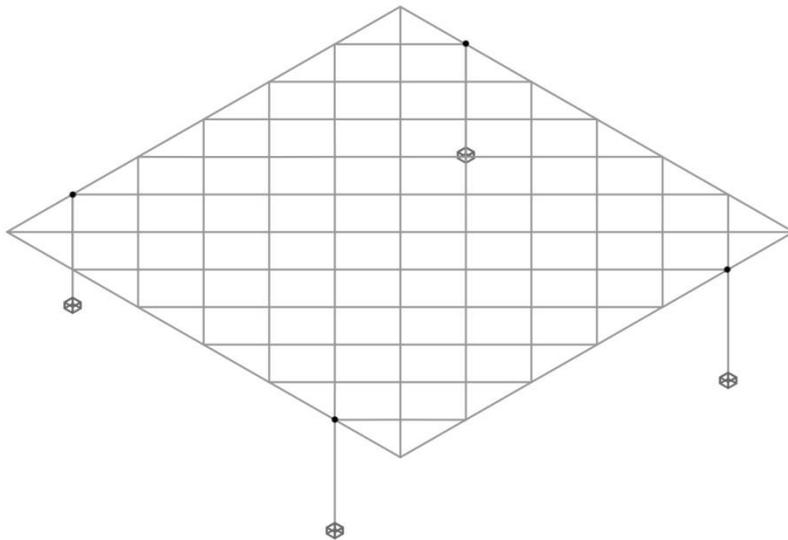
Este modelo se plantea como una solución con multitud de pilares con el objetivo de que por su menor tamaño se desmaterialicen de la escena interior, el forjado se vuelve a plantear bidireccional.

V-2M2P-11



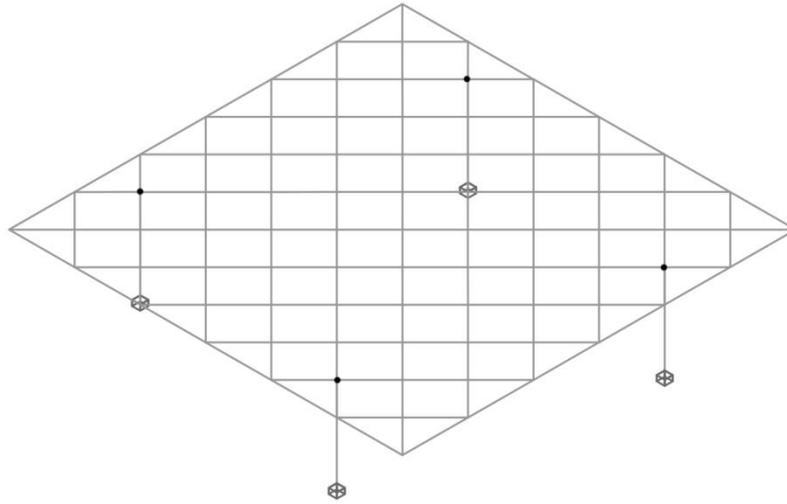
Este modelo utiliza un solo pilar por cara, pero este no encuentra ninguna relación de simetría con el resto, el forjado es bidireccional.

V-2M2P-12



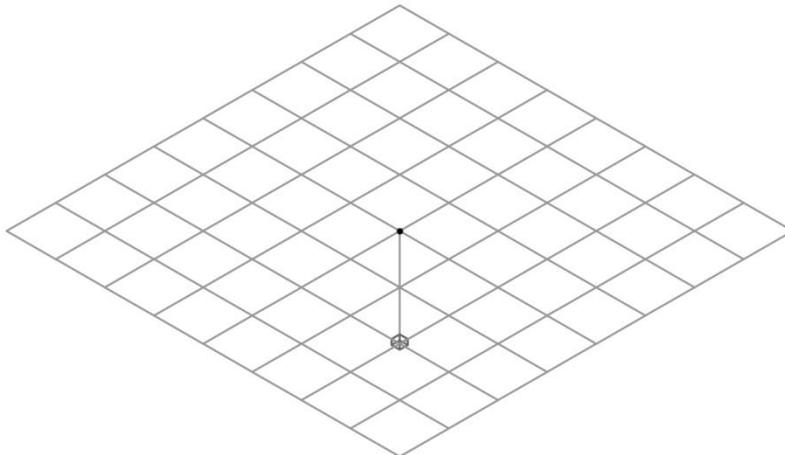
Este modelo es una variante del anterior, es semejante excepto en el forjado bidireccional, este se encuentra girado a 45°.

V-2M2P-13



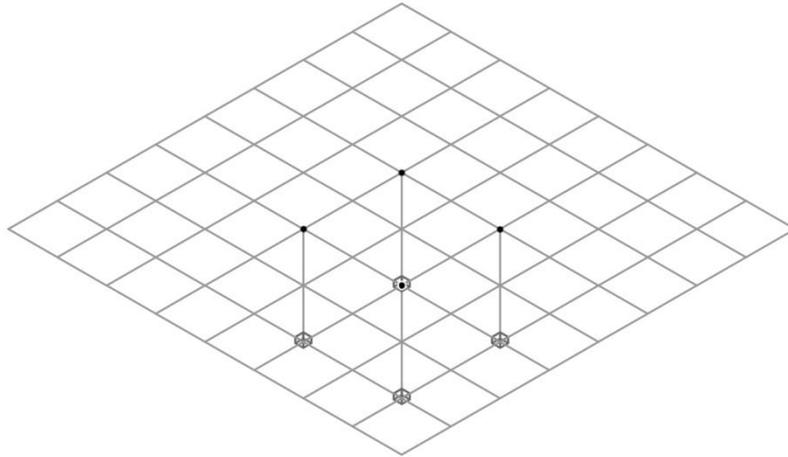
Este modelo es otra variante similar, esta vez los pilares se retranquean del perímetro dejándolo en voladizo, el forjado se encuentra también girado a 45°.

V-2M2P-14



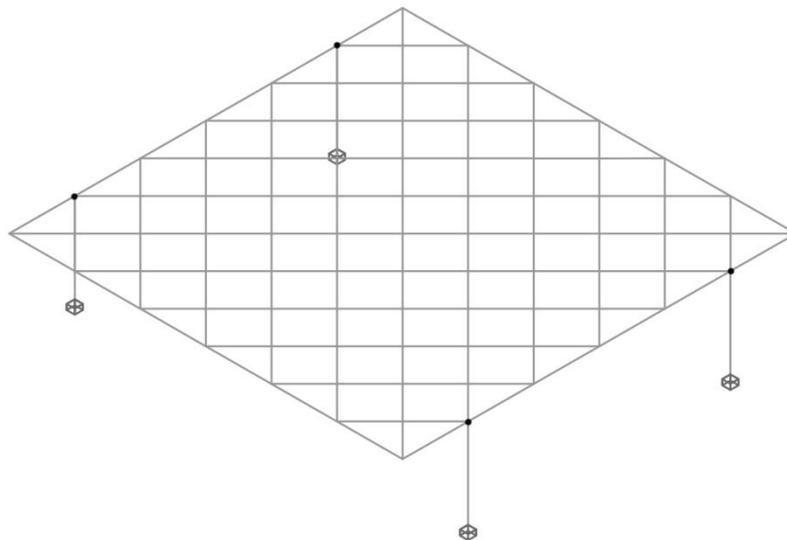
Este modelo se basa en el funcionamiento de la estructura de “paragüas” de Félix candela, un solo pilar central que sostiene toda la cubierta en voladizo.

V-2M2P-15



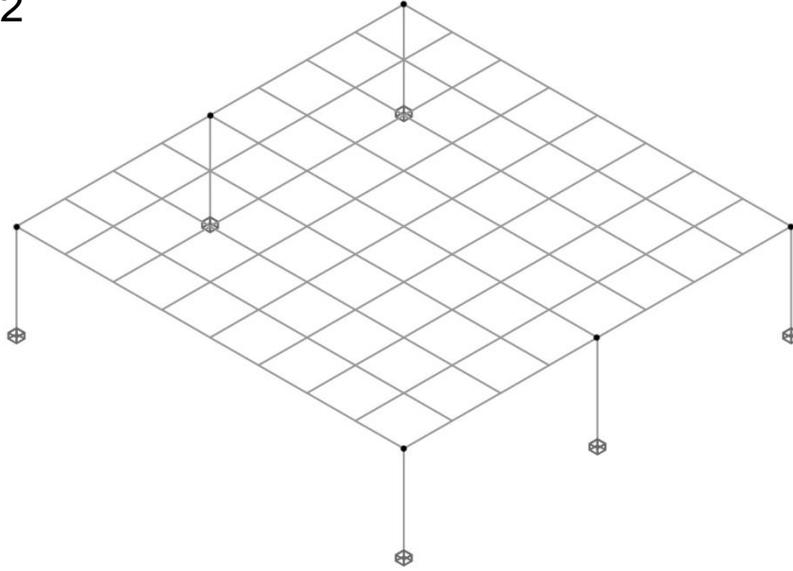
Este modelo es una variante del anterior, es semejante excepto en los pilares, el pilar central del modelo anterior ahora aumenta su inercia convirtiéndose en 4 pilares que orbitan el centro más pequeños con dos módulos de separación entre ellos dejando el resto del forjado bidireccional en voladizo

V-2M1P-1



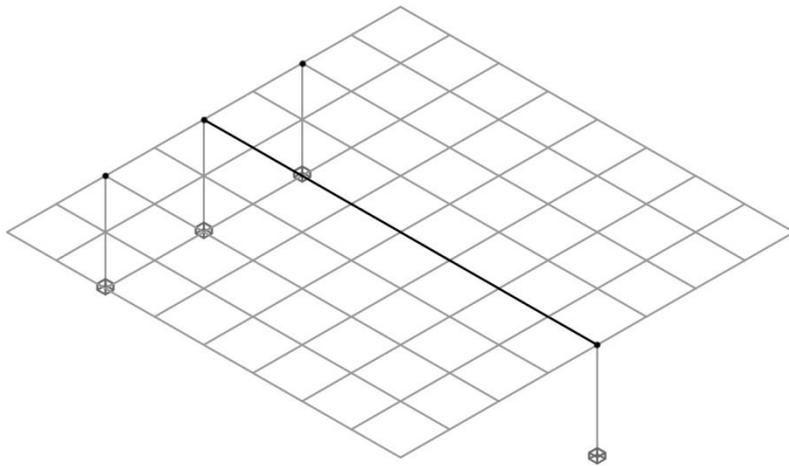
Este modelo es una mezcla entre la variante V-1M-2 y la variante V-2M2P-3, mezcla la disposición de los pilares enfrentados dos a dos con la geometría del forjado bidireccional girado 45°

V-2M1P-2



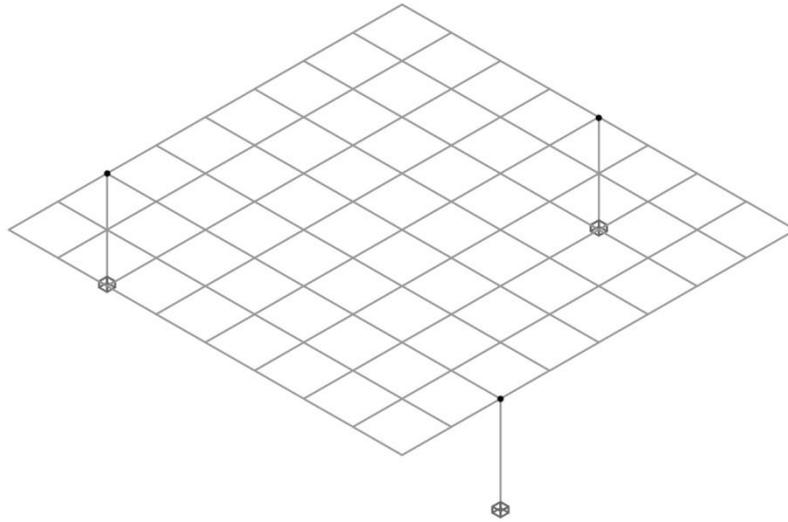
Este modelo contiene 3 pilares perimetrales enfrentados con otros tres en su cara opuesta, deja las otras dos caras libres y utiliza un forjado bidireccional

V-P0-1



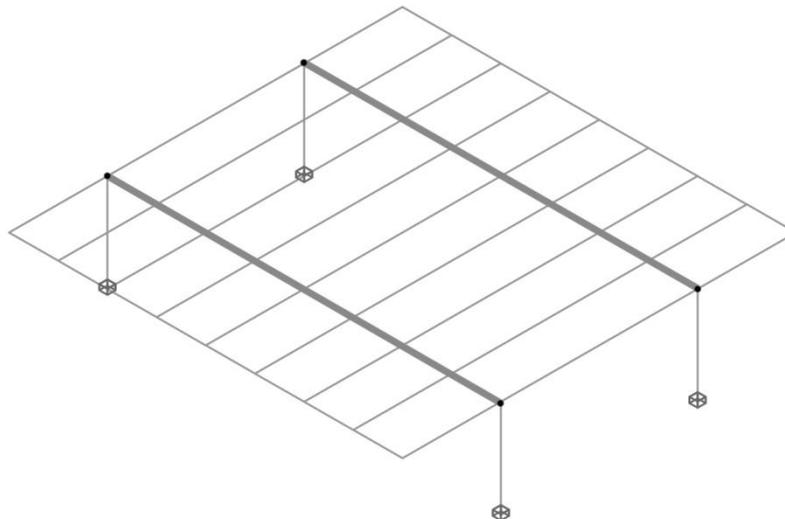
Este modelo deriva del anterior, ya que su funcionamiento también se basa en una viga de sección homogénea que pretende recoger la mayoría de los esfuerzos de la malla bidireccional del forjado, los pilares se sitúan formando un triángulo.

V-P0-2



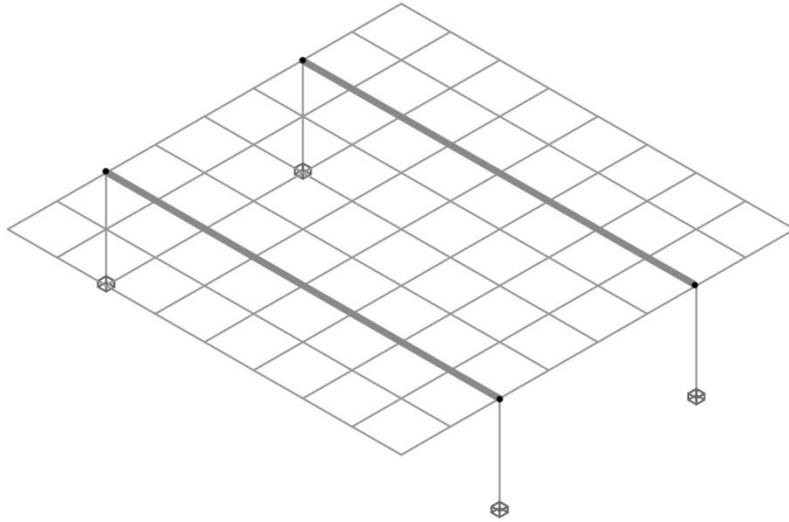
Este modelo contiene tres pilares, conforma el modelo más heterogéneo y rompedor con respecto a la idea original del proyecto ya que uno de los tres pilares se sitúa en el centro de vano perimetral mientras que los otros dos se sitúan desplazados, el forjado es bidireccional.

V-1M-1



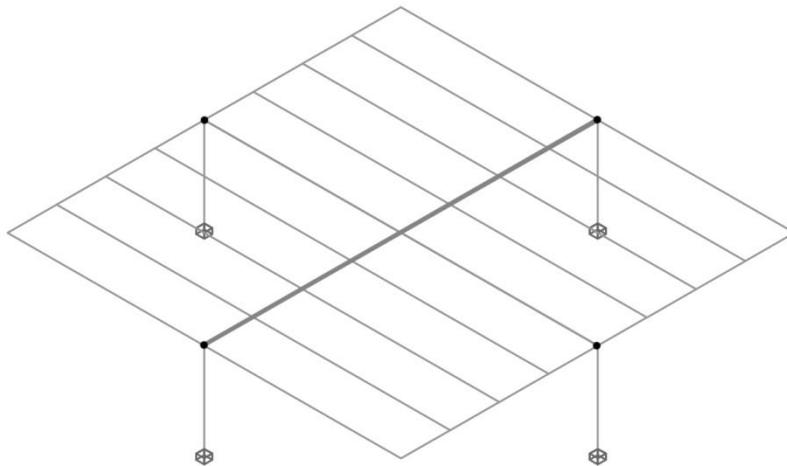
Este modelo parte de la concepción de un forjado unidireccional en lugar de uno bidireccional, los pilares se encuentran enfrentados dos a dos dejando dos caras libres de pilares y las esquinas en voladizo, dos vigas de sección regular atraviesan la luz de pilar a pilar.

V-1M-2



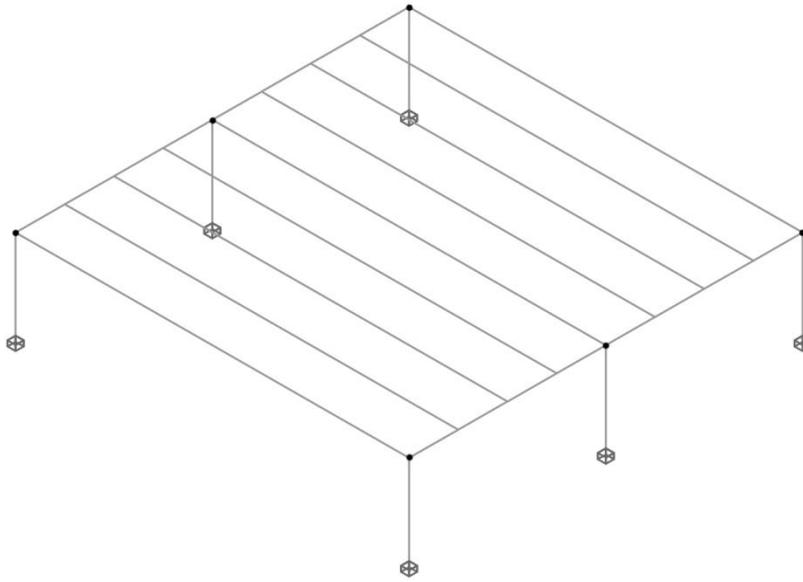
Este modelo es semejante al anterior, con la salvedad de que el forjado unidireccional pasa a ser un forjado bidireccional.

V-1M-3



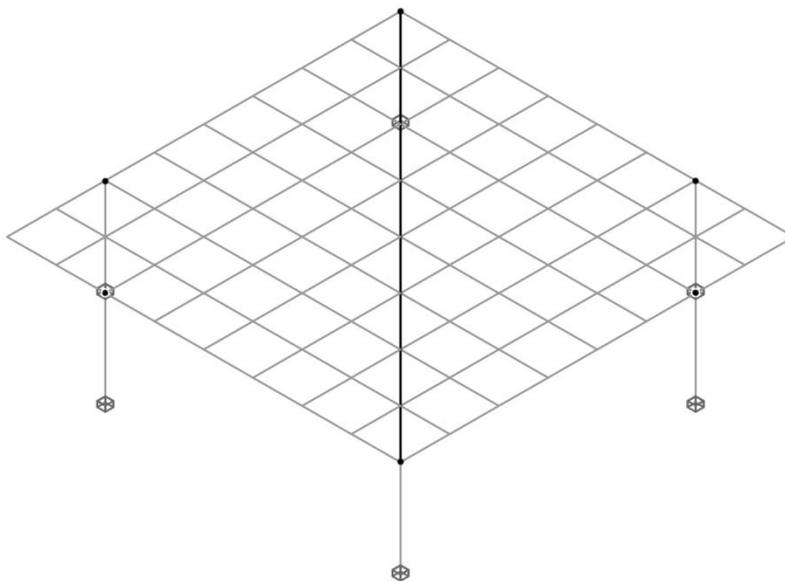
Este modelo utiliza un forjado unidireccional, similar al de la variante V-1M-1, con una disposición de pilares en el centro de cada vano perimetral por los que pasan dos vigas cruzadas de canto regular, similar a como le ocurre al modelo V-2M2P-2

V-1M-4



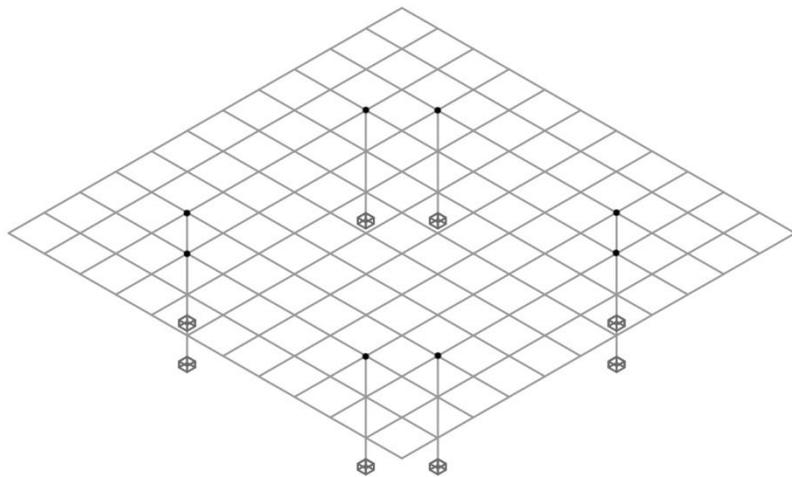
Este modelo es una variante del anterior, es similar salvo en su forjado que pasa a ser unidireccional

V-1M-5



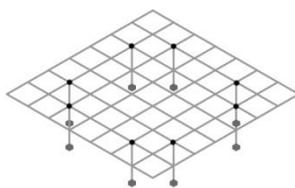
Este modelo basa su funcionamiento en una viga diagonal de sección homogénea que absorberá los esfuerzos del forjado bidireccional, los pilares se sitúan de manera simétrica con respecto a la diagonal, dejando las esquinas perpendiculares a la diagonal en voladizo

V-2M2P-16

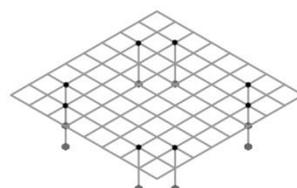


Este modelo es bastante peculiar, por ello se muestra en último lugar, ya que es el único que tiene un paso de malla diferente con respecto a los que propuso Mies originalmente, se adelanta que esta es el tipo de estructura más liviana y por ello se ha pretendido variar el paso de la malla con diversos tamaños para encontrar la posición óptima de los pilares, encontrando finalmente en este de 11 divisiones por lado la solución más óptima.

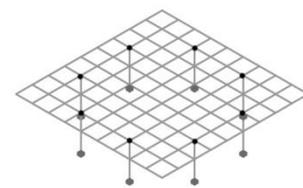
A continuación se muestran algunas de las variantes que han precedido a este modelo (sólo los similares a este que modifican el número de divisiones por cara de la malla):



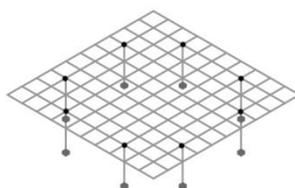
V-7M



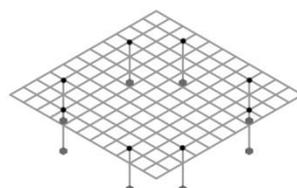
V-8M



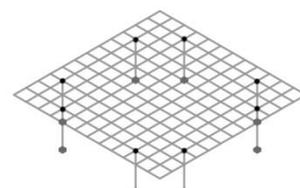
V-9M



V-10M



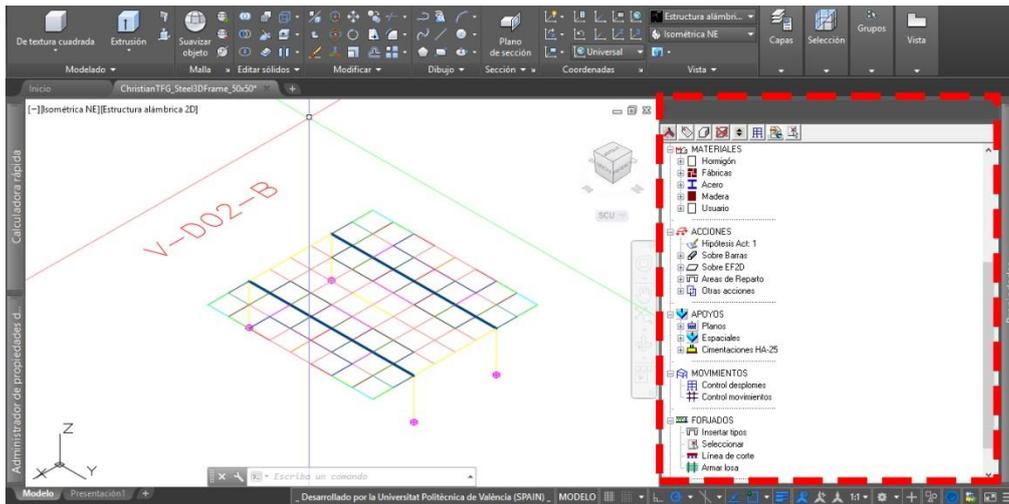
V-11M



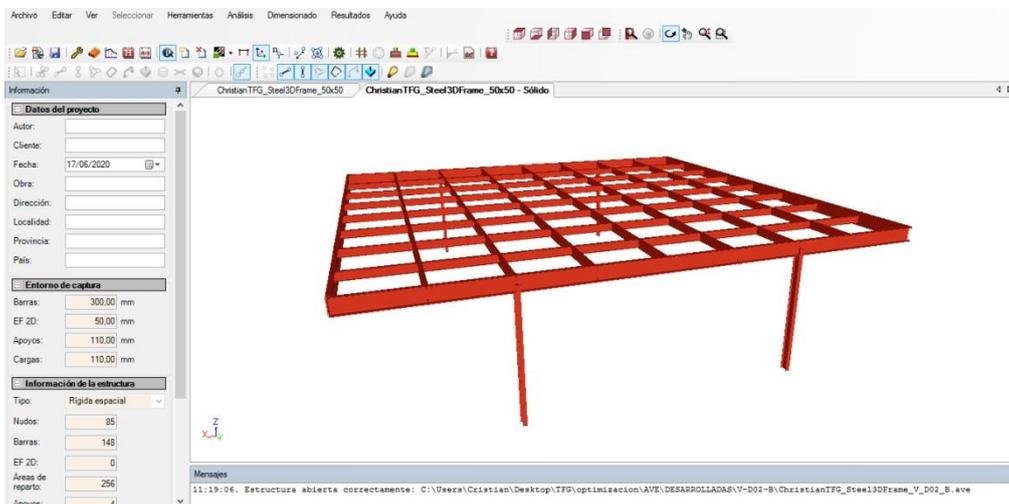
V-12M

Cómo funciona la modelización:

La modelización consiste en recrear el modelo de forma que el programa pueda leerlo, en mi caso al estar utilizando el programa informático de cálculo estructural Architrave, he dibujado los modelos en 3D utilizando el programa AutoCAD, ya que Architrave incorpora una herramienta de modelización mediante la cual permite atribuir propiedades a las barras y establecer los parámetros, de este modo he podido fijar en las líneas generadas por AutoCAD los perfiles estructurales, que son leídos en el sentido transversal de las líneas.



