



TESI DE MÀSTER

Màster

Ingeniería Estructural y de la Construcción

Títol

Optimización de forma de estructuras reticulares planas

Autor

Villarreal Huertas, Wilson Vereen

Tutor

Bairán García, Jesús Miguel

Intensificació

Análisis estructural

Data

Julio 2014

Resumen

Las estructuras reticulares planas, como las celosías, se suelen emplear en edificaciones cuyo requisito principal es salvar una gran luz con una estructura ligera, que pueda generar espacios diáfanos y funcionales para distintos tipos de edificios. Sus aplicaciones se pueden observar en cubiertas o fachadas de estaciones de ferrocarriles, aeropuertos, estadios, coliseos, centros culturales, etc.

Así mismo, esta tipología estructural triangulada, por lo que se considera conceptualmente indeformable, permite crear soluciones estéticas muy sugerentes, cuya eficiencia está íntimamente ligada a la forma de la estructura.

En esta tesina, se plantea un estudio de **Optimización de la forma** de dichas estructuras reticulares mediante procedimientos analíticos, donde el peso, la deformación y el rendimiento de las piezas, que conforman la estructura, son parámetros de control importantes en la evaluación.

Toda la evaluación se realizará en base a una estrategia de **algoritmos genéticos**, que hace referencia a la teoría de la evolución de Darwin, donde una población de individuos, los más aptos, tienen mayores probabilidades de supervivencia.

En nuestro caso, la población de individuos o modelos de celosías se ha ido generando mediante la transformación de una estructura base, que ha ido cambiando de geometría utilizando un parámetro global de forma, pre-establecido en nuestro estudio. Luego, la población generada será evaluada siguiendo los tres parámetros de control ya mencionados, como: el peso, optimización tensional y la deformación de la estructura.

En el siguiente paso, se realizará una mezcla y mutación en parte de la población seleccionada, ya sea de la población élite, población con aptitud media o la población con aptitud inferior a la media. Este proceso se repetirá N generaciones, con el propósito de ir mejorando la aptitud de los individuos. Por último, se realizará un control entre las mejores generaciones para saber qué grupo de estructuras son las más óptimas.

Toda esta metodología será complementada con un software de análisis que pueda realizar la creación de una población inicial mediante los algoritmos establecidos en el trabajo de investigación y estudiar la evolución de la estructura hasta poder encontrar el individuo con mayor aptitud de toda la población.

Con este análisis descrito esperamos obtener una “estructura genéticamente superior” que pueda marcar diferencia con respecto a una estructura estándar. Nuestro objetivo en sí, es desarrollar una metodología de cálculo para la solución de problemas de optimización de forma en estructuras reticulares planas, que sirva como base para plantear soluciones en estructuras espaciales, como la malla espacial. Este último estudio, es una propuesta de investigación para nuestro proyecto del doctorado.

Índice

1. Introducción y objetivos	5
1.1. Introducción	5
1.2. Objetivo del estudio	7
1.2.1. Objetivos generales	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.2.3. Alcance y límites	8
1.3. Justificación	8
2. Estado del Arte	10
2.1. Antecedentes de la estructura reticular plana	10
2.1.1. Evolución	10
2.1.2. Tipologías estructurales	13
2.1.2.1. Cerchas	13
2.1.2.2. Vigas en Celosías	14
2.1.3. Aplicaciones de estructuras reticulares en cubiertas y fachadas	16
2.1.3.1. Estación Internacional de Waterloo	16
2.1.3.2. Almacén para carbón en San Vicenç dels Horts	18
2.1.3.3. Call Center de Toledo	20
2.1.3.4. Kansai International Airport Passenger Terminal Building	23
2.2. Antecedentes de Optimización estructural	28
2.2.1. Conceptos básicos	28
2.2.2. Optimización con Formulaciones Discretas	32
2.2.3. Optimización con Formulaciones Continuas	36
2.2.4. Optimización con Algoritmos Genéticos	45
2.2.5. Aplicación de Algoritmos Genéticos en Celosías	52
2.2.5.1. Optimización estructural mediante formulaciones discretas	52
2.2.5.2. Optimización estructural mediante formulaciones continuas y discretas	57
3. Propuesta metodológica de Optimización de forma mediante Algoritmos Genéticos	62
3.1. Propuesta	62

3.2. Generación de la Población inicial	63
3.2.1. Estructura base	63
3.2.2. Algoritmo de evolución.....	65
3.2.3. Selección de Forma Predeterminada	69
3.3. Función Objetivo.....	71
3.3.1. Deformación	73
3.3.2. Tensión óptima.....	74
3.3.3. Minimización de peso.....	75
3.4. Selección.....	76
3.4.1. Realización de Ranking.....	76
3.4.2. Aplicación de operador de selección SUS	79
3.5. Cruzamiento	81
3.6. Mutación	84
3.6.1. Distribución del Gen de mutación	85
3.7. Población Óptima.....	88
4. Implementación de Software de Optimización de forma OPTWIL	91
4.1. Introducción al programa.....	91
4.1.1. Inicio	92
4.1.2. Pre-dimensionado	95
4.1.3. Datos A.G.	97
4.1.4. Cálculo A.G.	99
4.1.5. Detalles Evolutivos	102
4.1.6. Reacciones.....	104
5. Evaluación de OPTWIL en una estructura existente ..	105
5.1. Evaluación.....	105
5.2. Estructura bi-apoyada.....	105
5.2.1. Celosía 1 o Interior	108
5.2.1.1. Optimización de Celosía 1	110
A. Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 1).....	111
B. Comprobación de Cálculo (Celosía 1)	113
C. Pre-dimensionamiento (Celosía 1).....	116
D. Datos A.G. (Celosía 1)	117

E.	Cálculo A.G. (Celosía 1).....	118
F.	Detalles Evolutivos (Celosía 1)	122
5.2.2.	Celosía 2 o Exterior	124
5.2.2.1.	Optimización de Celosía 2	126
A.	Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 2).....	127
B.	Pre-dimensionamiento (Celosía 2).....	129
C.	Datos A.G. (Celosía 2)	130
D.	Cálculo A.G. (Celosía 2).....	131
E.	Detalles Evolutivos (Celosía 2)	135
5.3.	Estructura en Voladizo	137
5.3.1.	Optimización de Celosía en voladizo.....	141
A.	Inicio de Propuesta en el programa (Voladizo)	141
B.	Comprobación de Cálculo (Voladizo).....	144
C.	Pre-dimensionamiento (Voladizo)	147
D.	Datos A.G. (Voladizo).....	148
E.	Cálculo A.G. (Voladizo)	149
F.	Detalles Evolutivos (Voladizo).....	153
G.	Reacciones (Voladizo)	155
5.4.	Estructura Apoyada-empotrada	156
5.4.1.	Optimización de Celosía apoyada-empotrada	159
A.	Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 4).....	161
B.	Pre-dimensionamiento (Celosía 4).....	163
C.	Datos A.G. (Celosía 4)	165
D.	Cálculo A.G. (Celosía 4).....	166
E.	Detalles Evolutivos (Celosía 4)	173
6.	Conclusiones.....	176
6.1.	Verificación del Objetivo	176
6.2.	Conclusiones Generales	176
6.3.	Futuras líneas de investigación	178
Referencias.....		179

1.

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

En el mundo de la ingeniería siempre se ha buscado el diseño de estructuras resistentes, rígidas, con poco peso y que cumplan su funcionalidad adecuadamente, es decir una **estructura óptima**.

Para lograr obtener este tipo de estructuras el hombre, desde comienzos de la Humanidad, ha experimentado con muchas técnicas constructivas. En un principio, muchas de ellas se basaban en experimentos de “prueba y error”. Luego, con las matemáticas y las leyes de la mecánica, estas técnicas se fueron desarrollando y se obtuvo una metodología del Cálculo estructural, que se apoyaba en métodos derivados de la mecánica complementada con el análisis matemático, y que sustituyeron a los métodos empíricos.

Después con el desarrollo de Métodos de Cálculo Matricial de Estructuras de Barras y el Método de elementos finitos, en el siglo XX, se ha podido plantear una metodología más rigurosa de análisis estructural, que permite **optimizar una estructura mediante su forma, distribución de esfuerzos (topología) o cambiando su sección a lo largo de toda su geometría**.

No obstante, esta técnica es muy compleja por lo que no existe un enfoque único que permita abordar la resolución de diferentes problemas. Por este motivo, la optimización estructural, en general, no ha alcanzado el nivel de desarrollo ni de aplicación en ingeniería, como otros métodos de cálculo estructural.

Sin embargo, los resultados que se obtienen a través de esta metodología de cálculo son muy satisfactorios, por lo que creemos que es muy importante seguir ampliando el campo de investigación para poder mejorar la eficiencia de nuestras estructuras.

En nuestra investigación se plantea el desarrollo de una metodología estructural de optimización estructural mediante la forma, basado en Algoritmos Genéticos (AG) y aplicado al diseño de estructuras reticulares planas o celosías.

Los Algoritmos Genéticos, por su parte, son métodos adaptativos evolutivos que pueden ser utilizados para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso

genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan de acuerdo a principios de selección natural y supervivencia del más fuerte, de esta manera se busca obtener mínimos y máximos de funciones objetivo.

La implementación de nuestro método se inicia con una estructura base, que evolucionará teniendo en cuenta dos tipologías estructurales contrarias entre sí.

- La primera tipología, nos muestra una familia estructural que trabaja mayormente a compresión. Esta pieza evoluciona y cambia de forma, con el propósito de comportarse como un arco sin la necesidad de llegar a una forma esférica, ya que la geometría final de la estructura debería ser "*relativamente plana*". A esta estructura la llamamos **Estructura Ascendente**.
- La segunda tipología es la inversa de la primera. Esta estructura base busca transformarse en una pieza que esté trabajando óptimamente a tracción, como una catenaria, y pertenece a la familia de **Estructura Descendente**.

Estas dos familias darán origen a una **Población inicial**, que será evaluada tomando en cuenta los siguientes parámetros de control: **deformación, tensión óptima o rendimiento óptimo de las piezas** y por último, **la minimización de peso**. También, se considera un parámetro global de **forma**, que es el cambio de sección de la estructura después de aumentar o disminuir la longitud de las diagonales y montantes que conforman la celosía.

Luego de evaluar cada individuo o elemento estructural de acuerdo a los parámetros de control, estas estructuras serán puntuadas y ordenadas tomando en cuenta su aprovechamiento estructural. Después, los mejores individuos serán cruzados y mutados con otros de menor jerarquía. El concepto es aumentar la población óptima en base a la reproducción. Además, la variedad de descendientes nos ayuda a aumentar la posibilidad de tener un gen óptimamente evolucionado y que las características de los individuos mejor adaptados se propaguen en forma creciente, en sucesivas generaciones.

Por último, la población óptima final podrá variar dependiendo de una **selección de forma predeterminada**, que permite escoger una forma predeterminada para la solución del problema. La forma podrá ser un estructura plana, dos aguas o variable. Esta opción nos da la posibilidad de tener más control sobre el resultado final de nuestra estructura.

1.2. Objetivo del estudio

El objetivo de este estudio es desarrollar una metodología de cálculo para la solución de problemas de optimización estructuras reticulares planas y de grandes luces, basada en el estudio de la forma y mediante algoritmos genéticos. Además, se busca crear un software que realice dicho análisis estructural, donde se observe la evolución de cada estructura analizada.

En esta investigación llamamos forma al cambio de sección de nuestra celosía, que se podrá realizar con el aumento de la longitud de montantes o diagonales, que unen el cordón superior e inferior de la estructura reticular o celosía.

1.2.1. Objetivos generales

En esta investigación se busca una nueva alternativa de cálculo estructural para mejorar una estructura, de por sí, ya optimizada.

El trabajo tendrá como base una formulación discreta, con un criterio de algoritmo genético. Este criterio se basa en la teoría de la evolución de Darwin, que nos indica que de una población de individuos, los más aptos, tienen mayores probabilidades de supervivencia. En nuestro caso, los individuos son representados por las distintas soluciones que han ido evolucionando de nuestra estructura base y su aptitud al medio es definida mediante una función de control, que cada individuo debe cumplir para ser considerado apto o no.

En resumen, nuestra investigación tendrá como objetivo encontrar la solución más óptima dentro de un grupo de estructuras ya optimizadas.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr cumplir el objetivo general debemos seguir los siguientes pasos u objetivos específicos:

Se deberá prestar especial atención a los conceptos teóricos del capítulo del estado del arte con respecto a la optimización. Ya que debemos estudiar las variables de diseño (propiedades de la sección, geometría de la estructura, topología de la estructura y propiedades constitutivas) y las formulaciones (métodos discretos y continuos) para poder evaluar cuál de ellas nos podrían servir de base para lograr desarrollar adecuadamente nuestra investigación. En nuestro caso debemos estudiar con mayor hincapié los algoritmos genéticos y los pasos que nos ayuden en el proceso evolutivo.

- A. Conocer y evaluar los diferentes tipos de estructuras reticulares planas que se han desarrollado hasta el momento.
- B. Investigar y desarrollar una metodología de cálculo basada en algoritmos genéticos para un elemento en celosía bidimensional simplemente apoyado, teniendo en cuenta una posterior ampliación para el cálculo de una estructura espacial.
- C. Estudiar las posibles limitaciones que podemos encontrar con el establecimiento de nuestros parámetros. Plantear técnicas de ajuste o refinamiento de nuestra cercha o conjunto de barras que permitan resolver problemas de mayores dimensiones con un coste computacional reducido.

1.2.3. Alcance y límites

En principio la investigación se iniciara con el estudio del algoritmo evolutivo propuesto, con el propósito de ir aprendiendo y evaluando su desarrollo en cada tipología, tanto de la estructura Ascendente como la Descendente.

Luego, este estudio se enfocará en el proceso de selección, cruce y mutación de los individuos. Se analizará los “pros y contras” que conlleva el cruce y la mutación.

No obstante pensamos que la investigación tendrá límites, que a continuación mencionaremos:

- La cantidad o diversidad de parámetros de control no podrá ser aumentada libremente, ya que se establece de antemano un algoritmo matemático, donde se ha considerado como se debe evaluar la estructura en el caso de estudiar la deformación, tensión y minimización del peso. Sin embargo, hemos establecido un control de porcentajes de dichos parámetros, donde el investigador podrá elegir qué función o parámetro de control tiene mayor relevancia que las demás. Estos porcentajes ayudaran a redirigir el resultado final de la optimización, dando prioridad a una función más que a otra.
- Si deseamos aumentar otro parámetro de control se tendría que evaluar cómo se podría introducir el nuevo parámetro sin perjudicar los existentes.
- Este mismo problema o restricción pasa con el parámetro global de forma. En este estudio no se podrá cambiar este parámetro con el propósito de no perjudicar el primer análisis planteado. Sin embargo, los primeros resultados, nos demuestran que con un solo parámetro podemos obtener resultados adecuados en nuestro estudio. Se podría analizar si es imprescindible sumar un parámetro global más para mejorar la propuesta.
- Con respecto a la creación del software, esta herramienta nos ha ayudado a comprender y corregir el algoritmo genético que se había propuesto inicialmente. Los resultados han sido positivos. Sin embargo, pensamos que el tiempo computacional que se tarda en analizar una estructura debería ser más corto. Actualmente podemos analizar una población de 2038 individuos o celosías, con apoyos simples, en 18 horas. Cada individuo tiene 19 nudos.
Se debería mejorar el código para disminuir el tiempo de análisis y poder obtener resultados con un gran número de generaciones.

1.3. Justificación

Con el transcurrir del tiempo las estructuras han ido evolucionando y las diferentes metodologías de cálculo han permitido que este progreso sea continuo. Cada vez más, encontramos estructuras más eficientes, con mayores rigideces y siempre buscando una ligereza en cada uno de sus componentes estructurales.

Como investigador con conocimientos en arquitectura y estructura me gustaría colaborar en la búsqueda de una metodología que permita diseñar estructuras más eficientes y óptimas. Un claro ejemplo como investigador, que tiene ese mismo objetivo, es el ingeniero japonés Mutsuro Sasaki. Él estudia una metodología de cálculo de optimización de superficies libres, basada en utilizar criterios iterativos de cálculo para encontrar una forma de superficie optimizada. Esta superficie aumentara su rigidez con el simple cambio de forma. En este caso utiliza como parámetro de control la energía de deformación. A este estudio le llama Extensión

de la Optimización Evolutiva Estructural (EESO) [2]. Un ejemplo práctico de esta metodología de diseño es la estación de Florencia, es una obra que puede resumir la importancia del porque debemos trabajar en este tipo de teorías de cálculo.

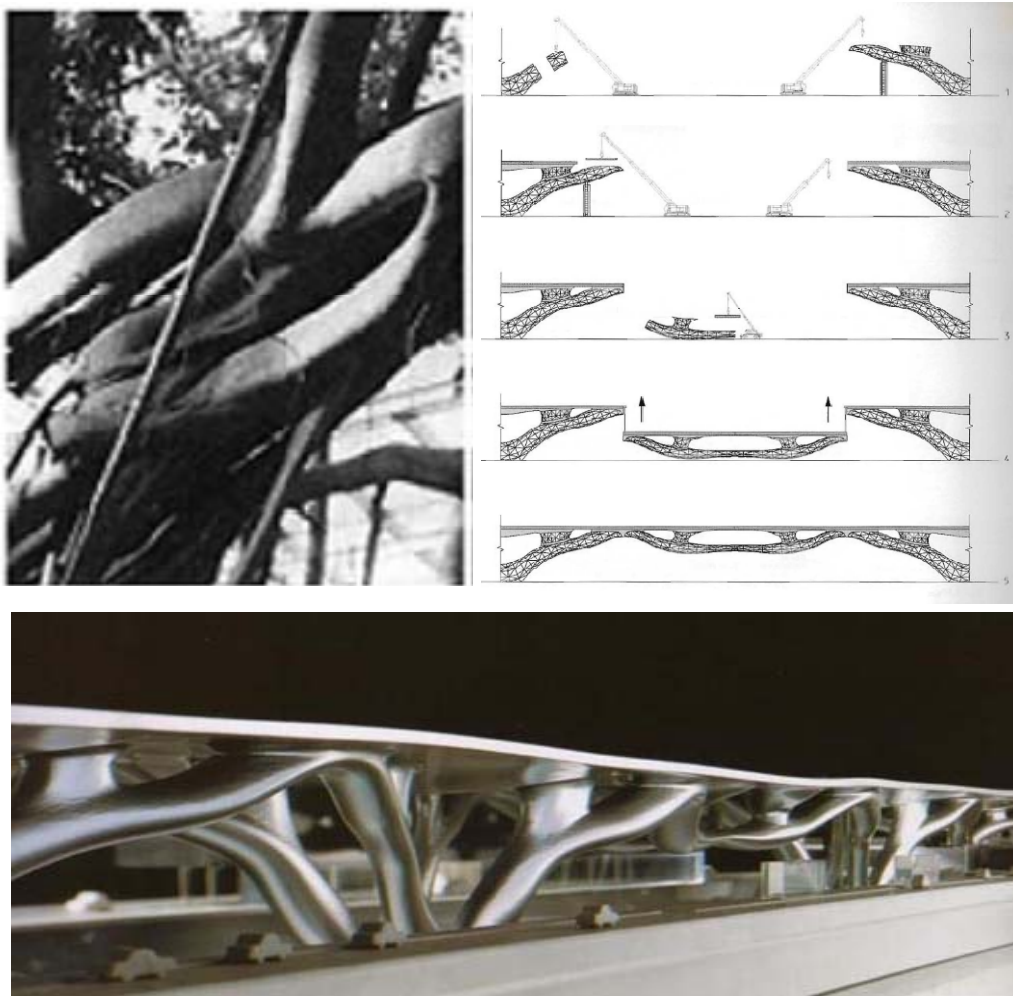


Fig. 1 : Nueva Estación de Florencia (Italia).

Se diseñó en base a una Optimización Estructural Evolutiva (Toyo ito y Sasaki 2005).

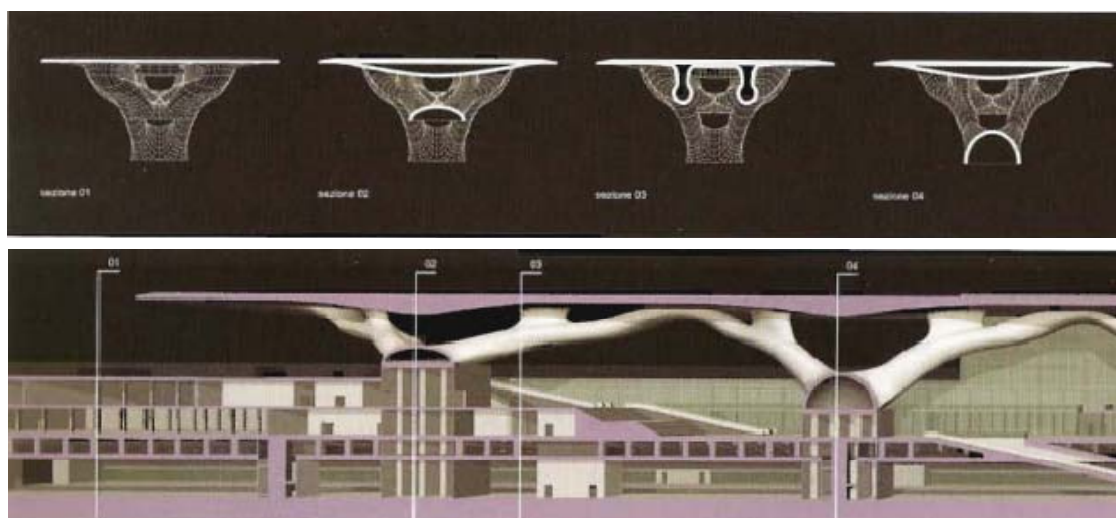


Fig. 2: Secciones del proyecto de la Nueva Estación de Florencia.

2.

Estado del Arte

2.1. Antecedentes de la estructura reticular plana

2.1.1. Evolución

Esta estructura reticular plana llamada también celosía tiene sus orígenes en las cubiertas de madera, que datan de hace más de dos mil años. No se puede afirmar con exactitud el momento de la aparición de esta estructura reticular, debido a que como prácticamente todos los sistemas constructivos, antiguos y modernos, estos son frutos de la evolución y la exploración de ideas.

Esta estructura es resultado de la evolución de una cubierta plana a una cubierta con caída de dos aguas, donde los elementos estructurales que dan la pendiente al plano del alero son los pares, y la barra horizontal, que compensa los esfuerzos horizontales, una por juego de pares, eliminando los empujes sobre los muros de apoyo, es el tirante (*fig. 4*).

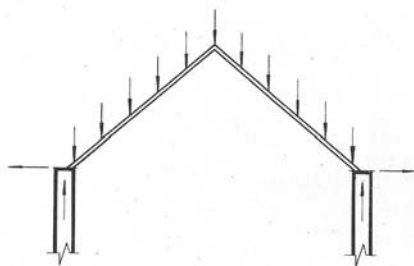


Fig. 3: Cubierta: Cargas y reacciones

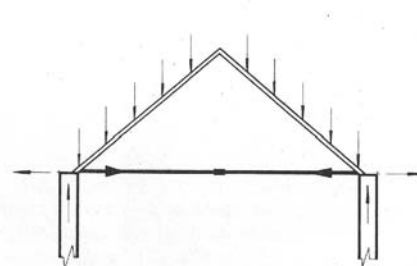


Fig. 4: Cubierta con tirante: Cargas y reacciones

Poco después, para evitar la excesiva flexibilidad de la barra traccionada, nació la **cercha con pendolón** (*fig.5*), que a su vez dio origen a **cercha con codales** (*fig.6*), llamada también cercha española porque es de uso común en la región rural española. Esta última cercha coloca dos tornapuntas para reforzar la flexión de los pares, que poco a poco fue ganando más luz.

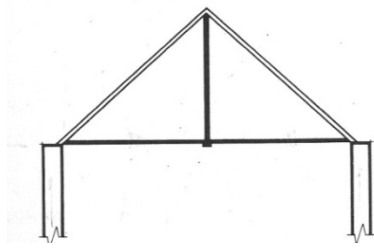


Fig.5: Cubierta: Cercha con pendolón

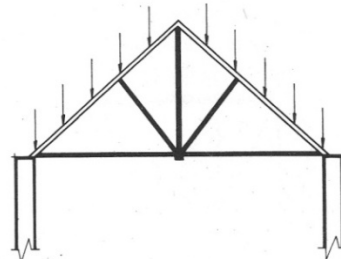


Fig.6: Cubierta: Cercha con codales

Uno de los ejemplos más antiguos de la cercha con codales lo podemos observar en los “Diez libros de Arquitectura” de Vitrubio, donde se detalla gráficamente la disposición estructural de una cubierta de un templo griego.

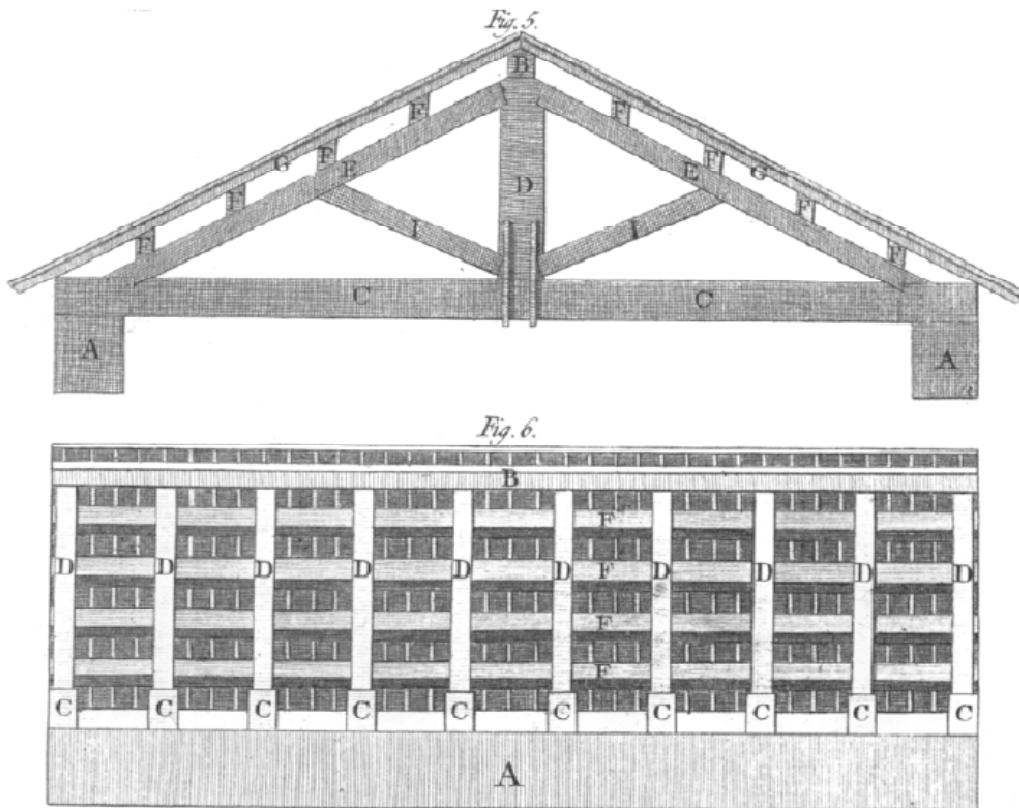


Fig. 7: Secciones de un templo griego. Los diez libros de Arquitectura, Cap. II Libro IV. Vitrubio.

Luego tenemos la **cercha Palladio**, que es una cercha con barra horizontal llamada puente. El efecto que se buscaba era evitar el pendolón, el cual era reemplazado por tres barras de menor longitud. Probablemente el nombre de la cercha provenga del uso que de ella hizo Palladio, sin embargo en la mayoría de edificios diseñados por él las cerchas quedaban ocultas en el bajocubierta. Por otro lado, según Lange, la basílica de Pompeya estaba construida con estas cerchas [30].