En el cuadrado menú de la extensión para modelizar en Architrave



Estructura sin calcular recién abierta en Architrave en su modo visualizar sólido

Para completar la modelización he marcado las condiciones de contorno, incluyendo empotramientos de los pilares en el suelo, flechas máximas según CTE y la carga repartida en cubierta, que en este caso he supuesto a partir de algunos de los dibujos de los modelos en los que Mies muestra una posible solución de cubierta²¹, debido a esto en los modelos se opta por una solución de chapa metálica sobre viguetas con capa de formación de pendientes.

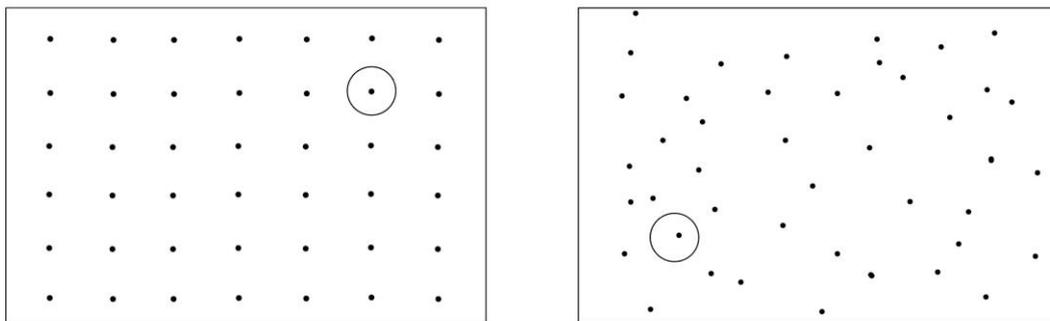
²¹ Información extraída de Van Der Rohe, Mies / editado por Drexler, Arthur / notas Schulze, Franz y Drexler, Arthur (1986-1992) / *The Mies van der Rohe archive*.

Cómo funciona la optimización:

La optimización en estructuras es un proceso mediante el cual se busca la mejor manera de construir una estructura en función de varios criterios posibles: peso de la estructura, grado de hiperestaticidad, tamaño máximo de los elementos estructurales, economía,... pudiéndose también mezclar entre sí varias variables.

En nuestro caso se utiliza un algoritmo desde una herramienta web de optimización, procesada desde la Universitat Politècnica de València con 5 ordenadores funcionando en paralelo, cada uno con dos procesadores. Estos equipos son los que procesan todo el trabajo lanzado hacia la web, este trabajo de optimización se relaciona con el programa informático de cálculo estructural Architrave, ya que utiliza su mismo motor de cálculo (SIMEST) sin necesidad de pasar por el propio programa ahorrando tiempo de procesamiento, tras la optimización se obtienen como resultado ficheros AVE, que es la extensión utilizada por esta herramienta.

Generalmente hay dos formas de realizar un algoritmo de optimización, este puede ser sistemático (rastreando todas las soluciones), o por el contrario este algoritmo puede ser aleatorio, dando multitud de soluciones de las cuales hay que descartar las no válidas y escoger la mejor según el criterio que queramos seguir, el algoritmo utilizado en esta herramienta de optimización forma parte de esta segunda clasificación.

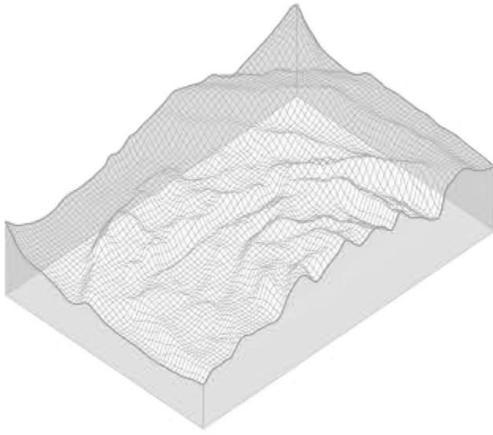


En las imágenes se muestran dos esquemas metafóricos para comprender los tipos de algoritmos optimizadores, el cuadrado representa el problema y el círculo la solución, en la primera imagen se muestra un procedimiento sistemático, donde desde un punto se llega a la solución y en el segundo se muestra un procedimiento aleatorio, de donde entre todos los puntos los únicos que no serán descartados serán los que logren encontrar la solución.

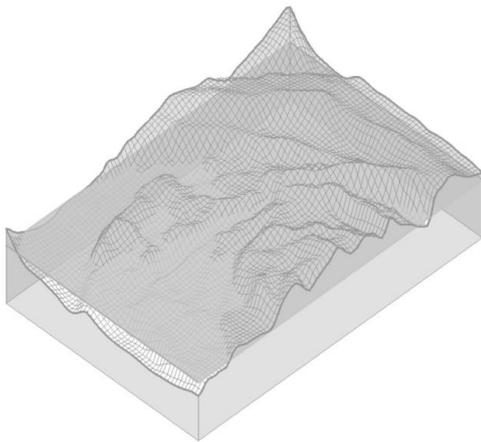
Nuestro procedimiento optimizador funciona con un algoritmo VTAM (Vast Territories Aerial Mapping), este algoritmo utiliza una representación topográfica 3D generando colinas y valles, utiliza la altitud relacionándola con las variables del problema, donde el punto más bajo representa la solución más óptima en función a esas variables.

El procedimiento funciona en base a dos parámetros generales, el primero de ellos el parámetro optimizador, en nuestro caso es el peso global de la estructura, y en segundo lugar el cumplimiento de la estructura, este segundo parámetro será representado como el nivel del mar de estas colinas y toda solución que quede por debajo de esta malla automáticamente será descartada²².

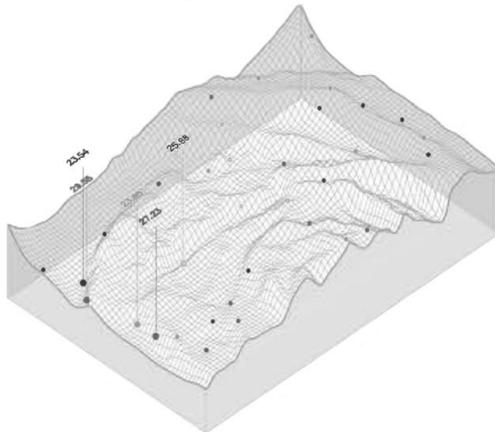
²² Información extraída de Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Vllora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM.



Representación 3D del terreno



Representación 3D del terreno con el nivel del mar



Representación 3D del terreno con el nivel del mar y los puntos lanzados

Fuente de las imágenes: VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM

Realmente la solución óptima es un concepto poco realista cuando utilizamos un algoritmo de este tipo, ya que la solución óptima debería coincidir exactamente con el punto más bajo de todos, y en contraposición el algoritmo funciona buscando mínimos locales y una vez encontrados lanza puntos cercanos a este, pudiendo quedar atrapado en un valle próximo a un mínimo local sin ser el mínimo absoluto. Para evitar esto se recurre a lanzar en paralelo varias veces el mismo proceso para que de esa forma haya más diversidad de soluciones y el algoritmo pueda escoger la mejor²³.

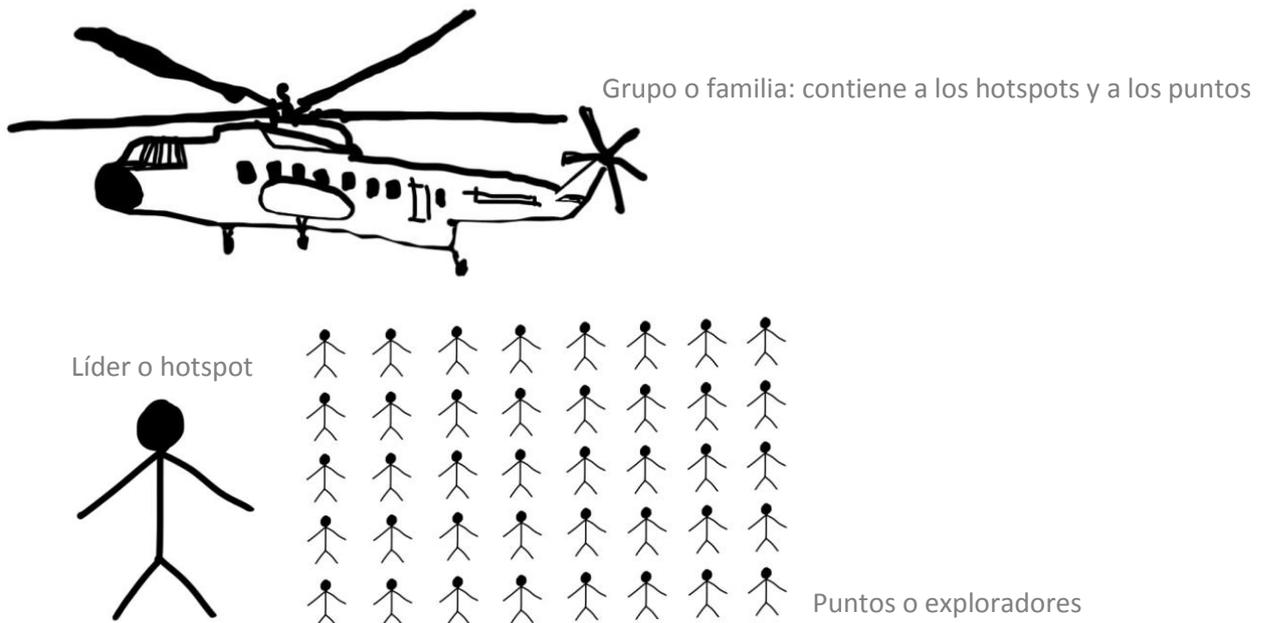
²³ Información extraída de Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Vllora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM.

Para encontrar las distintas soluciones con el algoritmo optimizador aleatorio se recurre a un sistema de procedimiento que desarrollaremos a continuación



Este dibujo representa una simplificación bidimensional del terreno 3D generado por el algoritmo VTAM para que pueda comprenderse mejor, la línea negra representa el parámetro optimizador en función de su altura y la línea gris representa a la malla que acota el cumplimiento o no de los elementos estructurales

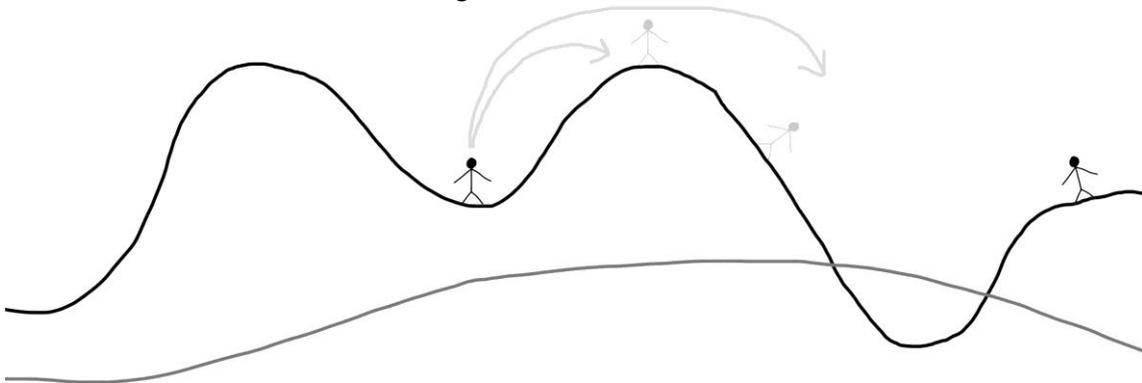
El programa de optimización tiene la posibilidad de crear varios grupos o familias, cada uno de esos grupos está presidido por un líder (Hotspot) que también puede ser cambiado a más de un líder, cada líder a su vez tiene una serie de puntos o exploradores a su jurisdicción que serán los que busquen la solución entre nuestras colinas, según la complejidad y dificultad del cálculo harán falta más líderes, grupos o puntos²⁴.



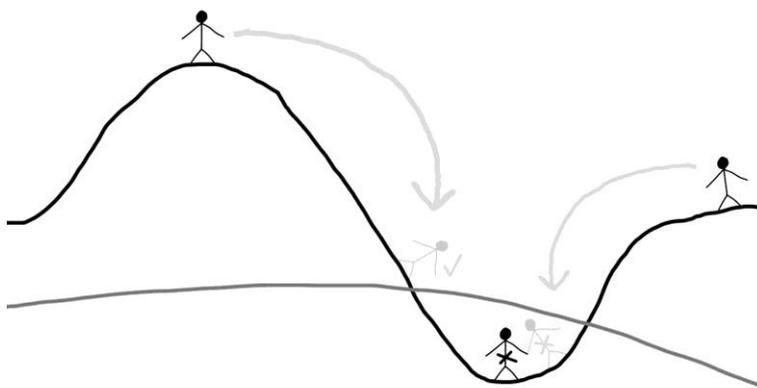
²⁴ Información extraída de Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Villora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM.

En una primera instancia se lanzan todos los puntos aleatoriamente por el relieve intentando distribuirlos para barrer la máxima cantidad de terreno posible, los hotspots o líderes comienzan a lanzar a sus exploradores, cada uno de estos exploradores comprobará como es el terreno a su alrededor, de entre todos los puntos encontrados por los exploradores, el líder decidirá cuál es el punto más bajo y este será el foco magnético del resto de exploradores de la familia que viajarán en una línea recta hacia el punto más bajo encontrado.

El movimiento hacia la línea recta marcado por el punto más bajo es aleatorio y muy interesante, ya que está basado en la propia experiencia de la naturaleza, por ejemplo en el movimiento de una abeja, mosca o hormiga en la búsqueda de alimento, su movimiento empezará en una cierta dirección y magnitud hasta que decida cambiar de dirección cambiando también la magnitud desplazada, este tipo de movimiento aleatorio generado por la selección natural a lo largo de los años es el que ha permitido minimizar el espacio recorrido en función del tiempo, dándole mayor oportunidad de encontrar alimento y por tanto de sobrevivir a las especies, en cierto modo esto es lo que intenta imitar en el algoritmo añadiendo desplazamientos aleatorios hacia el punto más bajo, de forma que si hay un mínimo relativo exista la posibilidad de poder saltarlo si el valor de movimiento obtenido aleatoriamente es lo suficientemente grande.



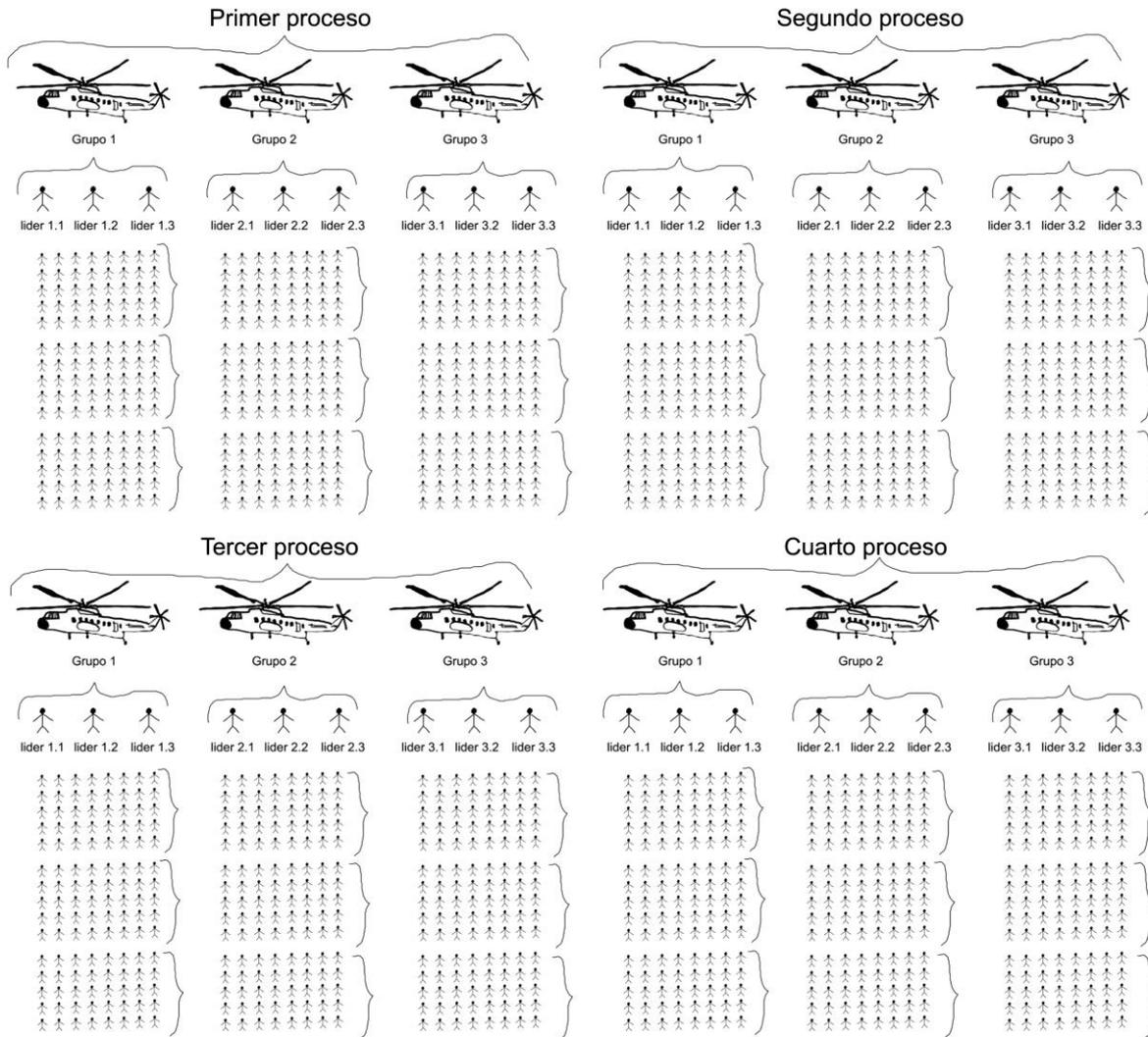
Puede ocurrir que el explorador obtenga un valor de movimiento elevado, tal que salte por encima del punto más bajo encontrado, de este modo existe la posibilidad de rastrear también las colinas y valles que quedan detrás del punto aumentando las posibilidades de encontrar una solución muy próxima al mínimo absoluto.



En el dibujo se muestra como una solución fuera de la malla que acota el cumplimiento de la estructura también tienen la capacidad de atraer a otros puntos, ya que aunque algunos puntos queden fuera de la malla de esta forma se consiguen más posiciones cercanas al mínimo²⁵. (Esta opción puede ser desactivada aunque no se recomienda)

²⁵ Información extraída de Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Vllora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM.

Si el problema es muy homogéneo y por casualidad los puntos se encuentran atraídos hacia una misma zona que no representa la mejor solución, el programa tiene un as en la manga, y es que como hemos mencionado anteriormente, no lanza exclusivamente un proceso, sino que desde la página de optimización se puede fijar el número de procesos. Estos procesos vienen a significar el número de veces que se repite la operación de lanzar a los grupos, que a su vez lanzan a los líderes (Hotspot) que a su vez lanzan a los puntos repetidas veces, habrá que fijar una tolerancia desde la página, ya que el lanzamiento de los exploradores en cada proceso se repetirá hasta que la diferencia entre la solución anterior y la actual sea menor que la tolerancia que hayamos fijado desde la web optimizadora²⁶.



En el dibujo se representa la cantidad de elementos lanzados si establecemos 4 procesos de 3 grupos con 3 líderes con 20 puntos cada uno, hay que tener en cuenta que cada explorador se moverá hasta que se supere la tolerancia indicada.

De esta manera se consigue una multitud de posiciones para los puntos con muchas interacciones entre ellos, lo que nos ayuda a recorrer el problema casi en su totalidad encontrando así como solución un punto muy cercano al mínimo absoluto.

²⁶ Información extraída de Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Vllora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Criterios de optimización:

En este caso al utilizar un algoritmo vemos objetivamente cual es la mejor solución, sin embargo todavía el algoritmo se podría desarrollar más para que se introdujesen factores de penalización por forma o espacio, de momento y hasta que una inteligencia artificial no cumpla con este trabajo, para conseguir un juicio en pro de la calidad de la arquitectura necesitamos aportar nuestro juicio subjetivo utilizando la valiosa información obtenida por el algoritmo, surge la pregunta de: ¿cuál es el precio a pagar para conseguir una arquitectura determinada?, y es que las grandes obras de arte siempre han tenido un precio.

Como criterio base para la optimización se ha fijado el peso de la estructura (volumen de acero), ya que es uno de los factores más importantes en cuanto a la economía de la estructura, sin embargo se barajarán otras variables importantes como son el espacio y la forma, consiguiendo encontrar mano a mano con el algoritmo un equilibrio entre precio de la estructura y calidad del proyecto.

Resultados de la optimización:

La herramienta optimizadora trabaja con familias, es decir con elementos idénticos entre sí, gracias a ellas el coste computacional se reduce mucho y posibilita la optimización. A través de un error se enviaron familias con doble simetría geométrica y simple simetría, esto provocó que el algoritmo no encontrase en algunos casos una solución óptima, este problema se solucionó imponiendo en las familias exportadas una doble simetría, ya que sabemos que corresponde con la solución más óptima por el carácter bidireccional de su geometría.

Como resultado de la optimización se han recopilado fichas de cada modelo, cada ficha corresponde al mejor de 2 intentos de modelizar cada variante, en las fichas se incluye peso de cada variante, sus perfiles máximos, dibujo del sólido de la estructura resultante, dibujo de su deformada y los esfuerzos axiales, cortantes y momentos en diagrama indicando el punto de valor máximo de cada uno de ellos para tener un orden de magnitud.

También se incluye una valoración donde se toman 3 puntos clave: Espacio, Estructura y Forma (Segura 2008). Estos 3 puntos claves se valorarán de la siguiente manera:

Espacio:

Para que el espacio sea óptimo los pilares deberán de quedar en el perímetro sin romper la diafanidad del espacio, la modulación es importante ya que llena de cualidad el espacio.

Estructura:

Tomaremos como punto de partida el peso de la estructura de la variante más conocida, que queda en torno a los 90KN, y a partir de ese peso compararemos el modelo a estudiar, ya que el peso repercute negativamente en la economía de la estructura

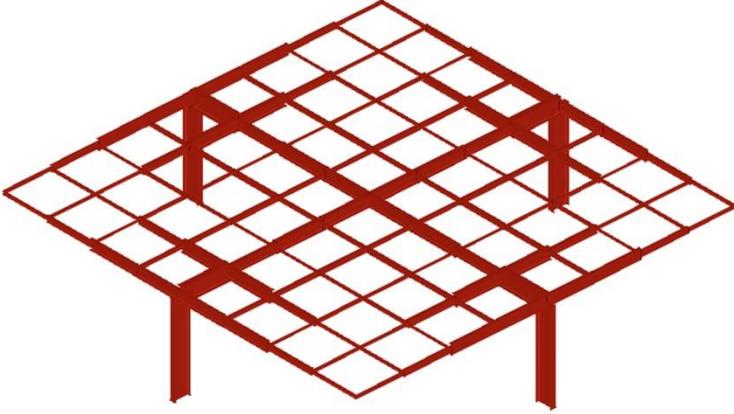
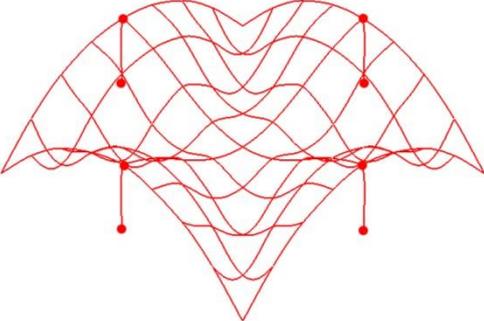
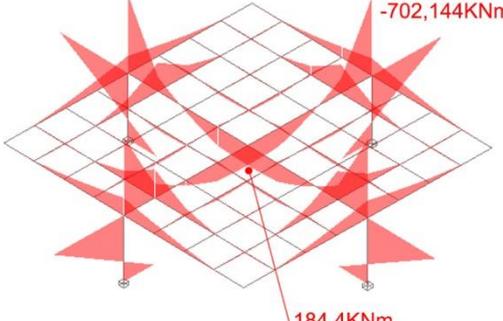
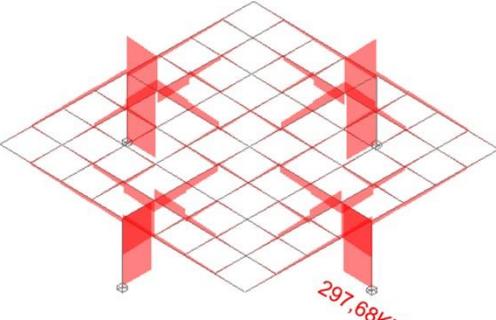
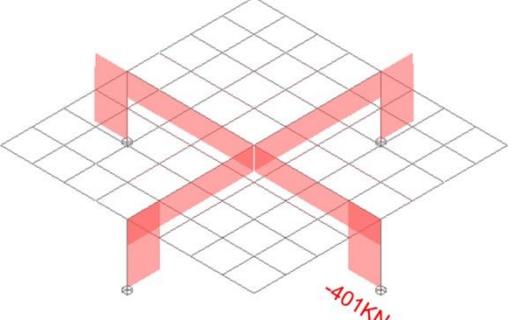
Forma:

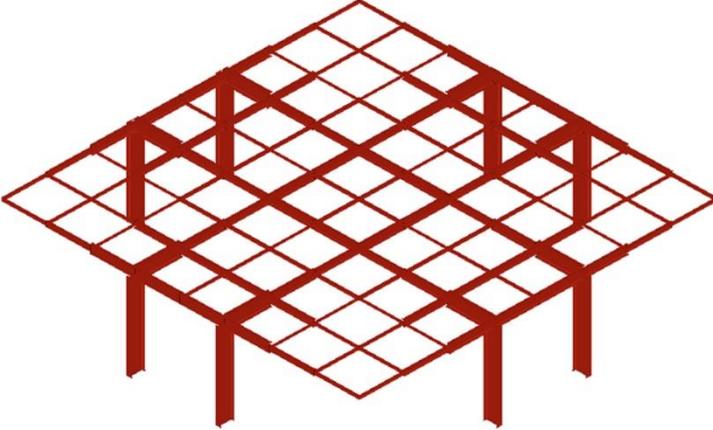
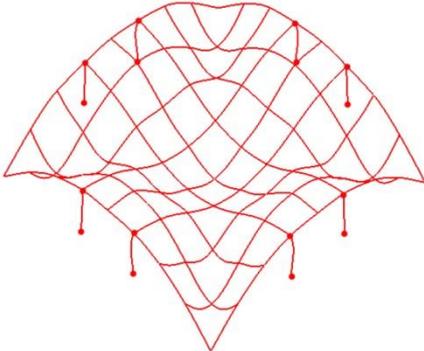
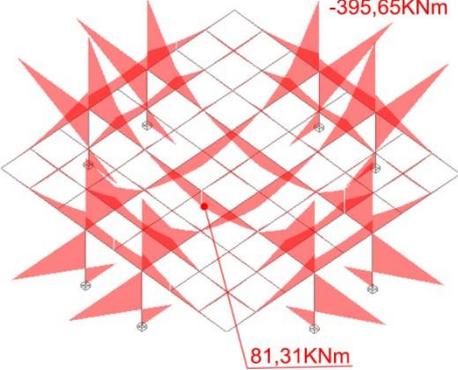
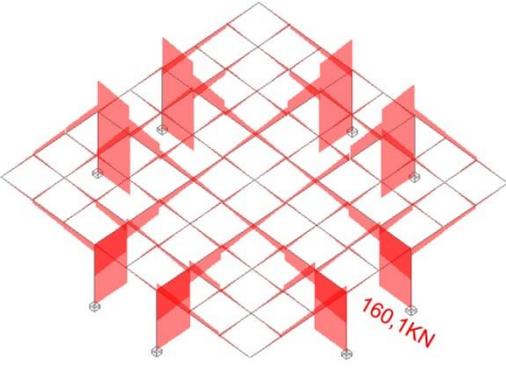
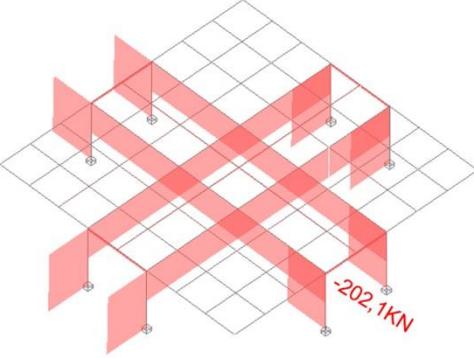
Para que la forma encaje con la geometría cuadrada del proyecto, la forma debe responder a la doble simetría, también deberá de tener un número de pilares múltiplo de los lados del cuadrado y toda irregularidad penalizará en la simpleza y pureza de la variante.

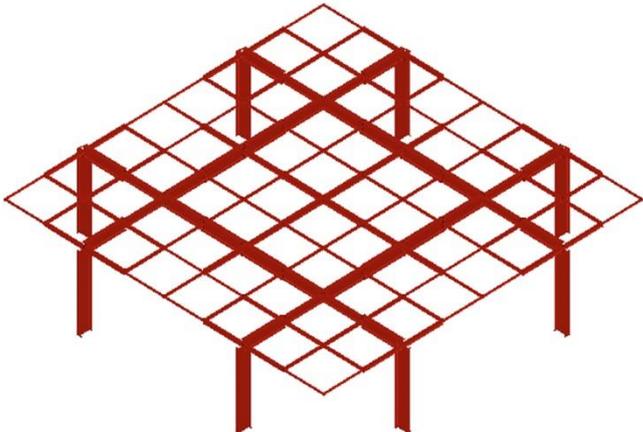
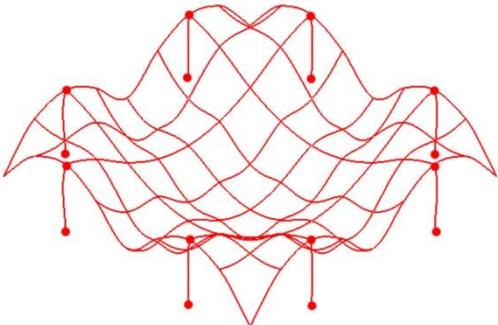
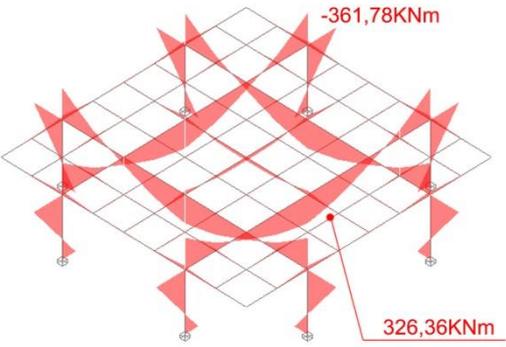
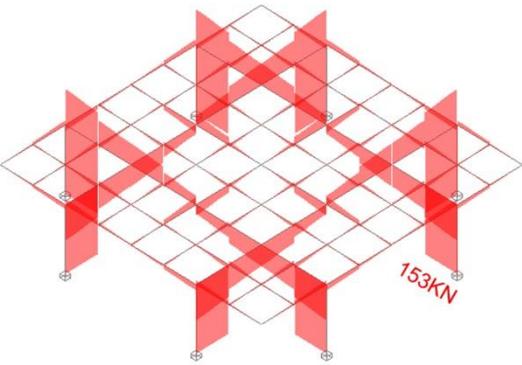
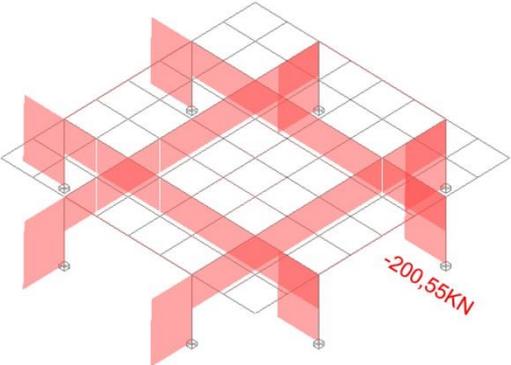
Todos estos puntos se calificarán en orden descendente según la siguiente nomenclatura:

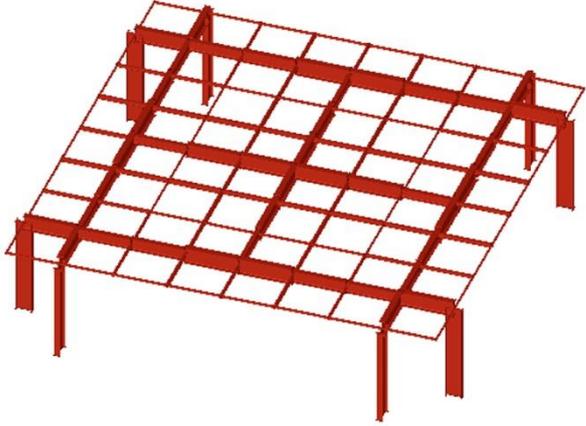
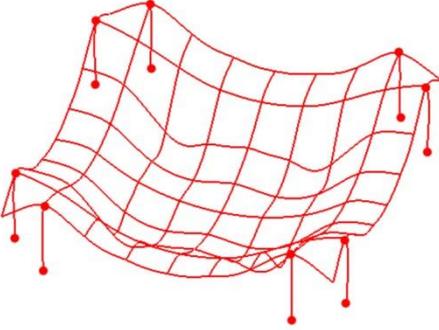
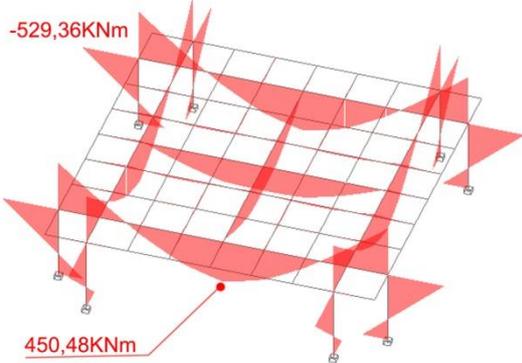
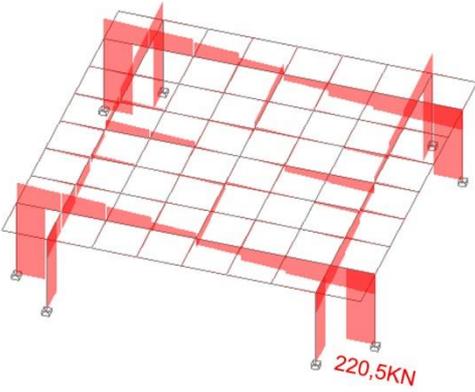
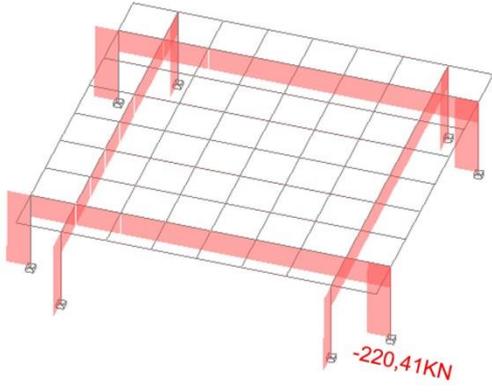
C- / C / D / B / A / A+

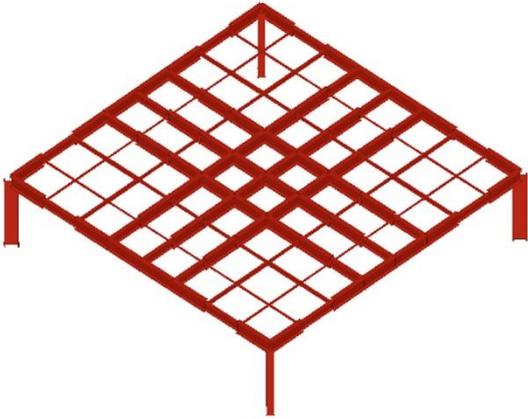
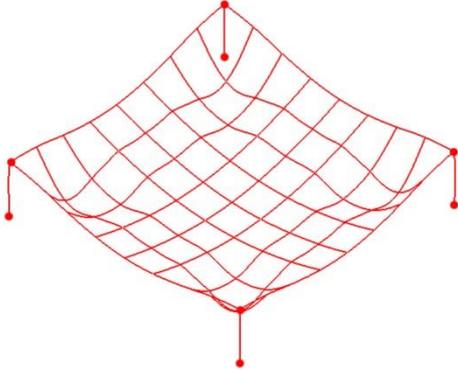
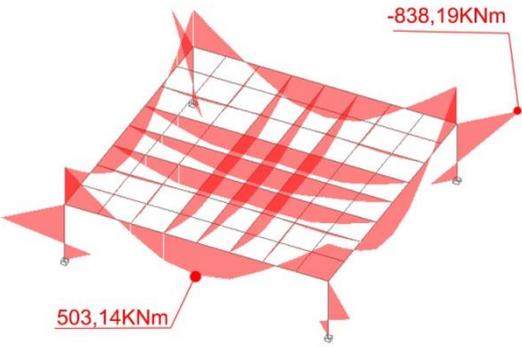
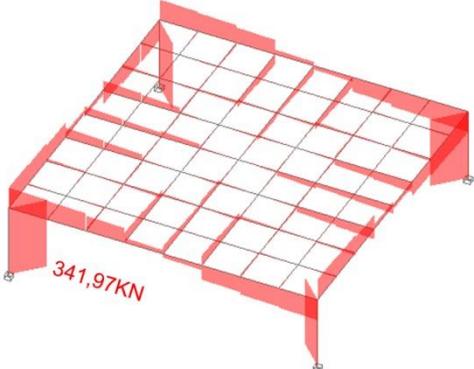
Fichas resultado
Modelos con simetría total

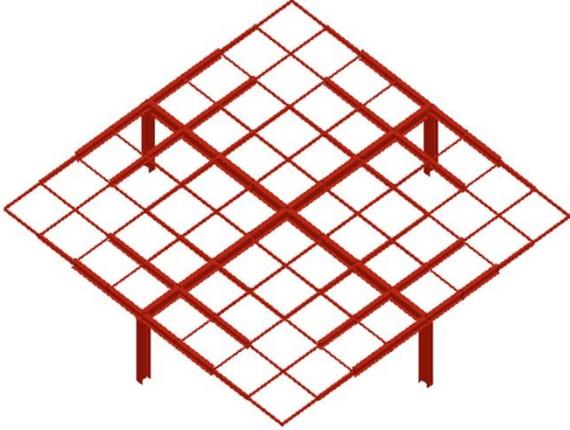
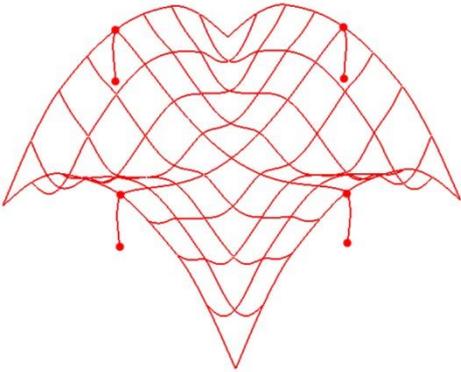
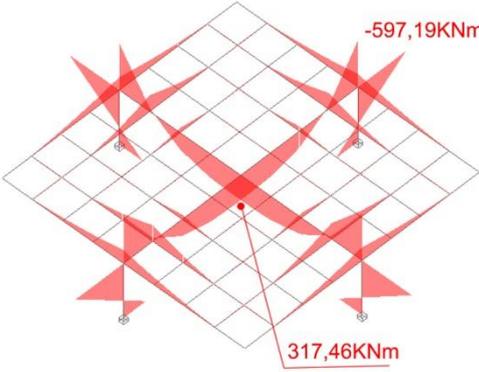
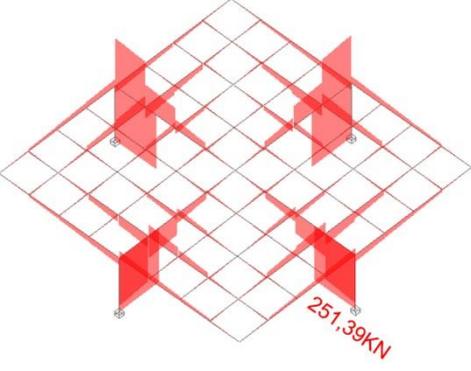
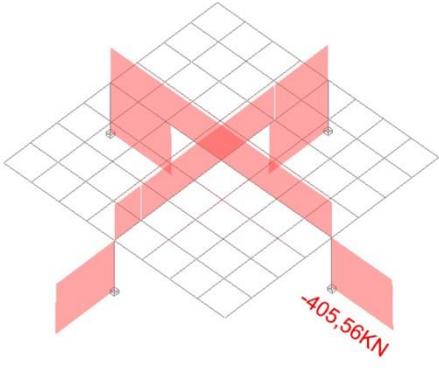
V-2M2P-1	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar IPE 600		
Máx viga IPE 600		
Peso total (KN) 94,28		
<p data-bbox="437 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="437 1263 576 1296">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1034 1263 1118 1296">Axiles</p> 	
Espacio A+	Estructura A	Forma A+
<p data-bbox="264 1816 1326 2011">Esta solución cuenta con pilares IPE que son mejores resistiendo esfuerzos de flexión que los perfiles en H, los perfiles IPE también son menos robustos, pero al existir una simetría total los esfuerzos se equilibran y se puede prescindir de esa necesidad de robustez que aportaría un perfil más pesado. El tamaño de las vigas ha sido condicionado por el momento flector, esto se puede apreciar en las secciones obtenidas, las cuales son mucho más pequeñas en los lugares donde el momento de la viga cambia de signo y su momento es nulo. Las vigas están cargadas de axiles, este fenómeno se puede explicar con el efecto de arco, y es que los cortantes de los pilares al no estar sujetos a nada necesitan de una fuerza que iguale el valor del cortante, esta fuerza se convierte en axil y físicamente se traduce como ambas cabezas de pilares intentando acercarse una a la otra.</p>		

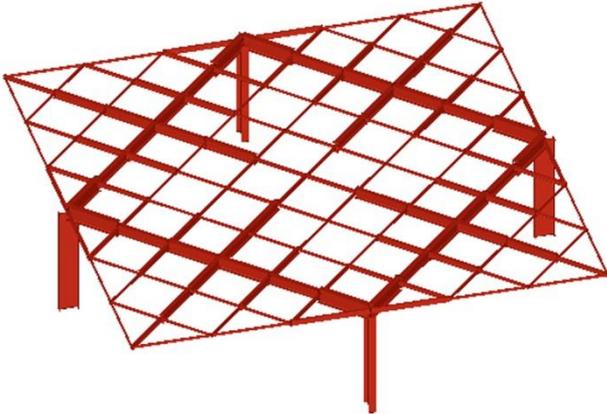
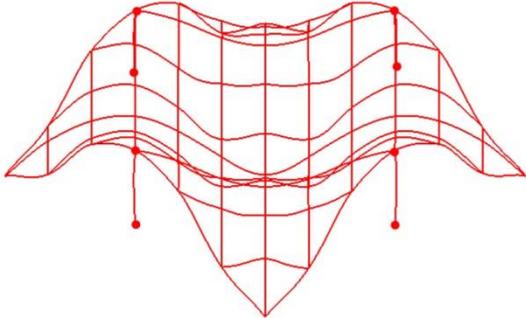
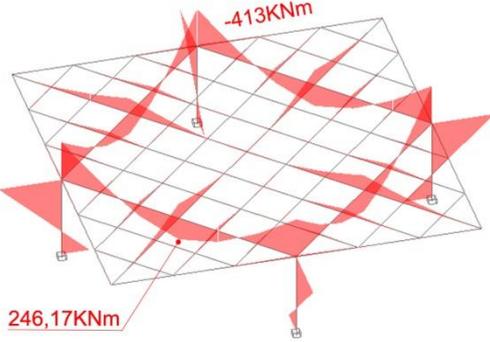
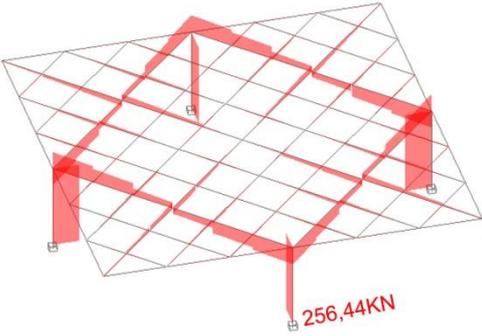
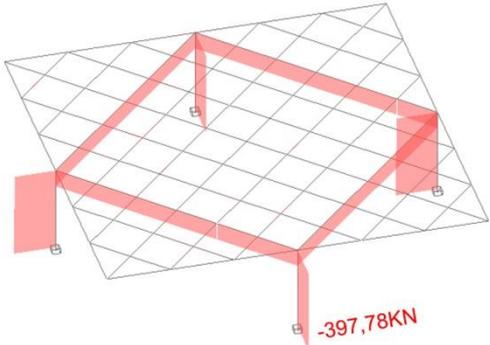
V-2M2P-1-B	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar IPE 550		
Máx viga IPE 500		
Peso total (KN) 103,658		
<p data-bbox="435 801 595 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p>  <p data-bbox="1174 846 1294 875">-395,65KNm</p> <p data-bbox="1094 1196 1198 1225">81,31KNm</p>	
<p data-bbox="435 1261 576 1294">Cortantes</p>  <p data-bbox="624 1621 699 1650">160,1KN</p>	<p data-bbox="1042 1261 1129 1294">Axiles</p>  <p data-bbox="1166 1608 1257 1637">-202,1KN</p>	
Espacio A	Estructura B	Forma A
<p data-bbox="268 1839 1321 1989">Esta sub-variante añade más pilares, el aumento de peso se debe fundamentalmente a los pilares, los cuales debido a la esbeltez y a la transmisión de momentos (se puede apreciar en la deformada de los pilares y en los saltos de los momentos de la gráfica) no se puede reducir el tamaño tanto como se debería, por lo tanto la opción de distribuir los esfuerzos en dos pilares más pequeños no funciona. El efecto arco vuelve a aparecer en las vigas que van de pilar a pilar, y el momento flector positivo en el centro de vano se reduce considerablemente, ya que este ahora se reparte entre el doble de elementos.</p>		

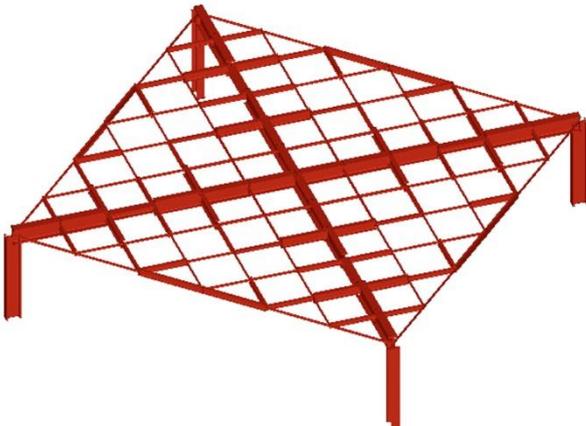
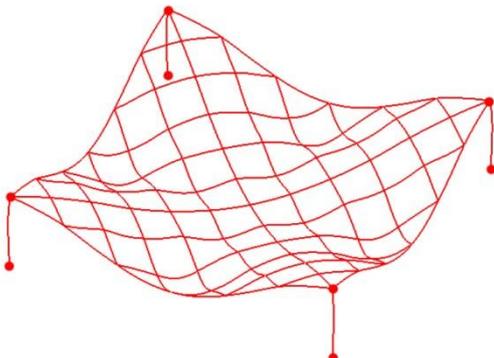
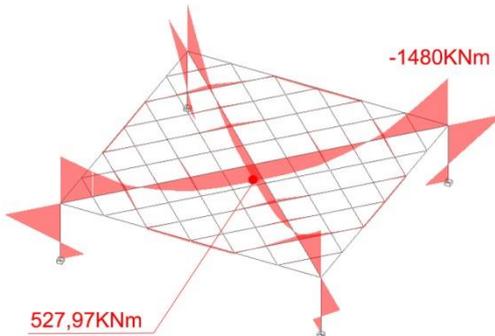
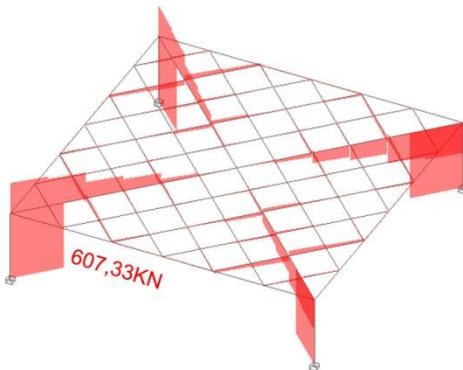
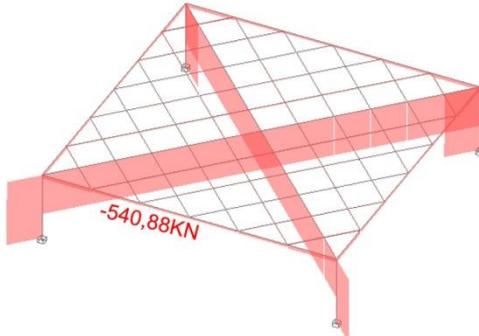
V-2M2P-1C	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar IPE 500		
Máx viga IPE 500		
Peso total (KN) 94,473		
<p data-bbox="435 801 595 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="435 1263 576 1296">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1043 1263 1129 1296">Axiles</p> 	
Espacio A	Estructura A	Forma A
<p data-bbox="264 1816 1326 2011">Este modelo funciona muy bien, al estar los pilares más separados no se llevan momentos grandes en la dirección débil del IPE, como además la viga fuerte no conecta pilares ubicados perpendicularmente los IPE trabajan en su mayor parte en su dirección con más inercia permitiendo prescindir de los perfiles en H más pesados. En el centro vemos como aparecen tamaños mayores en forma de cruz ya que el algoritmo ha decidido que es mejor concentrar los esfuerzos en vigas un poco más grandes que repartir el esfuerzo en todo el cuadrado central, esto puede ser debido en parte a que no puede coger un perfil más pequeño que el IPE 80 ya que la serie se acaba ahí, si fuese posible utilizar perfiles conformados quizás sí que el algoritmo hubiese encontrado óptimo igualar todos los perfiles y hacer el centro homogéneo.</p>		