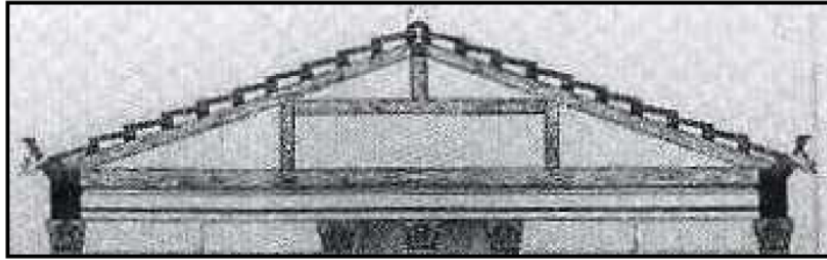


Fig. 8: Cercha Palladio. Basílica de Pompeya según Konrad Von Lange

Por último, con el propósito de cubrir grandes luces, estas estructuras fueron evolucionando aún más durante la historia. Además la necesidad de utilizar este mismo tipo de estructuras para construir puentes fue otro punto clave para su desarrollo. Los puentes de madera evolucionaron rápidamente en la edad media y fue Palladio, en el siglo XVI, el primero que realizó una serie de diseño de vigas y arcos triangulados, con una intención clara de su comportamiento resistente.

Un ejemplo de estas propuestas presentadas por Palladio es el puente del rio Cismone, donde se proyectaba una viga triangulada de madera con empalmes metálicos, salvando una luz de 30 metros [30].

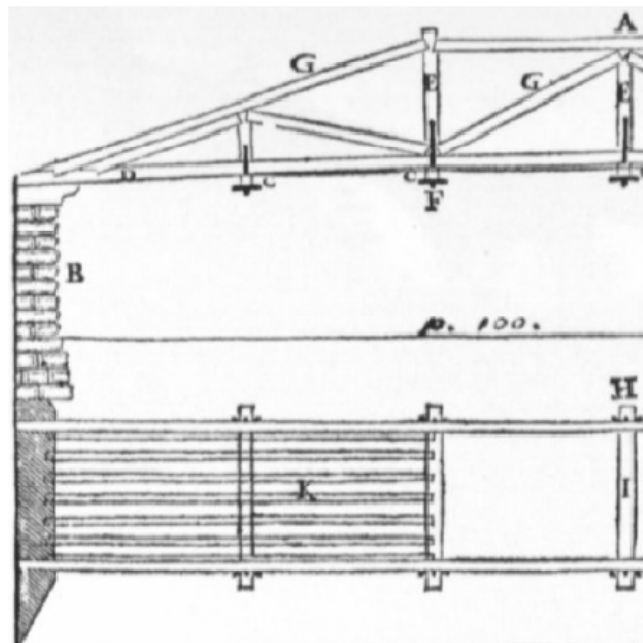


Fig. 9: Puente sobre el rio Cismone. Ilustración de Palladio

A continuación mencionaremos las distintas tipologías de cerchas que se fueron creando durante la historia.

2.1.2. Tipologías estructurales

2.1.2.1. Cerchas

A. Cercha Belga

El cuchillo belga incorpora una innovación, el cual es no tener barras verticales en toda la cercha. No obstante, sigue alternando barras traccionadas y comprimidas. Las barras comprimidas se denominan péndolas y son las barras de mayor grosor en la *fig.10*. Las barras traccionadas se les llaman tirantillas.

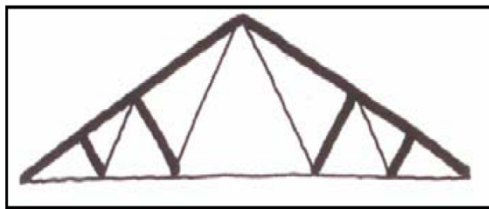


Fig. 10: Cercha Belga

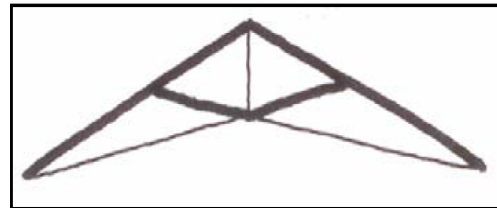


Fig. 11: Cercha Alemana

B. Cercha Alemana

Es una solución minimalista, que simplifica la estructura de la cercha y libera el espacio debajo ella. La principal característica del cuchillo alemán es que las barras inferiores cruzadas trabajan como elementos comprimidos y traccionados a la vez. Una zona de la barra funciona como tornapunta, mientras que el otro extremo funciona como un tirante.

C. Cercha Suiza

Esta estructura tiene puntos en común con la belga y la alemana. Tiene dos tirantes similares a la cercha belga, que forma una geometría curva o poligonal de bajo de la cubierta, logrando así obtener un mayor espacio libre debajo de ella, como la cercha alemana.

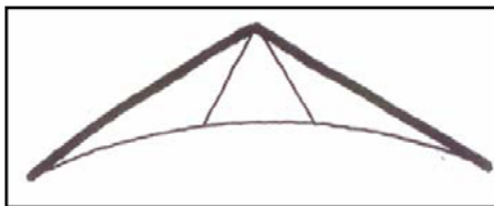


Fig. 12: Cercha Suiza

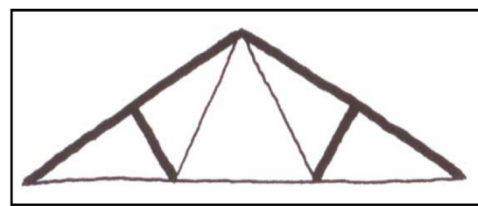


Fig. 13: Cercha Polonceu

D. Cercha Polonceau

Llamada así en honor del ingeniero que la desarrolló, es una cercha post-revolución industrial, por lo que se ha construido más en acero que en madera. Es una adaptación del cuchillo belga en el que los tornapuntas centrales mueren en las péndolas.

Existe una Polonceu compuesta, donde la misma cercha se repite con mayor número de puntales. Esta cercha es más resistente que la primera y siempre conserva las mismas secciones en sus barras.

También está la Polonceu peraltada, que es una estructura con mayor pendiente y permite quebrar el tirante inferior con el propósito de crear más espacio libre debajo de la cubierta.

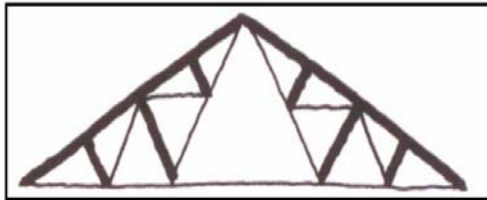


Fig. 14: Cercha Polonceu compuesta

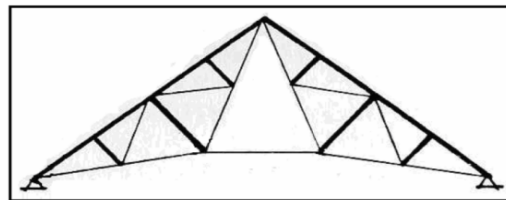


Fig. 15: Cercha Polonceu peraltada

2.1.2.2. Vigas en Celosías

La necesidad de aplicar los principios de las cerchas, para el aligeramiento de vigas y arcos de gran luz, dio lugar a un tipo de celosías basadas en utilizar un gran número de tornapuntas y tirantes, similares a una viga fink. El objetivo era dividir la carga en diferentes puntos, donde cada montante con sus respectivos tirantes pueda ser capaz de absorber cada carga.

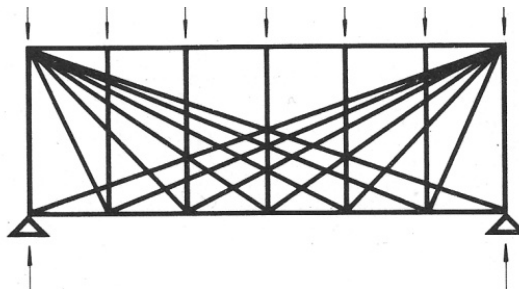


Fig. 16: Celosía base

Sin embargo, debido a que los ángulos son muy agudos o muy obtusos, junto a la dificultad de la existencia de miembros de gran longitud, que podrían sufrir problemas de pandeo, la tendencia en este tipo de estructuras se inclinó a mantener ángulos de 45 a 60, con pocas barras. Este concepto originó la creación de las vigas Pratt, Howe y Warren, entre otras.

A. Viga Pratt

Se obtiene adosando triángulos rectos, en un número par, de manera que sus diagonales simétricas se corten por debajo de la viga. Las barras cortas trabajan a compresión mientras las más largas lo hacen a tracción. Se utilizan para luces moderadas.

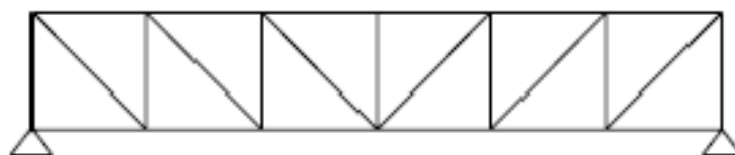


Fig. 17: Viga Pratt

B. Viga Howe

Se obtiene adosando también triángulos rectángulos, pero de manera que las diagonales simétricas se corten por encima de la viga. Las barras más largas trabajan a compresión y por tanto estas, podrían sufrir problemas de pandeo. Con el propósito de no tener problemas de pandeo en las diagonales estas suelen ser de mayor sección, por lo que encarece la solución estructural.

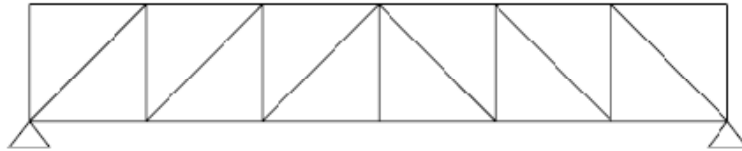


Fig. 18: Viga Howe

C. Viga Warren

En este caso los triángulos que se adosan son equiláteros, por lo que resulta menor número de barras para la misma luz y por lo tanto, más diáfanas que las anteriores.

Una variedad de este tipo es la Warren con montantes o compuesta, que se obtiene añadiendo a la anterior montantes para reducir las luces del cordón superior sometido a compresión. Sin embargo, los nudos son más complicados de realizar.

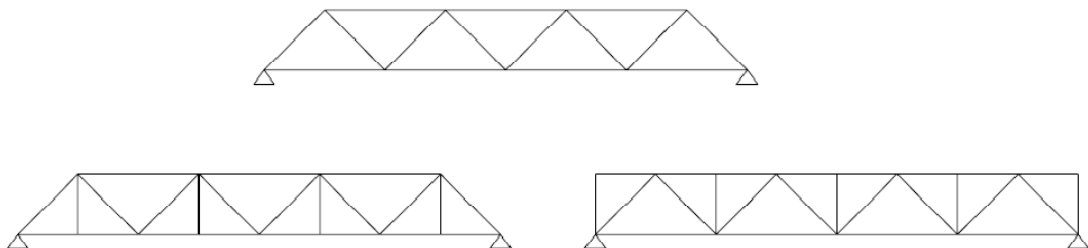


Fig. 19: Viga Warren y dos variedades de ella.

D. Tipo Cruz de San Andrés

Es muy utilizada para arriostramientos horizontales y para hacer indeformables los pórticos cuyos nudos no son rígidos.

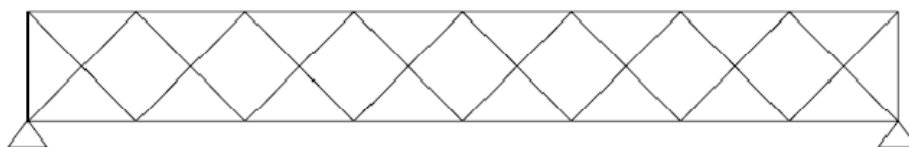


Fig. 20: Cruz de San Andrés

2.1.3. Aplicaciones de estructuras reticulares en cubiertas y fachadas

A continuación presentaremos algunos ejemplos donde la estructura en celosía ha cobrado protagonismo en la funcionalidad de los proyectos. Se podrá observar que las estructuras reticulares planas o espaciales, ayudan a resolver planteamientos arquitectónicos de manera adecuada y eficiente, sin sacrificar un estilo arquitectónico propuesto. En estos ejemplos las intervenciones estructurales han mejorado aun más la propuesta arquitectónica.

2.1.3.1. Estación Internacional de Waterloo

Esta estación de trenes se encuentra ubicada en Londres y fue construida en 1992. Su diseñador fue el arquitecto Nicholas Grimshaw, quien trabajó en colaboración con el ingeniero Anthony Hunt.

Este proyecto presentaba una serie de condicionantes que determinaron fuertemente su planteamiento. En primer lugar, la compleja geometría del solar, de planta circular abocinada, hacía que la zona de llegada de trenes tuviera que tener un ancho variable de 33 a 50 metros.

La solicitud del cliente era que en este espacio se tenía que ubicar cinco vías de tren con sus respectivos andenes, con la dificultad adicional de que una de las vías debía situarse muy próxima a uno de los extremos, donde existía una limitación de altura de 15 metros.



Fig. 21: Vista aérea e interior de la estación de Waterloo

Por otro parte, la estructura debía ser capaz de hacer frente a tres tipos de acciones y desplazamientos particulares: asientos diferenciales debido a las condiciones del terreno en la que se cimentaba el edificio, desplazamientos verticales significativos, debido a cargas variables, como el peso de los trenes, y por último, las acciones horizontales debido a la aceleración y frenado de los trenes.

Para resolver estas condiciones se adoptó un esquema estructural sencillo y eficaz, como es el arco, pero esta solución se volvió más compleja conforme se iba desarrollando el proyecto. Las restricciones de las alturas generaron que la geometría del arco se volviera más aplanada, de lo que se pensaba y por lo tanto, los esfuerzos a flexión se volvieron importantes en esta propuesta. La solución fue considerar una rotula en la zona donde el momento era nulo, de manera que cada uno de los tramos del arco estuviera siempre sometidos a esfuerzos del mismo signo (momentos positivos en el tramo mayor y negativos en el menor), lo que

permitía controlar elementos de la celosía sometidos a compresión y arriostrarlos convenientemente para evitar su pandeo (fig.22).

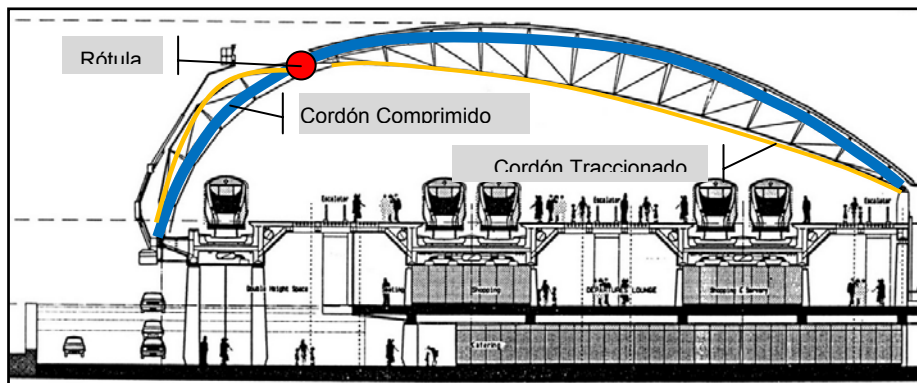


Fig. 22: Sección transversal de la Estación Internacional de Waterloo.

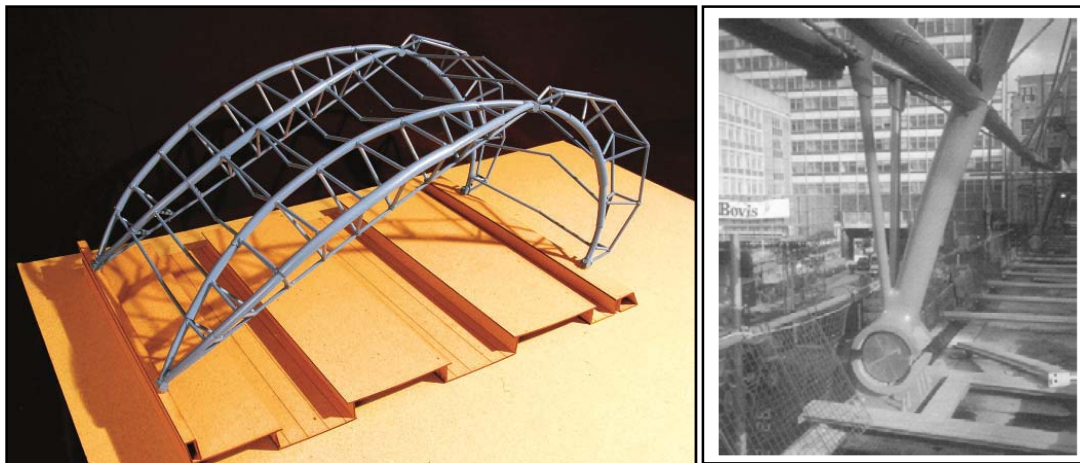


Fig. 23: (a) Maqueta del módulo estructural de la estación de Waterloo.
(b) Detalle de apoyo articulado de acero fundido.

Para el arriostramiento de estos elementos se utilizó la estructura secundaria de anclaje de fachada, que se sitúa en el cordón inferior de la celosía. De esta manera el resto de los elementos de las celosías pueden ser de menor tamaño, al estar sometidos a esfuerzos de tracción, con excepción de los montantes.

El esquema adoptado requería la resolución de complejas piezas de conexión, que en ocasiones llegaban a recibir hasta cinco elementos distintos, con diversos ángulos e inclinaciones. Para la resolución de estos nudos era de gran importancia plantear un sistema que permitiera alcanzar un alto grado de estandarización. La utilización de piezas de acero de fundición soldable permitió dar respuestas a la complejidad de las uniones de manera elegante y sofisticada, como se ve en la figura 23b.

2.1.3.2. Almacén para carbón en San Vicenç dels Horts

Los fabricantes de cemento en España utilizan combustibles sólidos para el calentamiento de los hornos, principalmente carbón mineral y coque de petróleo. El origen de dichos productos es en general lejano a la ubicación de las plantas. En algunos casos, estos minerales son recibidos vía marítima, por lo que obliga a las cementaras tener almacenes donde acopiar grandes cantidades de dichos productos a granel

Cementos Molins, con el propósito de almacenar estos productos y protegerlos del medio ambiente, decidió transformar su parque libre en un almacén cubierto. El proyecto lo desarrolló la Politécnica de Ingeniería y Arquitectura S.A.

El parque del carbón siempre ha estado organizado mediante una rampa y un dique de tierras obtenido por desmonte, donde los camiones vuelcan el material, formando una pila con ayuda de una pala. Además, desde una cota inferior, una pala alimenta, por medio de una tolva, una cinta transportadora que conduce el combustible a un silo intermedio, y desde ahí al correspondiente molino.

El diseño de la cubierta respeta la disposición topográfica del lugar, con las normales correcciones y regulaciones, y la funcionalidad básica del almacén. Como única variación, se añade una cinta longitudinal a lo largo del almacén y tres tolvas, que por un lado permiten mantener a cubierto la manipulación del material, y por otro, reducen los movimientos de la pala.



Fig. 24: Vista aérea del almacén de carbón

La solución adoptada para el cubrimiento del área, rectangular de aproximadamente 172 x 77m, presenta ventajas económicas, estéticas y funcionales de entre las analizadas: área interior muy diáfana y bien adaptada a los gálibos necesarios (mínimo de 10,50 metros de alto); y una estructura exterior al cerramiento, lo que reduce tanto el volumen cerrado como la superficie susceptible de acumular polvo del carbón.

La estructura está formada por 9 pórticos biarticulados de celosía de sección de 4x4m en vano y de 4x3m en pilares, construidos con perfiles tubulares de acero de distintos espesores, principalmente secciones cuadradas de 140mm y de 180mm. Su diseño salva una altura de 8,50m.



Fig. 25: Proceso constructivo de la nave industrial

Entre los pórticos de la nave, nos encontramos con unas bóvedas atirantadas de chapa autoportante, con apoyo fijo a un lado y deslizante en el opuesto, transmitiendo únicamente esfuerzos verticales. El cerramiento continúa con un material traslucido por la parte superior del plano inferior de la celosía. El agua recogida de las bóvedas se conduce mediante canalones a los bajantes dispuestos en los extremos, en ambos lados de los pilares de la celosía.

Transversalmente, el pórtico se resuelve con los pilares que soportan las celosías y las cruces de san Andrés que arriostran toda la fachada.



Fig. 26: Vistas de la bóveda atirantada entre los pórticos y vista de las cruces de San Andrés.

2.1.3.3. Call Center de Toledo

Este edificio se encuentra ubicado en Santa María de Benquerencia, en la provincia de Toledo, España. Fue encargado por La Consejería de Ciencia y Tecnología de la Comunidad de Castilla-La Mancha y luego pasó a ser propiedad de Telefónica Móviles. Los arquitectos responsables del proyecto son Felipe Pich-Aguilera y Teresa Batlle.

Para el diseño de este edificio se han utilizado los últimos referentes tecnológicos y bioclimáticos. Su arquitectura y estética elegante e innovadora le ha valido para ser reconocida y ser galardonada con distintos premios de sostenibilidad.



Fig. 27: Perspectiva del edificio Call Center de Toledo

Estructuralmente, el edificio está compuesto por los siguientes elementos:

Dos núcleos rectangulares principales de hormigón armado (Cuadrados rojos en la [fig.28](#)), que se ubican en la zona central del edificio y sirven de soportes para las losa prefabricadas que se ubican a distintas alturas. En estos núcleos encontramos los servicios y las zonas de escaleras.

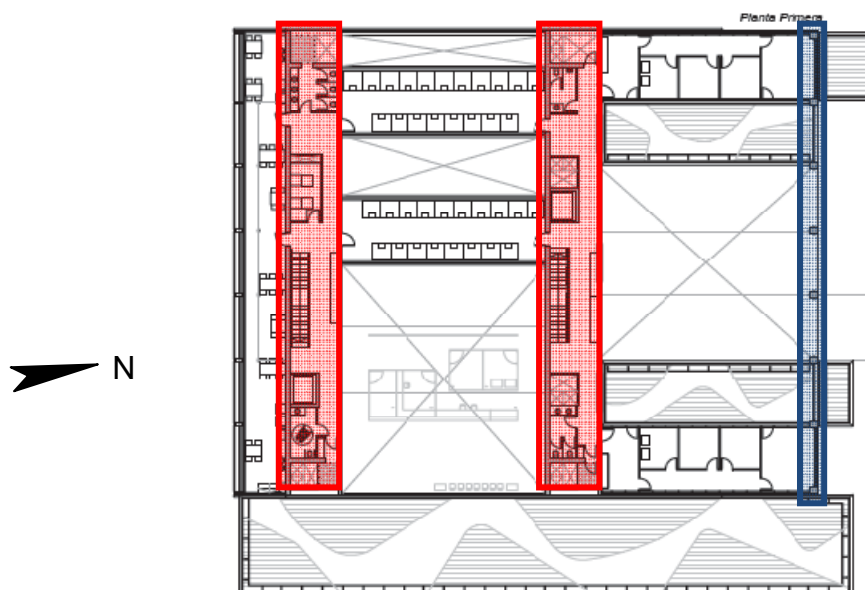


Fig. 28: Planta Primera. Núcleos principales (rojos) y sistema porticado (azul)

Un sistema de pórticos de hormigón armado (rectángulo azul [fig.28](#)), que se ubica en la fachada norte y también sirve de apoyo para las losas prefabricadas.

Losas prefabricadas de hormigón armado, que se ubican a diferentes alturas, distanciadas unas de otras, con el propósito de crear espacios iluminados y con una ventilación cruzada. Estos elementos están orientados de norte a sur.



Fig. 29: Sección Longitudinal del edificio. Vista de las losas prefabricadas tipo "puentes"

Por último, tenemos la cubierta, compuesta por una estructura en celosía de forma curva, simulando el ala de un avión. Esta estructura es un elemento principal en la funcionalidad del edificio, debido a que la cubierta permite crear un clima controlado dentro del edificio, tanto en invierno como en verano ([fig.30](#)).

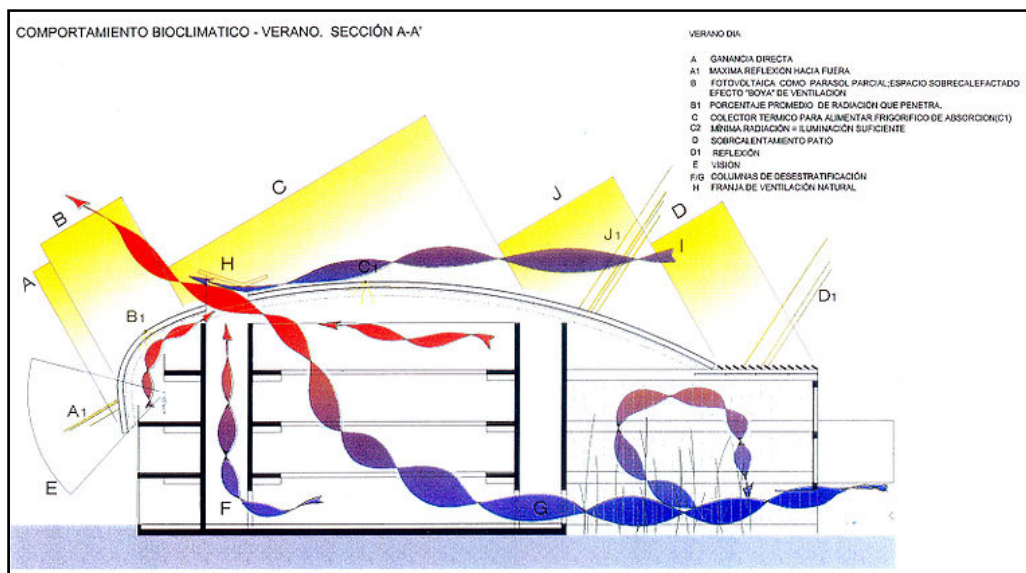


Fig. 30: Comportamiento bioclimático del edificio en Verano. Sección Transversal

Esta estructura se encuentra apoyada en seis puntos del edificio y tiene un canto total de 78cm, logrando una sensación de ligereza. Estos puntos de apoyo se observan en la [fig.31](#).

En el extremo izquierdo la cubierta se apoya en unos pilares apantallados de hormigón armado, mediante bulones, a efectos de conservar su articulación (1). En la zona superior hay dos puntos de apoyo en cada núcleo principal (2-3 y 4-5). En cada apoyo existen triangulaciones con perfiles tubulares que articulan la unión. La luz que se salva entre los núcleos es de 15m. Por último, en el extremo derecho, la estructura tiene un gran vuelo, que se salva mediante un tornapunta (6), compuesto por un perfil tubular de 200x8mm, quedando al final un voladizo de 5,50mts.

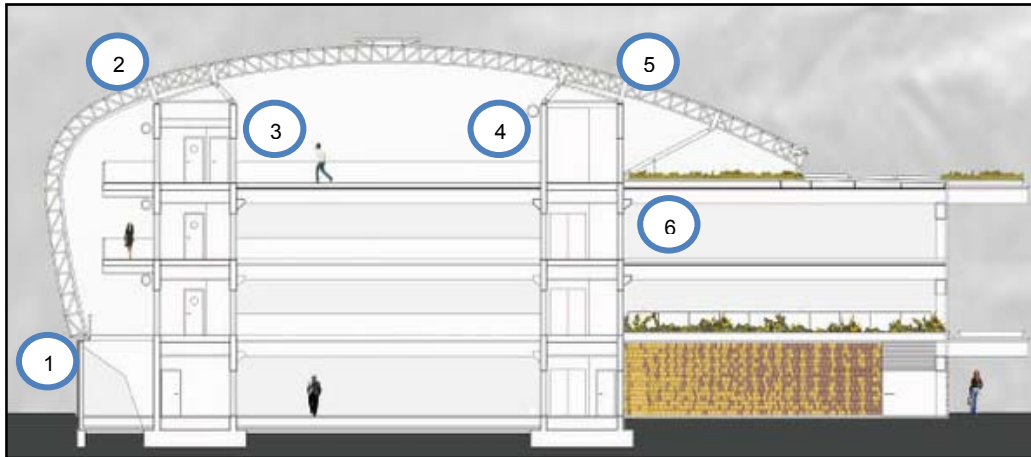


Fig. 31: Sección transversal con ubicación de puntos de apoyo de la cubierta

La modulación de la celosía es fija y están separadas cada 4,80mts; siendo esta la longitud de las correas. Por razones constructivas, estas correas están separadas cada 80 cm. y se ha tomado dicho módulo para formar las triangulaciones de la celosía. Los puntos donde se apoya la cubierta, sobre la estructura de hormigón, se han rigidizado mediante cruces de San Andrés.