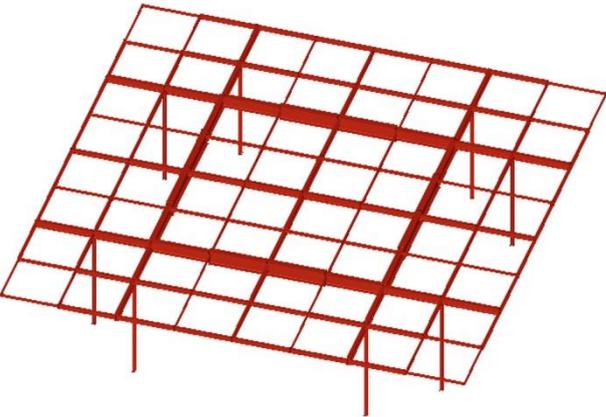
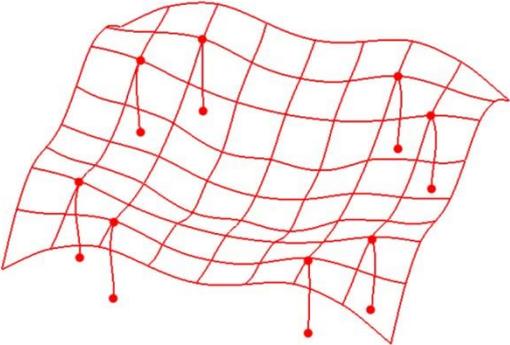
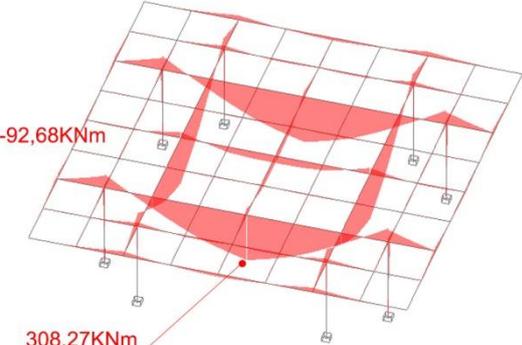
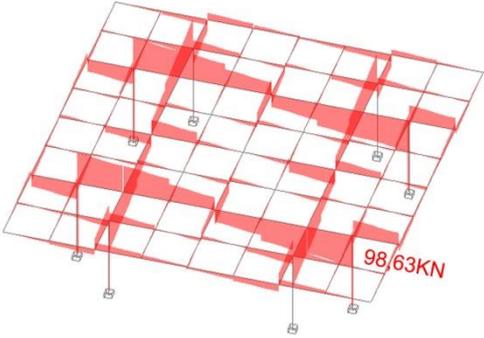
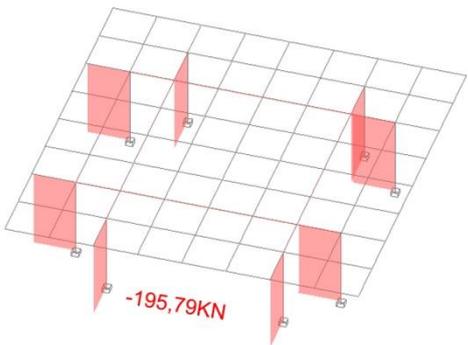
V-2M2P-1-D	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar IPE 550		
Máx viga IPE 600		
Peso total (KN) 125,015		
<p data-bbox="435 801 595 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="435 1263 576 1296">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1042 1263 1129 1296">Axiles</p> 	
Espacio B	Estructura D	Forma B
<p data-bbox="268 1845 1329 1973">Este modelo funciona peor, ya que al distanciar tanto los pilares y dejar tan poco voladizo, no se llegan a compensar los momentos flectores, también se debe a que se toman luces entre pilares más grandes obligando a utilizar vigas IPE 600. Se vuelve a apreciar cómo se resuelve el centro concentrando las inercias en algunos elementos dando como resultado una forma de cruz central dentro de un cuadrado rígido a pesar de que los pilares no acometan a esa cruz.</p>		

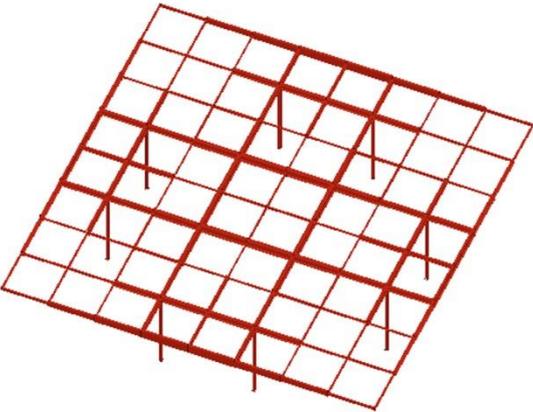
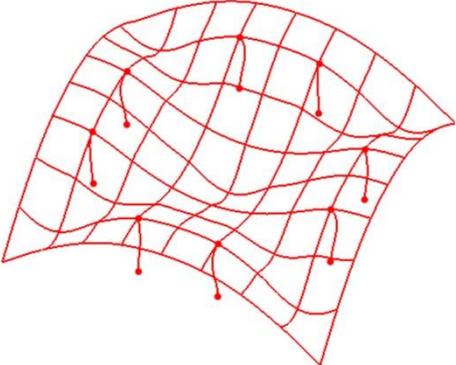
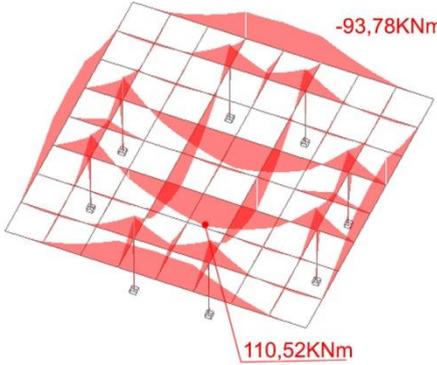
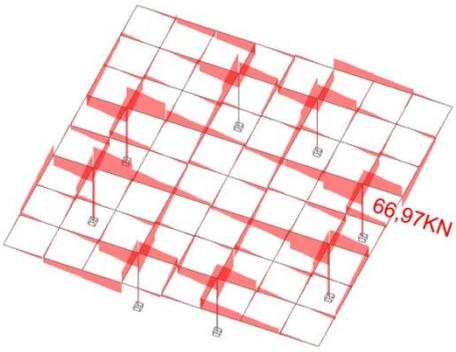
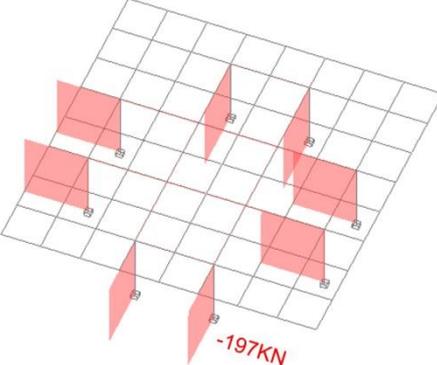
V-2M2P-1-E	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEA 600		
Máx viga IPE 600		
Peso total (KN) 198,87		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="932 801 1209 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1261 571 1294">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1038 1261 1129 1294">Axiles</p> 	
Espacio C	Estructura C	Forma A
<p data-bbox="264 1823 1329 1995">Este modelo ofrece la peor solución de entre todas las variantes anteriores del modelo base V-2M2P-1, al situar los pilares en las esquinas la luz aumenta demasiado, de modo que para salvar la flecha central el modelo necesita de 3 vigas de canto considerable en cada dirección, además por la situación de los pilares en las esquinas del cuadrado los esfuerzos no pueden viajar directamente, por el contrario estos deben ir cambiando de rumbo para poder ir desde el centro de vano (donde la deformada es mayor) a los pilares, por este motivo se generan las 4 vigas perimetrales, para así poder descargar los esfuerzos de las vigas centrales a los pilares aumentando mucho el peso de la solución.</p>		

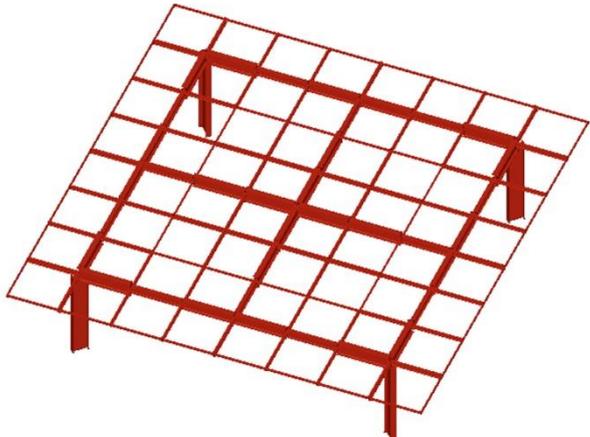
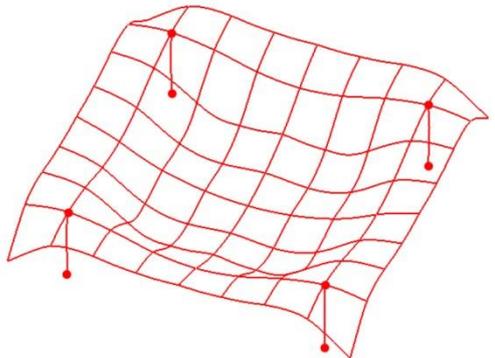
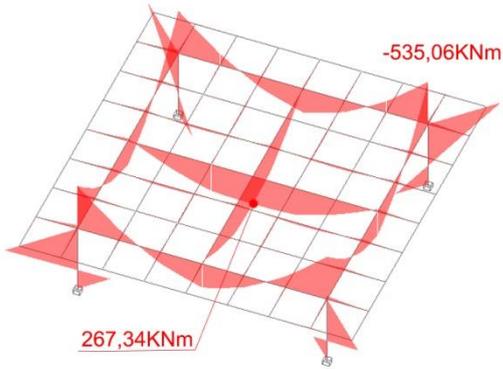
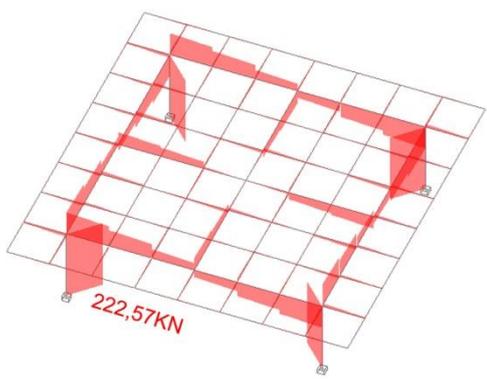
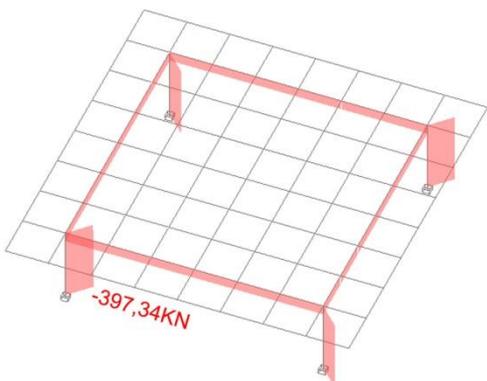
V-2M2P-2	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEA 450		
Máx viga IPE 550		
Peso total (KN) 107,65		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="932 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1261 576 1294">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1031 1261 1118 1294">Axiles</p> 	
Espacio A+	Estructura B	Forma A+
<p data-bbox="264 1825 1326 1951">Este modelo es similar al modelo base, su diferencia radica en que en este modelo no puede reducir el tamaño de las vigas centrales en cruz, ya que forman parte de la misma familia y forman una viga homogénea, su aumento de peso se puede explicar sencillamente por esta causa. Con este modelo al añadir más inercia en el centro la deformada es menor, pero al no acabar siendo este el punto crítico del problema no mejora la solución que aportaba el modelo V-2M2P-1.</p>		

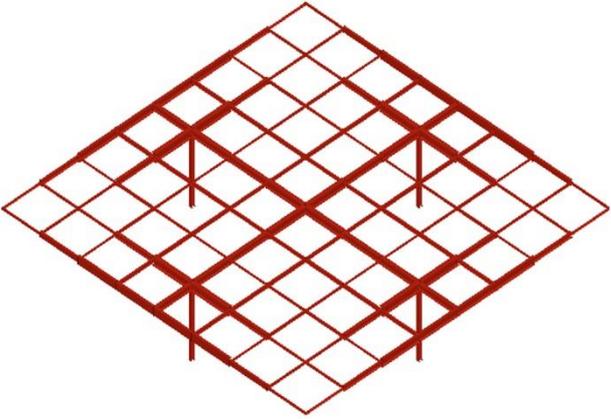
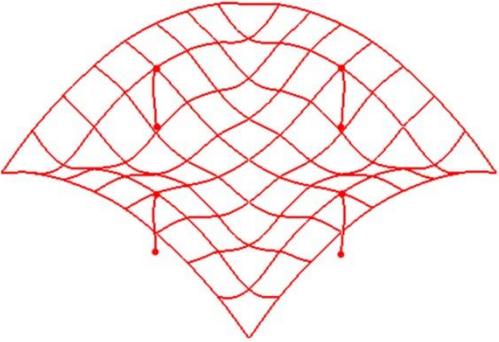
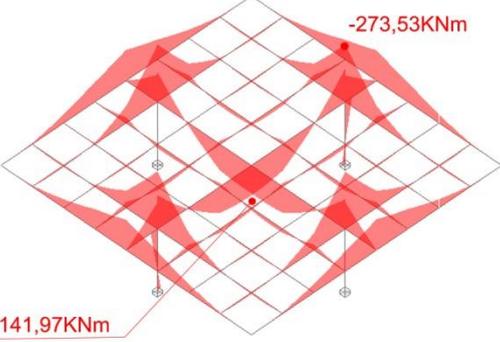
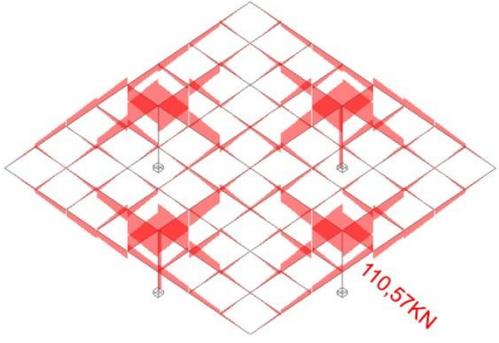
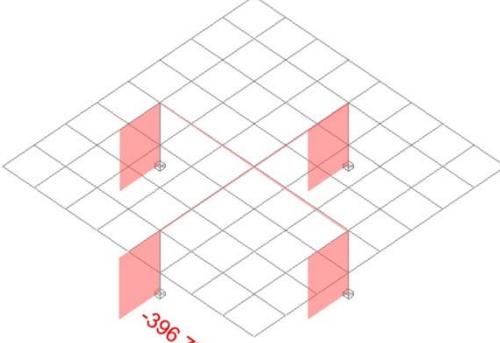
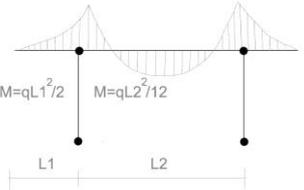
V-2M2P-3	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar IPE 600		
Máx viga IPE 500		
Peso total (KN) 84,55		
<p style="text-align: center;">Deformada</p> 	<p style="text-align: center;">Momentos flectores</p> 	
<p style="text-align: center;">Cortantes</p> 	<p style="text-align: center;">Axiles</p> 	
Espacio A+	Estructura A	Forma A+
<p>Este modelo tiene una solución bastante buena mejorando el peso de la versión base, esto se debe a que consigue conectar los pilares con luces más pequeñas gracias a la malla girada 45°. Este modelo es muy interesante porque trata el centro de forma que no se generan momentos positivos, el centro es en este modelo una carga muerta con perfiles mínimos y será el cuadrado que une los pilares quien se ocupe de absorber la mayor parte de los esfuerzos y llevarlos a los pilares.</p>		

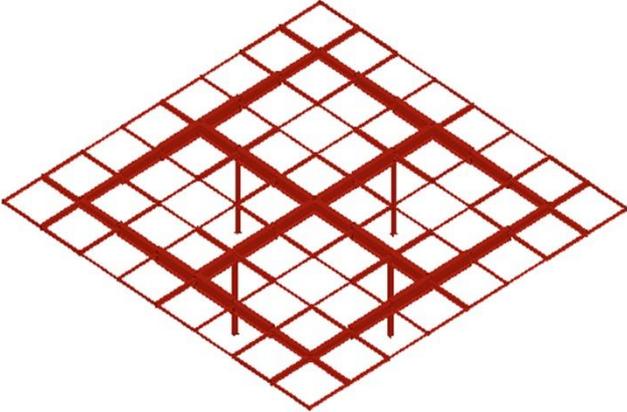
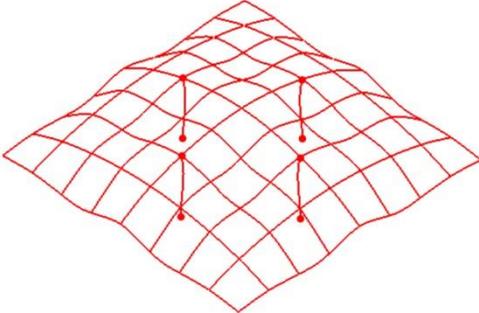
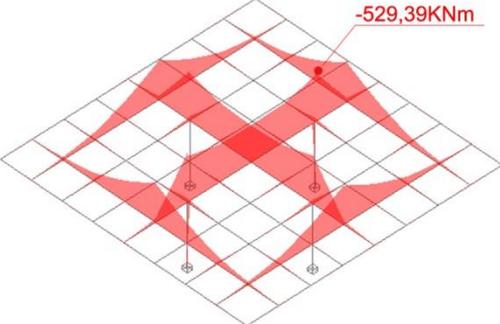
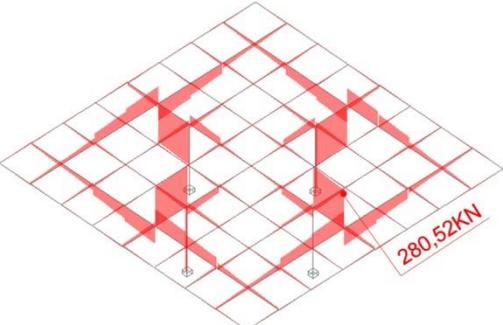
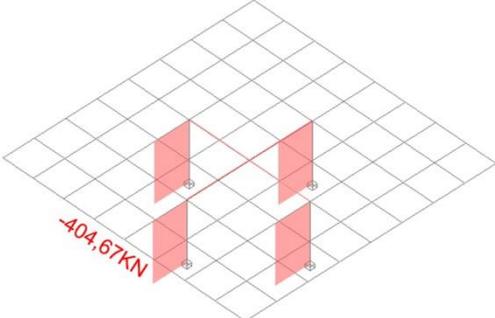
V-2M2P-4	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEM 600		
Máx viga HEM 500		
Peso total (KN) 165,29		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="932 801 1209 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1263 571 1296">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1031 1263 1118 1296">Axiles</p> 	
Espacio B	Estructura C	Forma A
<p data-bbox="261 1843 1326 1966">Este modelo utiliza los pilares en esquina como en el modelo V-2M2P-1-E, pero esta vez al tener la malla girada a 45° puede utilizar la diagonal para transmitir los esfuerzos, resulta de menor peso aunque para los pilares se toman HEM 600, que supone el tamaño máximo de la serie y los perfiles más robustos y pesados que puede poner el algoritmo, para las diagonales también se utilizan perfiles hasta HEM500, a pesar de todo esto al concentrar en las diagonales la mayor parte de los esfuerzos el peso disminuye.</p>		

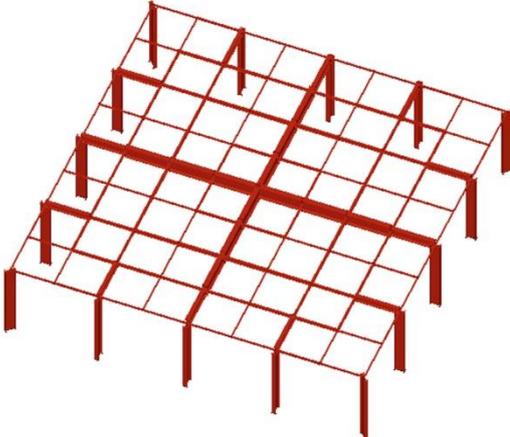
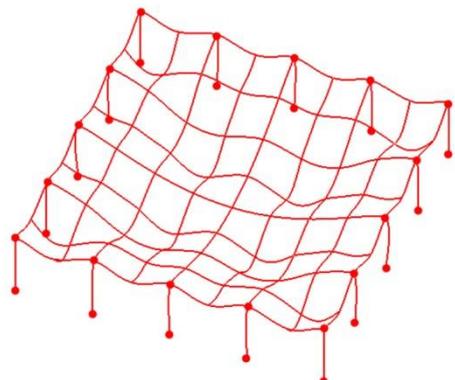
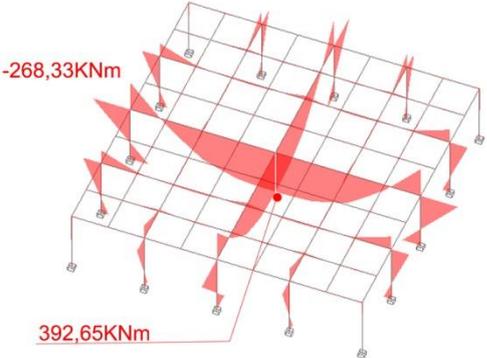
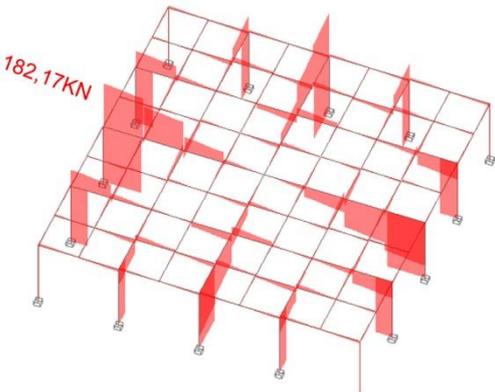
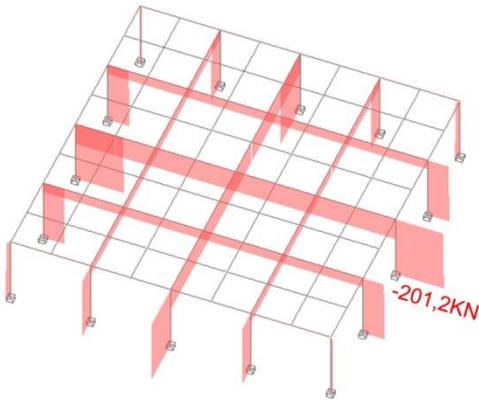
V-2M2P-5	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEB 100		
Máx viga IPE 500		
Peso total (KN) 66,67		
Deformada 	Momentos flectores 	
Cortantes 	Axiles 	
Espacio D	Estructura A+	Forma B
<p>Este modelo consigue una solución muy buena, gracias a que consigue disminuir sus 8 pilares a HEB100, ya que consigue eliminar los momentos flectores de ellos, funcionando en su mayor parte a compresión y eliminando problemas de pandeo que suelen ser críticos para las dimensiones de los pilares. La relación entre la distancia de vanos y voladizos que ofrece este modelo también ayuda a equilibrar los momentos centrales. En la deformada se puede apreciar la peculiaridad que crean los distintos tamaños de los perfiles, unos perfiles se apoyan en otros más rígidos y esto produce las ondulaciones que se aprecian en la deformada.</p>		