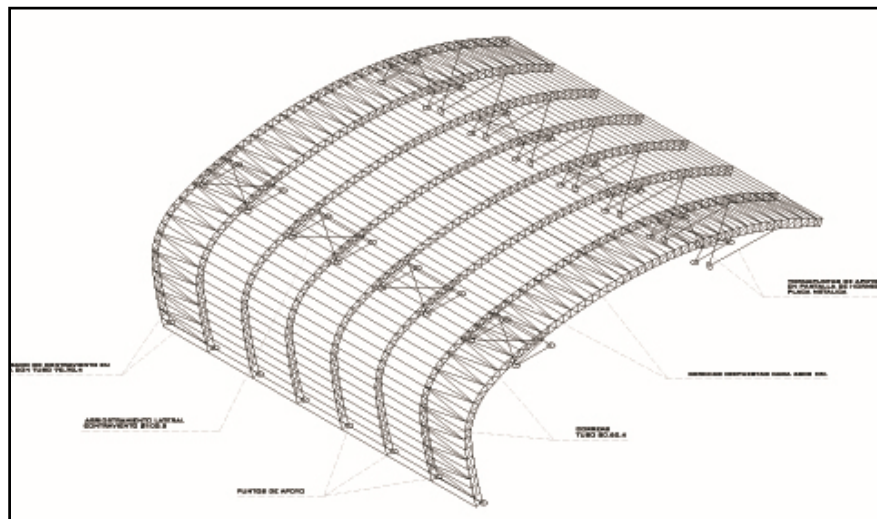


Fig. 32: Perspectiva de la cubierta, con la ubicación de las cruces del sistema de arriostramiento.

Por último, en las fachadas laterales del edificio se ha diseñado una estructura de contraviento, que permite distribuir las cargas directamente sobre los forjados intermedios del edificio. La modulación de esta estructura coincide con la modulación del arriostramiento que se observa en el plano de la cubierta, compuesta por diagonales tubulares de 70x70x4mm, logrando generar una estructura que trabaje como un solo elemento.

2.1.3.4. Kansai International Airport Passenger Terminal Building

Es un aeropuerto internacional ubicado en una isla artificial en la bahía de Osaka, a unos 50 km al sur del centro de Osaka, Japón. Fue diseñado por el arquitecto Renzo Piano y por el ingeniero Peter Rice de Ove Arup & Partners.

El aeropuerto fue inaugurado el 4 de septiembre de 1994 y su construcción fue considerada como el trabajo de ingeniería civil más caro de la historia moderna, luego de 20 años de planificación, 3 años de construcción y miles de millones de dólares invertidos.



Fig. 33: Vista Aérea del aeropuerto de Kansai en Osaka, Japón.

Su construcción se inició en 1987. Primero se realizó una muralla protectora en todo el perímetro del futuro aeropuerto, que fue terminada a finales de 1989. Aproximadamente 21 millones de metros cúbicos de bloques de hormigón fueron utilizados de relleno, excavados de tres montañas. La obra empleó una mano de obra de aproximadamente de 10.000 trabajadores, 10 millones de horas de trabajo a lo largo de 3 años y se usó de 80 barcos para completar una capa de 30 m de grosor ubicada en la plataforma submarina.

En 1990, se completó el puente de 3 km de largo, que conecta la isla artificial con la Prefectura de Osaka, con un coste de 1.000 millones de dólares. Para ese momento, la isla se había hundido 8 m, más de lo previsto.

En 1991 se comenzó con la construcción de la terminal, con un edificio de cuatro niveles, 25m. de ancho, una altura de 30m. y una longitud de 1,7 Km. Esta estructura está conformada por 900 pilares, que se encuentran ubicados en una retícula aproximada de 14x10m. y que están montados sobre gatos hidráulicos controlados, con el objeto de compensar los movimientos del firme (*Fig.34*).

Se sabe que estos movimientos fueron muy acelerados los primeros meses después de su inauguración. El terreno llegó a hundirse 5cm por mes. Ahora este asentamiento se ha controlado, no obstante al ser un terreno poco estable, de arcilla diluvial, es difícil saber su comportamiento a futuro. Por esta razón, se propuso una cubierta ligera para el proyecto.

El éxito de esta obra colosal se confirmó en 1995, cuando un fuerte terremoto sacudió el área de Osaka; y en Kansai ni tan siquiera se rompieron las cristaleras, debido a que la estructura cuenta con juntas de dilatación que absorben los movimientos sísmicos, térmicos, y los asentamientos del terreno.



Fig. 34: Sistema Hidráulicos de par corregir el asentamiento que se producen en zonas puntuales del terreno y mantener la horizontalidad de los forjados.

2.1.3.4.1. Cubierta del Aeropuerto

La cubierta tiene una forma aerodinámica similar a las alas de un avión. Su diseño proviene de una geometría toroidal (fig.35), donde las alas, conceptualmente, representan la parte superior de un anillo de 16.800 metros de circunferencia, con un radio inclinado de 68° con respecto al horizonte, que pasa a través de la tierra y emerge sobre la isla. La curvatura debía ser imperceptible para garantizar la visión de la torre de control hacia los extremos de la cubierta.

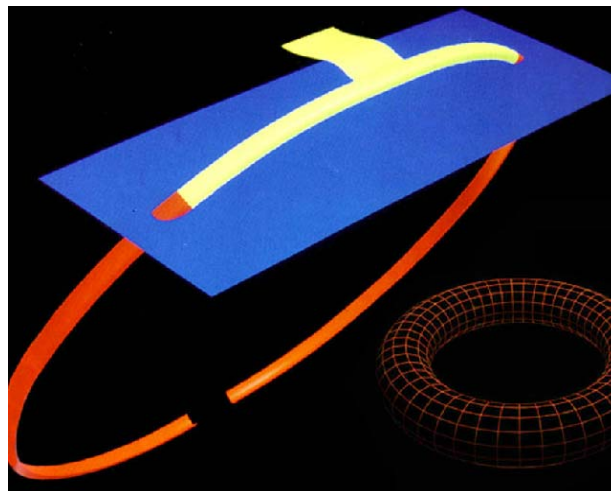


Fig. 35: Geometría Toroidal que ayudo a generar la geometría inicial de la cubierta

Este diseño garantiza la estandarización máxima de los componentes del edificio, como es el caso de los paneles de cubierta, donde todos los 82.000 paneles de acero inoxidable del aeropuerto son absolutamente idénticos.

Así mismo, se puede observar en la imagen toroidal que la cubierta tiene dos zonas diferenciadas. La primera zona es la que se ubica en el centro de la cubierta y funciona como zona de acceso al edificio y la segunda zona es el corredor que cruza todo el aeropuerto y funciona como una zona de embarque.

La primera la zona tiene un perfil asimétrico y su diseño responde a cálculos que han permitido que el flujo de aire sea invisible para la estructura. En este caso se ha llegado a

canalizar el aire de la zona de ingreso (punto 1 de la *fig.36* hacia la zona de la pista (punto 4 de la *fig.36*), sin usar conducto alguno. Se ha creado un microclima que permite estar por encima de 20°C en invierno y por debajo de 26°C en verano, con una humedad relativa de 25 a 55%.

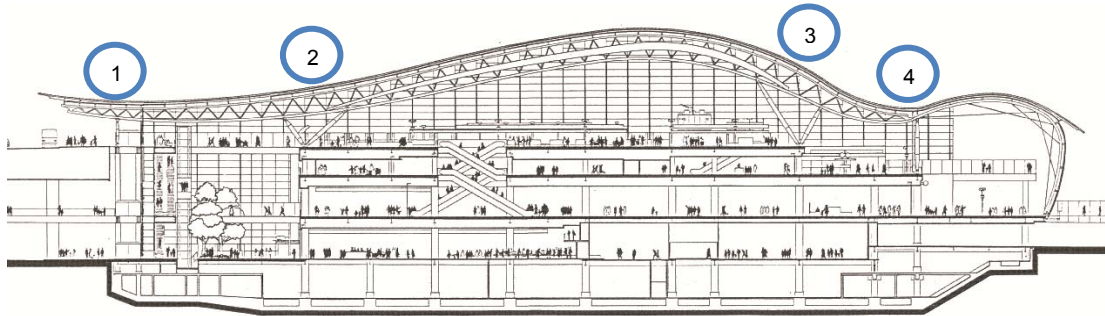


Fig. 36: Sección transversal. Ubicación de los 4 puntos de apoyo de la celosía principal

Por otro lado, la estructura de la cubierta está formada por unas celosías principales de sección triangular, que tienen una longitud total de 120 m. y un canto máximo de 3,40m. Cubre una luz máxima de 68,50m y se apoya en cuatro puntos. Los apoyos centrales, punto 2 y 3, son apoyos triangulados tipo tornapuntas, que ayudan a estabilizar la estructura.

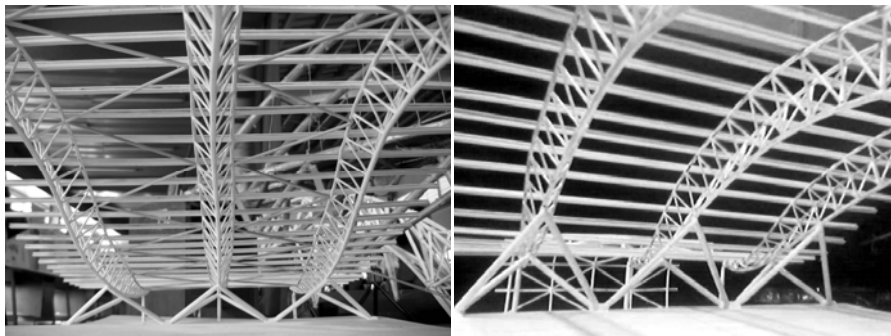


Fig. 37: Vistas de maqueta de celosías principales con apoyos triangulados

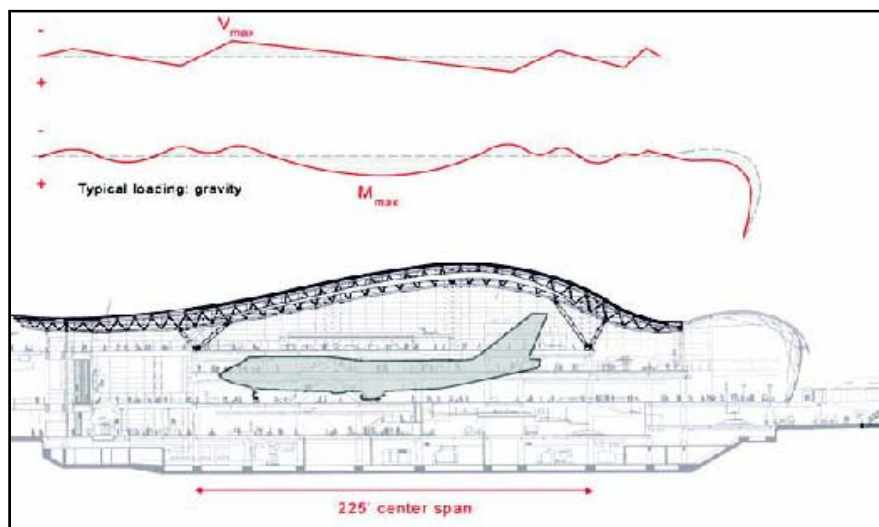


Fig. 38: Diagrama de cortantes y momentos flectores de la cubierta

La segunda zona, la zona de embarque, tiene una apariencia más ligera, donde las celosías se transforman en una malla plana. Esta estructura al ser un arco no funicular, se rigidiza con unos tirantes entrecruzados, evitando así su deformación. Esta técnica la planteó por primera vez el ingeniero ruso Vladimir Shújov (*Fig.40*).

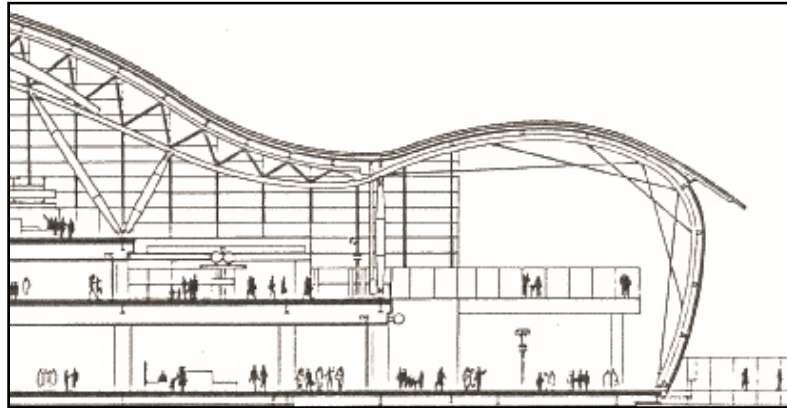


Fig. 39: Sección transversal de la zona de embarque

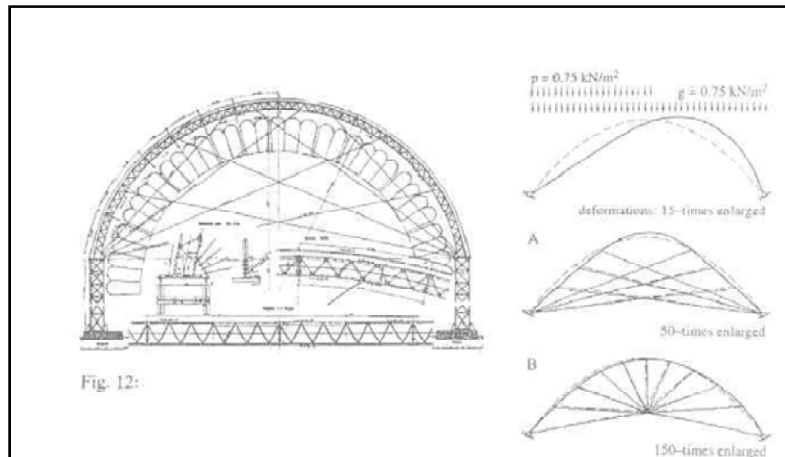


Fig. 40: Esquema estructural del Hall de exhibición de todas las Rusias en Nizhni Nóvgorod, 1896
Obra de Valdimir Shújov



Fig. 41: Zona de embarque. Se puede observar la rigidización del arco a través de tirantes

Por último, el desagüe pluvial en toda la cubierta se realiza por cada uno de los paneles hacia una capa impermeable situado debajo.

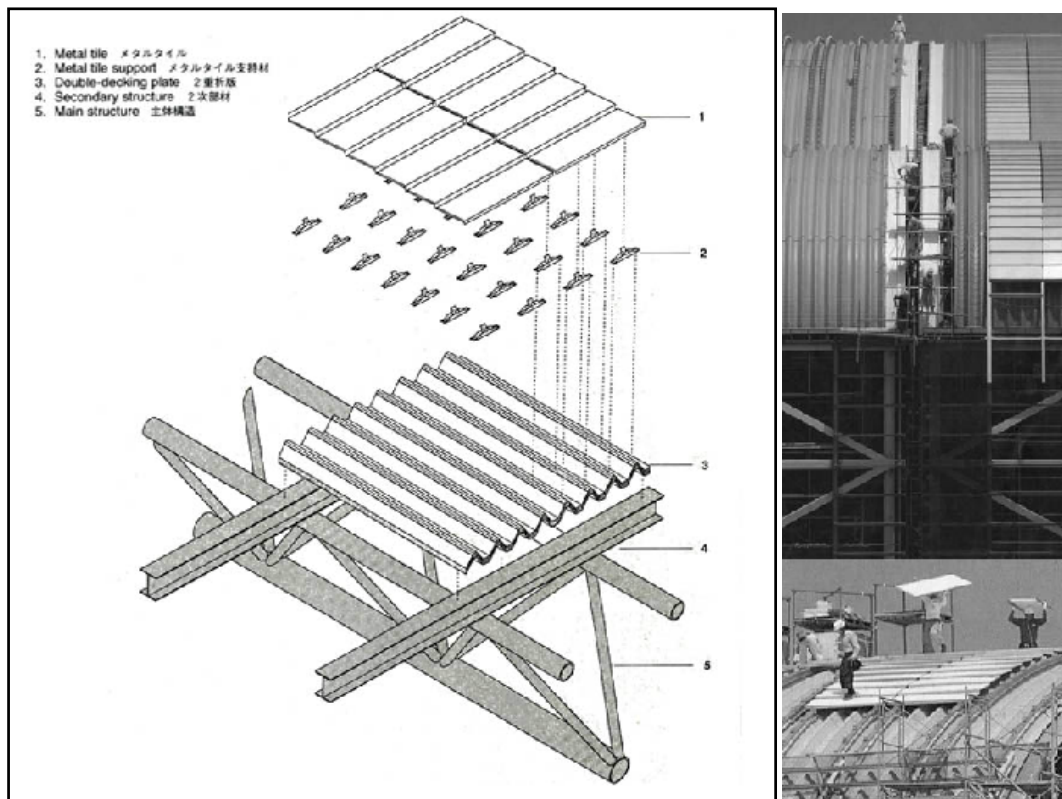


Fig. 42: Detalle de cubierta

2.2. Antecedentes de Optimización estructural

2.2.1. Conceptos básicos

En nuestro trabajo de investigación es importante conocer los siguientes conceptos y términos para comprender el propósito de la investigación:

2.2.1.1. Formulación del diseño óptimo de estructuras

Es importante definir los límites del sistema que se desea investigar. Generalmente, el diseño que se pretende optimizar pertenece a un conjunto mayor, y estos límites son las acotaciones que lo separan del mismo. Sirven para aislar el sistema de su entorno, puesto que para su análisis, todas las interacciones entre el sistema y su entorno se suponen invariables a un determinado nivel.

El problema de diseño óptimo se entiende como aquél que se plantea para determinar el valor de una serie de variables que minimice o maximice, según sea el propósito, el valor de una función objetivo, el problema se puede formular como: encontrar el vector de variables de diseño x que:

$$\begin{array}{ll} \text{minimice} & f(x) \\ \text{sujeto a} & h_j(x) = 0 \quad j=1, \dots, m_i \\ & g_k(x) > 0 \quad k=1, \dots, m_d \\ & x_{i,i} < x_i < x_{i,s} \quad i=1, \dots, n \end{array}$$

donde

x	vector n-dimensional de variables de diseño
$f(x)$	función objetivo, representa el criterio óptimo
$h_j(x)$	restricción de diseño de igualdad j
$g_k(x)$	restricción de diseño de desigualdad k
m_i	número de restricciones de igualdad
m_d	número de restricciones de desigualdad
$x_{i,i}$	límite inferior de las variables de diseño i
$x_{i,s}$	límite superior de las variables de diseño i
x_i	variable de diseño i
n	número de variables [27]

Al espacio n-dimensional definido por el vector de la variable x se le denomina espacio de diseño.

Las restricciones definen hipersuperficies que acotan un entorno en el espacio de diseño. Un conjunto de variables de diseño define un punto en el espacio de diseño. Si un punto es tal que se cumplen todas las restricciones, ese punto es un diseño válido o factible.

2.2.1.2. Variables de diseño

En los estudios de optimización estructural es necesario saber que existen dos tipos de magnitudes que intervienen en el diseño. Las primeras son magnitudes constantes, llamadas *parámetros*, cuyo valor se debe a las condiciones que son impuestas por el mismo problema. Y las segundas magnitudes, son llamadas *variables*, cuyos valores pueden cambiar a lo largo del diseño.

Estas últimas se distinguen en cuatro tipos de variables:

- Propiedades de la sección de la pieza: área, momentos de inercia y de torsión.
- Geometría de la estructura: altura, longitud, espesor, etc.
- Topología de la estructura: densidad del material, perímetro total, etc.
- Propiedades constitutivas: módulo de elasticidad, Coeficiente de Poisson, etc.

2.2.1.3. Formulación discreta y continua

Teniendo en cuenta la tipología de las variables mencionadas y el planteamiento del diseño óptimo, estas se pueden clasificar en discretas o continuas.

2.2.1.3.1. Formulaciones Discretas

Esta formulación estudia la existencia o no de material dentro de un dominio predefinido. En la optimización estructural se tiene en cuenta que el material debe tener una distribución eficiente y adecuada para el desarrollo del problema.

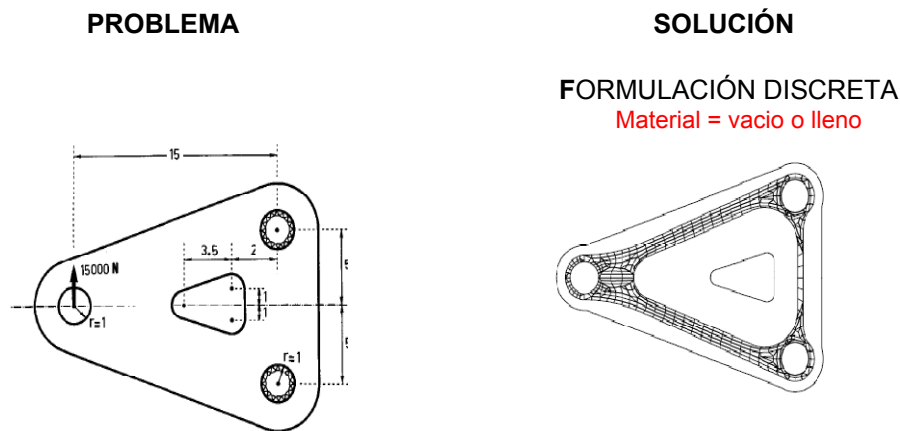


Fig. 43: Soporte en voladizo. Esquema del problema de optimización (Zhang)

Esta formulación de diseño presenta algunas ventajas frente a las formulaciones continuas, ya que la distribución de material vacío-lleno facilita su posterior fabricación. Además, la eliminación de los elementos que no son necesarios supone la desaparición de su contribución en el cálculo estructural de modo que se evitan ciertos problemas numéricos, como los fenómenos de singularidad en los problemas con restricciones de tipo tensional existentes en las formulaciones continuas.

2.2.1.3.2. Formulaciones Continuas

Las formulaciones discretas propuestas presentan algunas ventajas importantes pero requieren, en general, un coste computacional excesivo que limita su capacidad de aplicación en la práctica. Por este motivo se han propuesto formulaciones continuas de las variables; que simplifican las dificultades de resolución que presentan los modelos discretos.

No obstante, la formulación continua introduce ciertas dificultades numéricas y conceptuales que se pueden observar en las diferentes técnicas que mencionaremos.

El primer y principal problema de las formulaciones continuas reside en la necesidad de definir una ecuación constitutiva del material para valores intermedios de las variables de diseño. En las formulaciones discretas este análisis no es necesario dado que las variables de diseño sólo pueden tomar los valores 0 ó 1. Sin embargo, en las formulaciones continuas éste es un paso imprescindible para poder resolver el problema estructural resultante.

De acuerdo con esta idea es necesario desarrollar una teoría que permita obtener modelos constitutivos de materiales con variables de diseño continuas entre 0 y 1. Estas variables de diseño continuas reciben el nombre de "**densidades relativas**" y representan la porción de volumen de material sólido frente a volumen total, de modo que el valor nulo indica que no existe material y el valor unitario indica que el material es sólido [8].

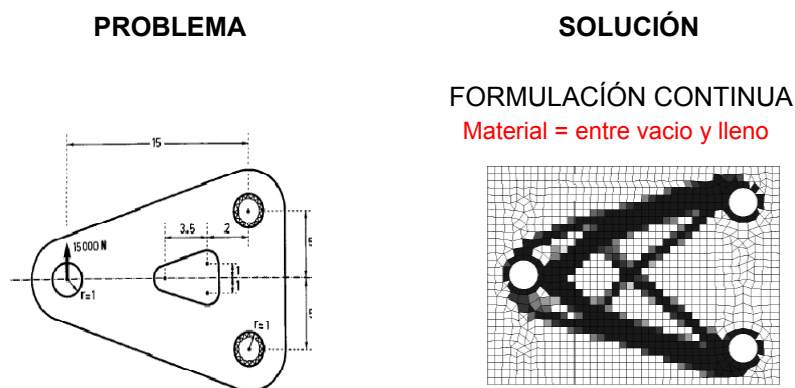


Fig. 44: Soporte en voladizo. Esquema del problema de optimización (Zhang)

La técnica más habitual para obtener el modelo constitutivo del material consiste en la definición de una micro-estructura resistente que incorpora el efecto de las variables de diseño.

A partir de esta configuración de material a nivel microscópico y mediante técnicas matemáticas de homogeneización se pretende obtener una matriz de rigidez (a nivel macroscópico) que caracterice la respuesta estructural para valores intermedios de las variables de diseño. Por otra parte, también tiene especial relevancia el análisis de otras magnitudes, como por ejemplo las tensiones, que tienen interpretación física sencilla para elementos llenos pero desconocida, a priori, cuando las variables de diseño toman valores intermedios.

2.2.1.4. Función objetivo

Una vez que se ha planteado el problema de interés, el siguiente paso es elegir un criterio con el que evaluar los diseños, de forma que podamos identificar cual es el mejor diseño según este criterio. Por lo tanto, la función objetivo suele ser una función escalar de las variables que intervienen en el diseño, y la condición habitual que se le exige a dicha función es que para la solución óptima tome un valor mínimo o máximo.

El planteamiento tradicional, es sin duda, la minimización de la masa, puesto que la masa estructural está directamente relacionada con el coste total de la misma.

En nuestro trabajo también consideramos esta función objetivo como la principal. Sin embargo este parámetro de control se encuentra acompañado de otras dos funciones, como la deformación y el rendimiento tensional de la estructura.

2.2.1.5. Algoritmos Genéticos

2.2.1.5.1. Población

Es un conjunto de individuos que representan el conjunto de soluciones evaluadas durante una generación. Idealmente la primera población debería estar formada por individuos contenidos en todo el espacio de búsqueda y, usualmente, su generación es de manera aleatoria, para impedir una convergencia prematura hacia soluciones próximas a óptimos locales.

La determinación de población no es tarea fácil. Esta depende de la complejidad del problema, de modo que cuanto mayor es el espacio de búsqueda mayor debe ser el tamaño de la población, para evitar un estancamiento prematuro en un óptimo relativo. El tamaño típico de las poblaciones en los problemas de optimización estructural suele estar en torno a los 100 individuos.

2.2.1.5.2. Individuos

Un individuo representa una de las soluciones del problema planteado. Cada uno de ellos, genéticamente, está conformado por uno o más cromosomas. El conjunto de parámetros que representa un cromosoma, en particular, recibe el nombre de *genotipo*. El genotipo tiene la información necesaria para la construcción del organismo, es decir la solución real al problema, denominada *fenotipo*. Por ejemplo, en términos biológicos, la información genética contenida en el ADN de un individuo sería el genotipo, mientras que la expresión de ese ADN (el propio individuo) sería el fenotipo.

Por otro lado, en términos artificiales, los cromosomas de un individuo están codificados en una cadena de bits. Donde cada bit o un bloque corto de bits adyacentes representan los genes del mismo individuo. Cada uno de estos genes tiene un valor de 0 o 1, denominado alelo.

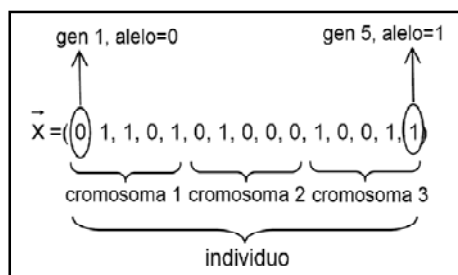


Fig. 45: Individuo genético binario

2.2.2. Optimización con Formulaciones Discretas

Como ya se ha mencionado en los conceptos básicos, la optimización estructural se puede realizar usando dos tipos de formulaciones: Formulaciones Discretas o Continuas.

En el presente trabajo se ha creído conveniente usar las formulaciones discretas para el desarrollo de nuestra propuesta. El planteamiento de esta formulación de vacío o lleno, en cuanto al material se refiere, nos parece que va más ligada al tipo de estructura que queremos optimizar. No obstante, no dejaremos de lado la posibilidad de complementar nuestra formulación discreta con “teorías de refinamiento”, usando formulaciones continuas.

A continuación mencionaremos las diferentes formulaciones discretas estudiadas hasta el momento y que nos han ayudado a plantear nuestra propuesta.

2.2.2.1. Criterios de Optimalidad

Los criterios de Optimalidad son unas técnicas que se han utilizado ampliamente en todas las ramas de la optimización estructural y basan su funcionamiento en el establecimiento de una hipótesis o condición de partida que será decisiva y caracterizará la solución óptima obtenida. Para cada problema es necesario definir un criterio de optimalidad apropiado que nos permita obtener la solución óptima más adecuada y realista. Bajo esta hipótesis de optimalidad el problema original se simplifica de forma considerable y puede resolverse de forma más sencilla ya que todos los diseños deben cumplir la exigencia establecida. El problema resultante consiste, por tanto, en

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar} & F(x) \\ \text{Cumpliendo} & g_j(x) \quad j = 1, \dots, J \end{array}$$

Donde:

g_j criterio de optimalidad utilizado
 J número de criterios impuestos para este problema.

Es obvio, por tanto, que el resultado final depende en gran medida el grado de adecuación del criterio de optimalidad empleado para cada problema en particular.

El criterio de optimalidad más habitual es el denominado FSD (Fully Stressed Design) o diseño sometido a tensión máxima o de rotura. **De acuerdo con esta idea, todos los elementos de la estructura presentan máxima tensión admisible para el material empleado cuando se ha alcanzado la solución óptima**, es decir, todas las partes de la estructura deben estar soportando la máxima tensión que puede resistir el material, al menos en un estado de carga [8].

2.2.2.2. Optimización Estructural Evolutiva

Los métodos de optimización estructural evolutiva ESO (Evolutionary Structural Optimization) fueron propuestos inicialmente en 1993 por Xie y Steven. Esta metodología consiste en una progresiva eliminación de material del dominio de diseño siguiendo unos criterios estructurales prefijados. En la formulación original del método de la Optimización Estructural Evolucionaria se eliminan aquellas partes de la estructura que no alcancen un cierto estado tensional previamente definido. Este límite se irá incrementado hasta obtener la solución final deseada que corresponderá a aquellas partes que superen la tensión establecida.

De forma general, el criterio de eliminación de material se impone tomando como referencia el valor de la tensión de comparación de Von mises.

En la formulación original del algoritmo ESO, Xie y Steven proponen la eliminación de aquellos elementos en los que cumple que:

$$\frac{\delta_e^{vm}}{\delta_{max}^{vm}} < RR_i$$

Donde δ_e^{vm} la tensión de Von Mises del elemento e, δ_{max}^{vm} el valor máximo admisible y RR el índice de rechazo de la iteración i, que se actualiza durante el proceso de optimización como:

$$RR_{i+1} = RR_i + ER_i, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Siendo ER_i el índice de evolución y RR el índice de rechazo. El índice de evolución toma habitualmente el valor $ER = 1\%$ pero en casos más complejos puede adquirir valores menores. Asimismo el índice de rechazo inicial también se toma como $RR_0 = 1\%$ en la mayor parte de las aplicaciones prácticas. Con este procedimiento, la topología estructural resultante avanza lentamente hacia el óptimo eliminando aquellas partes que contribuyen en menor medida debido a su bajo estado tensional.

Sin embargo, la formulación convencional del algoritmo de optimización evolutiva presenta algunos inconvenientes que se han ido revisando en versiones posteriores del mismo. Por ejemplo, el algoritmo original no permite que un elemento que haya sido eliminado en un paso anterior, por no considerarse necesario, pueda recuperarse en una iteración posterior debido a una redistribución de esfuerzos en la estructura. En consecuencia, el proceso de eliminación de material debe realizarse de forma muy lenta para reducir el condicionamiento excesivo de la solución cuando se eliminan partes de la estructura que pueden resultar trascendentales cuando la configuración se aproxima a la óptima.

Para evitar este problema, se han planteado otros métodos que, al contrario de lo que se propone en el algoritmo original de optimización evolutiva, incorpora nuevos elementos a la estructura en aquellas zonas donde su existencia reporte un mejor comportamiento estructural. Este método recibe el nombre de **Optimización Estructural Evolutiva Aditiva** (AESO Additive Evolutionary Structural Optimization).

Con posterioridad, se ha propuesto un algoritmo más completo que incorpora las dos teorías presentadas anteriormente tanto para eliminación de material (ESO) como para incorporación de nuevas partes o elementos a la estructura (AESO) que recibe el nombre de **Optimización Estructural Evolutiva Bidireccional** (BESO Bi-directional Evolutionary Structural Optimization). Con este método se consigue mejorar considerablemente el proceso de optimización, dado que el algoritmo de eliminación de los elementos resistentes no necesita limitar tanto el índice de rechazo (RRi) porque el algoritmo AESO permite la recuperación en iteraciones posteriores de elementos eliminados que tienen una relevancia considerable en el comportamiento estructural si fuese necesario [8].

2.2.2.3. Método de Optimización Jerárquica de Búsqueda por Proximidad.

Este método (Hierarchical Neighborhood Optimization Method) es relativamente reciente, lo han desarrollado Stolpe y Stidsen; y Werme y Svanberg. En este caso la formulación propuesta plantea una técnica que permite resolver el problema discreto de optimización topológica de estructuras minimizando el peso y con restricciones de tensión.

El algoritmo basa su funcionamiento en la aplicación sucesiva de dos técnicas principales. Por una parte, se busca sobre una malla de elementos bastante gruesa la distribución óptima del material. Para ello se modifica el diseño colocando o eliminando material en un único elemento, en cada iteración. El elemento a modificar se elige como el más adecuado de sus elementos adyacentes, de modo que se reduzca la función objetivo y se cumplan las restricciones en tensión. Una vez obtenido el diseño óptimo para este grado de discretización de la malla se procede a hacer un refinamiento y se comienza de nuevo el proceso con nueva malla, a partir del diseño anterior.

En esta formulación también es habitual el empleo de dos mallas de elementos distintas. Una malla fina, que permanece invariable a lo largo del proceso de optimización, que tiene como función obtener el comportamiento estructural del conjunto con precisión; y una malla más gruesa que contiene las variables de diseño y sobre la que se aplican las técnicas ya mencionadas de refinamiento y de optimización de la solución. De esta forma, el cálculo estructural se realiza con una malla fina, que garantice el cumplimiento de las restricciones en tensión y por otro lado, la distribución del material se obtiene a partir de una malla más gruesa.

Este proceso, en general, es muy lento y costoso pero proporciona una distribución vacío-llena e incorpora restricciones en tensión, lo cual supone una técnica muy compleja, pero novedosa, para resolver este tipo de problemas desde un punto de vista discreto [8].

2.2.2.4. Método de las Curvas de Nivel.

El método de las curvas de nivel ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a su facilidad de adaptación en gran variedad de aplicaciones y, en particular, en problemas de optimización topológica. Los primeros trabajos desarrollados en este ámbito que empleaban el método de las curvas de nivel fueron propuestos por Sethian y Wiegmann. Más recientemente se han realizado nuevas aportaciones sobre este método que incorporan otras técnicas adicionales como los propuestos por Alexandrov- Santosa, Wang y Park- Youn para mejorar el comportamiento de estos planteamientos.

El método de las curvas de nivel no es exactamente un algoritmo de optimización discreto pero proporciona una solución vacío-llena. En esencia, el método consiste en definir la solución del problema de optimización topológica, es decir la distribución material, mediante una función de muy alto orden de modo que la topología final de la solución se obtiene a partir de la curva de nivel de valor cero de esta función. Las partes del dominio que corresponden a curvas de nivel superiores a la curva de nivel cero serán zonas con material y las restantes no presentarán material [8].

2.2.2.5. Método de la Burbuja

El método de la burbuja, al igual que ocurre con el método de las curvas de nivel, no es un método que trate directamente el problema discreto de optimización pero, sin embargo, las soluciones obtenidas también corresponden a distribuciones vacío-lleno.

El método de la burbuja es un método conceptualmente distinto a los presentados hasta el momento y fue desarrollado en 1993 por Eschenauer y Schumacher. Su funcionamiento se desarrolla en dos fases claramente diferenciadas. En una primera fase, se pretende obtener la distribución óptima de material atendiendo a la modificación de la geometría de los contornos. Una vez encontrada la geometría externa más adecuada se procede a buscar el punto del dominio donde el nivel de tensión sea inferior. En esta zona se introduce un agujero infinitesimal o "burbuja".

Si el agujero se incorpora dentro de la región material se ha alcanzado una estructura de "genus" superior y se procede a modificar la geometría de nuevo considerando el agujero introducido hasta alcanzar la distribución óptima. Si el agujero infinitesimal se incorpora en el contorno existente, la topología de la estructura no cambia y es necesario refinar la malla en esa zona para alcanzar una mejor solución. El proceso se detiene cuando se alcanza el número máximo de agujeros que se estima adecuado o cuando el tamaño de los nuevos agujeros introducidos es menor que un cierto valor predeterminado.

Este procedimiento se puede observar fácilmente en el siguiente esquema propuesto por Eschenauer.

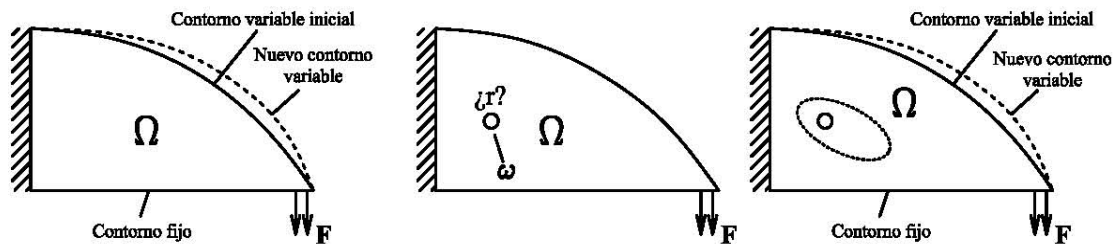


Fig. 46: Esquema de evolución del Método de la Burbuja. Primero se busca la geometría adecuada. Segundo, se introduce un agujero donde exista una tensión inferior. Tercero, con el agujero incluido se busca, otra vez, una geometría adecuada.

El método presenta la ventaja de proporcionar soluciones de vacío-lleno pero requiere unos costes computacionales muy elevados debido a la necesidad de redefinir la malla de Elementos Finitos en cada proceso iterativo y de resolver los problemas de optimización de formas resultantes [8].

2.2.3. Optimización con Formulaciones Continuas

Sabemos que las formulaciones continuas simplifican las dificultades de resolución que presentan los modelos discretos pero su dificultad radica en poder desarrollar una teoría que permita obtener modelos constitutivos de materiales con variables de diseño continuas entre 0 y 1.

2.2.3.1. Principales Formulaciones Continuas

2.2.3.1.1. Técnicas de Homogenización

Es la formulación que ha adquirido mayor relevancia en el campo de la optimización topológica. Los principios básicos fueron propuestos en 1985 por Murat y Tartar. Posteriormente, Lurie y Cherkaev, y Kohn y Strang en 1986 continuaron este trabajo, encontrando a su vez nuevas dificultades de la formulación continua del problema (dependencia de la malla, disposiciones en damero,...) en formulaciones de máxima rigidez.

El mayor auge de estas técnicas surge a partir de 1988 con los trabajos de Bendsoe y Kikuchi, en los que se aplican de forma práctica la teoría de la homogeneización a problemas reales y se propone una formulación de máxima rigidez bajo una restricción en el volumen de la estructura. La publicación de estos trabajos supone el nacimiento de la optimización topológica como una nueva disciplina dentro de la optimización estructural. Esta técnica de homogeneización ha sido ampliamente estudiada con posterioridad y es, en la actualidad, el método habitualmente empleado para obtener modelos constitutivos de materiales con densidades relativas intermedias tal y como queda reflejada directamente en los trabajos de Bendsoe y Kikuchi, Eschenauer y Olhoff, y Suzuki y Kikuchi, entre otros. A partir de estos modelos han surgido, de forma paralela, numerosas aplicaciones prácticas que utilizan estos modelos de material incorporados en formulaciones continuas del problema de la optimización topológica de estructuras mediante esquemas de máxima rigidez o mínimo peso, fundamentalmente.

En los primeros trabajos sobre esta disciplina, Bendsoe y Kikuchi, y Olhoff y Eschenauer utilizaron un modelo de microestructura basado en elementos cuadrados con un hueco rectangular de tamaño variable en su interior que recibió la denominación "hole-in cell" por este motivo. En trabajos posteriores se plantearon otras microestructuras sobre las que se aplicaba la teoría de la homogeneización para obtener la matriz constitutiva del material. Los ejemplos más representativos de estos modelos se describen a continuación.

A. Modelo de material *Hole in cell*

El modelo "*hole in cell*" fue propuesto por Murat y Tartar en 1985 y ha sido el primer tipo de microestructura planteado para resolver el problema de optimización topológica de estructuras continuas. En cada celda o elemento del mismo se introduce un agujero cuadrado de tamaño variable que se puede orientar en la dirección del espacio más adecuada, tal y como se puede observar en la *figura 47*.

Posteriormente, formulaciones un poco más generales de la microestructura "*hole-in-cell*" propusieron el uso de agujeros con geometrías rectangulares y, por lo tanto, más complejas que las originales. Con esta formulación más general el modelo de microestructura queda definido a través de tres parámetros: las variables μ_1 y μ_2 y el ángulo de orientación Θ .

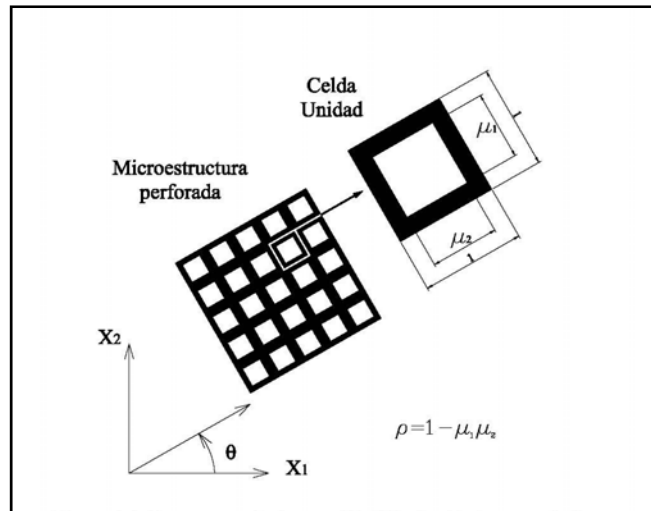


Fig. 47: Estructura Hole in cell

Este tipo de planteamientos presenta, sin embargo, algunos inconvenientes dado que se utilizan varios parámetros distintos (en este caso 3) para definir el tensor de elasticidad del material y, por tanto, hay que definir otras tantas variables de diseño para cada uno de los elementos de la malla, lo que supone, en la práctica, un número muy elevado [8].

B. Modelo de microestructuras formadas por capas

Otro de los modelos frecuentemente utilizados corresponde a las microestructuras (celdas base) formadas por capas de material de diferentes propiedades y orientaciones espaciales.

De acuerdo con esta idea general se pueden plantear modelos de microestructura de rango 1, formadas con una única capa de fibras de material orientadas en una dirección determinada (*fig. izquierda 48*), modelos de microestructura de rango 2 formadas por 2 capas de fibras de material orientadas en dos direcciones diferentes (*fig. central 48*) y modelos de microestructura de rango 3 formadas por 3 capas de material convenientemente orientadas (*fig. derecha 48*).

Estas formulaciones no aportan, aparentemente, ventaja alguna frente al modelo "hole in-cell" dado que el número de variables que es necesario definir en cada elemento es elevado. Sin embargo, las microestructuras formadas por capas de material presentan la particularidad de que son las soluciones de máxima rigidez cuando las direcciones de las fibras coinciden con las direcciones principales de esfuerzos a que está sometido el material. El modelo de rango 1 es la solución de máxima rigidez para elementos unidimensionales cuando las fibras se orientan de forma longitudinal. Lo mismo ocurre con las configuraciones de rango 2 y de rango 3 para problemas en 2 y 3 dimensiones, respectivamente.

Si además se considera que la mayor parte de los trabajos realizados en el ámbito de la optimización topológica de estructuras se plantean mediante formulaciones de máxima rigidez con una restricción en el volumen de material este tipo de microestructuras serían las más adecuadas para este problema.

Por el contrario, estas celdas base presentan también algunos de los inconvenientes que presenta el modelo "hole in cell" dado que la definición de la microestructura para cada celda requiere de un número elevado de parámetros, lo que limita considerablemente su aplicabilidad en la práctica. Además, es previsible que las configuraciones obtenidas presenten zonas importantes de material con densidades intermedias, lo que provoca que la solución final del

problema no proporcione distribuciones razonablemente parecidas a configuraciones de vacío-lleño.

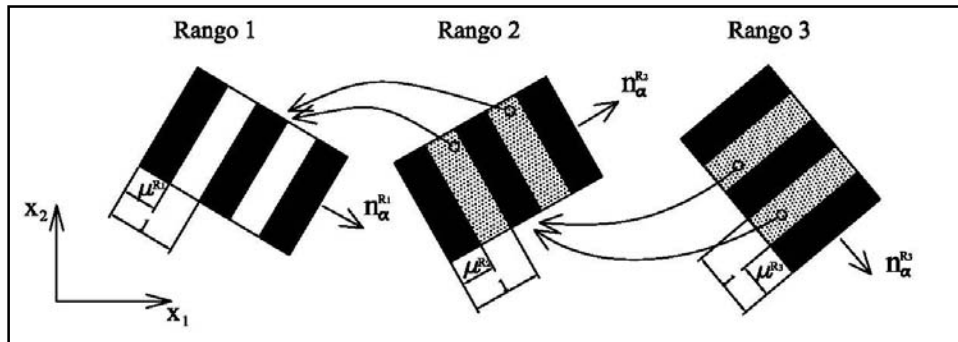


Fig. 48: Microestructura bidimensional por capas de rango 3

La configuración final de la microestructura correspondiente a una celda base de rango 3 con una orientación de las capas ortogonal se puede observar en la [figura 50](#) [8].

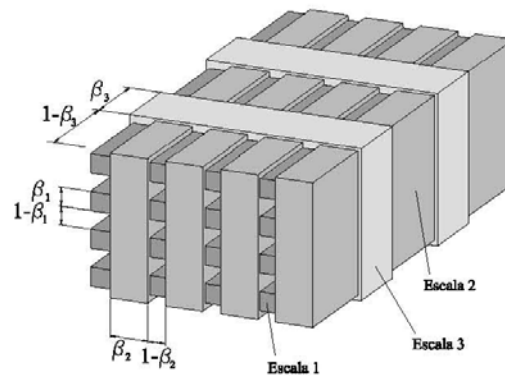


Fig. 49: Microestructura tridimensional por capas de rango 3

2.2.3.1.2. Material Sólido Isotrópico con Penalización (SIMP)

Los modelos de microestructura "hole in cell" y los formados por capas de material presentan inconvenientes importantes ya que el número de variables de diseño por cada celda es elevado, lo que limita en la práctica su aplicabilidad debido al elevado número de elementos que se utiliza. Además, las soluciones finales obtenidas con estos modelos (especialmente con los formados por capas) presentan grandes zonas con densidades intermedias que son difícilmente realizables en la práctica. Estos inconvenientes han motivado el desarrollo de nuevos planteamientos con variables continuas que reducen la complejidad del problema resultante. El más importante y el que mayor relevancia y difusión ha adquirido es el modelo de material sólido isotrópico con penalización o SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty).

El modelo SIMP se basa en la idea de utilizar un esquema de grosor variable propuesto en 1973 por Rossow y Taylor de modo que el tensor de elasticidad efectivo del material para densidades relativas intermedias se obtiene como:

$$E_{ijkl} = \rho^p E_{ijkl}^0 \quad p > 1, \quad 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \quad (1)$$

Donde E_{ijkl} representa el tensor de elasticidad del material para valores de densidad relativa ρ intermedios y E^0_{ijkl} es el tensor de elasticidad del material sólido. El exponente p se utiliza para penalizar los elementos con densidades intermedias cuando $p > 1$. El efecto de esta penalización se puede observar en la *figura 51* para distintos valores de la penalización.

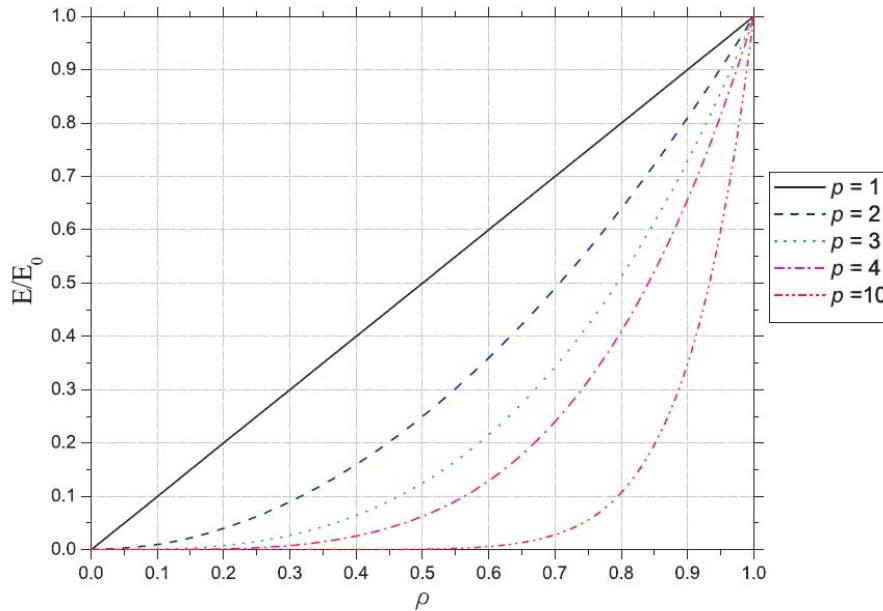


Fig. 50: Efecto de la penalización sobre la rigidez en el modelo SIMP

Un factor de penalización $p > 1$ provoca que la rigidez del material sea proporcionalmente inferior al volumen empleado, que sigue un comportamiento lineal con el valor de las variables de diseño, tal y como se puede observar en la figura anteriormente mostrada. El efecto de esta penalización se puede observar en los trabajos propuestos por Bendsoe, donde se indica que para valores de $p \geq 3$ la distribución de material obtenida corresponde, fundamentalmente, a una solución del tipo vacío-lleño .

El modelo SIMP no se propuso inicialmente del mismo modo que las microestructuras presentadas anteriormente. Su utilización está basada en la facilidad de aplicación de su formulación (sin necesidad de aplicar la homogeneización) y en la posibilidad de establecer penalizaciones sobre las zonas de la estructura con densidades intermedias, de modo que las soluciones obtenidas se aproximen en mayor medida a distribuciones binarias (0-1). Además, tal y como se puede observar en la ecuación (1), el modelo sólo incorpora en el problema de optimización topológica una única variable de diseño por cada elemento ya que no se requiere la definición de microestructuras complejas que incorporen varios parámetros para su caracterización.

En realidad, la formulación SIMP no se obtuvo mediante las técnicas de homogeneización utilizadas en los modelos presentados anteriormente sino que se planteó directamente a partir de la expresión matemática (1A) sin analizar los fundamentos físicos subyacentes. Primero se planteó la formulación matemática y se aplicó en los problemas de optimización y, posteriormente, se demostró que esta teoría matemática correspondía a una microestructura de material realista, lo que proporcionó la interpretación física al modelo (Bendsoe y Sigmund). El modelo SIMP puede asimilarse, por tanto, con una configuración resistente real para unos valores del factor de penalización p y del módulo de Poisson ν adecuados.

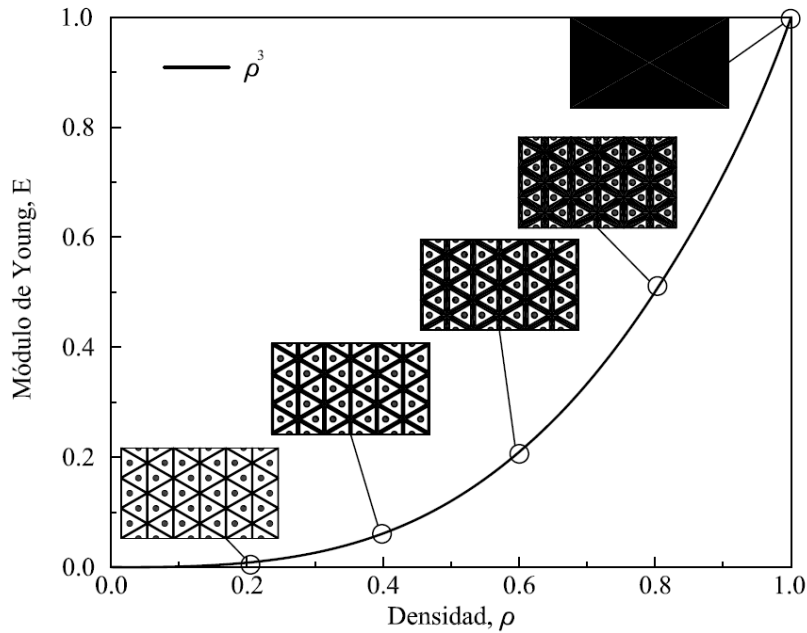


Fig. 51: Microestructura correspondiente para el modelo SIMP ($\rho=3$, $\nu = 1/3$) Bendsoe y Sigmund, Eschenauer y Olhoff.

Este método también tiene claros inconvenientes, uno de ellos es que la solución depende en gran parte de las penalizaciones impuestas y de la malla de elementos finitos. Además si lo que se busca son estructuras de máxima rigidez nos da estructuras con distribución en damero.

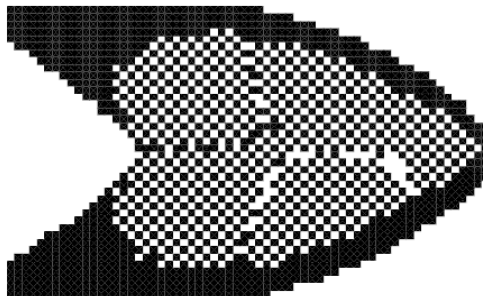


Fig. 52: Solución de viga en voladizo con solución en damero

2.2.3.1.3. Método de las restricciones en tensión minimizando el peso

La optimización topológica con formulación que minimiza el peso con restricciones en tensión es uno de los métodos más utilizados y extendidos en la materia de optimización de estructuras. Estas restricciones limitan y comparan una tensión de referencia, que suele ser la tensión de Von Mises a la tensión máxima admisible de fallo. La tensión de Von Mises es una tensión promedio de la estructura, la cual si supera un máximo, la estructura puede sufrir una falla.

Para resolver el problema se discretizará el dominio en una malla de Elementos Finitos, utilizando como variable la densidad de material para cada elemento.

Para resolver el problema se propone una función objetivo con un conjunto de penalizaciones en tensión y limitaciones en densidad, que favorecen a la aparición de una solución binaria, la cual hay que minimizar utilizando derivadas de primer y segundo orden. Hay diferentes tipos de restricciones de tensión, la de tipo local, la de tipo global y la reducción por bloques de tipo local.

Una vez está planteado el problema de optimización hay que proceder con el cálculo de la estructura. Para ello se utiliza el Método de los Elementos Finitos, ya que es un método fiable y es capaz de incluir las variables de diseño, como lo es la densidad relativa del elemento.

Por culpa de la complejidad de cálculo, debido al gran número de variables, la no-linealidad de la función objetivo y de las restricciones, los algoritmos que se implementan para resolver el problema suelen ser con costes computacionales muy altos y con grandes tiempos de cálculo, por lo tanto, se buscan algoritmos que proporcionen soluciones adecuadas con un coste computacional asumible [8].

2.2.3.2. Aplicación de formulación continua desarrollado en la UPC

2.2.3.2.1. Generación automática de bielas y tirantes considerando criterios constructivos

Esta técnica fue desarrollada por Jesús M. Bairán García, Dr. Ingeniero de Caminos y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña, en 2011. Esta metodología propone un método de generación de bielas y tirantes, basado en la optimización topológica que utiliza análisis lineales elásticos de la región D en estudio.

Este método, al igual que el método general de bielas, se inicia definiendo la frontera de la región D en estudio y luego se aísla el cuerpo libre de la misma. Posteriormente, teniendo en cuenta el Principio de Saint-Venant, se sustituye los esfuerzos internos en los planos de corte del cuerpo libre por cargas puntuales estáticamente equivalentes (fig.53).