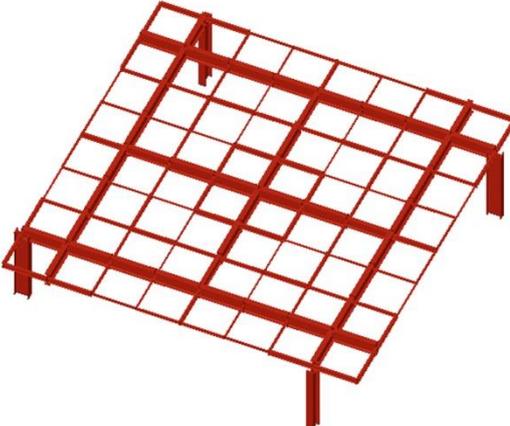
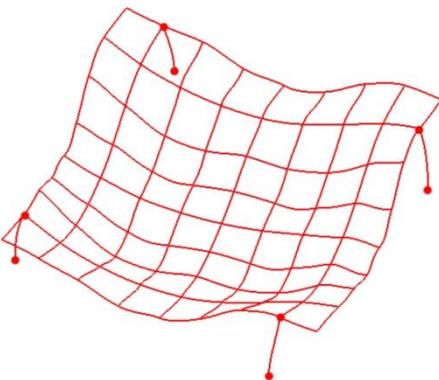
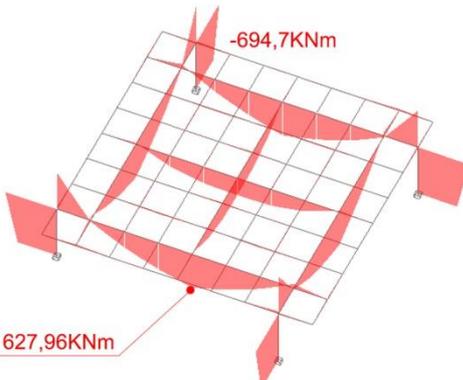
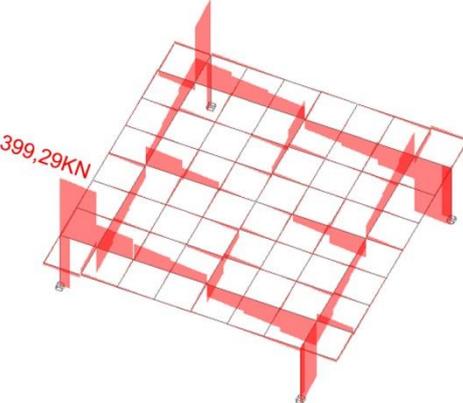
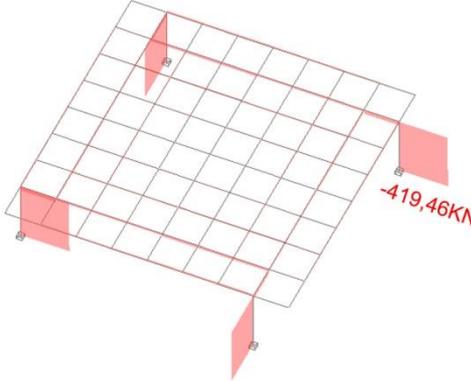
V-2M2P-6	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEB 100		
Máx viga IPE 330		
Peso total (KN) 71,87		
Deformada 	Momentos flectores 	
Cortantes 	Axiles 	
Espacio D	Estructura A+	Forma B
<p>Este modelo no mejora al anterior (V-2M2P-5) que tenía menos vuelo en las esquinas, en este modelo aparecen vigas un poco mayores que se acercan a los voladizos de las esquinas para así poder dar rigidez al voladizo. La malla se resuelve generando una geometría en cruz con bastantes vigas pero no demasiado grandes (IPE330), estas vigas forman cuadrados que unen todos los pilares y crean una cruz rígida, esta cruz sobrepasa a los pilares llegando al perímetro de modo que puede compensar el momento central, se deja menor tamaño de vigas en los cuadrados ubicados en las 4 esquinas del cuadrado.</p>		

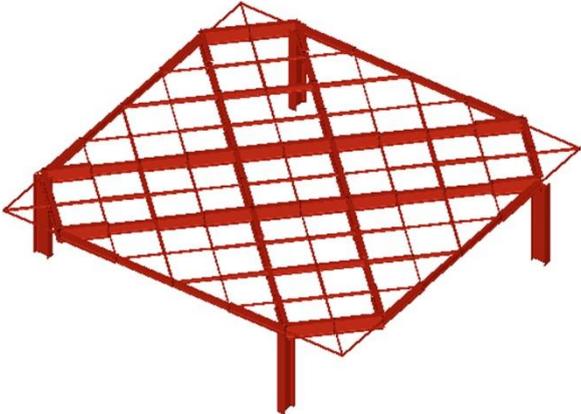
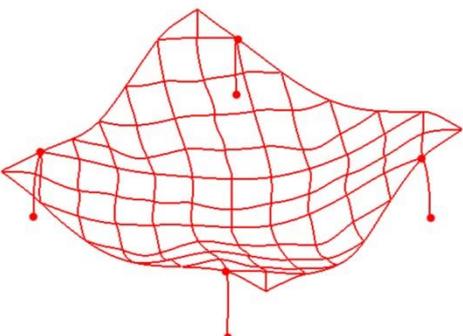
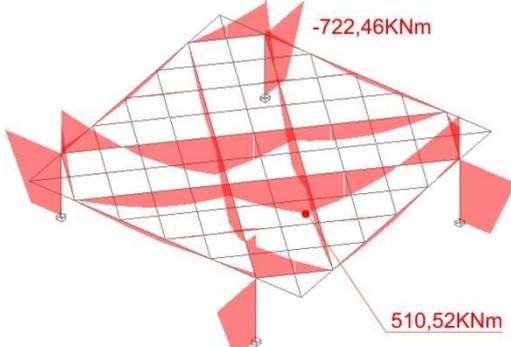
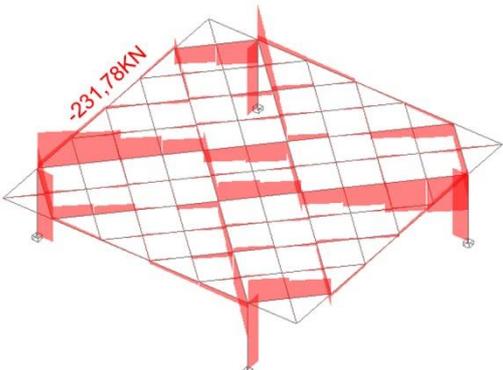
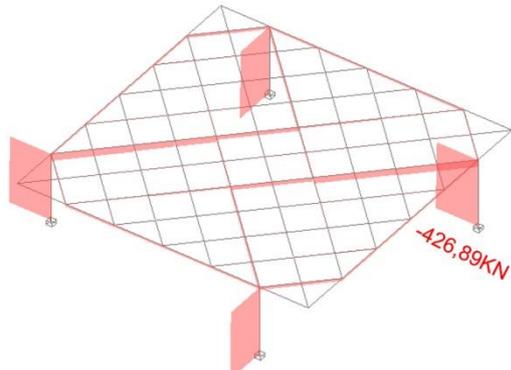
<p>V-2M2P-7</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar IPE 550</p>		
<p>Máx viga IPE 500</p>		
<p>Peso total (KN) 83,22</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio D</p>	<p>Estructura A</p>	<p>Forma D</p>
<p>Esta versión coloca los pilares en las esquinas pero los retrae para generar un voladizo perimetral, este retranqueo ayuda a que las luces entre pilares sean menores y el voladizo ayude a equilibrar los momentos flectores. En el centro se genera una cruz central que al no poder llegar directamente a los pilares genera mayores cantos en las vigas que unen los pilares, se puede apreciar como el cortante en estas zonas de unión cruz-viga llega a ser relevante.</p>		

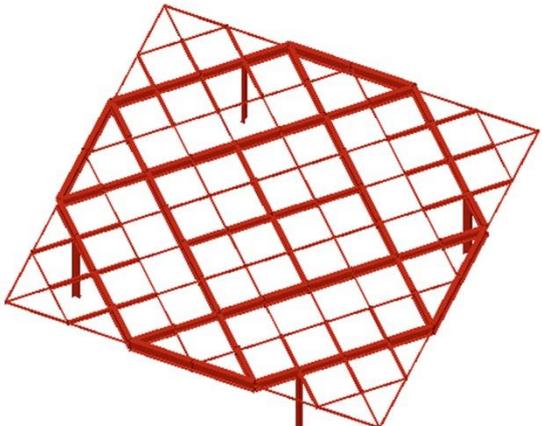
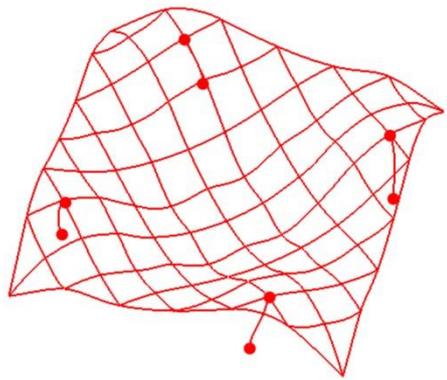
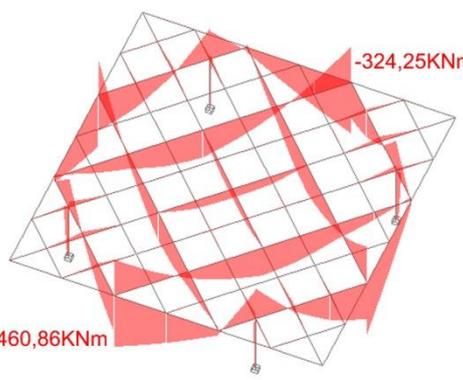
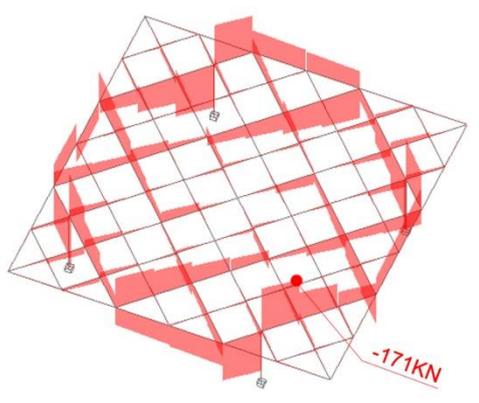
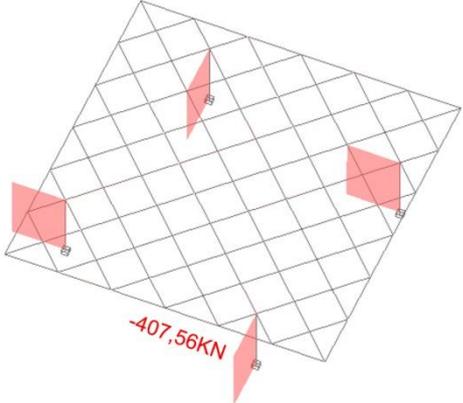
V-2M2P-8	Sólido de la estructura optimizada			
Máx pilar HEB 140				
Máx viga IPE 400				
Peso total (KN) 73,67				
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 			
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 			
Espacio D	Estructura A+	Forma A		
<p>En este modelo se aprecia como al introducir los pilares perimetrales hacia el interior, se equilibran los momentos flectores y se reduce la cantidad de momentos que debe resistir el pilar, permitiendo utilizar perfiles menores. Si procedemos a calcular la distancia óptima de vuelo tenemos que la distancia óptima es aproximadamente 0,4 veces el vano interior, en este modelo tendríamos un valor aproximado de 0,17 (pero con más carga en el centro).</p>				$qL_1^2/2 = qL_2^2/12$ $L_1^2 = L_2^2/6$ $6L_1^2 = L_2^2$ <p>(Tomando $L_2=1$)</p> $L_1 = L_2/\sqrt{6} \approx 0,40$

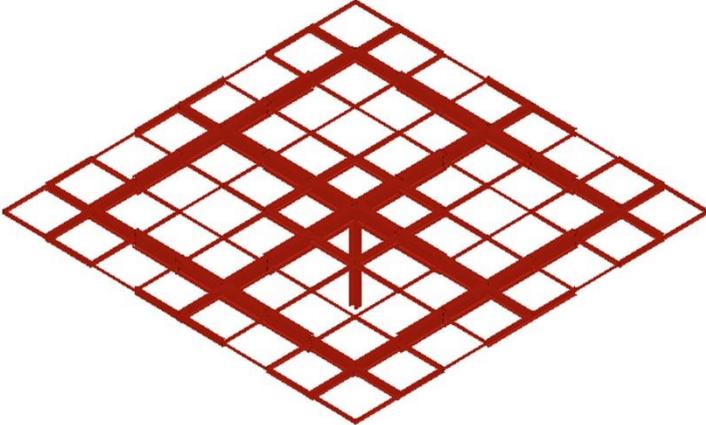
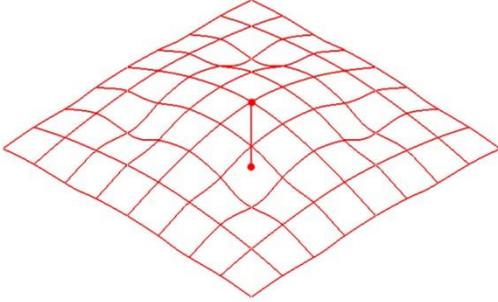
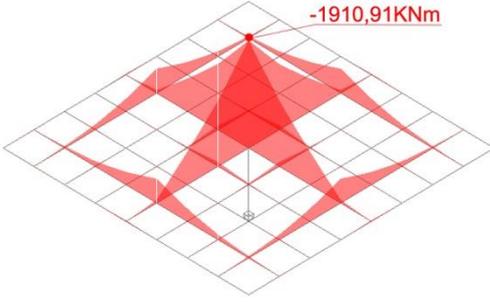
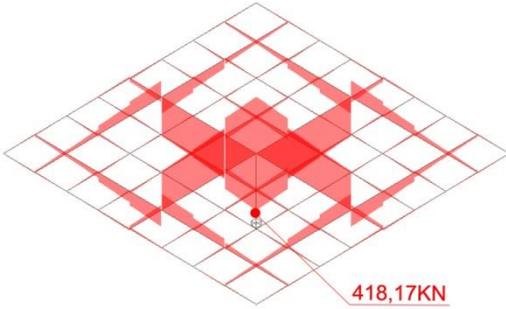
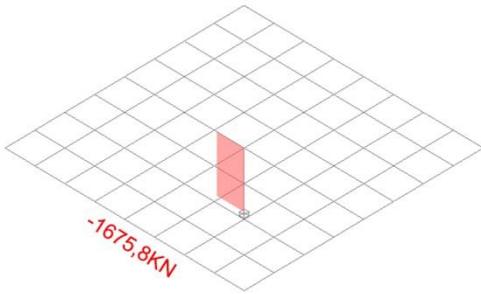
<p>V-2M2P-9</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEB 140</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 95,127</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio C-</p>	<p>Estructura A</p>	<p>Forma A</p>
<p>Este modelo retranquea aún más los pilares, resultando de una proporción de vuelo de 0,5 mucho más cercana que la anterior al valor óptimo de 0,4, a pesar de esto la solución es peor, la explicación que se le da es que aunque la distancia sea mejor que en el modelo anterior, existe un peso localizado en todo el voladizo (peso propio de la viga), que hace que se descompense esta proporción</p>		

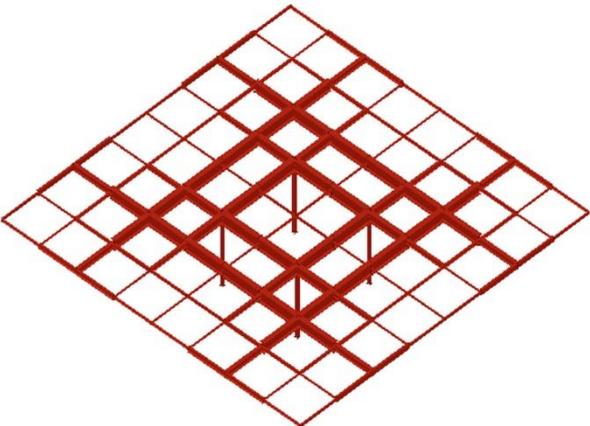
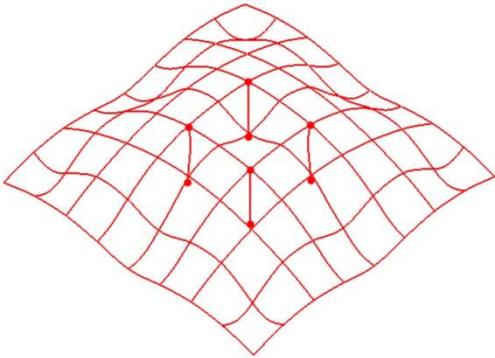
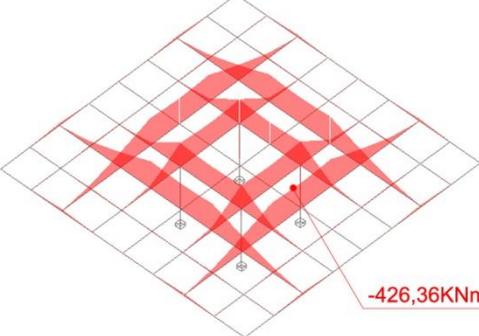
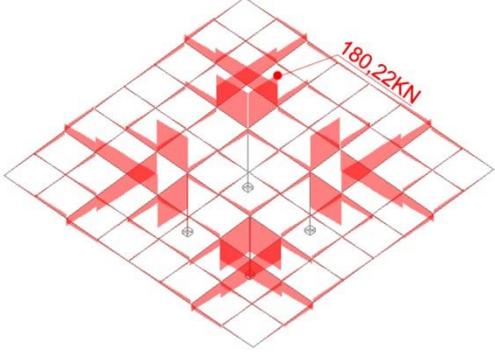
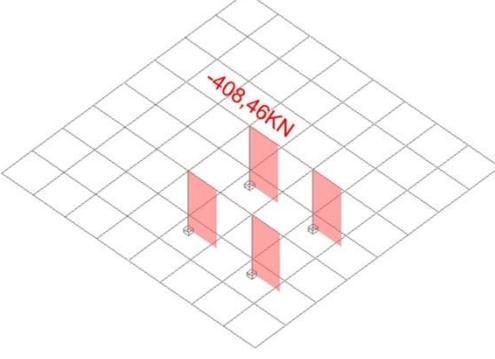
<p>V-2M2P-10</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar IPE 400</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 96,86</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio B</p>	<p>Estructura A</p>	<p>Forma A</p>
<p>Este modelo rompe con la idea de que es mejor concentrar los pilares, en parte es porque al existir tantos de ellos unos se ayudan a los otros para resistir los esfuerzos y transmitiéndolos gracias a la malla, se puede ver nuevamente como la opción de generar una cruz y concentrar los esfuerzos en puntos determinados de la malla sigue siendo mejor que disponer toda la malla de forma homogénea.</p>		

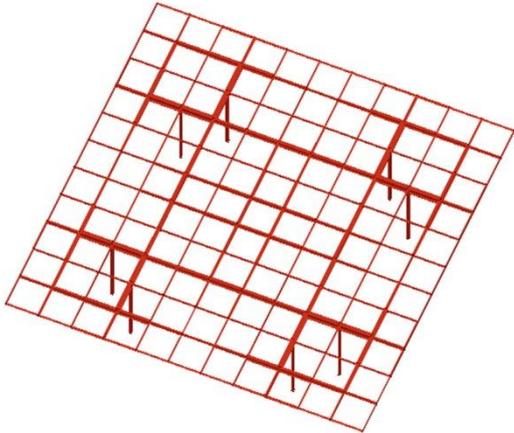
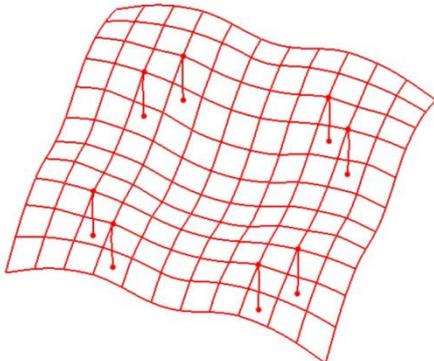
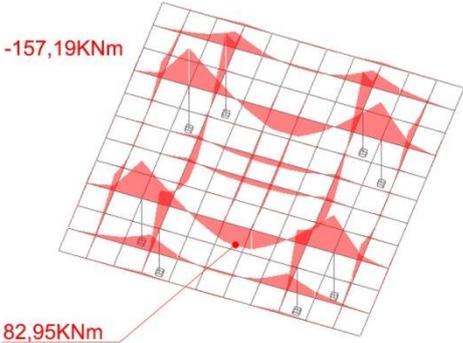
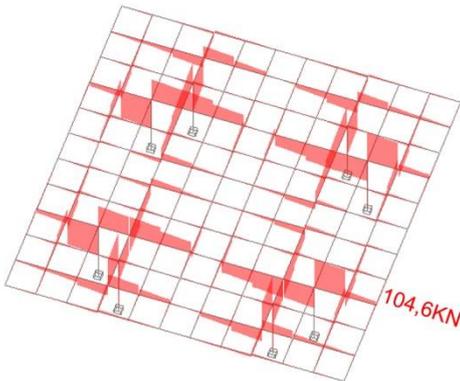
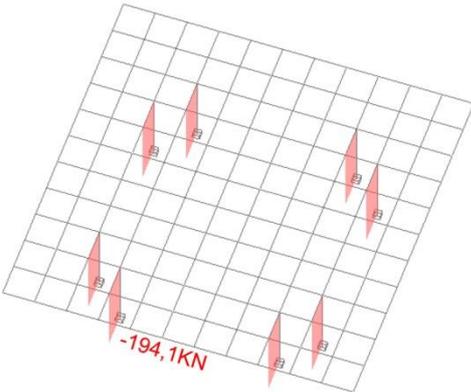
<p>V-2M2P-11</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 600</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 148,78</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio A</p>	<p>Estructura D</p>	<p>Forma A</p>
<p>Este modelo muestra que si no adecuamos la malla a las posiciones de los pilares, la estructura necesitará para distribuir los esfuerzos vigas de mayor canto generando una estructura mucho más pesada que si tuviese líneas de carga claras y contundentes. En este modelo los pilares son solicitados a momentos en sus dos direcciones, por lo tanto se pasa del perfil IPE al HEA.</p>		

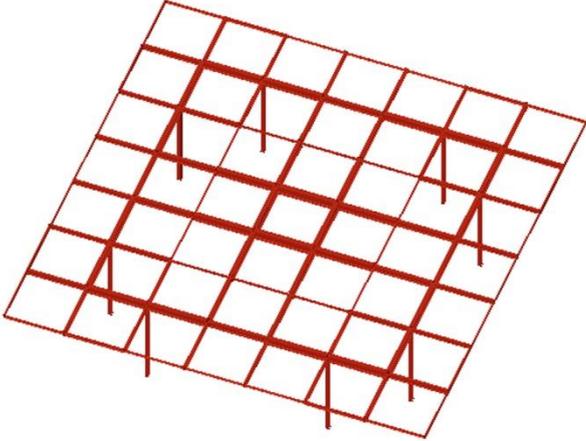
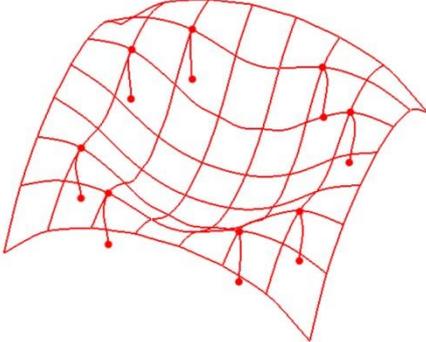
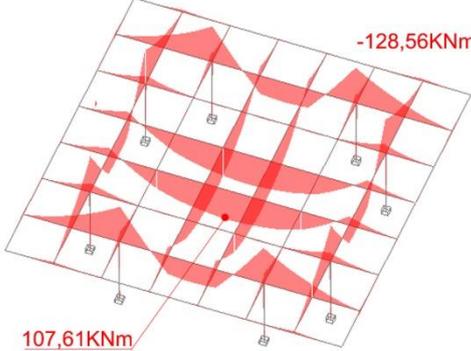
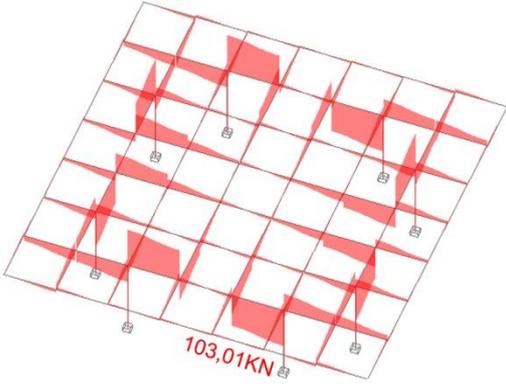
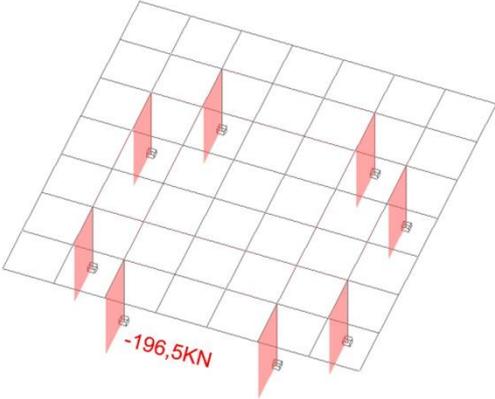
<p>V-2M2P-12</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEM 600</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 170,99</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio A</p>	<p>Estructura C</p>	<p>Forma A</p>
<p>En este modelo al no poder llevar las cargas de pilar a pilar, el algoritmo ha encontrado como solución óptima trazar rectángulos que conecten los pilares y se crucen en el centro, por este motivo obtenemos unas vigas dobles que hacen que la estructura sea mucho más pesada, en el centro de vano podemos ver una curiosa distribución de momentos positivos, y es que en el encuentro entre ambas vigas se produce un intercambio de momentos, el punto más alejado del pilar entrega momento positivo al punto más cercano obteniendo como resultado un diagrama con simetría central.</p>		