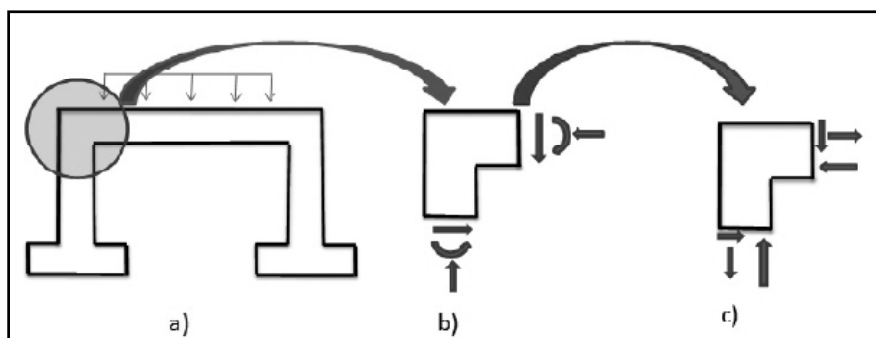


Fig. 53: Límites de la región D en el caso de un nudo de un pórtico, diagrama de cuerpo libre y sistema de cargas equivalentes

Luego se realiza un cálculo lineal elástico de la región aislada mediante un modelo de elementos finitos, desarrollado por el investigador. Los resultados identificarán un modo de trabajo del material y, a la vez, se definirán una serie de factores de eficacia del material en cada punto. Estos factores de eficacia irán modificando las características del material en cada

iteración, de tal manera que la reducción de energía de deformación (W) se irá presentando paso a paso.

Se considera que el proceso converge cuando entre dos iteraciones seguidas, el cambio relativo en energía de deformación, calculado con la ecuación (2), es menor que la tolerancia elegida. El autor ha usado como tolerancia el 1% en los ejercicios de aplicación presentados en su propuesta.

$$W = \frac{1}{2} q \cdot d \quad (2)$$

Donde:

q Vectores de cargas
 d desplazamiento nodales del modelo de la estructura

En resumen, el método se basa en modificaciones sucesivas de la distribución de propiedades mecánicas en la estructura de acuerdo a criterios energéticos. Al final del proceso, el campo de tensiones principales de compresión y tracción permite definir el esquema de bielas y tirantes, sin necesidad de disponer un armado inicial.

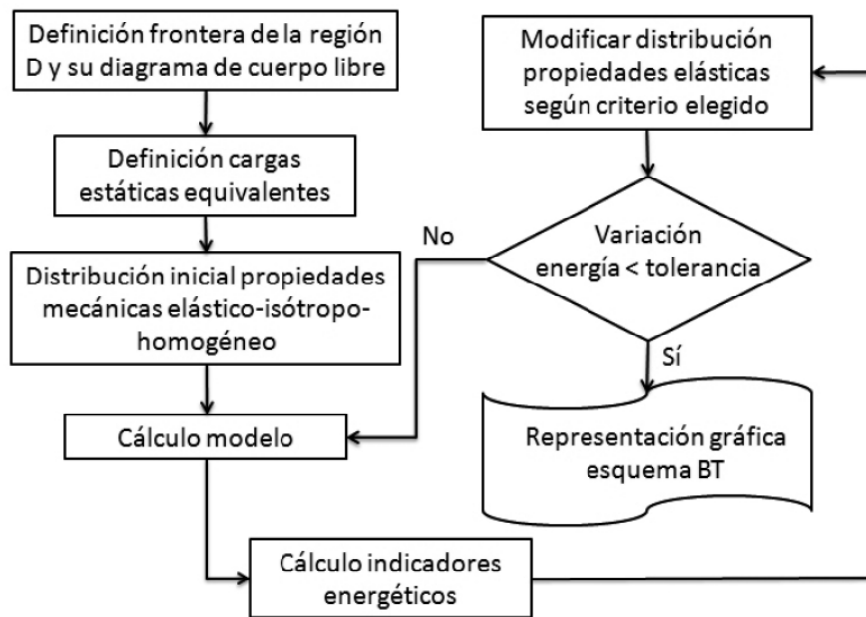


Fig. 54: Diagrama de flujo general del método de generación de esquemas BT

Así mismo, con los resultados obtenidos el autor propone dos criterios de armado.

- El primero criterio, es un criterio Isótropo. Donde se aplica el mismo tratamiento a las zonas de compresión y a la de tracción; y el tipo de matriz constitutiva es usado siempre de esta forma.
- El segundo criterio es el Ortótropo, donde se considera el sistema constructivo convencional. Se usa matrices constitutivas ortótropas en las zonas de tracción para forzar orientaciones determinadas de los tirantes.

A continuación presentamos los resultados de uno de los tres ejemplos presentados en esta investigación.

Ejemplo 1: Viga de gran canto con abertura y carga superior [24].

En este ejemplo el criterio de armado 1 convergió tras 15 iteraciones y el criterio 2 convergió tras 9 iteraciones. Con el criterio 1 el “flujo de cargas” se presenta como un arco de descarga, el cual debe modificar su ruta de descenso en el sector izquierdo del muro para poder transmitir el esfuerzo al apoyo. En este sector aparecen zonas traccionadas que ayudan a equilibrar los campos comprimidos que se han dividido en dos (Fig.56). Este esquema puede no ser conveniente desde el punto de vista de la disposición de armadura en obra.

En cambio en el criterio 2, se muestra la capacidad que tiene este criterio de generar esquemas con tirantes orientados de forma vertical y horizontal, donde las bielas se desarrollan en el continuo hormigón y donde todo el conjunto forma un esquema factible de bielas y tirantes (Fig.57).

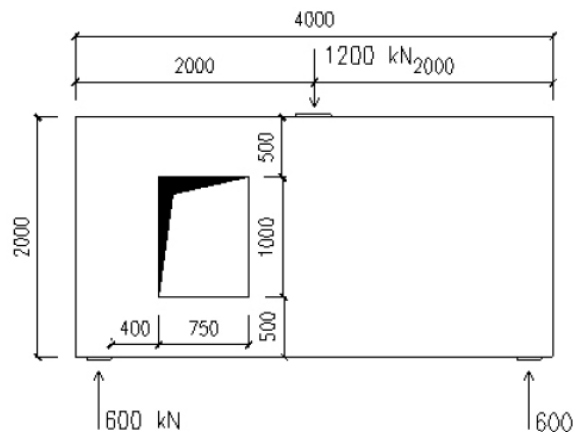


Fig. 55: Ejemplo 1. Viga de gran canto con abertura

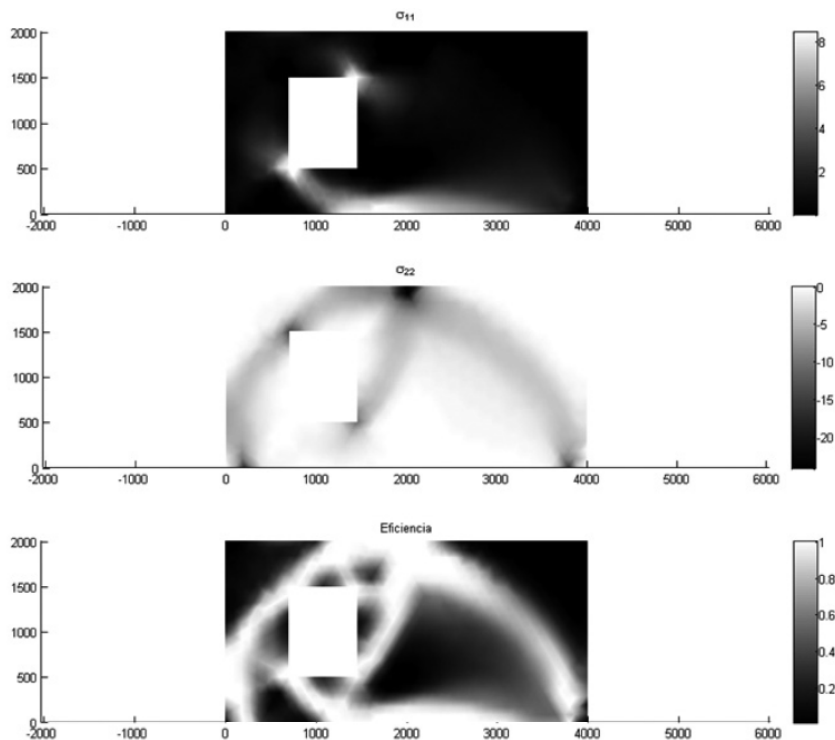


Fig. 56: Campos de tensiones principales (MPa) y distribución de factor de eficiencia para el Ejemplo 1-Criterio 1

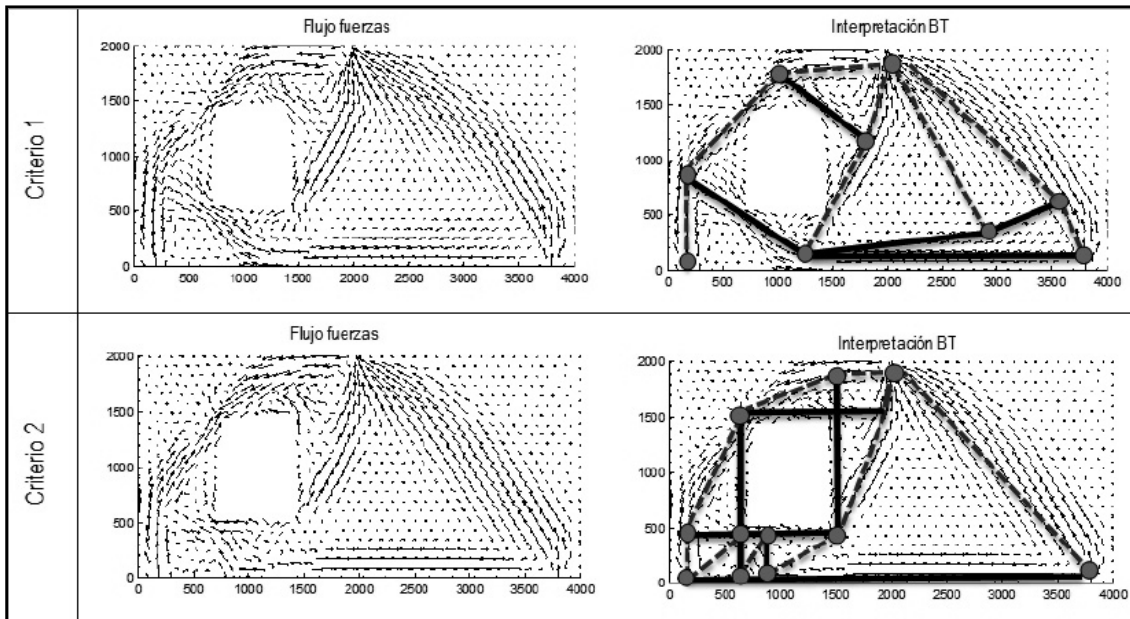


Fig. 57: Flujo de fuerzas internas e interpretación como esquema de bielas y tirantes para el Ejemplo 1

Por último, se concluye que la metodología de generación de esquemas de bielas y tirantes de regiones de D funciona adecuadamente para resolver problemas lineales.

Además, con el desarrollo de un programa de elementos finitos, en base a esta metodología, se ha podido observar que la convergencia del problema se presenta en un número de iteraciones muy reducida. Y que su aplicación de criterios de armado puede ayudar a satisfacer las diferentes condicionantes constructivas que se presentan en toda obra.

2.2.4. Optimización con Algoritmos Genéticos

Los Algoritmos Genéticos es una formulación discreta de búsqueda heurística, inspirados en la genética y la selección natural, enunciada por el naturalista inglés Charles Darwin en el libro "the Origin of Species by Means of Natural Selection Or Preservation of Favoured Races in the Struggle for life". Según esta teoría los individuos más aptos de una población son los que sobreviven al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno.

Esta teoría fue desarrollada por John Henry Holland y sus colaboradores (entre los que destaca De Jong), en la universidad de Michigan, a finales de los sesenta. Después de estudiar un libro escrito por Fisher, titulado "la teoría genética de la selección natural", Holland aprendió que la evolución es una forma de adaptación más potente que el simple aprendizaje, y tomó la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar un algoritmo que permitía a los ordenadores imitar el proceso de evolución. Los objetivos fundamentales de su investigación fueron explicar de forma rigurosa los procesos adaptativos de los sistemas naturales y diseñar sistemas artificiales que imiten los mecanismos de estos últimos. De estos estudios dedujo que:

- La evolución es un proceso que opera sobre cromosomas más que sobre los seres vivos que estos codifican.
- El proceso de reproducción es el punto en el que se produce la evolución.
- El cruce genera en los hijos cromosomas diferentes por recombinación de los cromosomas de sus padres.
- Las mutaciones generan en los hijos genes diferentes a los de sus padres.

Posteriormente, en los años 80, David Golberg fue el discípulo de Holland quien alcanzó mayor éxito en este campo. Golberg estaba interesado en encontrar un diseño óptimo de líneas para el transporte de gas y quería utilizar el planteamiento de los Algoritmos genéticos para ello. Golberg le planteó esta idea a Holland, tras asistir a un seminario de este último. Sin embargo, Holland le replicó que tal aplicación era excesivamente compleja. Poco tiempo después Golberg logró llevar a cabo dicha tarea en su tesis doctoral.

En 1989, Golberg publica un libro que se convertiría en un hito en el campo de la optimización mediante Algoritmos Genéticos. Este libro recogía no menos de 73 aplicaciones exitosas utilizando este tipo de algoritmo, muchas de ellas relacionadas con la optimización de estructuras, como el clásico problema de diez barras y seis nudos, aunque sin la restricción de desplazamientos del problema original.

Desde entonces numerosos artículos, tesis y libros han establecido su validez como técnica de optimización. Los Algoritmos Genéticos difieren de los demás métodos tradicionales de optimización de varias formas:

- Utilizan funciones objetivos para determinar la aptitud del individuo a evaluar, no derivadas u otro tipo de información adicional. Los algoritmos Genéticos son ciegos.
- No trabaja con las variables de diseño, sino con una codificación de estas.

- Utilizan un conjunto de puntos del dominio en contraposición con los métodos tradicionales que se basan en un único punto. Esto se traduce en que en cada iteración los Algoritmos Genéticos procesan y evalúan un determinado número de diseños.
- Utilizan reglas u operadores estocásticos en lugar de las tradicionales reglas determinísticas.
- Existe la certeza matemática de que el algoritmo es capaz de obtener siempre un óptimo global, si no existe una limitación temporal en el cálculo.

2.2.4.1. Función Aptitud

La adaptación de cada individuo, de una población, frente al medio se realiza mediante la función de *Aptitud* (ϕ) o *Fitness*. Este grado de adaptación determinará que probabilidad tiene un individuo de reproducirse o incluso de quedar eliminado de la población.

Para cuantificar la aptitud de un individuo se usa los **parámetros de control o funciones objetivo**. Estos parámetros de control son valores que el usuario busca minimizar o maximizar, es mas en algunos casos, se usa factores de penalización que evitan que el individuo analizado tenga una disposición poco adecuada, según el investigador.

2.2.4.2. Operadores Genéticos

Son los encargados de mimetizar los procesos naturales de los Algoritmos Evolutivos. En el caso de los algoritmos genéticos se encuentran presentes los siguientes operadores: inicialización, reproducción (selección + cruce) y mutación.

2.2.4.2.1. Operador de Inicialización

Se trata normalmente de un operador muy sencillo que se encarga de **generar la población inicial** de forma aleatoria, compuesta por individuos que representan una posible solución del problema que se quiere resolver. Estos individuos están codificados en forma de cromosomas, es decir una cadena de valores que representan la información característica del individuo (*ver fig.58*).

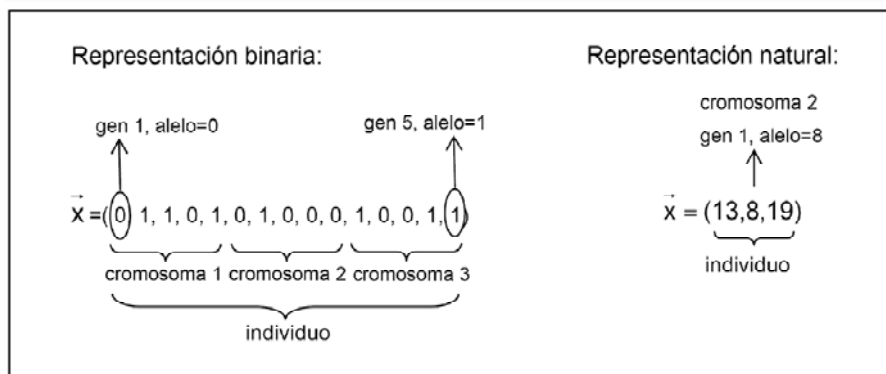


Fig. 58: Terminología y ejemplos de representaciones de un individuo en los Algoritmos genéticos.

Se representa un individuo o posible solución mediante un vector de tres componentes, ya sea representado de forma binaria o natura [29]

Por otro lado, es importante saber que la población inicial debe ser suficientemente dispersa para poder abarcar todo el espacio de búsqueda.

A continuación presentamos un esquema de evolución típica de un Algoritmo Genético (*ver fig.59*), donde se puede apreciar que en k generaciones se consigue mejorar la aptitud desde ϕ_0 a ϕ_k . Después de pasar la generación k la aptitud mejora a un ritmo menor hasta llegar a un punto en que la aptitud se mantiene.

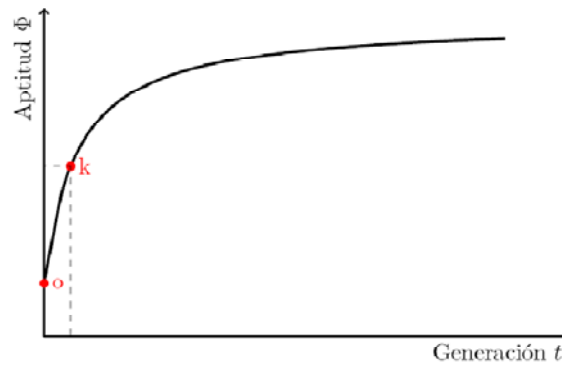


Fig. 59: Evolución temporal típica de un Algoritmo Genético

2.2.4.2.2. Operadores de Reproducción

Los Algoritmos Genéticos se fundamentan en el proceso de la reproducción, durante el cual el proceso de búsqueda genera individuos nuevos y mejores. Son estos operadores los que dominan el proceso de búsqueda, donde su selección y configuración dependerán los procesos de exploración y explotación.

La exploración hace referencia a la búsqueda de soluciones más allá de las soluciones codificadas por los padres, mientras que la explotación se refiere a la búsqueda del óptimo guiado y acotado por los padres.

Es importante conocer que una exploración demasiado intensiva hace el proceso de búsqueda lento al no generar suficientes esquemas, mientras que una explotación excesiva puede provocar la convergencia prematura en un óptimo relativo. Por otro lado, el ajuste de ambos es dependiente del tipo de problema que se quiere resolver, por lo que debe ser establecido en cada caso.

El ciclo reproductivo consta de tres pasos: la selección de los padres, el cruce de los padres para generar nuevos individuos y la mutación, que altera en mayor o menor medida el genoma de los nuevos hijos. Cada uno de ellos es implementado dentro del algoritmo con un operador diferente.

A. Operador de Selección

La selección es el proceso mediante el cual se selecciona, por diferentes procedimientos, un grupo de individuos de la población inicial que participaran del proceso de la reproducción. Estos individuos serán los padres y formaran sus hijos, tras aplicarle los operadores de cruce y mutación.

Los principales operadores son los siguientes:

Selección aleatoria.- Esta técnica selecciona aleatoriamente los padres de la nueva población. Presenta la ventaja de mantener la diversidad de la población y el inconveniente de hacer extremadamente lento el proceso de convergencia.

Selección por ruleta (RWS).- También conocida como selección estocástica (variables aleatorias) con remplazo o como selección proporcional a la aptitud, fue introducida por De Jong.

La implementación de este operador es mediante el uso de una ruleta de casino, que se divide en partes proporcionales a la aptitud de cada individuo de modo que cada porción coincide con la probabilidad de selección p_s del mismo. Seguidamente se lanza la ruleta μ veces, donde μ es el número de individuos de la población, seleccionando en cada tirada un progenitor y formando así, las parejas que engendrarán a los futuros hijos. Estos individuos, en algunos casos, están almacenados en un vector x , donde los índices impares son los padres y los pares las madres.

Selección por muestreo universal estocástico (SUS).- También conocida como selección estocástica sin remplazo. Fue definida por De Jong y estudiada por Baker con el fin de mejorar la mala distribución de los individuos de la población en función de los valores esperados K_i obtenidos mediante el operador de la selección RWS.

La implementación del operador se realiza mediante un mapeo de individuos en segmentos contiguos de una misma línea, de manera que cada segmento es proporcional en tamaño a su aptitud, de modo similar a la selección por ruleta. La longitud total de la línea será igual a la unidad. A continuación se colocan los punteros sobre la línea como individuos desean seleccionarse (generalmente μ), distribuidos de forma equidistante a una distancia de $1/\mu$.

Seguidamente se genera un número aleatorio en el intervalo $(0, 1/\mu)$ y partiendo del origen, se selecciona al individuo (segmento) que coincide con esa posición. A continuación se incrementa la posición en $1/\mu$ y se selecciona al siguiente individuo que coincide con dicha posición, el proceso se repite μ veces hasta seleccionar todos los individuos. Este muestreo se puede observar en la siguiente imagen.

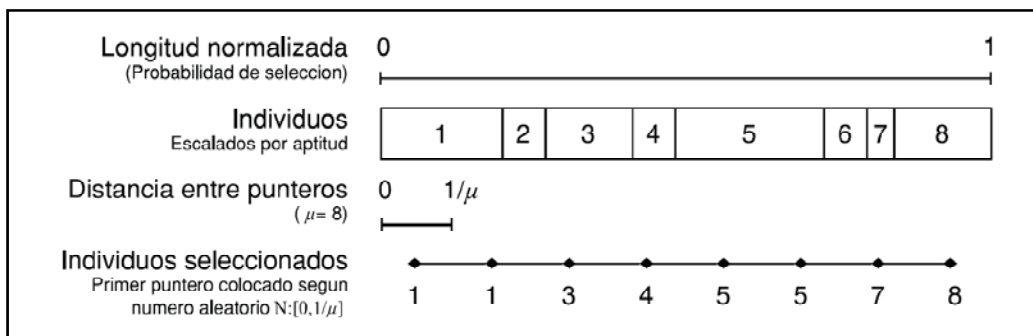


Fig. 60: Ejemplo de selección por muestreo universal aleatorio (SUS)

Selección por grupos.- También llamado selección por bloque, fue propuesto por Thierens y Goldberg. Cuando la presión selectiva es muy baja, los operadores de selección proporcionales a la aptitud ralentizan la convergencia del algoritmo. El operador de selección por bloques intenta evitar este inconveniente.

La implementación se realiza dividiendo la población k en grupos, asignándoles una probabilidad de selección a cada grupo. La probabilidad de selección de un individuo dentro de su grupo se obtendrá dividiendo la probabilidad de selección del grupo entre el número de individuos de dicho grupo.

En la **figura 61** se muestra un ejemplo de aplicación del operador. A un 30% de la población se le asigna una probabilidad de selección del 75%, mientras que el otro 70% se le asigna el 25%. De este modo, si la población es de 10 individuos, el primer grupo estará formado por tres individuos y la probabilidad de selección de cada uno de ellos será:

$$p_s = 0,75/3 = 0,25.$$

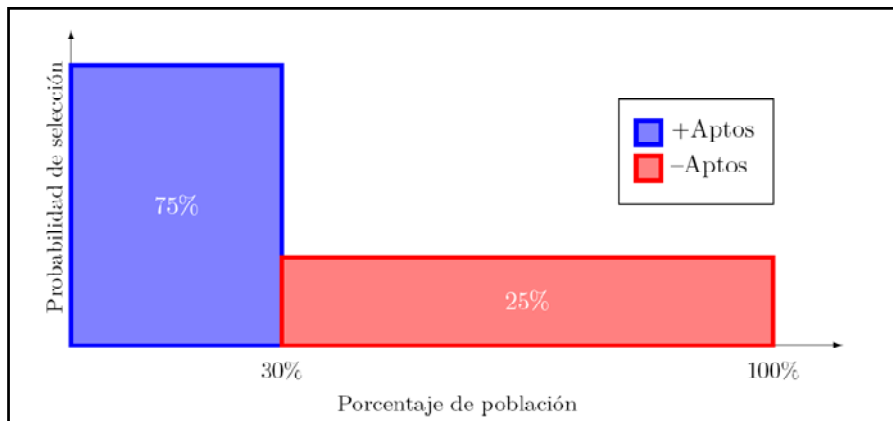


Fig. 61: Selección por grupos o bloques

Selección por Torneo.- Propuesto por Wetzel, estudiada inicialmente por Brindle en su tesis y popularizada por Deb y Golberg. En este operador se seleccionan dos o más individuos de la población de modo que compitan entre sí para ser uno de los padres de la nueva generación. El vencedor será el individuo con mayor aptitud, repitiendo este proceso hasta elegir todos los padres.

Este algoritmo tiene la ventaja de no requerir la ordenación de la población en función de su aptitud, con el correspondiente ahorro computacional. Al no utilizar la aptitud para realizar la selección se asegura la diversidad de la población y, por consiguiente, el valor de la presión selectiva (\emptyset) será:

$$\emptyset = 2^{\eta_{\text{tor}}-1}$$

Donde:

η_{tor} Número de individuos que participan en cada torneo

B. Operador de Cruce

También llamado operador de recombinación o crossover, es el responsable de realizar la combinación de la información genética de dos individuos, seleccionados como padres, permitiendo realizar búsquedas en otros puntos del espacio de soluciones. Cuanto más diferentes sean los padres, tanto mayor será la influencia de este operador en el funcionamiento del algoritmo. Por lo tanto, la eficiencia de la búsqueda dependerá en gran medida de la presión selectiva y la diversidad de población.

Aunque intervienen generalmente dos padres y se generen dos hijos, esta no es la forma exclusiva de cruce. El cruce podría extenderse a un caso más general donde intervienen varios padres o se genere un solo individuo.

A continuación mencionamos los más destacados:

Cruce por un punto.- Fue propuesto inicialmente por Holland y estudiado por De Jong. En este cruce se genera un corte de los genomas (cadenas) de los padres a una misma distancia "x" y luego se intercambia los genomas cortados, de tal manera que se genere dos individuos nuevos, que serán los hijos.

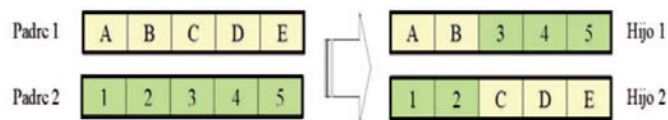


Fig. 62: Cruce de un punto

Cruce por n puntos.- La técnica de cruce por un punto puede generalizarse fácilmente a n puntos de corte de la cadena. En este caso se permutan los genes comprendidos entre los puntos de corte.



Fig. 63: Cruce de dos puntos

Cruce uniforme.- Este operador fue desarrollado por Syswerda. Su funcionamiento es diferente a los anteriores. En este caso se genera una máscara binaria de forma aleatoria, de igual longitud del genoma de los padres (n_g). Seguidamente se realiza el cruce siguiendo esta máscara, eligiendo para el primer hijo al primer padre cuando en la máscara hay un 1 y al segundo cuando hay 0 y viceversa con el segundo hijo. Este operador es una generalización de los anteriores.

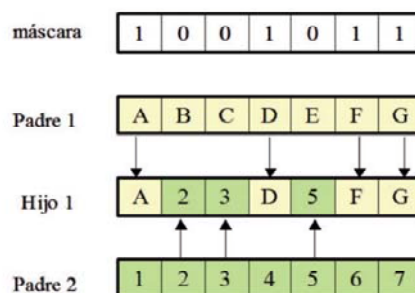


Fig. 64: Cruce uniforme

2.2.4.2.3. Operador de Mutación

Este operador es responsable de realizar búsquedas más allá de los puntos generados por los genomas de los padres. Es responsable por lo tanto de la exploración, cuando el algoritmo converge y la población pierde diversidad.