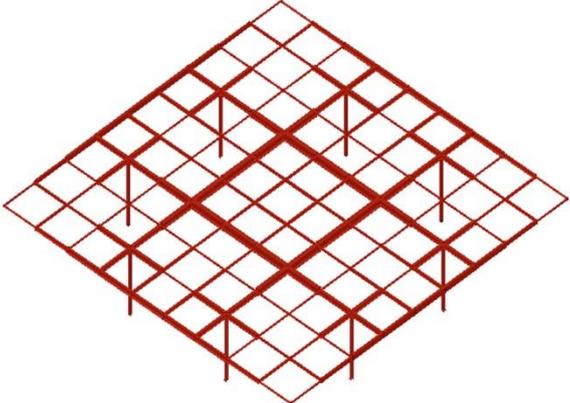
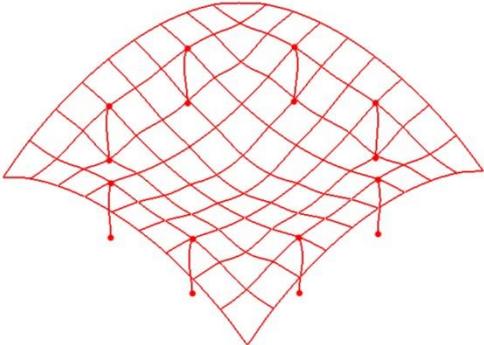
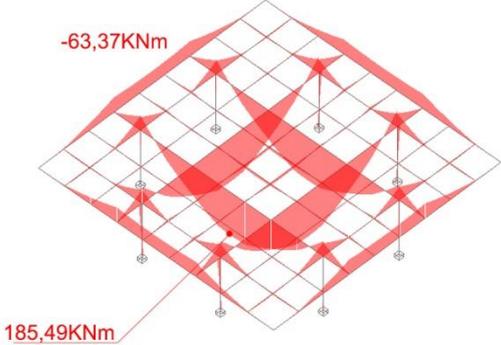
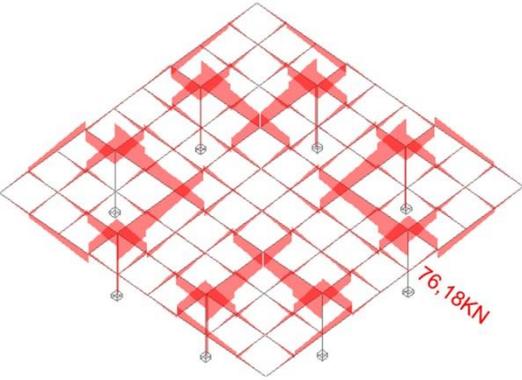
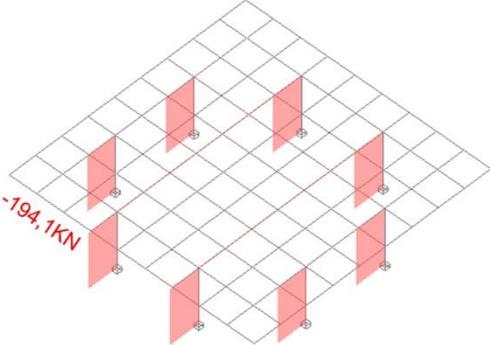
<p>V-2M2P-13</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar IPE 270</p>		
<p>Máx viga IPE 550</p>		
<p>Peso total (KN) 113,523</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio D</p>	<p>Estructura B</p>	<p>Forma A</p>
<p>Este modelo es muy interesante, como resultado se muestran una serie de vigas con mayor canto formando un octógono irregular, al girar la malla 45° se ofrece esta posibilidad de transmisión de esfuerzos. Los pilares se han podido reducir mucho gracias a que al estar retranqueados los momentos se han equilibrado liberando a los pilares de esfuerzos de flexión excesivos. El diagrama de momentos en el octógono va variando continuamente de positivo a negativo, es como si fuese una gran viga corrida de que cambiando su signo</p>		

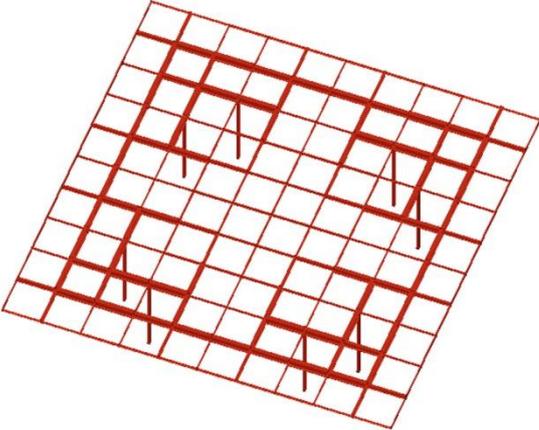
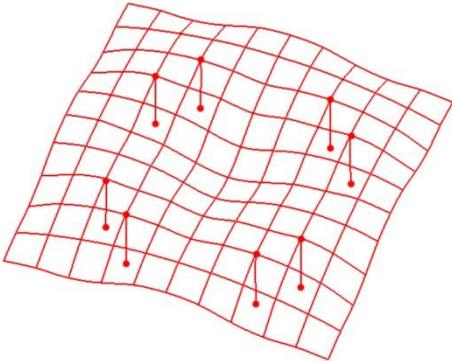
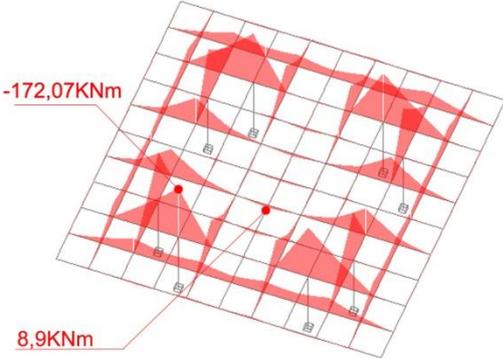
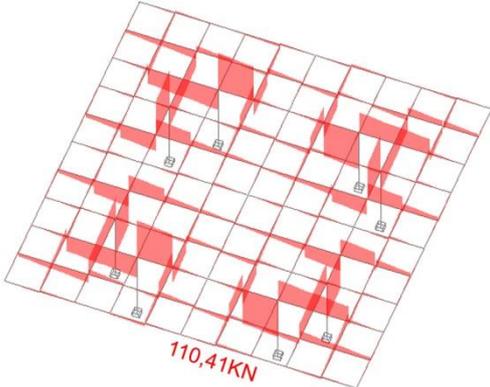
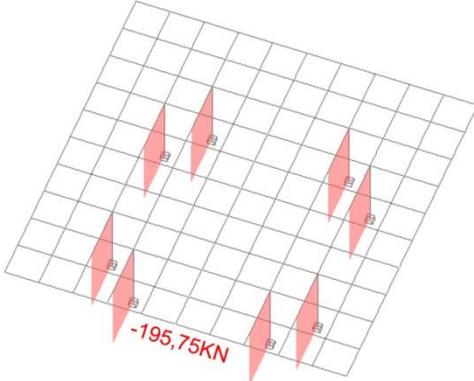
<p>V-2M2P-14</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 260</p>		
<p>Máx viga HEM 600</p>		
<p>Peso total (KN) 147,33</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio C</p>	<p>Estructura D</p>	<p>Forma C</p>
<p>La solución que ofrece este modelo no es demasiado mala para el tipo de estructura que contiene, esto se debe a que al ser totalmente simétrica y tener un pilar central, este se libera de momentos permitiéndole trabajar de forma óptima y reduciendo su sección drásticamente (1 solo pilar HEA 260), Hay que tener en cuenta que si hubiese alternancia de cargas en la malla se generarían momentos flectores asimétricos empeorando mucho la solución. Por su forma de deformarse, en la malla no hay cabida de esfuerzos flectores positivos, ya que toda la malla es un voladizo, para resolver este gran voladizo perimetral se recurre a envolverlo con cuadrados concéntricos conectados por una cruz central que será la encargada de bajar los axiles hasta el pilar.</p>		

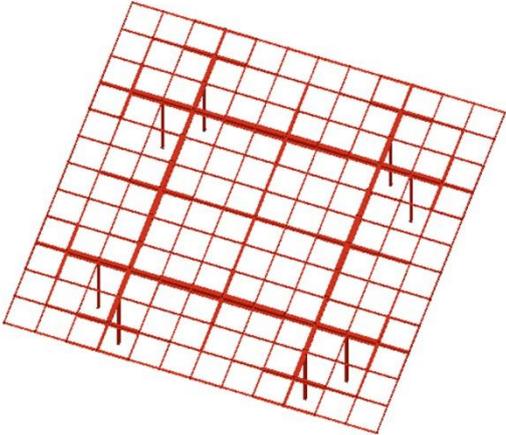
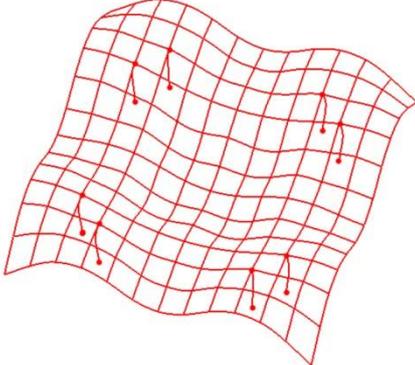
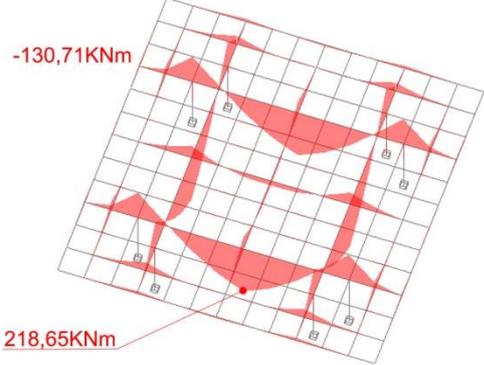
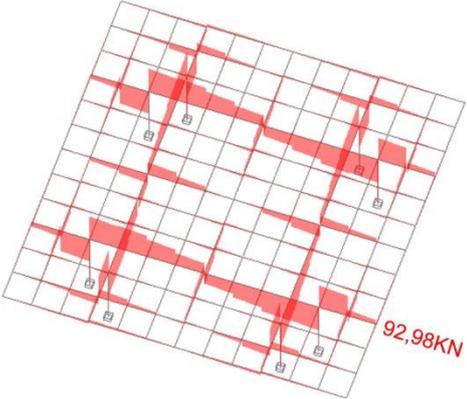
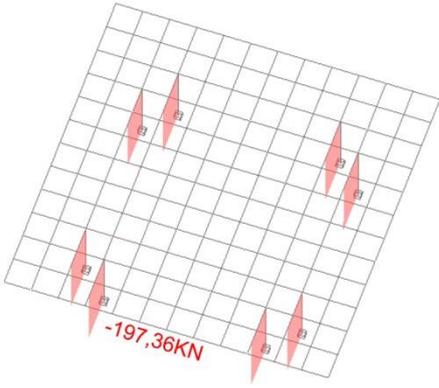
<p>V-2M2P-15</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEB 120</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 116,002</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p>  <p>-426,36KNm</p>	
<p>Cortantes</p>  <p>180,22KN</p>	<p>Axiles</p>  <p>-408,46KN</p>	
<p>Espacio C-</p>	<p>Estructura B</p>	<p>Forma B</p>
<p>Este modelo ubica los pilares en una posición muy interna, tanto que no hay esfuerzos flectores positivos en la malla, ya que los negativos del voladizo los han utilizado para bajar su intensidad y compensarse. Es curioso cómo se aprecia en la estructura que las vigas que forman el cuadrado exterior de mayor inercia no siguen la línea de pilares, esto es posiblemente para conseguir un vuelo menor que no sea desde el pilar sino un módulo más atrás.</p>		

<p>V-2M2P-16</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 100</p>		
<p>Máx viga HEA 330</p>		
<p>Peso total (KN) 56,2</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio D</p>	<p>Estructura A+</p>	<p>Forma D</p>
<p>Este modelo es el que cuenta con menor peso en su estructura, es el único modelo (además de sus variantes) que modifica la geometría de la malla original que propuso Mies para el proyecto, se ha hecho así para buscar la mejor ubicación de los pilares, ya que esta posición depende del tamaño de los módulos, se han probado diferentes variantes cambiando los módulos, que se mostrarán a continuación (V-M7 / V-M9 / V-M10 / V-M12). La posición de los pilares de este modelo permite un equilibrio óptimo entre los momentos flectores, si miramos los módulos de la diagonal (voladizo 2,5 / vano interno 7) contiene una proporción de 0,416 muy cercana al 0,4 que se mencionó anteriormente como proporción óptima.</p>		

V-2M2P-7M	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEA 120		
Máx viga IPE 360		
Peso total (KN) 60,05		
Deformada 	Momentos flectores 	
Cortantes 	Axiles 	
Espacio D	Estructura A+	Forma D
<p>Variante relacionada con el modelo V-2M2P-16, en este caso se toman 7 módulos por cara, por ese motivo encontramos menor cantidad de elementos estructurales que necesariamente no implica menor peso, tal y cómo se ha comprobado en distintas sub-variantes desplazando los pilares con 7 módulos. La proporción entre voladizo y vano en este caso es de 0,375 (voladizo1,5 / Vano 4) muy próxima a 0,4 lo que explica su buen resultado, pero proporción sin embargo no tan cercana a 0,4 como en el modelo V-2M2P-16 que sigue ofreciendo el mejor resultado.</p>		

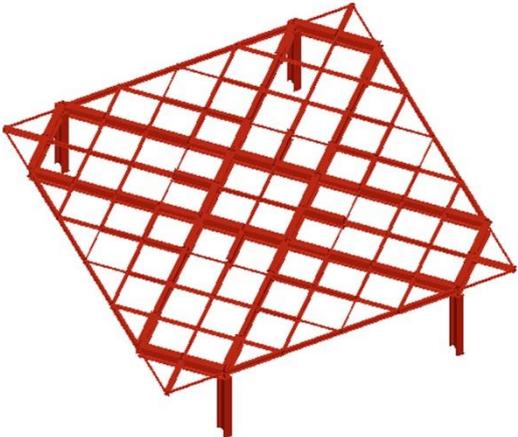
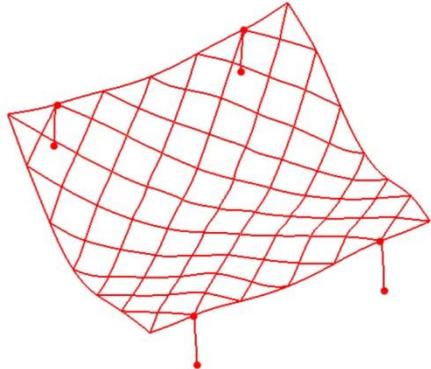
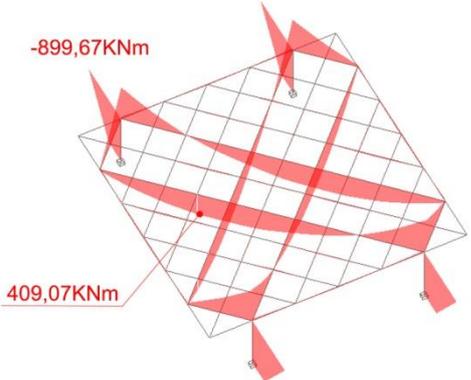
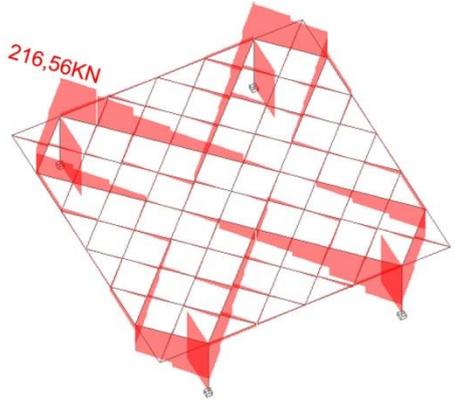
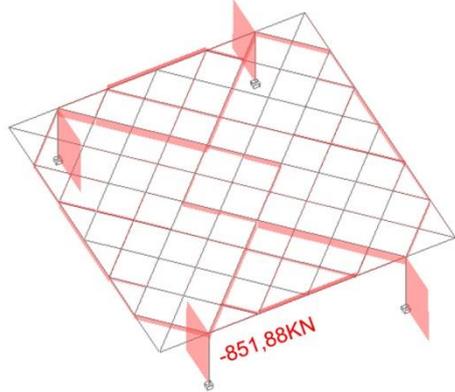
V-2M2P-9M	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEB 100		
Máx viga IPE 400		
Peso total (KN) 72,32		
Deformada 	Momentos flectores 	
Cortantes 	Axiles 	
Espacio D	Estructura A+	Forma D
<p>Variante relacionada con el modelo V-2M2P-16, en este caso se toman 9 módulos por cara. La proporción entre voladizo y vano en este caso es de 0,5 (voladizo 2,5 / Vano 5) más alejada de 0,4 que la versión anterior.</p>		

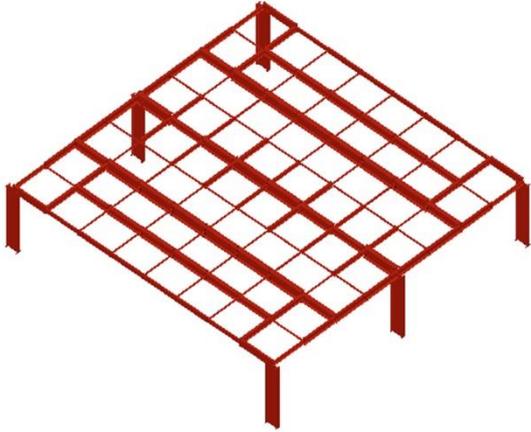
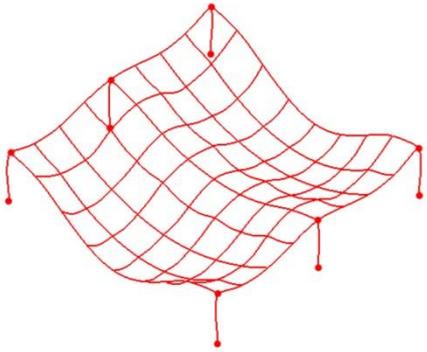
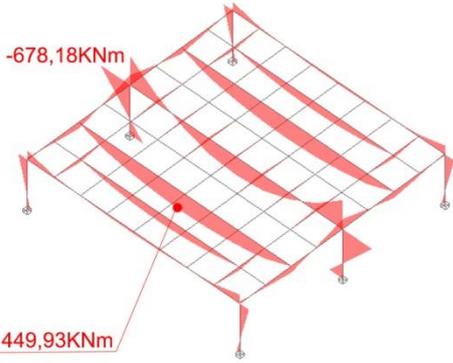
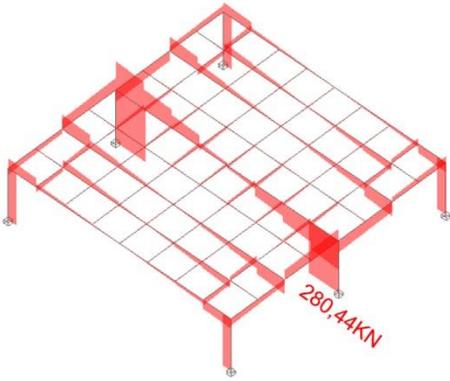
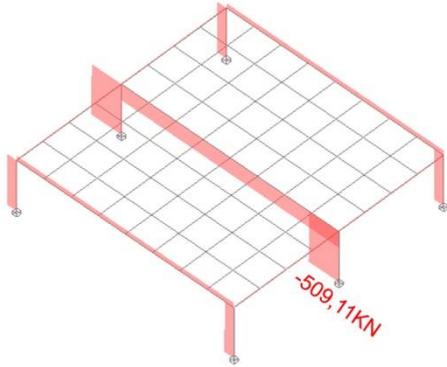
<p>V-2M2P-M10</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 100</p>		
<p>Máx viga HEA 330</p>		
<p>Peso total (KN) 68,12</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio D</p>	<p>Estructura A+</p>	<p>Forma D</p>
<p>Variante relacionada con el modelo V-2M2P-16, en este caso se toman 10 módulos por cara. La posición de los pilares en este caso ha sido cambiada introduciéndolos un módulo hacia dentro, ya que dentro de todas las posiciones probadas esta era la óptima, que se justifica por el mismo motivo: la proporción entre voladizo y vano en este caso es de 0,5 (voladizo 2,5 / Vano 5) dando la opción más equilibrada posible con 10 módulos.</p>		

V-2M2P-12M	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEB 100		
Máx viga IPE 400		
Peso total (KN) 60,85		
Deformada 	Momentos flectores 	
Cortantes 	Axiles 	
Espacio D	Estructura A+	Forma D
<p>Variante relacionada con el modelo V-2M2P-16, en este caso se toman 12 módulos por cara, ofreciendo el modelo con más elementos de los que se muestran, aunque tal y como se puede ver mayor número de elementos no implica mayor peso. La posición de los pilares en este caso es similar al anterior, introduciéndolos un módulo hacia dentro, ya que dentro de todas las posiciones probadas esta era la óptima, la proporción entre voladizo y vano en este caso es de 0,357 (voladizo 2,5 / Vano 7) ofreciendo un resultado similar al de la variante M7, ya que su coeficiente de proporción es idéntico.</p>		

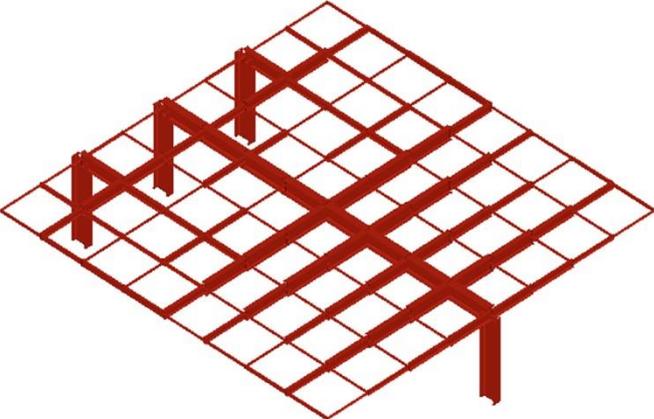
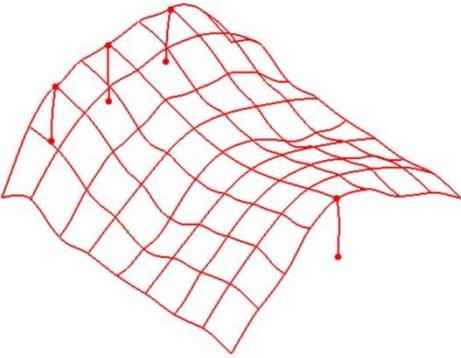
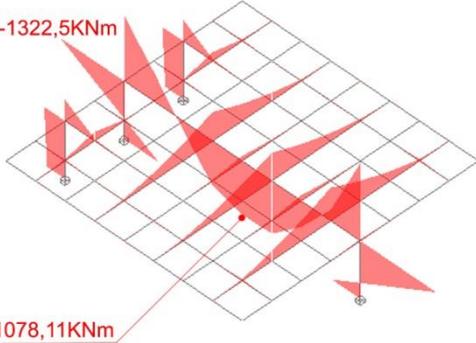
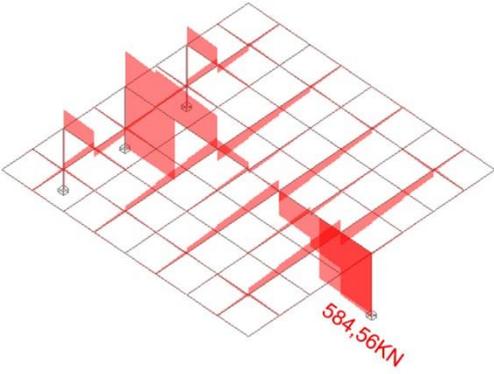
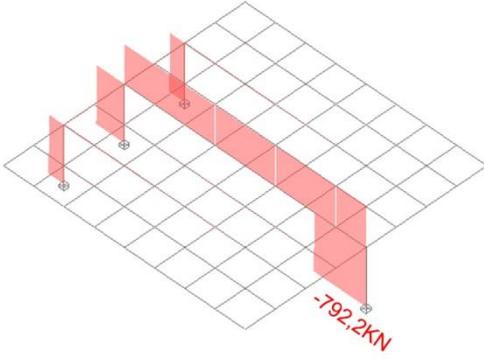
Fichas resultado