Al igual que las mutaciones naturales, los hijos mutados usualmente tienen una aptitud muy inferior a los padres, por lo que el porcentaje de individuos mutados no puede ser muy elevado. Pero también es cierto que muchas veces sirven para saltar de un óptimo local a otro e incluso al óptimo global. En el caso de los Algoritmos Genéticos no podemos confiar la exploración exclusivamente a este operador porque en este caso se comportaría como una búsqueda aleatoria, lo cual es del todo indeseable.

La probabilidad de mutación (p_m) recomendada, de cada gen de un individuo, suele ser entre 0,001-0,01; aunque algunos autores como Schaffer sugieren emplear la siguiente expresión empírica:

$$p_m \approx 1,75/\mu n_g$$

Donde:

μ *Tamaño de Población*
 n_g *Número de genes en el genoma s.*

La forma en que se selecciona los genes que mutaran es el siguiente: A partir del primer gen se genera un número aleatorio r , entre 0 y 1, de modo que si $r < p_m$ se producirá la mutación de ese gen. El proceso se produce hasta alcanzar el último gen.

Si cada gen es mutado con una probabilidad p_m , la probabilidad de que un individuo sea mutado vendrá dada por la ecuación:

$$p_{mi} = 1 - (1 - p_m)^{n_g}$$

2.2.5. Aplicación de Algoritmos Genéticos en Celosías

2.2.5.1. Optimización estructural mediante formulaciones discretas

La optimización topológica en vigas en celosías se realiza mediante técnicas iterativas de búsqueda, donde la solución no es única sino que está encerrada en un intervalo, es decir, al final de la evaluación, podemos encontrar un grupo de elite que predomine sobre una población general, ya evaluada.

Además, en muchos casos, las propuestas de análisis de optimización topológica son realizadas mediante formulaciones discretas, donde encontramos una diversidad de funciones objetivo que evalúan cada miembro de nuestra población. Cada función objetivo será propuesta por el investigador que realiza el estudio, generando así un análisis personalizado de acuerdo a cada autor.

El ejemplo que presentamos a continuación es de un artículo llamado: “*Optimización topológica de sistemas estructurales bidimensionales discretos mediante algoritmos genéticos*”, realizado Cristian García, Pablo Lotito, Lisandro Parente y Marcelo Vénere, en la Universidad del Nordeste, en Argentina. La propuesta de estudio evalúa dos diferentes tipologías de vigas. La primera es una viga en voladizo y la segunda es una viga simplemente apoyada.

Como ya mencionamos, en el resumen, los algoritmos genéticos guardan una relación con la teoría de la evolución de Darwin. Esta teoría nos habla de la evolución de los organismos vivos a lo largo de las generaciones y evolucionan de acuerdo a principios de selección natural.

En este trabajo de investigación se genera una población inicial mediante un algoritmo heurístico diseñado para cumplir las restricciones del problema. En este caso las restricciones eran las siguientes: limitar el valor de ángulo de la barras al intervalo de $-85^\circ < \alpha < +85^\circ$ y respetar los nodos 1 y 5 (ver fig.65).

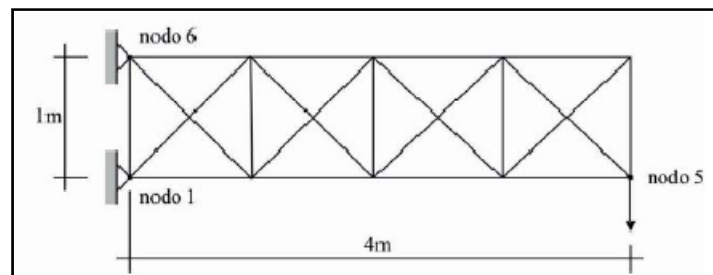


Fig. 65: Ejemplo de celosía en voladizo a analizar. Geometría y apoyos [7].

Luego esta población inicial será evaluada ante unas **funciones objetivo o parámetros de control**, como:

- Descenso mínimo de nudo
- Minimización de energía interna de deformación.
- Minimización de la norma euclidiana de la tensión actuante máxima respecto de la tensión mínima
- Minimización del peso de la estructura.
- Minimización de energía de disipación plástica
- Minimización de número de barras plastificadas

En las siguientes imágenes presentamos tres análisis de optimización de la celosía en voladizo (*fig.66*). En los dos primeros gráficos presentamos una evaluación de la celosía utilizando una función objetivo, como el peso y la minimización de desplazamiento vertical en un apoyo, nodo 6. Y en el tercer gráfico se evaluó la misma celosía utilizando la función multi-objetivo, compuesto por los seis parámetros de control mencionados anteriormente.

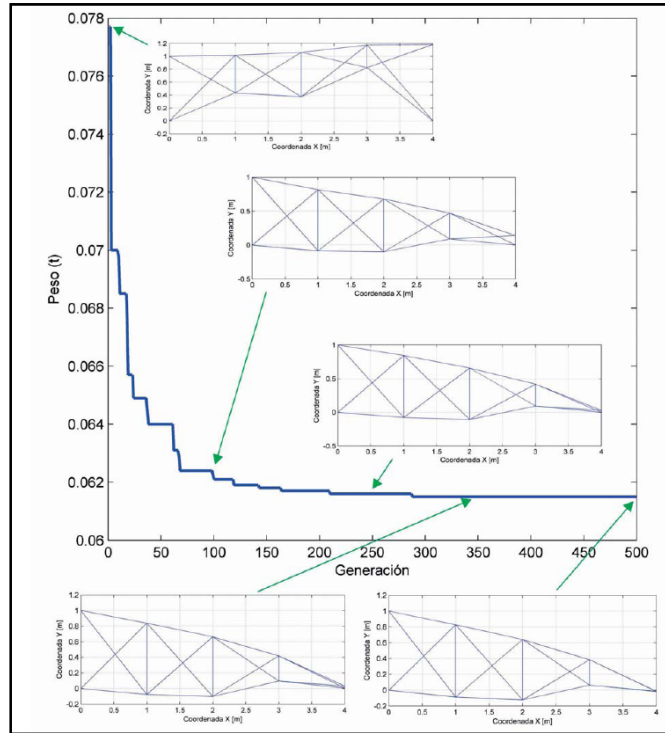


Fig. 66: Resultados del ejemplo de voladizo con la función objetivo de minimización peso [7].

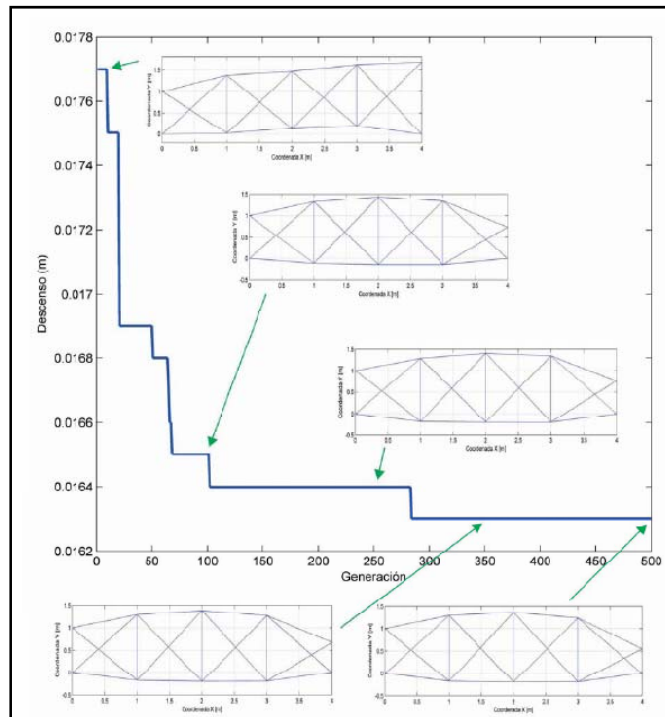


Fig. 67: Resultados del ejemplo de voladizo con la función objetivo de desplazamiento [7].

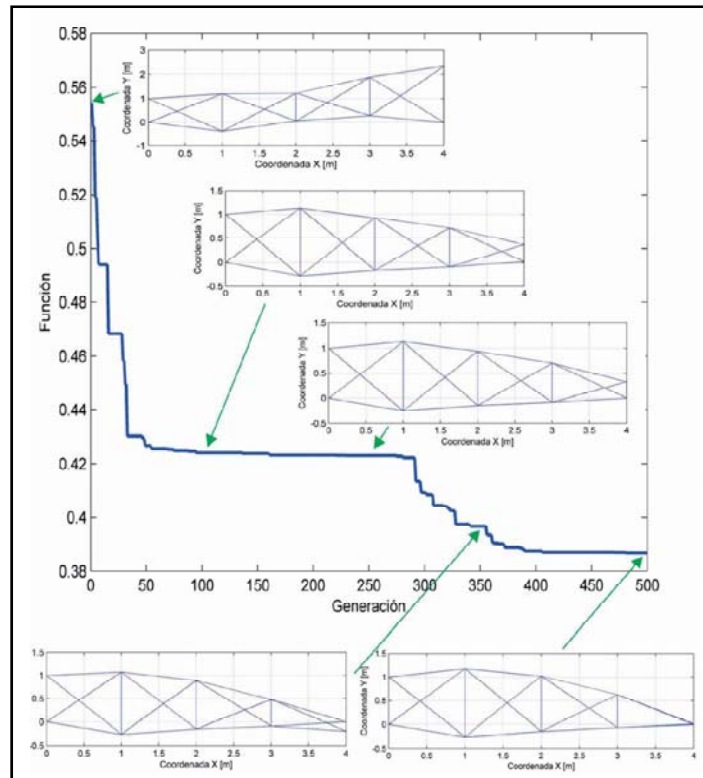


Fig. 68: Resultados del ejemplo de voladizo con la función multi-objetivo [7].

Después de obtener un rendimiento de cada individuo en base a la función multi-objetivo, se realiza una selección de la población para su reproducción posterior. Dicha selección se ha realizado usando un operador llamado *Remainder Selection Methods*, cuya principal característica es elegir de forma determinística los individuos que se van a reproducir, considerando la parte entera de su factor de probabilidad y eligiendo a su pareja de forma aleatoria.

Se debe recordar, que la probabilidad de reproducción viene dada por la Aptitud o Fitness de cada individuo frente a la evaluación multi-objetivo.

Una vez que se ha seleccionado a los padres, el cruzamiento se realiza de dos maneras: Para los individuos impares el cruce se realiza mediante un punto de corte y para los individuos pares se emplea un cruzamiento intercalado.

Este cruzamiento mixto es importante porque permite introducir mejoras cuando la población se ve copada rápidamente por los mejores individuos y cabe la posibilidad de encontrar una solución que corresponda al máximo o mínimo local.

Luego se realiza la mutación, donde se adopta una función que varíe su probabilidad, desde 1%, en las primeras generaciones hasta el valor máximo 30%, a partir de la generación *maxmut* (fig.69). A partir de esta última generación los investigadores observaron que se dificultaba la optimización.

Después de aplicar cada operador genético, como el cruzamiento y la mutación, se realiza una fase de corrección, que permite corregir las restricciones que no se han cumplido durante el proceso evolutivo. Un ejemplo de ello es el movimiento del apoyo del nudo 5, que siempre está restringido. Sin embargo en algunos modelos este nudo se encuentra fuera de su ubicación original. En este caso, solo se modifica las coordenadas de dicho nudo (fig.70).

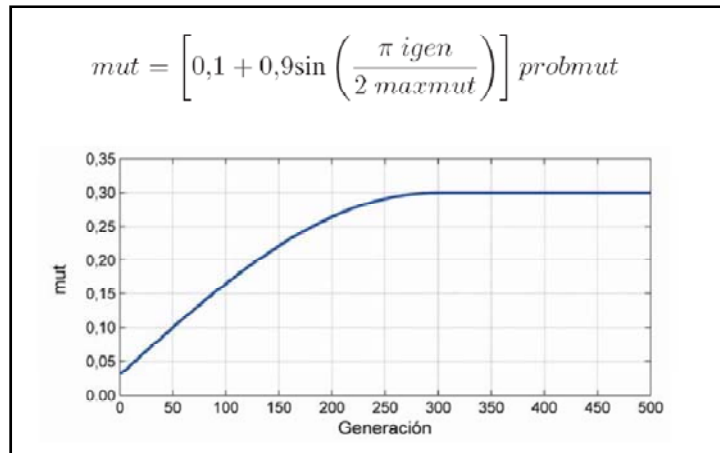


Fig. 69: Función variable de la probabilidad de mutación [7].

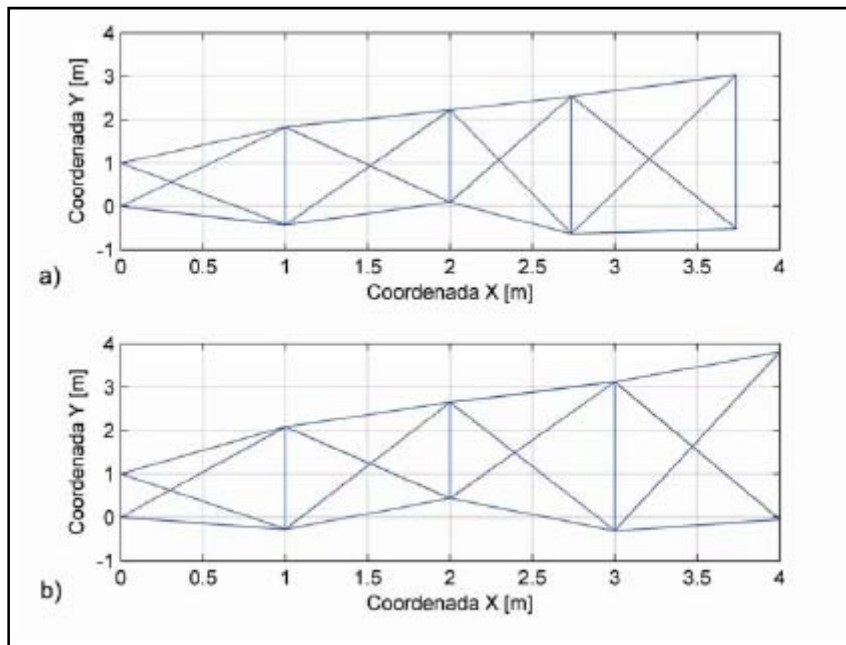


Fig. 70: Ejemplo de corrección del nudo 5 (lado derecho de la celosía) [7].

Por último, se realiza una evaluación final con las funciones objetivo y se selecciona el grupo de celosías que mejor comportamiento estructural tiene en ese momento.

Las conclusiones que se llegaron a obtener en esta investigación iban orientadas a la implementación de la metodología de trabajo. Debido a que el resultado final mostraba una generación medianamente grande que cumplía con las funciones objetivo. Concluyeron que debían introducir formulas de corrección que puedan disminuir esa población final. Esto dio pie a realizar evaluaciones con diferentes parámetros de control, en la primera etapa de la generación poblacional, con el propósito de disminuir, también, el tiempo de convergencia de las soluciones.


```

BEGIN Inicialización de variables
Generación de la población inicial
FOR Bucle sobre generaciones
  Evalúa la función objetivo
  Selección
  IF Generacion impar
    Cruzamiento Intercalado
  ELSE
    Cruzamiento Single Point
  END IF
  Corrección
  Mutación
  Corrección
  Nueva Población = Pob.Cruzada + Elit
END FOR
END

```

Fig. 71: Pseudocódigo elemental del AG implementado

En la imagen inferior se muestra como mejoraron los resultados una vez que se realizaron las correcciones planteadas en las conclusiones.

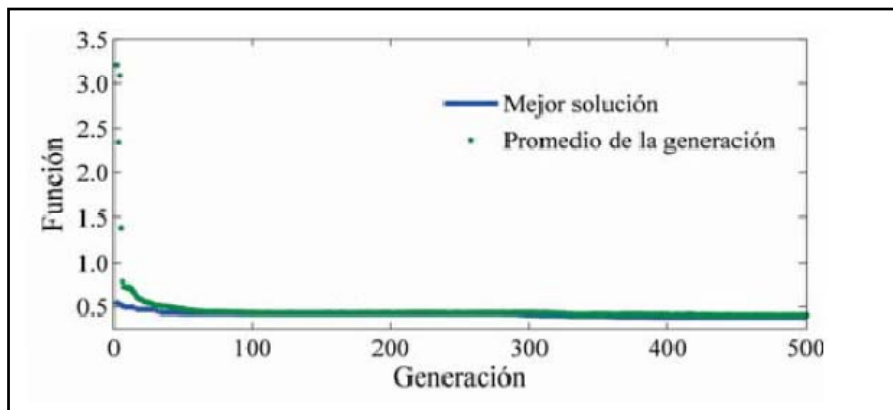


Fig. 72: Mejor individuo y promedio de la generación [7].

2.2.5.2. Optimización estructural mediante formulaciones continuas y discretas

La forma de resolver un problema de optimización estructural es mediante formulaciones discretas o continuas, ambas formulaciones son adecuadas pero siguen caminos diferentes en el momento de plantear una solución, como se mencionó al inicio de nuestro documento. No obstante, durante nuestra investigación hemos podido encontrar propuestas donde ambas formulaciones pueden convivir en un planteamiento de optimización estructural, de manera que una de ellas puede ser parte de una fase de refinamiento de la otra, es decir, una formulación, ya sea continua o discreta, puede complementar a la otra en una etapa de desarrollo, focalizado, de la optimización.

A continuación presentaremos un ejemplo de este tipo de propuestas.

La investigación que presentamos se llama: “*Optimización topológica estructural de ensambles*”, presentada por Carlos Julio Camacho López, en la Universidad Nacional de Colombia. Este estudio busca la optimización de elementos estructurales mediante la resolución de formulaciones continuas que ayudan a generar un esqueleto inicial óptimo. Luego se realiza una evaluación con formulaciones discretas que permiten seleccionar que individuo es el más eficiente, tomando como objetivo la búsqueda de un ensamblaje óptimo, mediante algoritmos genéticos.

El proceso de evaluación se inicia mediante el concepto de optimización estructural a través de autómatas celulares híbridos (Tovar, 2006a), donde se discretiza un elemento de región continua, constituidos por elementos finitos cuadriláteros bilineales, que están sometidos a ciertas condiciones de carga y restricciones de desplazamiento.

En este estudio, la solución del problema elástico lineal es a través de **una minimización de energía de deformación bajo las restricciones de masa y densidad**. Considerando estos parámetros se evaluó una viga en voladizo y estos fueron los resultados:

- Estructura inicial, donde se ha discretizado el elemento.
- Elemento optimizado con formulaciones continuas, donde el valor de 1 indica que hay material y el valor de 0 indica material nulo o vacío. En los casos intermedios el material se va “erosionando” y toma valores entre el 0 y 1.
- Cierre morfológico, etapa de corrección donde se elimina las discontinuidades existentes.

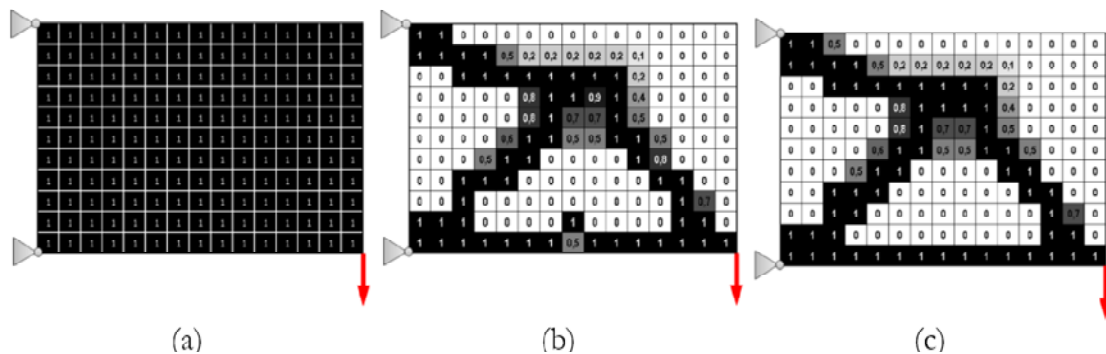


Fig. 73: (a) Dominio de diseño; (b) Imagen de resultado de optimización (S); (c) Cierre morfológico S_x . [28]

Luego se realiza un filtrado de la estructura, donde se establece límites en cada elemento discretizado. Este límite señala un almacenamiento solo de los elementos de la matriz cuyo valor es igual o mayor que η . En este ejemplo se presenta como constante de filtrado $\eta = 0,8$.

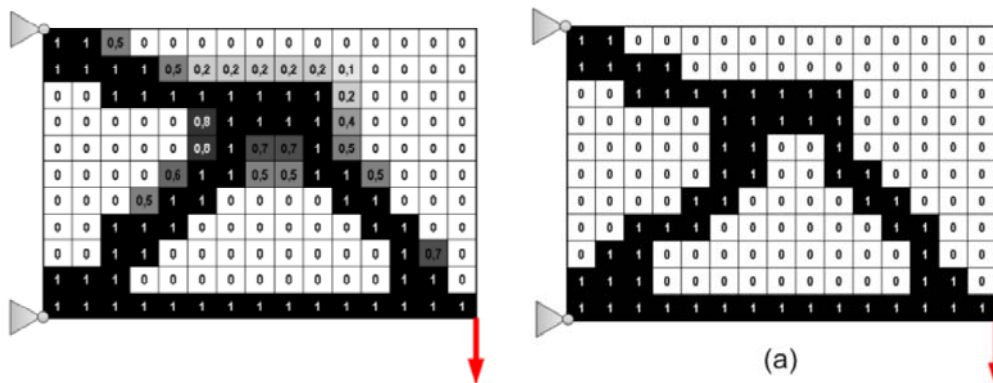


Fig. 74: Proceso de filtrado en base a la constante η [28].

Después se identifica el esqueleto estructural realizando un barrido o eliminación de elementos, con el propósito de generar una mínima distancia entre las regiones formadas por los vacíos. En este ejemplo se forman tres regiones de vacíos (R1, R2 y R3).

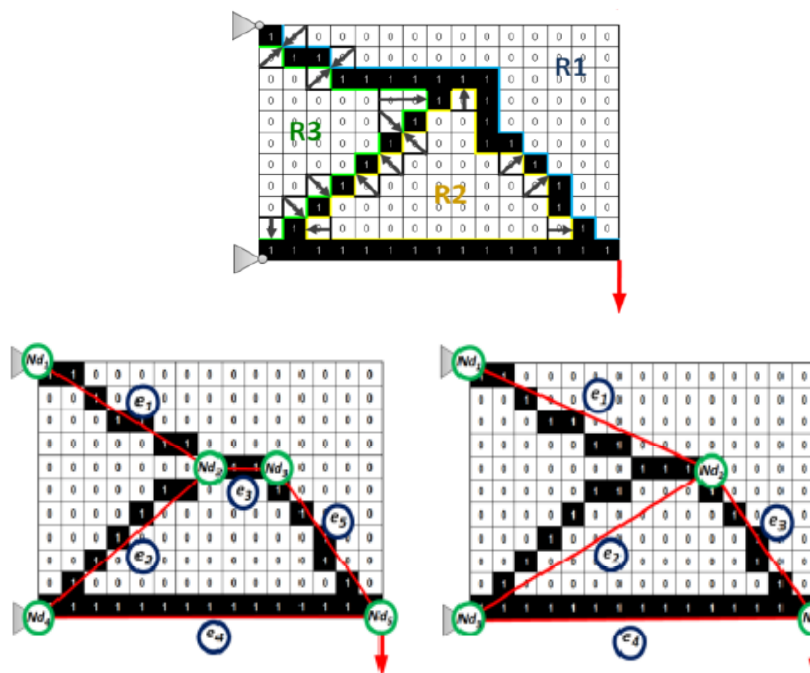


Fig. 75: Proceso de barrido y de identificación del esqueleto estructural [28].

Cuando se identifica el esqueleto estructural, se realiza la disminución del número de nodos, utilizando la función de colapso de nodos por proximidad. Esta función une los nudos más cercanos. Esta transformación se puede observar en las dos últimas imágenes de la [fig.75](#), donde la estructura pasa de 5 nodos a 4 nodos.

Una vez identificada la estructura final, se realiza una matriz de conexiones acompañada de una grafica topológica, que más adelante nos ayudará a componer diferentes Vectores Topológicos de Ensamblabilidad (V).

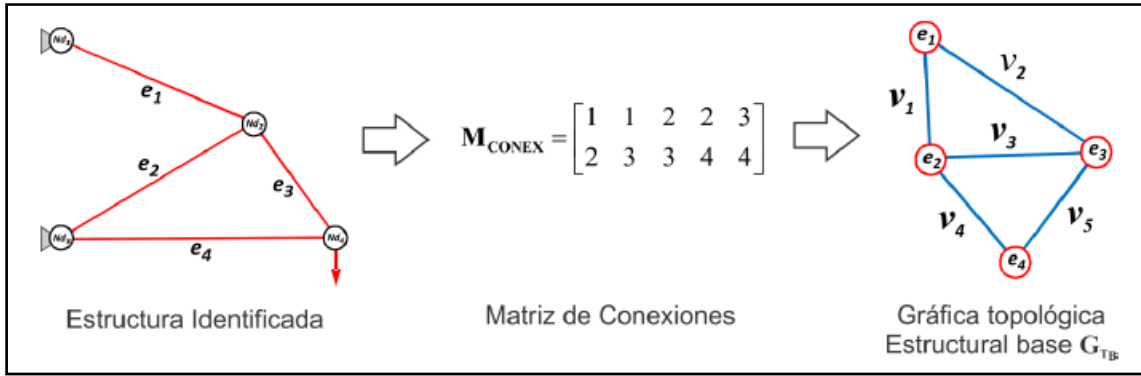


Fig. 76: Estructura base y generación del Vector Topológico $V = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$

Los vectores topológicos de ensamblabilidad son generados mediante las posibles formas de ensamblar una estructura. En la imagen inferior se puede observar las diferentes posibilidades de ensamblaje de nuestra estructura.

Cada modelo es un miembro de una población, que será evaluada mediante dos funciones objetivo: **La rigidez de la estructura ensamblada**, donde se evalúa una estructura con uniones rígidas, semirrígidas o articulas; y **la manufacturación de la estructura**, definida por la complejidad en la fabricación de los componentes que constituye la estructura ensamblada.

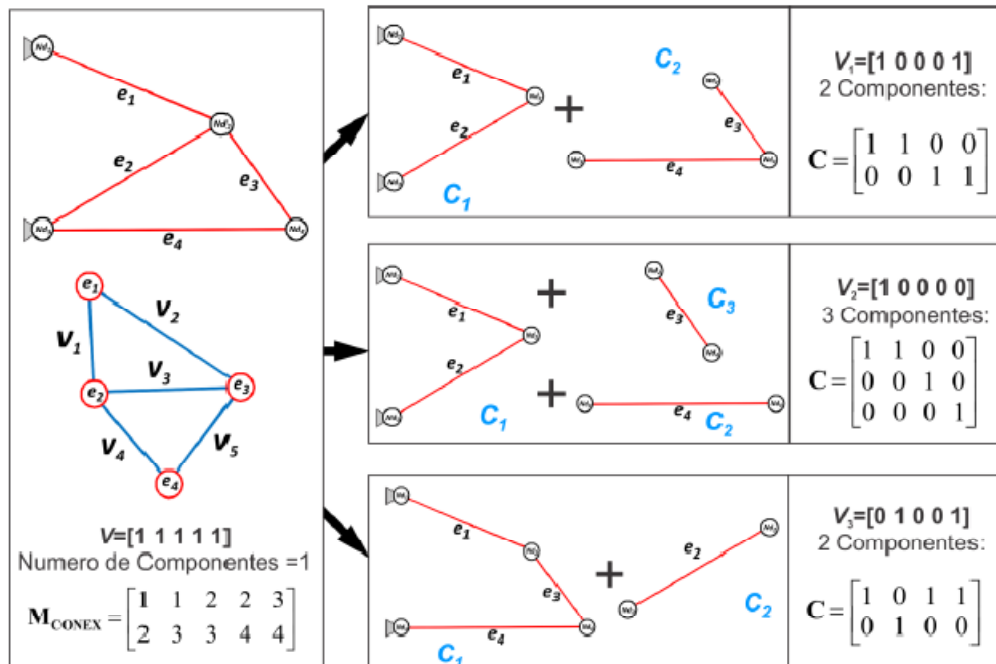


Fig. 77: Generación de población mediante los diferentes Vectores Topológicos de Ensamblabilidad (V) [28].