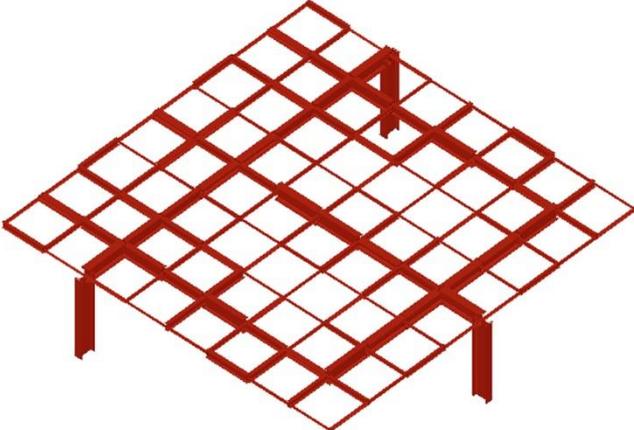
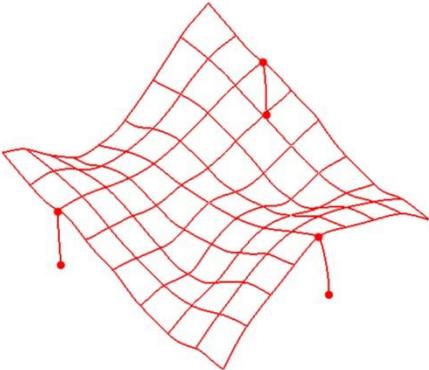
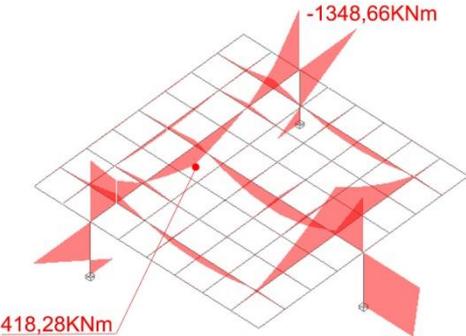
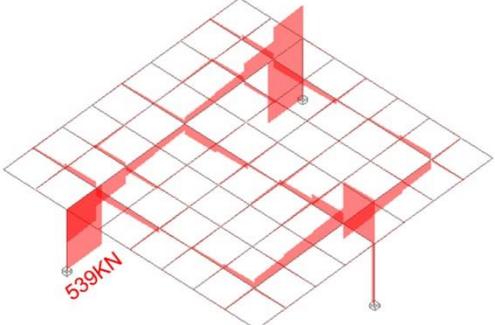
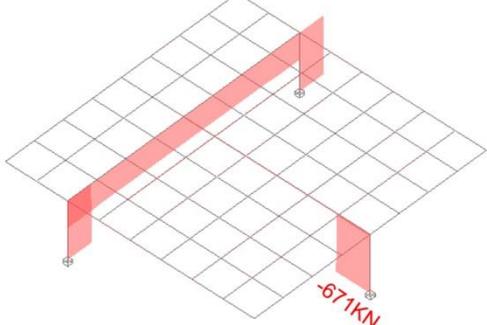
Modelos con doble simetría en malla y pilares no uniformes

V-2M1P-1	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEM 600		
Máx viga HEA 600		
Peso total (KN) 218,78		
<p style="text-align: center;">Deformada</p> 	<p style="text-align: center;">Momentos flectores</p> 	
<p style="text-align: center;">Cortantes</p> 	<p style="text-align: center;">Axiles</p> 	
Espacio A	Estructura C-	Forma B
<p>En este modelo volvemos a ver una penalización muy fuerte al no tener los pilares enfrentados con líneas claras de transmisión de esfuerzos, para solucionarlo el algoritmo los rodea con rectángulos formando una cruz con vigas dobles como ocurría en el modelo V-2M2P-12, este modelo aún funciona peor, ya que los pilares pierden por su posición la simetría central que tenían en el modelo mencionado anteriormente. Los pilares toman muchos momentos flectores en ambas direcciones engrosando su sección hasta un HEM 600.</p>		

<p>V-2M1P-2</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar IPE 600</p>		
<p>Máx viga IPE 600</p>		
<p>Peso total (KN) 133,37</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio B</p>	<p>Estructura D</p>	<p>Forma D</p>
<p>Este modelo utiliza vigas intermedias para salvar la flecha en lugar de homogeneizar toda la malla interior, vemos como el algoritmo vuelve a encontrar óptimo concentrar las cargas en varios elementos. Para poder equilibrar en el centro de vano los momentos flectores de ambos lados se engrosan varios perfiles perpendiculares a la viga central, formando una espina de refuerzo.</p>		

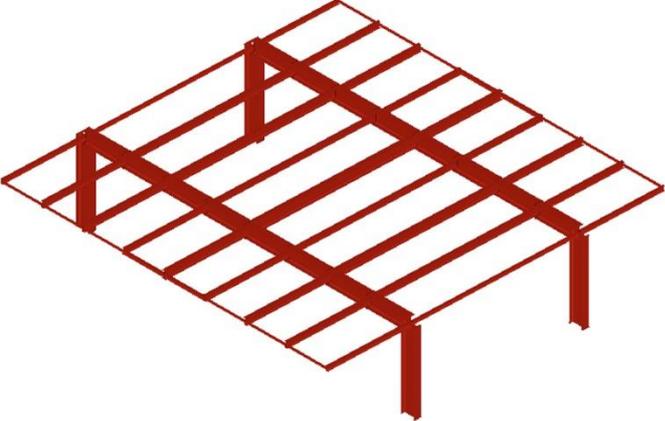
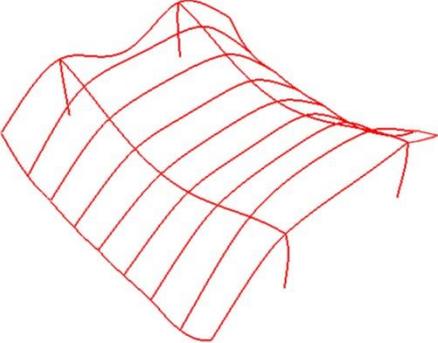
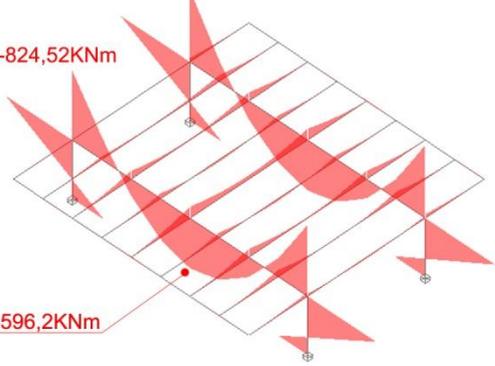
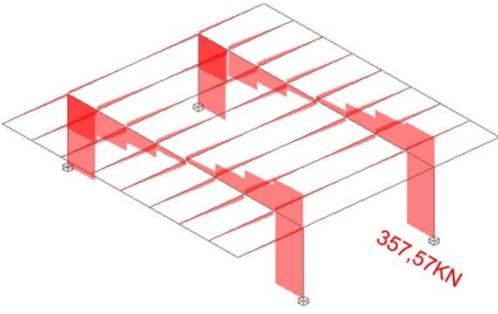
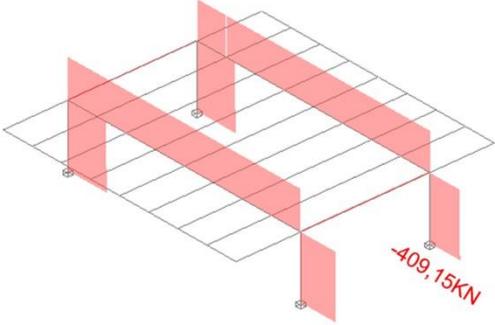
Fichas resultado
Modelos con pilares no simétricos

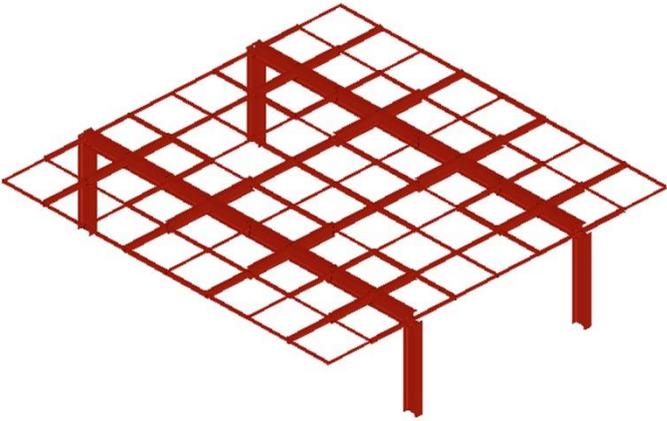
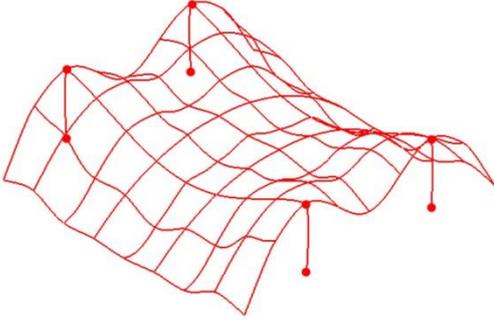
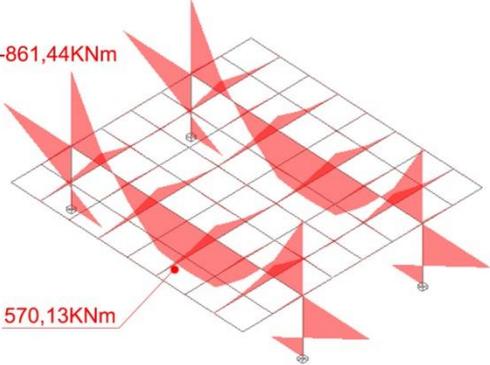
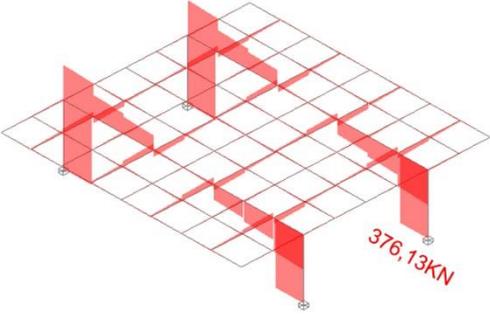
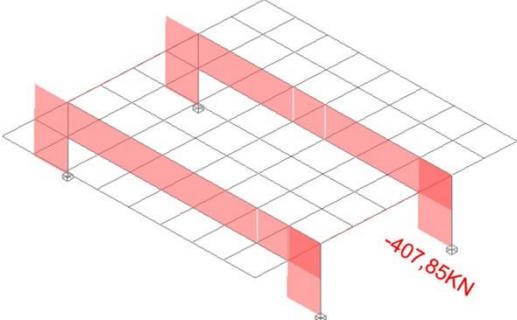
V-0P-1	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEM 600		
Máx viga HEM 600		
Peso total (KN) 157,855		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="932 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1263 576 1296">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1031 1263 1118 1296">Axiles</p> 	
Espacio B	Estructura C	Forma C
<p data-bbox="264 1816 1329 2011">En este modelo existe una disposición de pilares muy descompensada existiendo el triple de ellos en un lado comparado con el otro. Los pilares han formado parte de la misma familia, por lo tanto el algoritmo no ha podido disminuir la sección de los menos solicitados, de haber sido así el peso probablemente se hubiese reducido, a pesar de ello se da fe de que la solución que se hubiera obtenido no sería relevante. En el centro de vano la flecha se salva con una potente viga de canto variable, también impuesta desde la modelización, desde la cual aparecen a modo de costillas otras perpendiculares de sección variable que pretenden aguantar el voladizo que en esa zona es mayor, vemos como en la viga central aparece el efecto de arco, generando un acercamiento entre cabezas de pilares y por consiguiente un axil sobre la viga que los une.</p>		

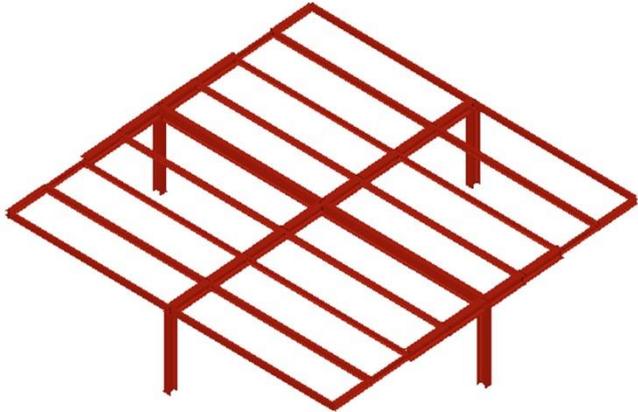
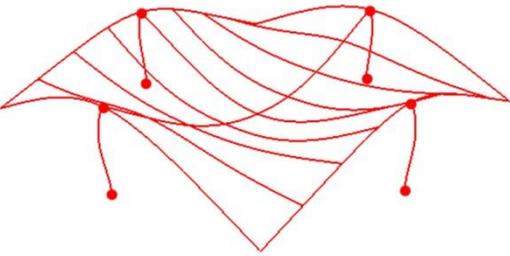
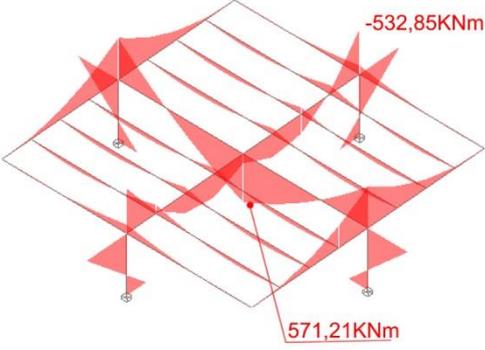
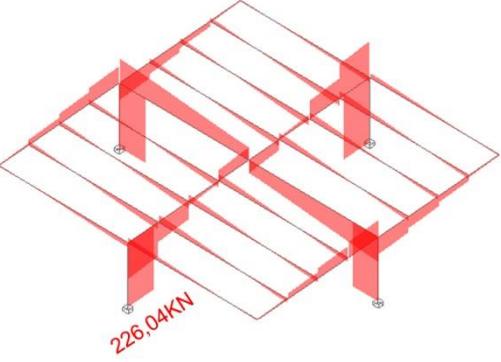
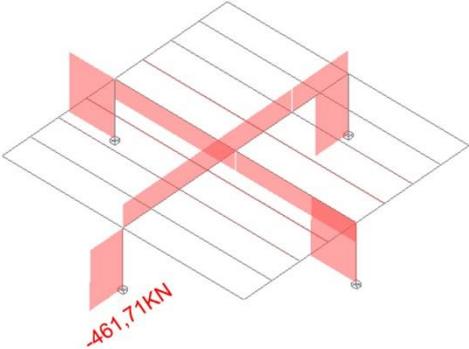
V-0P-2	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEM 600		
Máx viga HEM 600		
Peso total (KN) 154,5		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1261 576 1294">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1031 1261 1118 1294">Axiles</p> 	
Espacio B	Estructura C	Forma C
<p data-bbox="264 1816 1326 2007">Este modelo es otra opción donde también se apuesta por la irregularidad, la malla queda liberada de esfuerzos concentrándolos todos en las vigas centrales formando un cuadrado más rígido, vemos como la deformada genera un paraboloides hiperbólico en el centro. El efecto arco aparece solo en la viga que va de pilar a pilar generando un axil sobre la viga, en la otra viga relevante que va perpendicular a esta (de viga a pilar) no puede aparecer este axil, ya que lo que intenta acercar es el centro de la viga con la cabeza de pilar y ese esfuerzo de intentar desplazar el centro de viga se traduce en el pilar de esa viga en un momento flector en la dirección de menos inercia de su pilar, esto explica la necesidad de recurrir a pilares HEM en la viga cargada de axil, el otro pilar se dimensiona igual dado que las familias son iguales.</p>		

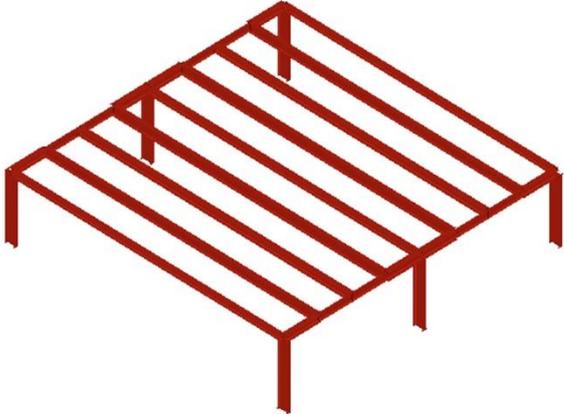
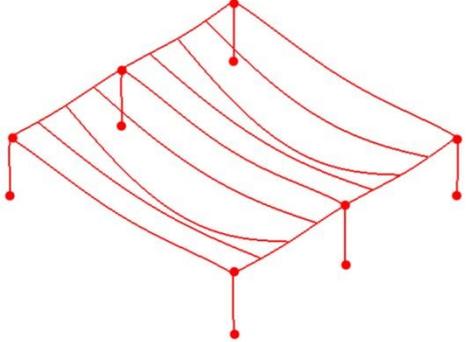
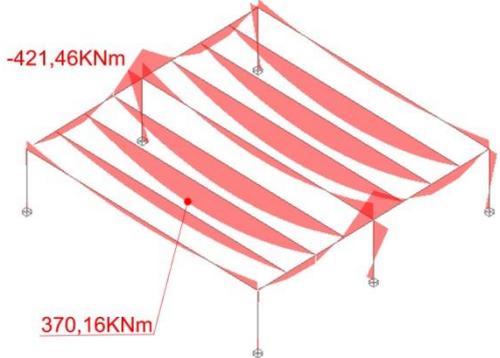
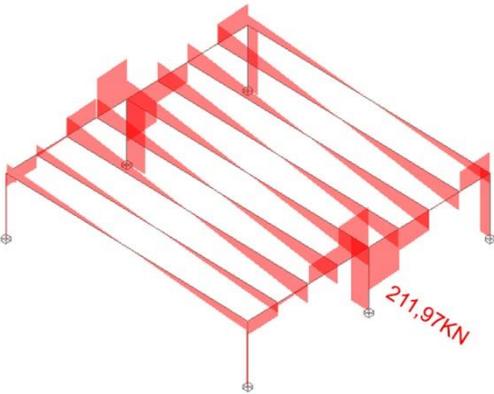
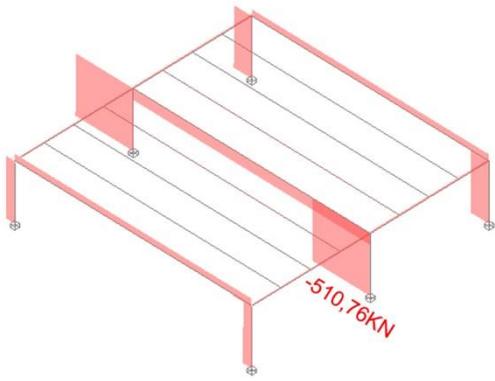
Fichas resultado

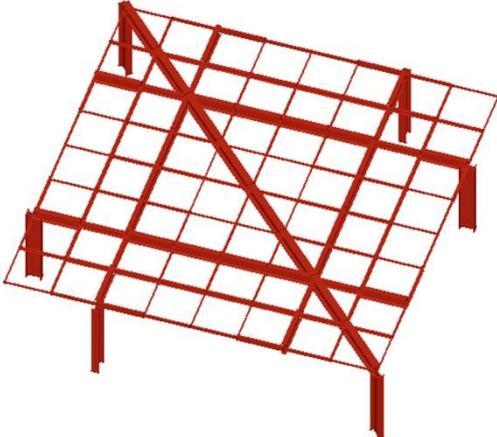
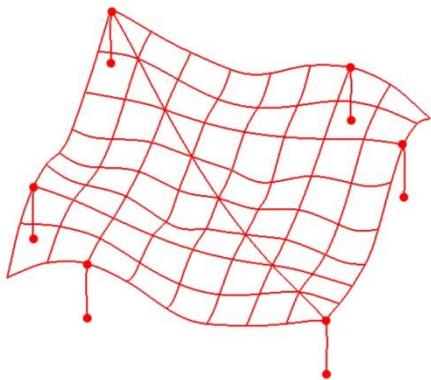
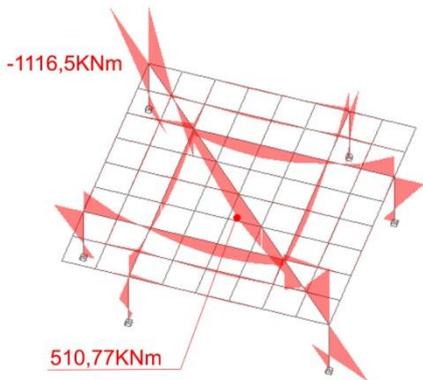
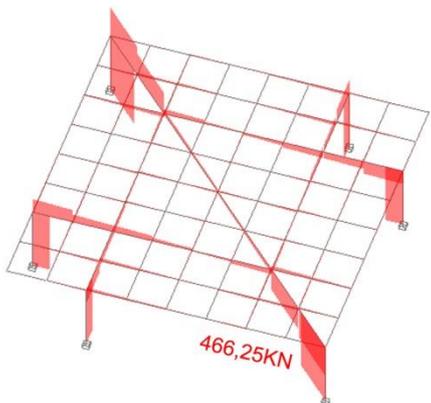
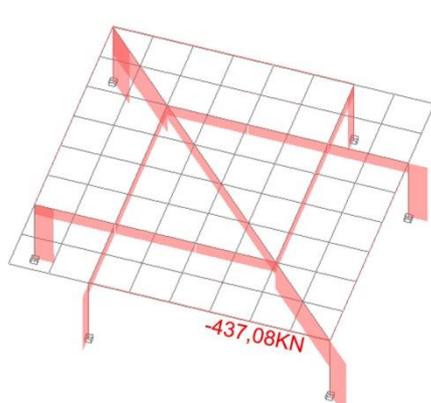
Modelos con malla con un solo eje de simetría

V-1M-1	Sólido de la estructura optimizada	
Máx pilar HEA 550		
Máx viga HEA 600		
Peso total (KN) 122,54		
<p data-bbox="432 801 592 835">Deformada</p> 	<p data-bbox="935 801 1214 835">Momentos flectores</p> 	
<p data-bbox="432 1261 576 1294">Cortantes</p> 	<p data-bbox="1031 1261 1118 1294">Axiles</p> 	
Espacio A	Estructura D	Forma D
<p data-bbox="264 1839 1326 1984">En este modelo se aprecia como a pesar de utilizar un forjado unidireccional, en el centro de vano y a modo de vigueta aparece un elemento de mayor sección, esto es para sujetar el voladizo y vemos como el algoritmo ha vuelto a decidir óptimo concentrar la sección en un solo elemento antes que uniformizarlo todo. Las vigas reciben un perfil HEA, ya que la luz es excesiva, quizás este sea el defecto más notable en forjados unidireccionales con pilares perimetrales, el efecto arco aparece en ambas vigas principales que van de pilar a pilar tal y como era de esperar.</p>		

<p>V-1M-2</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 550</p>		
<p>Máx viga HEA 550</p>		
<p>Peso total (KN) 114,45</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio A</p>	<p>Estructura B</p>	<p>Forma D</p>
<p>Este modelo similar al anterior (V-1M-1) ofrece un forjado bidireccional, el cual consigue mejorar la solución, ya que genera vigas muy delgadas en zonas donde antes existían vigas más gruesas, la bidireccionalidad abre muchos caminos para transmitir las cargas y al utilizar un algoritmo podemos encontrar el camino más óptimo de modo que las soluciones bidireccionales mejoran a las unidireccionales en este caso, también explicado por la geometría totalmente simétrica del cuadrado sobre el que se inserta la estructura.</p>		