Luego el proceso de selección, cruzamiento y mutación es similar como en el primer ejemplo de optimización.

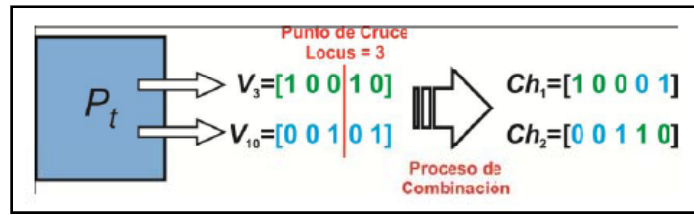


Fig. 78: Proceso de cruzamiento de punto de corte simple

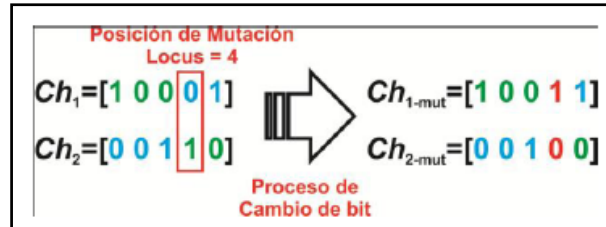


Fig. 79: Proceso de mutación por cambio del alelo en un bit aleatorio [28].

No obstante, la forma como se realizó la selección es distinta. En esta propuesta, la selección se realiza usando una clasificación por niveles, llamado Ranking por dominancia, donde existirán diferentes niveles de individuos no-dominados (ver fig.80a). Para realizar esta clasificación se utilizan dos funciones objetivo.

En este ranking se representa la calidad de la solución en términos de su convergencia. Puede existir más de un frente de individuos no-dominados, en la figura 80a se observa cinco diferentes frentes de individuos.

En el caso que encontremos dos individuos con el mismo valor de ranking, el mejor individuo será el que tenga mayor distancia de apilamiento dentro de su frente. Esta distancia de apilamiento (Crowding distance) es la proximidad que hay entre un individuo en concreto y los individuos de alrededor de un mismo frente. Una distancia de apilamiento mayor implica mayor diversidad en la población.

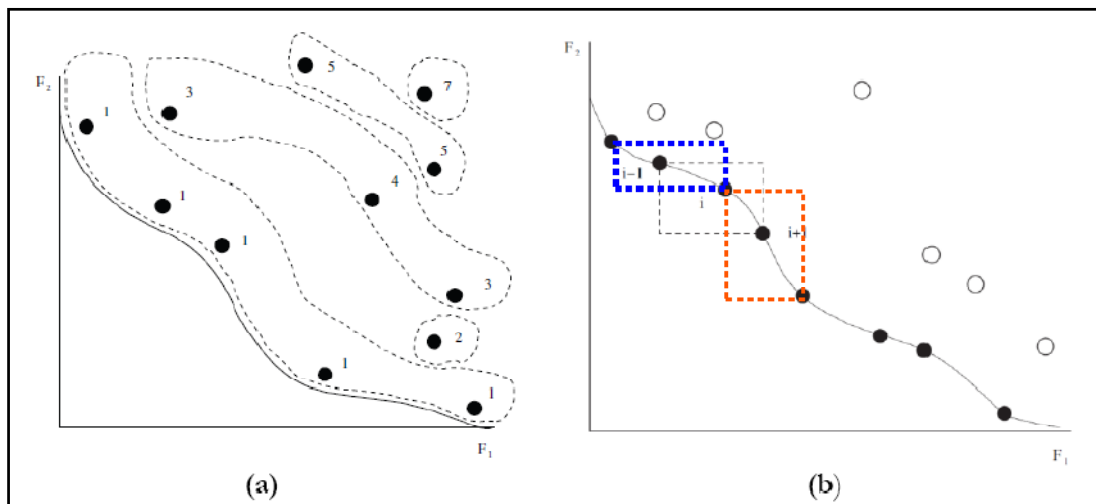


Fig. 80: (a) Ranking por dominancia. Se observa 5 diferentes frentes no-dominados; (b) Distancia de apilamiento en un mismo frente. El cuadro naranja tiene mayor distancia de apilamiento que el cuadro azul.

Una vez generada la población por cruzamiento y por mutación, se realiza nuevamente un ranking de la población total, utilizando las mismas funciones objetivo. En este último ranking obtenemos el frente óptimo de Pareto (FOP), el cual representa a los individuos que dominan al resto y que por tanto presentan las mejores condiciones de rigidez y manufacturación.

En las siguientes imágenes se observa el frente Óptimo de Pareto de una viga en voladizo con 10 barras (*fig.81*), y su comparación frente a la población total de ensamblajes (*fig.82*)

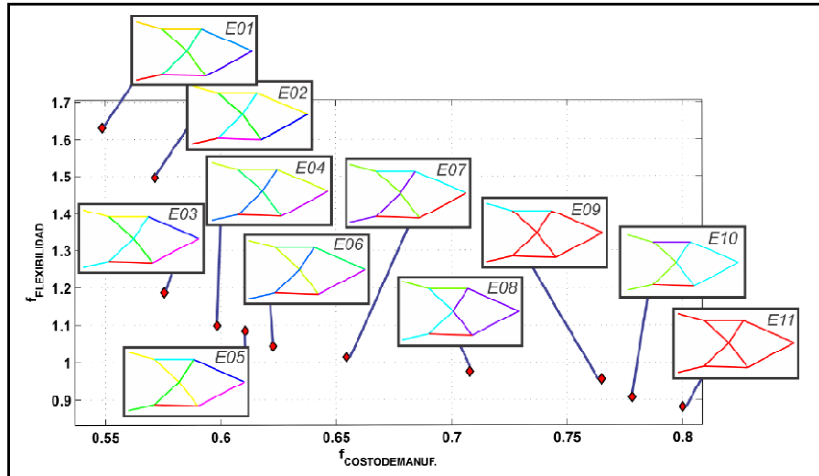


Fig. 81: Presentación de resultados del frente Óptimo de Pareto [28].

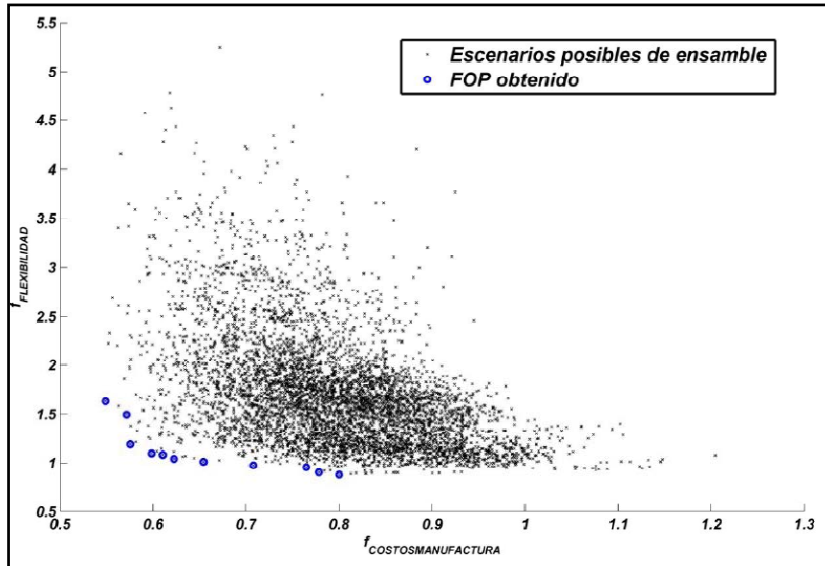


Fig. 82. Comparación entre el Frente Óptimo y la población total de ensamblajes [28].

3.

Propuesta metodológica de Optimización de forma mediante Algoritmos Genéticos

3.1. Propuesta

A continuación se presenta una propuesta metodológica de optimización de forma de una estructura reticular plana, llamada también celosía, usando los algoritmos genéticos como su formulación discreta.

La propuesta busca presentar una nueva alternativa de optimización de estructuras en celosía utilizando un parámetro global de forma y tres parámetros de control complementarios, que ayuden a evaluar la aptitud de cada individuo dentro de la población.

Para la presentación de esta metodología hemos dividido la propuesta en las siguientes partes:

- Generación de la población inicial
- Evaluación multi-objetivo
- Selección
- Cruzamiento
- Mutación
- Población Óptima

3.2. Generación de la Población inicial

La Población inicial (P_0) es generada mediante un algoritmo heurístico que permite crear distintos "individuos" o versiones de estructuras de una misma estructura base.

Se dice que un algoritmo es heurístico cuando la solución no se determina de forma directa, sino mediante ensayos, pruebas y reensayos.

En nuestro caso, dichas pruebas y reensayos se realizarán bajo un **parámetro global de forma**, donde la estructura base cambiará de sección cuando realicemos movimientos sucesivos en sus nudos (movimientos verticales). Estos cambios de coordenadas en los nudos se realizarán por zonas.

Con el propósito de tener un orden al momento de generar los movimientos nodales, se ha planteado que la estructura debe estar dividida por zonas (banda central, banda soporte y banda voladizo). En nuestro estudio tenemos dos tipos de estructuras que analizaremos, cada una ellas presenta una división zonas diferente, que explicaremos más adelante. Estas estructuras son: Estructuras con Apoyos laterales y estructuras en Voladizo.

Esta zonificación nos permitirá manipular adecuadamente el cambio de sección en las zonas que se necesite tener mayor o menor rigidez. Además, al realizar los cruzamientos y mutaciones en los diferentes "individuos", estas divisiones servirán de mucho para focalizar las transformaciones y seleccionar adecuadamente los módulos que sufrirán estos cambios genéticos.

Cabe destacar, que el objetivo de cambio de sección por etapas, en la estructura base, es encontrar una configuración adecuada que supere el índice óptimo estructural de la estructura inicial.

3.2.1. Estructura base

La estructura base que queremos plantear para este proyecto de investigación tiene su origen en la malla espacial semi-octaédrica, la que ha sido transformada en una estructura bidimensional para nuestro estudio. El resultado de esta transformación da origen a una estructura similar a la viga Warren

La selección de esta estructura, se debe a que en un futuro cercano se desea plantear este trabajo de investigación de optimización de forma a una estructura espacial.

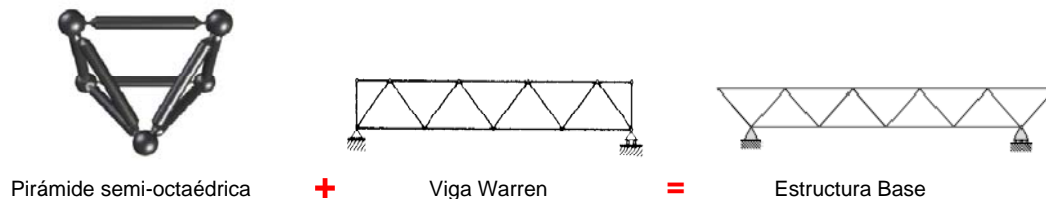


Fig. 83: Composición de la Estructura Base

A continuación presentamos la imagen final que tiene nuestra estructura base, cuando tiene apoyos laterales o cuando es una estructura en voladizo.

A. Estructura con Apoyos laterales

Esta celosía se encuentra dividida en tres zonas: Dos zonas serán de soporte y una zona será la banda central (Fig. 84). La zona de soporte tiene una longitud de $L/4$ y la banda central $L/2$.

Los apoyos podrán ser ubicados en los extremos inferiores como en los extremos superiores. Cabe resaltar, que cuando restrinjamos los movimientos en el nudo 5 y 11, al mismo tiempo, obtendremos un esquema de empotramiento en este sector, ayudándonos a simular la continuidad de la cercha.

La numeración de los nudos y su ubicación es un aspecto práctico para el desarrollo del algoritmo. La numeración siempre comenzará desde la banda central superior o voladizo superior.

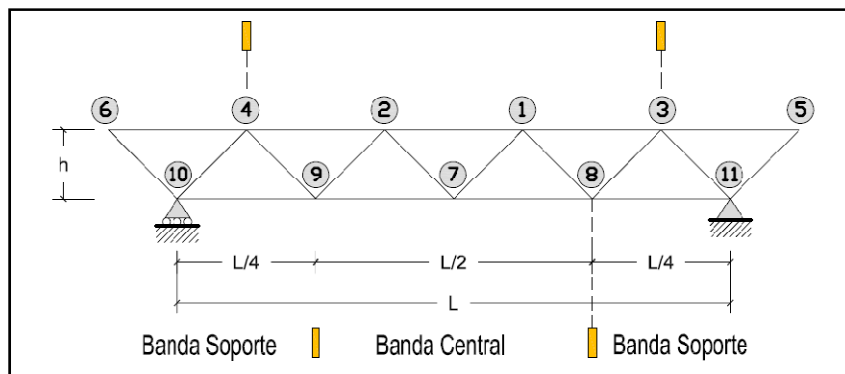


Fig. 84: Estructura Base con apoyos laterales

B. Estructura en Voladizo

La estructura en voladizo estará dividida en dos zonas: La banda de voladizo y la banda de soporte. La zona de soporte y la banda de voladizo tienen una longitud de $L/2$. La banda de soporte siempre se encontrará en el sector derecho de la estructura. Esta restricción se establece para el correcto desarrollo del algoritmo de evolución.

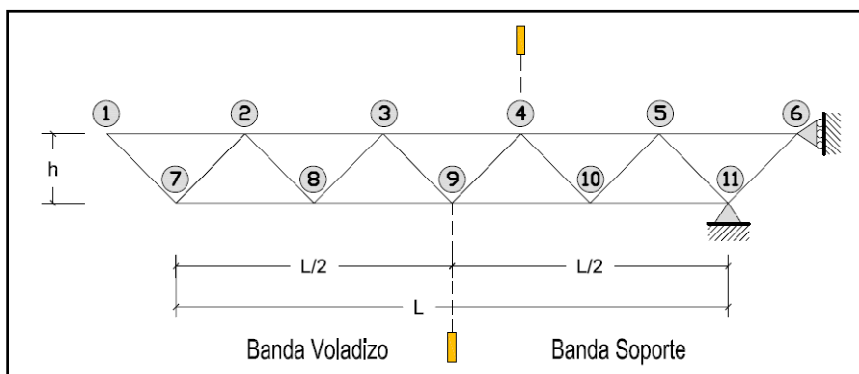


Fig. 85: Estructura Base en voladizo

3.2.2. Algoritmo de evolución

Nuestra propuesta de algoritmo de evolución se divide en dos familias: Familia de Estructuras Ascendentes y Familia Estructuras Descendentes.

A. Familia de Estructuras Ascendentes

Estructuras con apoyos Laterales

Esta familia se basa en una estructura que trabaja mayormente a compresión. Los cambios de altura que se generen en este tipo de estructuras tendrán un rango máximo de $3h$, teniendo en cuenta que h es la altura del canto inicial de la cercha. Esta altura se considerara sobre el nivel de los apoyos.

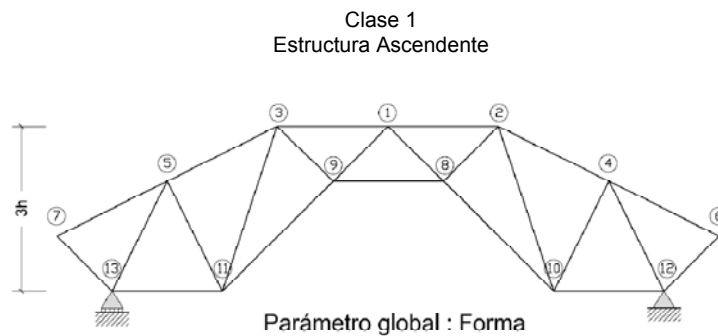


Fig. 86: Familia evolutiva de Estructura Ascendente con apoyos laterales

La generación de esta población es mediante el siguiente algoritmo:

Algoritmo para la generación de una Población inicial Ascendente

1. Elevación de nudos de banda central.

Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

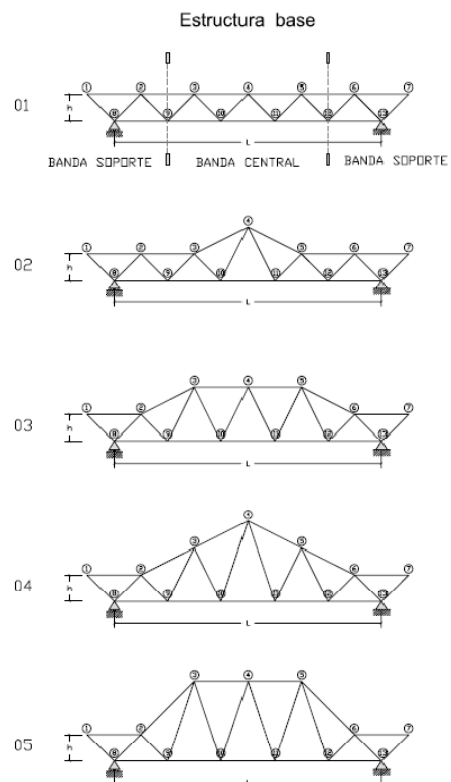
2. Elevación de nudos de banda soporte

Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

3. Descenso de nudos de banda central.

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

4. Descenso de nudos superiores de banda soporte



Estructuras en voladizo

Esta tipología estructural continúa con las mismas premisas que la estructura con apoyos laterales. Se desarrolla con una altura máxima de $3h$ y no desciende bajo el nivel de los apoyos. En la zona de soporte superior (nudo 4 y 5, Fig. 87) se permite el movimiento vertical con el propósito de no restringir la evolución de una estructura con gran canto en su apoyo.

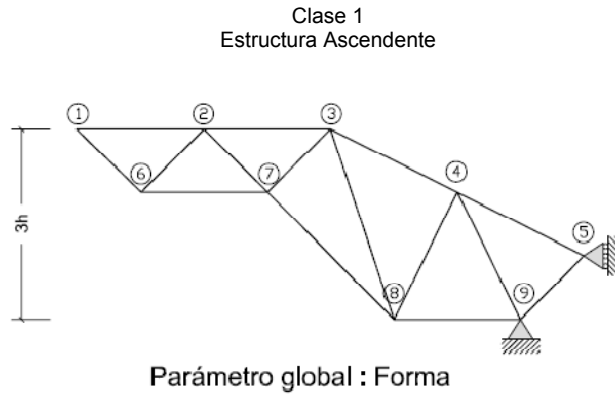


Fig. 87: Familia evolutiva de Estructura Ascendente en voladizo

La generación de esta población es mediante el siguiente algoritmo:

Algoritmo para la generación de una Población inicial Ascendente

1. Elevación de nudos de banda soporte.

Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

2. Elevación de nudos de banda voladizo

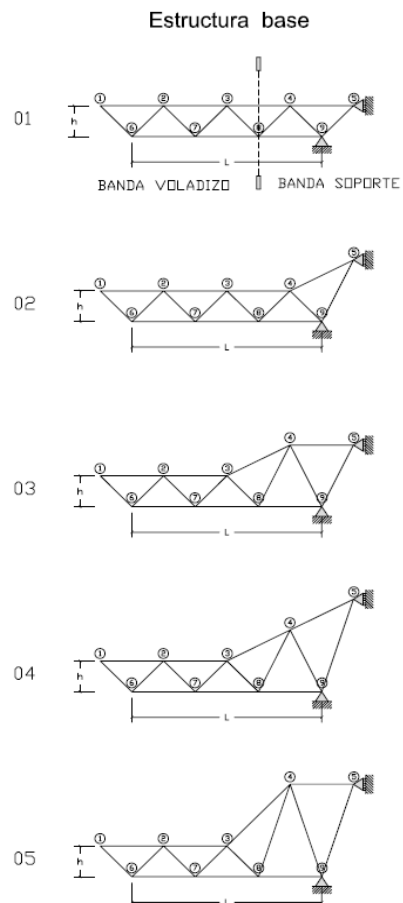
Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

3. Descenso de nudos de banda soporte.

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

4. Descenso de nudos banda voladizo

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores



B. Familia de Estructuras Descendentes

Estructuras con apoyos Laterales

La segunda clase o familia se basa en una geometría que trabaja a tracción, similar a una catenaria. La altura total de evolución máxima también será de $3h$, igual que la configuración anterior, no obstante la altura en los nudos superiores no pasará de $2h$ y el descenso de los nudos inferiores no será mayor a h , tomando como línea de referencia el nivel de los apoyos (ver fig.88).

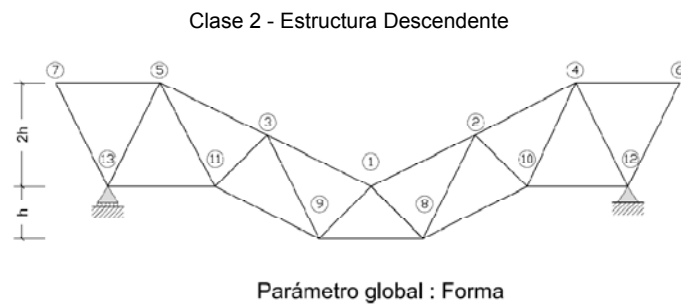


Fig. 88: Familia evolutiva de Estructura Descendente con apoyos laterales

En este caso los módulos de los apoyos (módulo apoyo izquierdo conformado por las barras 7-5, 5-13 y 7-13; y el módulo apoyo derecho conformado por las barras 4-6, 6-12 y 4-12. ver fig.88) siempre estará por encima del nivel de los apoyos mismos. Esta restricción se debe a que no queremos perder la configuración de nuestra futura malla espacial semi-octaédrica. Sin embargo, siempre estaremos evaluando esta restricción, para saber hasta qué punto es necesario conservar este parámetro establecido.

La generación de esta población es mediante el siguiente algoritmo:

Algoritmo para la generación de una Población inicial Descendente

1. Descenso de nudos de banda central.

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

2. Descenso de nudos de banda soporte

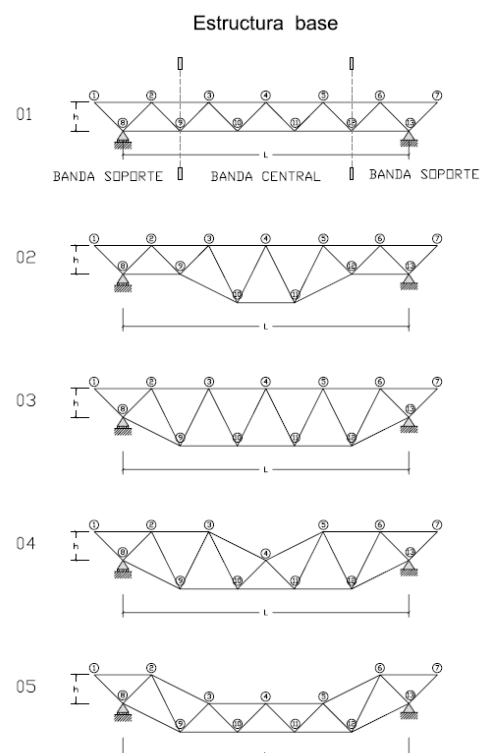
Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

3. Elevación de nudos de banda central

Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

4. Elevación de nudos de banda soporte

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores



Estructuras en voladizo

Esta tipología estructural continúa con las mismas premisas que la estructura con apoyos laterales. Se desarrolla con una altura máxima de $2h$ y sus nudos inferiores no descenderán más de una altura h , bajo el nivel de los apoyos.

Clase 2 - Estructura Descendente

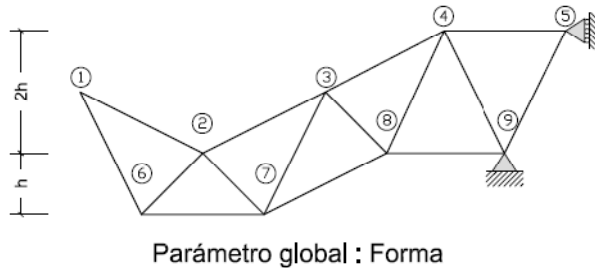


Fig. 89: Familia evolutiva de Estructura Descendente en voladizo

La generación de esta población es mediante el siguiente algoritmo:

Algoritmo para la generación de una Población inicial Descendente

1. Descenso de nudos de banda soporte.

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

2. Descenso de nudos de banda voladizo

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

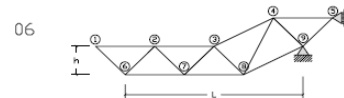
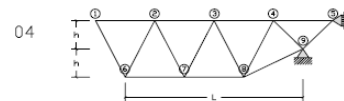
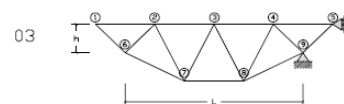
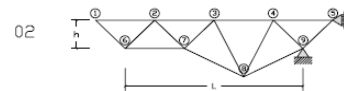
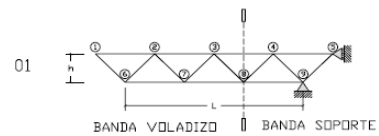
3. Elevación de nudos de banda soporte

Primero: Nudos superiores
Segundo: Nudos inferiores

4. Elevación de nudos de banda voladizo

Primero: Nudos inferiores
Segundo: Nudos superiores

Estructura base



3.2.3. Selección de Forma Predeterminada

Luego de comprender, que nuestra **población inicial** puede estar formada por estructuras ascendentes y descendentes, que han sido generadas mediante un algoritmo heurístico, pasamos a un siguiente paso. La selección de una **forma predeterminada** nos permite elegir qué tipo de estructura queremos optimizar. A continuación presentamos las distintas opciones que se han planteado como la selección de forma.

A. Forma Arbitraria

Con esta opción se analizará el total de la población generada.



B. Estructura plana

Se considera un nivel plano cuando el 50% o más de sus nudos se encuentran en el mismo nivel de altura.



C. Estructura de dos aguas simple

Se considera un nivel de dos aguas cuando el 50% o más de los nudos de la banda central se ubican en una cota igual o superior al promedio de altura de los nudos de la banda soporte.



D. Estructura de dos aguas doble



E. Estructura plana superior y dos aguas inferior



F. Estructura limahoya superior y dos aguas inferior

Se considera que el nivel es tipo limahoya cuando el 50% o más de los nudos de la banda central se ubican en una cota inferior al promedio de altura de los nudos de la banda soporte.



G. Estructura limahoya superior y plana inferior



H. Estructura dos aguas superior y limahoya inferior



I. Estructura plana superior y limahoya inferior



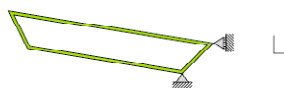
J. Estructura limahoya doble



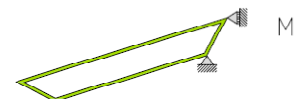
En el caso de estructuras en voladizo, las formas siguen el mismo formato pero su número las simplificamos en tres formas.



K. Voladizo Plano



L. Voladizo caída interior.



M. Voladizos caída exterior

3.2.3.1. Ejemplo de aplicación de formas predeterminadas.

En la imagen inferior se observa diferentes columnas con una numeración del 1 al 4, que representan cada paso del algoritmo que hemos presentado anteriormente. Además, este cuadro se repite, ya que el algoritmo entra en un bucle con el propósito de generar más miembros en una población. La generación de individuos se detiene cuando se ha superado el número de Población inicial fijado por el investigador.

Cuando se selecciona una forma predeterminada el proceso evolutivo sólo se le aplicará al grupo correspondiente de la forma. En caso que el número de individuos del grupo seleccionado no supere la Población inicial, el bucle de generación se repetirá nuevamente, hasta superar el número de individuos solicitados.

ALGORITMO GENÉTICO PARA LA GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL - FAMILIA DE ESTRUCTURAS ASCENDENTES (PRIMERA VUELTA)

FORMAS PREDETERMINADAS		1	2	3	4	1	2	3	4
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Fig. 90: Presentación de la Población Inicial mediante el algoritmo para estructuras a Compresión o ascendentes
Se observa una distribución de individuos de acuerdo a una forma predeterminada de selección

3.3. Función Objetivo

Después de seleccionar la forma predeterminada de la población, se procede a evaluar la *Aptitud o Fitness* de cada individuo mediante funciones objetivo o parámetros de control. Estos parámetros nos ayudan a observar el comportamiento de cada individuo frente a su entorno y su probabilidad de supervivencia.