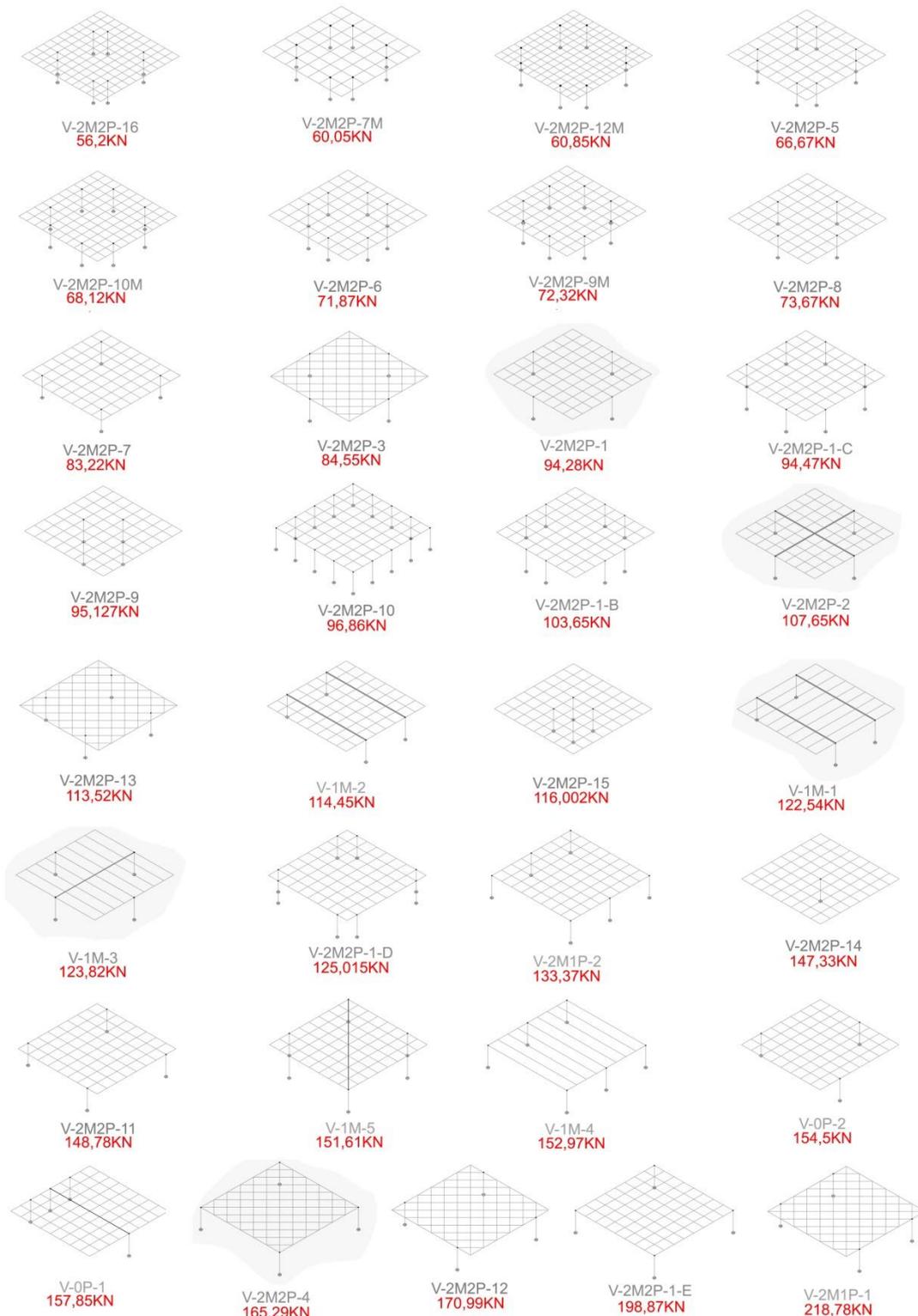
<p>V-1M-3</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEB 360</p>		
<p>Máx viga HEA 400</p>		
<p>Peso total (KN) 123,825</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio A+</p>	<p>Estructura D</p>	<p>Forma B</p>
<p>Este modelo utiliza un forjado unidireccional, sin embargo el algoritmo ha aumentado la sección de la viga perpendicular que va de pilar a pilar en la dirección contraria a la que carga el forjado unidireccional, encontrando óptimo generar artificialmente una estructura resistente bidireccional formada a partir de una cruz central y utilizando el resto de elementos como un simple refuerzo, este modelo refuerza la teoría de que para este proyecto es impensable utilizar un forjado unidireccional ya que el bidireccional es mucho mejor.</p>		

<p>V-1M-4</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar IPE 500</p>		
<p>Máx viga IPE 500</p>		
<p>Peso total (KN) 152,973</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio B</p>	<p>Estructura C</p>	<p>Forma C</p>
<p>En este modelo se vuelve a utilizar un forjado unidireccional con pilares perimetrales, esta vez las vigas pueden ser IPE debido a que traza varias de ellas, las cuales se van engrosando sutilmente al acercarse a la viga central. Es muy interesante como en la deformada se aprecia que la viga situada en el centro de cada lado (si dividimos en dos el forjado) baja mucho más que el resto, esto es debido a que esta viga se conecta con el punto medio de la viga perimetral a la que acometen el resto de vigas, esto produce un efecto de torsión que se traduce en esta deformación excesiva de las vigas centrales, la bidireccionalidad ayuda en este aspecto reduciendo las flechas, otro motivo por el que mejora al forjado unidireccional en este caso.</p>		

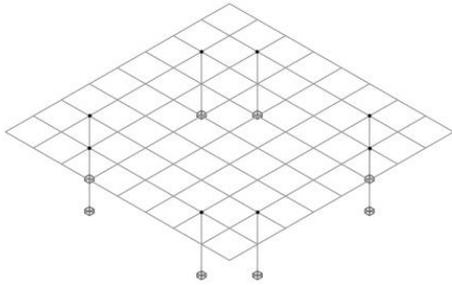
<p>V-1M-5</p>	<p>Sólido de la estructura optimizada</p>	
<p>Máx pilar HEA 600</p>		
<p>Máx viga HEA 600</p>		
<p>Peso total (KN) 151,61</p>		
<p>Deformada</p> 	<p>Momentos flectores</p> 	
<p>Cortantes</p> 	<p>Axiles</p> 	
<p>Espacio B</p>	<p>Estructura C</p>	<p>Forma C</p>
<p>Este modelo aporta una gran viga en diagonal que contradice la dirección perpendicular de la malla, a pesar de ello esta viga resulta tomada en cuenta por el algoritmo, al tener la luz en la dirección mayor (diagonal) la viga y los pilares son muy solicitados y por eso la solución requiere de perfiles en H (HEA 600). Es interesante ver como aparece el efecto arco de forma quebrada, ya que la viga forma un cuadrado dividido por la diagonal en dos triángulos indeformables, se genera de este modo un axil sobre el cuadrado central y todas las vigas conectadas a pilares. En la dirección perpendicular a la diagonal existen voladizos que generan una compensación, de tal modo que en el centro de la malla la dirección perpendicular a la diagonal disminuye su flecha y sostiene a la diagonal.</p>		

Discusión

Después de este trabajo de indagación tanto de los orígenes de las ideas miesianas como del proyecto no construido de la casa 50x50 y tras analizar y evaluar cada uno de los modelos que se han mostrado, se pueden sacar algunas conclusiones en claro, pero primero deberíamos tener un orden global sobre que estructura ha funcionado mejor:

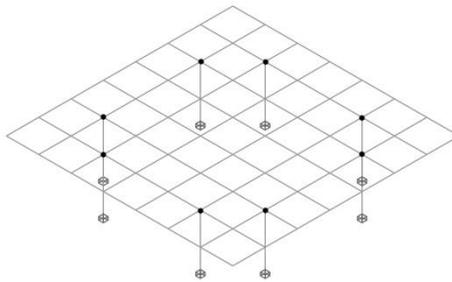


De todos los modelos el que posee la estructura óptima en cuanto al peso se refiere es el modelo correspondiente a la categoría “modelos con simetría total” V-2M2P-16 seguido de sus variantes V-2M2P-7M y V-2M2P-12M



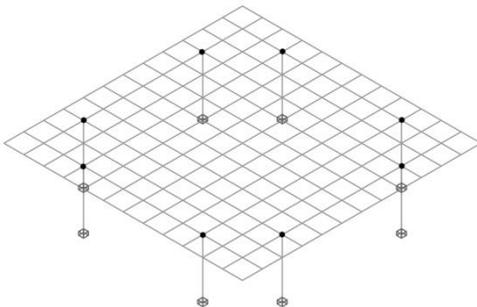
V-2M2P-16

Peso total: 56,20KN



V-2M2P-7M

Peso total: 60,05KN



V-2M2P-12M

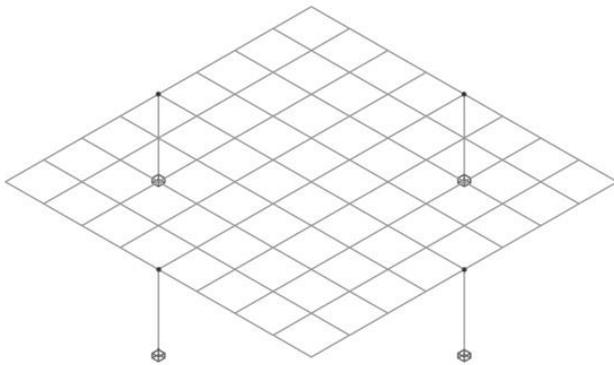
Peso total: 60,85KN

Al modelo óptimo V-2M2P-16 le han precedido numerosas sub-variantes, en este caso se han mostrado las mejores para cada paso de malla, la complejidad del problema reside en que una malla es un espacio acotado según la dimensión de sus módulos, por eso llegar al coeficiente de reparto exacto sin modificar el tamaño global de la estructura es impensable.

El modelo V-2M2P-16 ofrece el mejor resultado que puede tener el proyecto para su dimensión real modificando sus módulos, sino consentimos la modificación de sus módulos el mejor modelo sería el V-2M2P-5 (66,67KN) manteniendo sus proporciones idénticas con el modelo de Mies.

El peso que se consigue en el modelo V-2M2P-16 es muy bueno en comparación con el resto de los modelos, incluso destaca comparándolo con los mejores modelos, pero sin embargo el resultado del cómputo de sumar la estructura con el espacio y la forma no es demasiado bueno (lo mismo ocurre con el modelo V-2M2P-5), y aunque si es cierto que deja libre las esquinas, la proximidad entre pilares y el número de ellos (doble que en la versión base) además de su retranqueo invadiendo el espacio hacen de esta solución una no demasiado buena aunque llena de interés igualmente.

Es cierto que el modelo más desarrollado de la casa 50x50 no es el mejor en cuanto a la economía de la estructura, pero en contraposición con el anterior todos sus puntos están equilibrados, además de que no posee una solución demasiado mala si la comparamos con el cómputo global de resultados respecto al peso de la estructura.

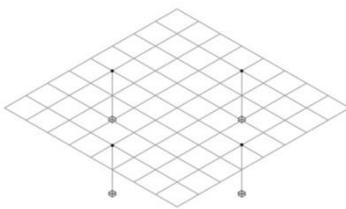


V-2M2P-1 (Modelo base)

Peso total: 94,28KN

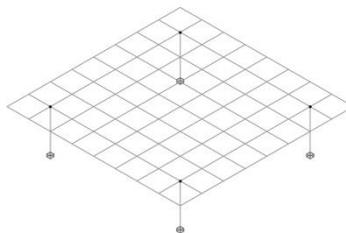
Además de todo lo mencionado anteriormente, esta variante consigue este peso relativamente bueno utilizando exclusivamente 4 pilares, mientras que los mejores resultados V-2M2P-7M / V-2M2P-12M / V-2M2P-16 / V-2M2P-5 utilizan 8 pilares, por lo tanto el modelo base V-D01 parte de una simplificación mayor requiriendo menor número de elementos estructurales y siendo mucho más esencial.

Existen otros modelos que mejoran el peso de la estructura del modelo base y cuentan con el mismo número de pilares, estos son los siguientes modelos:



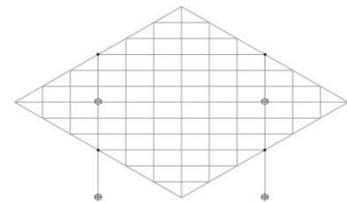
V-2M2P-3

Peso total: 84,55KN



V-2M2P-7

Peso total: 83,22KN



V-2M2P-8

Peso total: 73,67KN

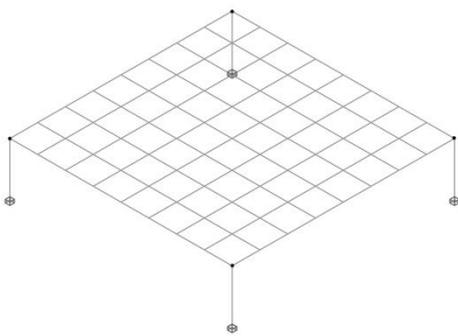
V-2M2P-3 y V-2M2P-7

A estos dos modelos les ocurre lo mismo que a los modelos que hemos mencionado, utilizan un retranqueo de pilares y un voladizo perimetral para compensar momentos, rompiendo la diafanidad del espacio interior, por lo tanto se distancian de ser soluciones óptimas.

V-2M2P-8

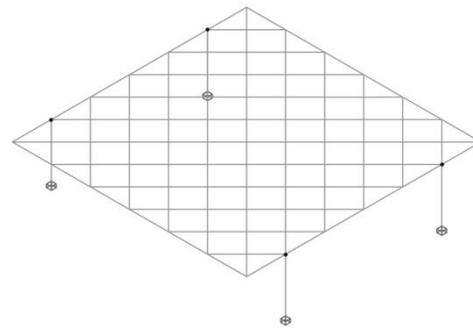
Este modelo ofrece una solución muy buena sin penalizar la forma del modelo, exclusivamente penaliza en la malla que afecta al espacio interior, al estar girada en el encuentro con las vigas del zuncho perimetral se forman triángulos y la existencia de dos formas geométricas agrede a la depuración geométrica que Mies intenta establecer. Si su peso fuese mucho mejor se podría pensar como solución sustituta de la versión base a pesar de sus inconvenientes.

Por el lado contrario los modelos que peor han funcionado han sido el modelo V-2M2P-1-E y el V-2M1P-1, ambos alrededor de los 200KN.



V-2M2P-1-E

Peso total: 198,87KN



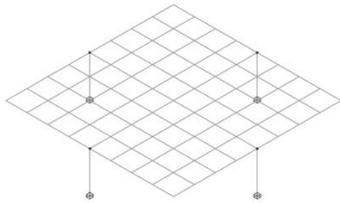
V-2M1P-1

Peso total: 218,78KN

El mal funcionamiento del primero reside en que los pilares están muy alejados y el perfil IPE es incapaz de salvar esa luz por flecha, se recurre al HEM mucho más pesado, además para reducir la flecha central la única opción es pasar vigas de canto considerable apoyadas en otras vigas de canto también considerable.

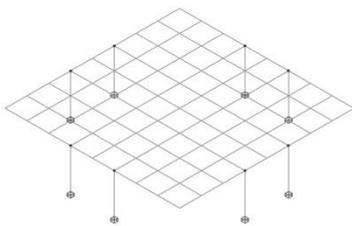
El mal funcionamiento del segundo reside en la disposición de los pilares enfrentados sin simetría total con una malla girada a 45º, esto produce que para pasar por el centro y salvar la flecha central no se puedan conectar los pilares directamente, obligando a duplicar vigas para conectarlos entre sí.

Si queremos encontrar una variante que mejore el modelo base, tendremos que trabajar con esta misma variante y comprobar cuál es su disposición óptima, para ello han servido los modelos V-2M2P-1-B / V-2M2P-1-C / V-2M2P-1-D / V-2M2P-1-E donde se mueven los pilares en el entorno del perímetro.



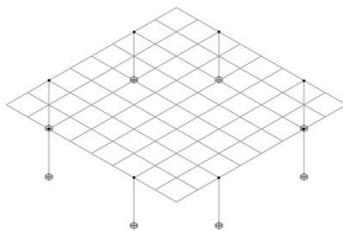
V-2M2P-1 = (Modelo base)

Peso total: 94,28KN



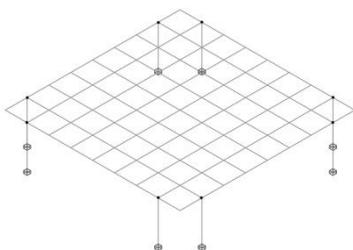
V-2M2P-1-B

Peso total: 103,65KN



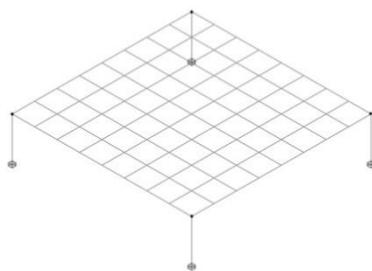
V-2M2P-1-C

Peso total: 94,47KN



V-2M2P-1-D

Peso total: 125,01KN



V-2M2P-1-E

Peso total: 198,87KN

Se concluye que el mejor modelo con pilares perimetrales en cuanto al peso de su estructura se refiere es el modelo base, seguido muy cerca del modelo V-2M2P-1-C que cuenta con 8 pilares perimetrales.

Además de que su peso es ligeramente mayor, por tener el doble pilares que el modelo base, se determina que la solución no mejora, dejando nuevamente el modelo base como la mejor solución (refiriéndonos al cómputo global: estructura, espacio y forma).

Por otra parte a través de la optimización hecha a los modelos y reproducidas en las fichas, se sacan unas conclusiones globales:

- El modelo cuanto menos simétrico sea peor funcionará en general.
- La solución de forjado unidireccional no mejora el problema en ningún caso.
- Los vanos que compensan voladizos ofrecen mejor resultado.
- Mayor número de elementos no implica mayor peso y viceversa.
- Es mejor concentrar todos los esfuerzos en uno o varios elementos que distribuirlos equitativamente por la malla, esto puede deberse al mayor peso propio que genera tener muchos elementos de canto homogéneo juntos (un perfil con más canto rodeado de perfiles mínimos aportaría menos peso).
- Si la geometría de la malla dificulta la transmisión de esfuerzos la estructura asume mucho mayor peso.
- La malla girada a 45° ofrece mejor resultado siempre que disminuya la distancia entre pilares.
- La solución con 8 pilares consigue menos peso que la solución con 4 pilares siempre que estos pilares carezcan de momentos significativos.
- Situar los pilares con simetría central empeora drásticamente la solución por dificultar la transmisión de esfuerzos por la malla.
- Los pilares que se encuentran enfrentados funcionan mejor
- Juntar demasiado los pilares no mejora el resultado generalmente
- Disponer cantos de vigas variables ayuda a mejorar la solución.
- La anchura de lado a lado no se puede salvar con un IPE, por lo tanto situar un forjado unidireccional con pilares perimetrales obliga a utilizar perfiles más pesados.
- Las mejores soluciones siempre contienen pilares HEB / HEM / HEA
- Los mejores modelos no ofrecen exclusivamente momentos positivos o negativos, en contraposición poseen ambos tipos de momentos buscando un equilibrio.

DESENLACE

Conclusiones

En este trabajo se ha hablado desde la parte más general a la más particular, se ha comenzado con la cuestión artística, antecedentes históricos y cómo Mies abarca su pensamiento, para posteriormente hablar de su concepción espacial y estructural, haciendo especial hincapié en la historia del proyecto de la casa 50x50 que ha sido el foco de este trabajo, desmenuzando sus modelos y modelizándolos, creando en muchos casos modelos nuevos a partir de los ya existentes, hasta lograr optimizar cada variante de su proyecto no construido utilizando un algoritmo informático.

Este algoritmo informático ha sido un elemento muy importante en este trabajo, el cual junto con Architrave han permitido ofrecer un flujo de trabajo rápido imprescindible para la cantidad de pruebas de ensayo y error que ha habido que hacer de cada modelo, ya que cada uno de ellos requiere de una modelización previa y unos condicionantes para que puedan obtener un resultado correcto.

Es cierto que el modelo que Mies propone inicialmente es mejorable, pero tal y como se aclara en la discusión es un modelo muy bueno no por ser radical en un único aspecto como podría ser la estructura, sino por aunar un poco de todas las características, es ahí en el punto medio donde Mies encuentra la virtud y la simplicidad en este proyecto.

Según mi punto de vista y los criterios que he usado, el mejor modelo es el modelo base por todos los motivos citados anteriormente, y pienso que Mies sabía perfectamente que este era el modelo óptimo y el que mejor iba a recoger todas las virtudes que necesitaba, no obstante para llegar a esta solución Mies dibujó numerosos modelos, ya que un paso muy importante que hay que dar para llegar a la simplicidad es la depuración, algo no puede ser simple y bueno de primer momento, para llegar a ello primero hay que tener una buena batería de intentos de ensayo y error para así poder filtrar la solución.

Quizás sea eso lo que más me ha llamado la atención a la hora de hacer este trabajo, ya que paradójicamente cada modelo ensayado en este trabajo parte de la misma concepción de ensayo y error para poder ser modelado y optimizado, así que en cierto modo se ha trabajado con el mismo flujo de trabajo que sigue Mies.

Luego pienso si realmente hay un modelo que sea más óptimo que otro, ya que por ensayo y error según el filtro que utilicemos obtendremos un modelo más adecuado a unas ideas proyectuales que a otras, me explico: Si para este proyecto Mies había planteado unas ideas inicialmente (filtros) tales como son la forma cuadrada pura, las esquinas liberadas de pilares o la estructura partícipe del espacio sin existencia de jerarquías, la solución óptima para esas ideas es nuestro modelo, pero si por el contrario se permite flexibilizar la idea u optar por utilizar una antítesis finalmente acabaremos con otro modelo óptimo para ese nuevo filtro.

Hay que remarcar que las ideas miesianas que guían este proyecto son correctas y adecuadas, ya que cada una de ellas se justifica con una adecuación del espacio, estructura y la forma del proyecto en el contexto de la arquitectura austera y esencial de Mies, se puede concluir entonces que las ideas de Mies se justifican y que para esas ideas el mejor modelo es el modelo base, el más conocido.

Existen apartados del trabajo que no se han incluido finalmente, y por lo tanto dejan abiertas ventanas futuras para poder seguir trabajando y ampliando este trabajo.

A continuación mencionaré algunos apartados que han sido pospuestos y otras posibilidades de seguir desarrollando el trabajo:

-Se pretendía mostrar modelos generados a partir del modelo base, donde se modificaba el grado de rigidez de las uniones en pilares para así poder verificar cual es la relajación óptima, sin embargo debido a que se albergaban dudas de la validez de los resultados obtenidos, ya que la versión actual de el algoritmo utilizado no tomaba las relajaciones en cuenta en su procesamiento se han decidido retirar del análisis, sería buen trabajo a futuro realizar no solo el análisis de ese modelo, sino también incluir la posibilidad de que existan rótulas en otros modelos singulares del proyecto.

-Tampoco se ha incluido un modelo muy interesante donde se ponía a prueba el algoritmo de la herramienta optimizadora. Se ha visto en este trabajo como el algoritmo no llegaba a una solución óptima con doble simetría si esta no estaba impuesta en la modelización de las familias de barras, dando como resultado una solución con simetría simple en uno de sus ejes exclusivamente, para ello se ha tenido que forzar la modelización de las familias en todos los modelos para facilitar la llegada del resultado más óptimo.

Este modelo que no se ha llegado a realizar intentaba liberar a las familias de la modelización previa con doble simetría, siendo cada barra un elemento perteneciente a una familia distinta, de este modo se esperaba comprobar como la herramienta podía salir del mínimo relativo encontrado en la solución con simple simetría y plantear la mejor solución con doble simetría geométrica, pero debido a la cantidad ingente de familias (una por barra) el algoritmo que aún está en desarrollo tenía que utilizar cantidades exponenciales de intentos que han inhabilitado el modelo, sería muy interesante plantear otra rama de trabajo centrada en esta herramienta optimizadora, y verificar que pueda encontrar el mínimo absoluto de esta solución u otras sin ninguna ayuda preconcebida inicial.

-Otra rama de trabajo que se podía seguir sería la de utilizar los mejores modelos de este estudio y optimizarlos siguiendo otro tipo de criterios, al mismo tiempo se podrían modificar e incluir otros tipos de estructura, así como modificar las proporciones del proyecto para indicar cuál es la proporción del cuadrado tal que la estructura permita albergar una vivienda unifamiliar y su estructura sea óptima

-Sería interesante la propuesta de una rama de trabajo basada en recrear los modelos tridimensionalmente y comentar en más profundidad entre otras cosas la interacción entre la forma, el espacio y la estructura de cada variante.

Con todos los puntos anteriores quedan abiertas multitud de ramas de investigación y desarrollo para poder continuar avanzando en este trabajo, además de las que puedan darse espontáneamente...

« La esquina es el origen de los problemas. »

Mies Van der Rohe

Bibliografía

Carter, Peter (1974) / *Mies van der Rohe at work* / ediciones Phaidon Press 1999

Cervilla García, Alejandro (2015) / *El lenguaje de la estructura: Mies van der Rohe y la construcción con acero y hormigón* / Tesis doctoral E.T.S. Arq. UPM / Archivo Digital UPM.

Colomé Montañés, Enrique (2014) / *Material, espacio y color en Mies van der Rohe. Café Samt & Seide: Hacia una Propuesta Estructural.* / Tesis doctoral E.T.S. Arquitectura UPM / Archivo Digital UPM.

Díaz Segura, Alfonso (2012) / *Fifty by fifty house casa Ritter-Gey. Odiosas comparaciones* / Artículo revista "En Blanco" Nº10: 16-19

Díaz Segura, Alfonso, Serra Soriano, Bartolomé, Merí de la Maza, Ricardo (2018)/ *Espacio, forma y estructura en la casa 50x50 de Mies van der Rohe.*

Fernández Galiano, Luis (2010) / Conferencias de ciclos fundación March / *Maestros de la arquitectura del siglo XX Mies van der Rohe.*

Mantovani Genari, Eduardo (2006-2007) / *Casa 50x50 Ludwig Mies van der Rohe* / Trabajo fin de master Universidad Politécnica de Cataluña.

Mantovani Genari, Eduardo (2015) / *Mies Two-Way Span* / Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cataluña.

Mies van der Rohe / *Moma collections Works of Mies van der Rohe* / Mies van der Rohe archive / <https://www.moma.org/artists/7166#works>.

Pérez García, Agustín, Alonso Durá, Adolfo, Gómez Martínez, Fernando, Alonso Ávalos, José Miguel, Lozano Lloret, Pau (2019)/ *Architrave* / Universidad politécnica de Valencia / www.architrave.es

Perez Garcia, Agustin, Lloret, Pau, Abalos, J, Guardiola Vllora, Arianna, Guardiola, Álvaro (2020) / VTAM Vast Territories Aerial Mapping / Web based application for Structural Optimization / FUNDAMENTALS OF THE OPTIMIZATION ALGORITHM. 10.13140/ RG.2.2.11870.25921/1.

Santatecla Fayos, José, Lizondo Sevilla, Laura, García Requejo, Zaida (2018) / *Relaciones entre arquitectura y estructura. Arquitectura estructural en Mies van der Rohe.*

Van Der Rohe, Mies / editado por Drexler, Arthur / notas Schulze, Franz y Drexler, Arthur (1986-1992) / *The Mies van der Rohe archive.*