En nuestro estudio planteamos los siguientes parámetros de control:

- Deformación
- Tensión óptima o rendimiento optimo
- Minimización de peso

Cada parámetro de control se evalúa individualmente y luego, se organiza en un ranking de acuerdo a su efectividad.

Para complementar la explicación de cada parámetro control, analizaremos una muestra de una población inicial (P_0) con dichos parámetros.

El ejemplo que se analizará es una estructura bi-articulada. El análisis se puede extrapolar a una estructura en voladizo.

La muestra del ejemplo está constituida por 20 individuos evolucionados, tanto de la familia de estructuras que trabajan a compresión como las estructuras que trabajan a tracción, más la estructura base.

Datos de la estructura base

Esta celosía forma parte de una estructura ligera, bi-apoyada, que cubre una luz de 5.00 metros y con una distancia entre celosías también de 5.00 metros. Tiene un arriostramiento lateral en cada nudo superior, con el propósito de controlar el pandeo en el cordón comprimido.

Las cargas que se han considerado son: el peso propio y una carga permanente de 1kN/m^2 . No se ha considerado carga de mantenimiento.

Las barras son de sección tubular de $\text{Ø}42\text{mm}$ y 3.2mm de pared (acero S275), en toda la estructura.

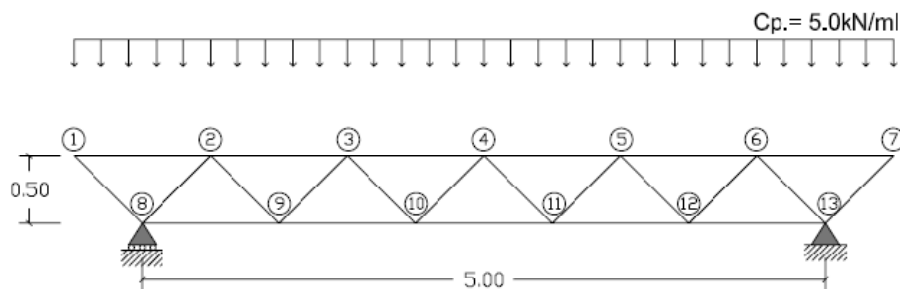


Fig. 91: Esquema estructural de ejemplo base

A continuación presentamos un esquema de los 21 individuos que se analizarán en esta ocasión:

EVOLUCIÓN ESTRUCTURAL DE CELOSÍA EN BASE A LA FORMA			
01		01	
FAMILIA ASCENDENTE		FAMILIA DESCENDENTE	
02A	02	05D	12
06A	03	07D	13
09A	04	08D	14
19A	05	11D	15
21A	06	13D	16
23A	07	14D	17
38A	08	20D	18
49A	09	23D	19
72A	10	29D	20
97A	11	30D	21

3.3.1. Deformación

Con este parámetro se realiza la primera evaluación de la población inicial, donde el individuo con menos flecha será el primero de la lista y recibirá el mayor puntaje de la evaluación, que es de 10 puntos. Por otro lado, el individuo con mayor flecha no obtendrá ningún punto, es decir será calificado con el valor de 0 puntos.

Es importante mencionar que la estructura que no cumpla con la flecha mínima será descalificada y no formará parte de esta evaluación. La flecha mínima será señalada por el usuario o investigador. No obstante, se recomienda usar la flecha mínima que establece el Código Técnico CTE; donde la flecha mínima en cubiertas, considerando la apariencia, es de $L/300$, siendo L la luz del vano.

La calificación se realizará de manera proporcional, teniendo en cuenta el rango de la flecha que existe en la población a evaluar. Se considera como primer punto de evaluación el nudo central inferior de la estructura. En caso que exista más de una estructura con la misma flecha, se considerará la deformación del nudo central superior, como un dato que incline la balanza hacia la mejor estructura. Este complemento de evaluación aumentará la calificación inicial de la estructura.

Ejemplo practico

En la *fig.92* se puede observar que las dos estructuras centrales (individuo 11D y 38A) tienen una flecha de 0,38cm, en el nudo inferior y su puntaje inicial es de 5.36. No obstante, la estructura 11D tiene menor flecha en el cordón superior del vano central, por esta razón, esta estructura tiene mayor calificación que la 38A. El porcentaje de puntos que ha aumentado es la diferencia que existe entre la calificación del individuo superior, el 23D, y la estructura 38A. Esta diferencia es de 0.71 puntos. Como la estructura 11D es una solución intermedia recibe un incremento proporcional de 0.36 puntos.

Por último, en caso de que sigan existiendo igualdades de flechas en la segunda evaluación el puntaje será igual para las dos estructuras.

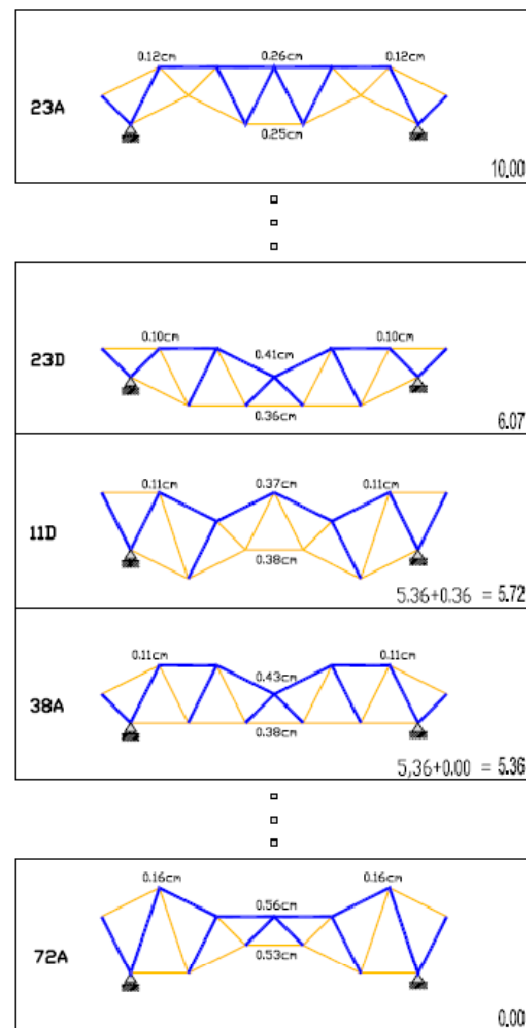


Fig. 92: Evaluación de Deformación

3.3.2. Tensión óptima

En la evaluación de la tensión óptima, la mejor finalista es la estructura que tiene mejor promedio de rendimiento global en todas sus barras. El rendimiento tensional de cada barra es de 1 a 100%, donde una barra que presente un 1% de rendimiento está sobredimensionada y donde una barra que presente el 100% de rendimiento roza el colapso, pero sigue siendo estable y óptima. Las estructuras que tengan una o más barras que superen el 100% serán descalificadas y no formarán parte de la clasificación. La puntuación también se realiza en un rango de 0 a 10 puntos, obteniendo el valor 10 la estructura que tenga un mejor promedio de rendimiento, un ejemplo de ello es la **figura 93**. En esta figura se observa que el mejor promedio de rendimiento la tiene la estructura 72A, con un promedio de 45%, y la estructura menos óptima, tensionalmente hablando, es la estructura 23A, con un promedio de rendimiento de 37%.

En caso que los individuos tengan un mismo promedio de rendimiento global, la calificación complementaria se realizará de la misma manera como se ha planteado en la deformación. No obstante, esta calificación se basa en un análisis de rendimiento local o parcial, donde se toma en cuenta el **número de barras** que superan el 75% de rendimiento y el **promedio de rendimiento** de dichas barras.

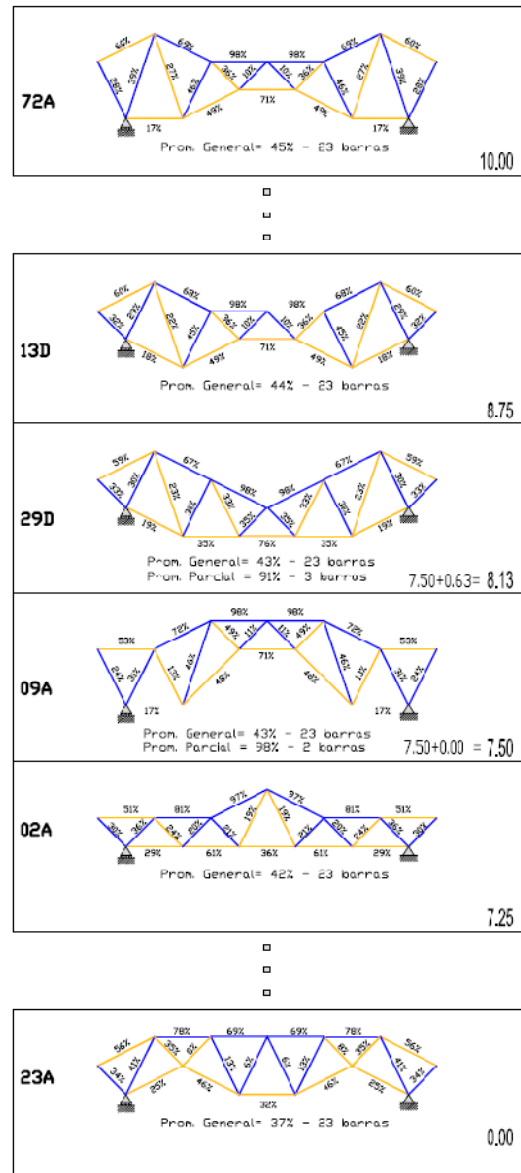


Fig. 93: Evaluación de Tensión Óptima

Ejemplo práctico

Las celosías 29D y 09A, tienen el mismo promedio general de rendimiento, sin embargo sus rendimientos locales son diferentes. La estructura 29D tiene 3 barras que superan el 75% de rendimiento y con un promedio local de 91% de rendimiento. Por otro lado, la estructura 09A tiene sólo dos barras que superan el 75% de rendimiento. Por lo tanto, la mejor estructura de ellas es la 29D, por tener el mayor número de barras óptimas que superen el 75% de rendimiento.

El puntaje complementario, que se le sumará a la estructura 29D será proporcional al rango de puntos que existe entre las estructuras que tienen el mismo promedio global y la estructura inmediatamente superior. En nuestro ejemplo, el rango de puntos es de 1.25 puntos, que es el resultado de restar 8.75 (modelo 13D) menos 7.50 puntos. Como la estructura 29D es un individuo intermedio entre el 13D y 9A, el incremento de puntos es la mitad del rango, es decir 0.63 puntos. En caso que ambas estructuras tengan la misma cantidad de barras que superen el 75% de rendimiento, la elección del mejor individuo dependerá del promedio parcial.

3.3.3. Minimización de peso

Este último parámetro de control será similar a los dos parámetros anteriores. Sin embargo, en este caso dividiremos la calificación en dos grupos.

El primer grupo obtendrá una calificación de 5 a 10 puntos. Este grupo estará conformado por los individuos más ligeros, es decir, las celosías que no superen el peso propio de la celosía base. La estructura que pese menos recibirá 10 puntos y la estructura que iguale al peso de la estructura base, obtendrá 5 puntos.

El segundo grupo estará conformado por las estructuras que sobrepasen el peso de la estructura base. Ellas obtendrán un calificación de 0 a 5 puntos. En este caso la estructura más pesada no recibirá puntos.

Las calificaciones serán proporcionales al rango del grupo y al peso de cada individuo.

En caso que exista dos estructuras con pesos iguales, dichas estructuras tendrán la misma puntuación.

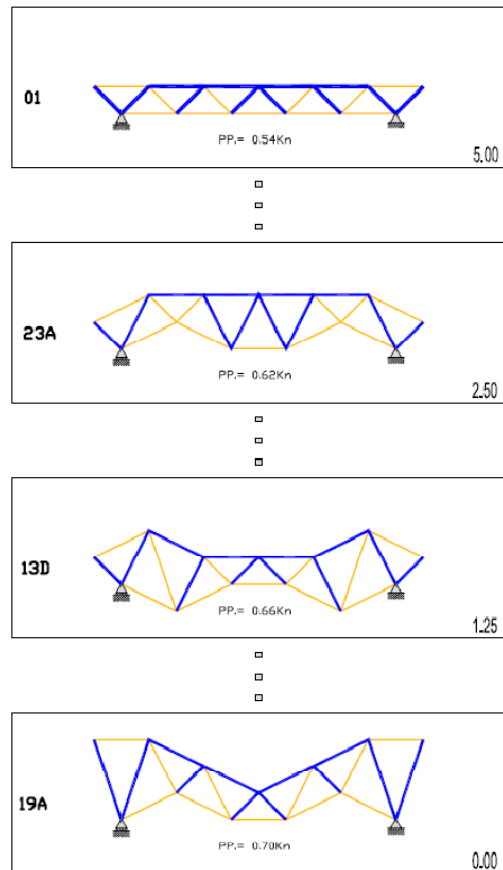


Fig. 94: Evaluación de Minimización de peso

Ejemplo practico

En nuestro ejemplo, los modelos estudiados no llegan a ser más ligeros que el modelo base, por lo que la puntuación máxima será de 5 puntos.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE CONTROL			
	DEFORMACIÓN	TENSIÓN ÓPTIMA	MINIMIZACIÓN DE PESO
01	 23A 10.00	 72A Prom. General= 45% - 23 barras Prom. Parcial = 98% - 2 barras 10.00	 01 PP = 0.54Kn 5.00
02	 23D 6.07	 19A Prom. General= 44% - 23 barras Prom. Parcial = 89% - 9 barras 9.68	 02A PP = 0.56Kn 4.38
03	 11D 5.72	 97A Prom. General= 44% - 23 barras Prom. Parcial = 91% - 4 barras 9.38	 05D PP = 0.58Kn 3.75
04	 38A 5.36	 49A Prom. General= 44% - 23 barras Prom. Parcial = 89% - 4 barras 9.06	 14D PP = 0.60Kn 3.13

Fig. 95: Resumen de clasificación de los cuatro primeros puestos. Evaluación con los parámetros de control: Deformación, Tensión óptima y Minimización de peso.

3.4. Selección

En nuestra investigación hemos utilizado como operador de selección el **muestreo universal estocástico** (SUS), que nos permite seleccionar los individuos a reproducirse en base a su *Aptitud o Fitness*. Además, admite que los individuos de mayor aptitud se reproduzcan más veces que los que tienen menor aptitud.

Los pasos que se deben seguir son los siguientes:

- a. Realización de Ranking en base a la función de Aptitud o Fitness de la población inicial (P_0).
- b. Aplicación de operador de selección SUS

3.4.1. Realización de Ranking

El Ranking es una lista de orden de aptitud global, donde se fusiona la evaluación de los tres parámetros de control más un porcentaje de participación de cada uno de ellos.

La suma de los tres porcentajes de participación será de 100%. Un individuo que en las tres funciones haya obtenido el primer puesto obtendrá una puntuación máxima de 10 puntos.

Estos porcentajes de participación, permiten al investigador controlar el tipo de resultado que desea obtener. Es decir, si se otorga un porcentaje de participación de 60% a la función de peso mínimo, el resultado más óptimo será la estructura que pese menos. La deformación y tensión óptima pasarían a un segundo plano.

Luego de establecer los porcentajes de participación de cada función y sumar las puntuaciones de cada individuo, se procede a realizar la lista del ranking, de mayor a menor puntuación, esta población clasificada la llamaremos Población Fitness (P_f).

La Población Fitness está formada por tres grupos:

- Modelos Élite
- Modelos con Aptitud Media
- Modelos con Aptitud inferior a la Media

La clasificación entre ellas se realizará en base a una campana de Gauss, donde la población Élite estará formada por los individuos que tengan una puntuación mayor o igual a la media (μ) más una vez la desviación estándar (σ).

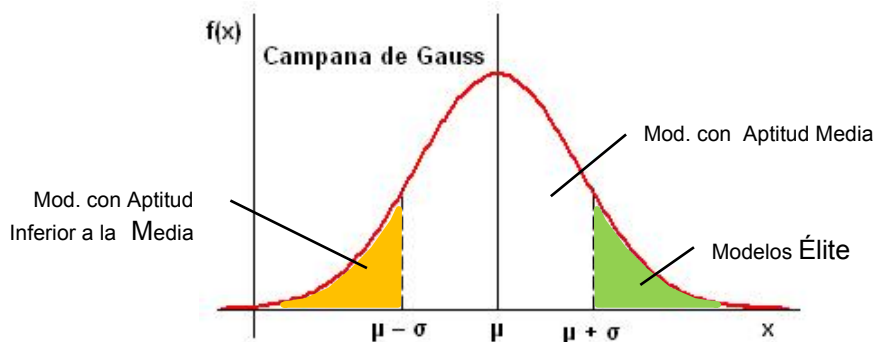


Fig. 96: Distribución de la población Fitness de acuerdo a la campana de Gauss

La población de Aptitud Media estará formada por los individuos que tengan una puntuación menor a $\mu + \sigma$ pero mayor o igual que $\mu - \sigma$.

Por último, la población de Aptitud inferior a la Media estará formada por los individuos que tengan un puntaje menor a $\mu - \sigma$.

Tabla de puntuaciones según la función Objetivo (Ejemplo práctico)

Puesto	Modelos	Puntuación			Pob. Fitness	Grupo $\mu=3.997$ $\sigma=0.63$
		Deformación (D)	Rendimiento tensional (Rt)	Peso (P)	D·33% + Rt·33% + P·33%	
1	2a	4.64	7.25	4.38	5.37	Pob. Élite Modelo ≥ 4.63
2	97a	4.46	9.38	1.25	4.98	
3	49a	3.21	9.06	1.25	4.46	Pob. Apt. Media 4.63 > Mod. ≥ 3.37
4	38a	5.36	6.25	1.88	4.45	
5	29d	4.29	8.13	0.62	4.30	
6	5d	1.79	7.00	3.75	4.14	
7	23a	10.00	0.00	2.50	4.13	
8	21a	3.21	6.75	2.50	4.11	
9	23d	6.07	3.75	2.50	4.07	
10	19a	2.14	9.69	0.00	3.90	
11	20d	3.93	6.50	1.25	3.85	
12	1	1.43	5.00	5.00	3.77	
13	13d	0.71	8.75	1.25	3.54	
14	14d	3.57	3.75	3.13	3.45	
15	11d	5.71	4.38	0.00	3.33	Pob. Apt. Inf. Media 3.37 > Modelo
16	72a	0.00	10.00	0.00	3.30	
17	9a	0.36	7.50	0.62	2.80	
	6a	Estructuras que colapsaron (Una o más de sus barras sobrepasaron su límite elástico)				
	8d					
	7d					
	30d					

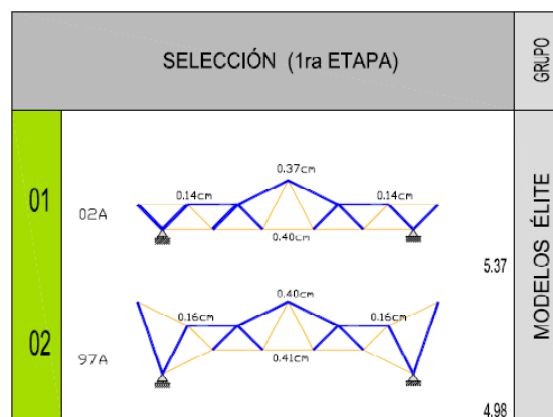


Fig. 97: Clasificación de Modelos Élite

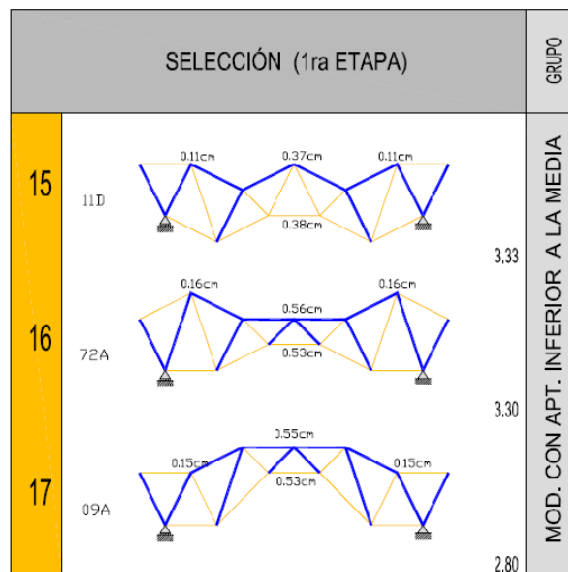
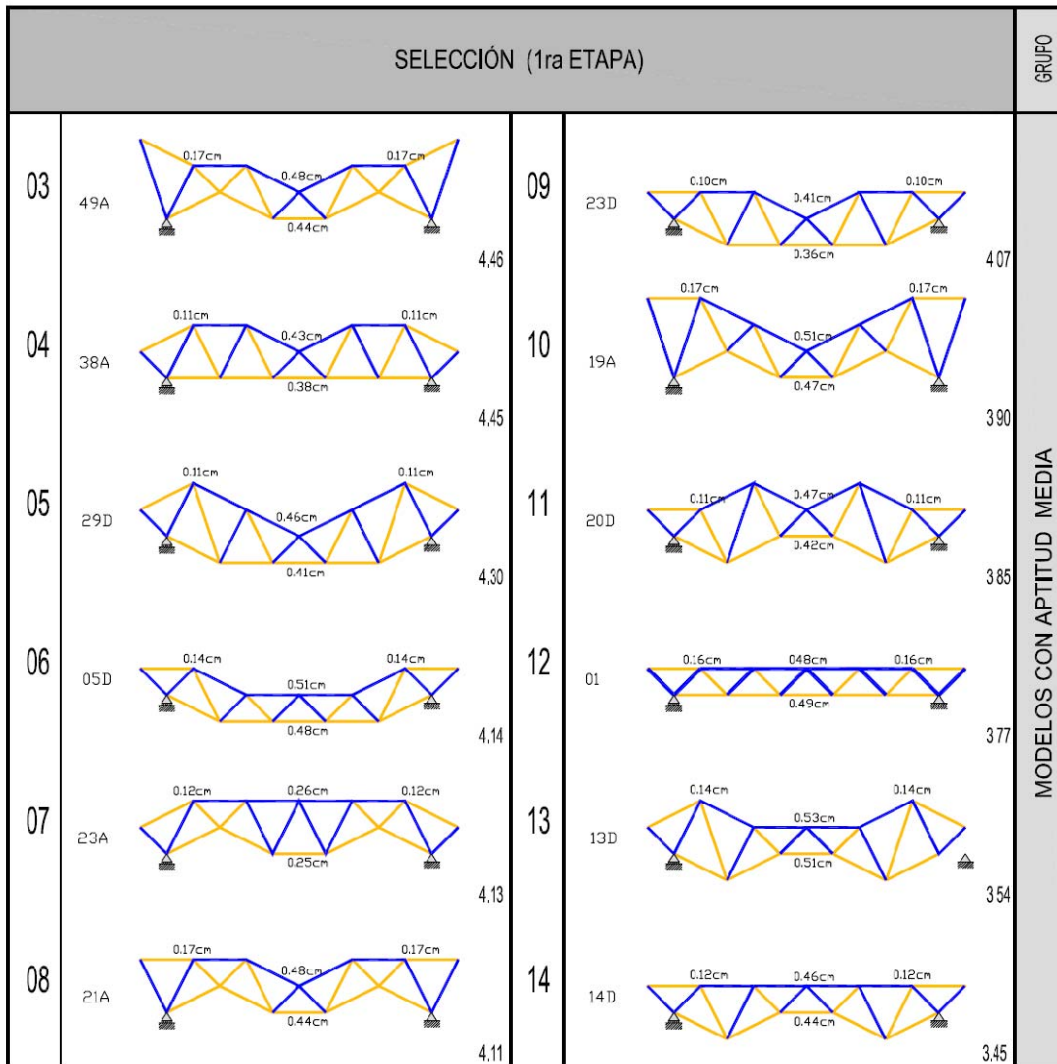


Fig. 98: Clasificación de Modelos con Aptitud Media y Modelos con Aptitud inferior a la Media de la Población Fitness (P_f)

3.4.2. Aplicación de operador de selección SUS

La aplicación de este operador es en base al muestreo universal estocástico, sin embargo hemos incorporado parte de la teoría de la selección por grupos, para mejorar nuestra selección.

Sabemos que la Población Fitness está compuesta por tres grupos de familias distintas. A cada familia se le otorgará una probabilidad de selección (p_s) de acuerdo a su aptitud. Estos porcentajes son los siguientes:

- Familia Élite 50%
- Familia de Aptitud Media 35%
- Familia de Aptitud inferior a la Media 15%

De este modo, cada miembro de una familia tendrá un tipo de probabilidad diferente en base a la familia que pertenece. En nuestro ejemplo práctico, cada individuo de la Familia Élite tiene una probabilidad de ser selecciona de 0.25 ($p_s = 0.5/2$ individuos), en la Familia de aptitud Media la probabilidad es de 0.029 ($p_s = 0.35/12$ individuos) y por último, la Familia de aptitud menor a la Media tiene una probabilidad de 0.05 ($p_s = 0.15/3$ individuos).

Una vez que tenemos la probabilidad de reproducción de cada individuo, se aplica el operador de selección SUS. Los datos para la ejecución de este operador son los siguientes:

- Población total de estudio (μ) o P_f 17
- Distancia entre punteros ($1/\mu$) 0.0588
- Distancia inicial N (valor aleatorio entre 0 - $1/\mu$) 0.0147

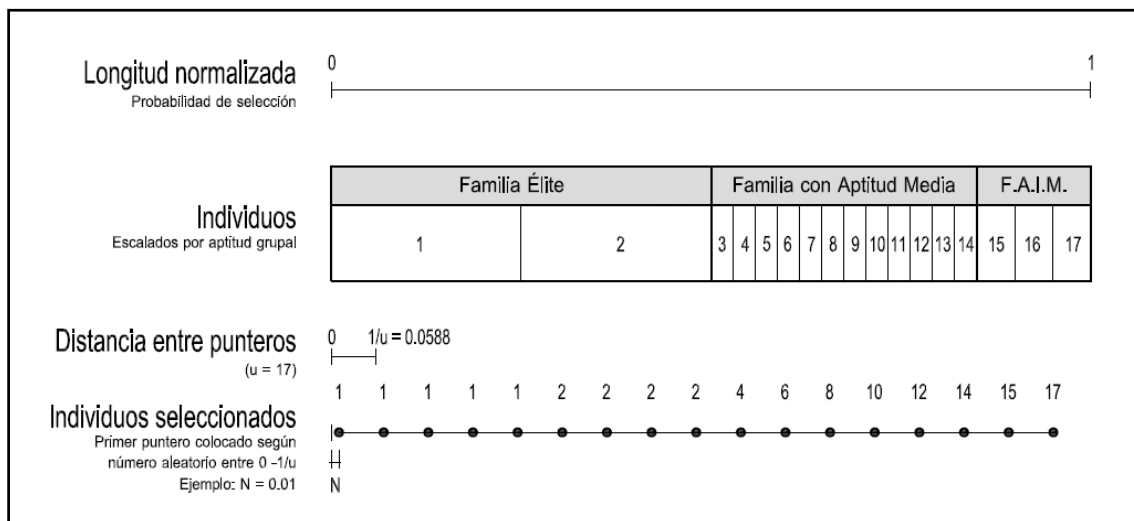


Fig. 99: Evaluación del operador de selección SUS, considerando el ejemplo práctico.

Aplicando los datos iniciales, obtenemos que: el individuo 1 se reproducirá 5 veces, el individuo 2 se reproducirá 4 veces, y los individuos 4, 6, 8, 10, 12, 14, 15 y 17 se reproducirán 1 vez. Luego las parejas, se formaran teniendo en cuenta que los padres serán de a familia con mayor aptitud, como la Familia Élite, y las madres serán de las familias inferiores, como la Familia de Aptitud Media y la Familia con Aptitud inferior a la Media, de nuestro ejemplo.

Por otro lado, si se observa que existe una falta de pareja para uno de los individuos, se deberá seleccionar una pareja con aptitud opuesta al individuo que se encuentre solo. Esta pareja será un individuo distinto en caso que este corresponda a una familia de aptitud baja. En la *fig. 100* se puede observar que el individuo 2 se quedó sin pareja, lo que permitió elegir, de manera aleatoria, una pareja perteneciente a una familia de aptitud inferior a la familia del individuo 2. En este caso se escogió como pareja el individuo 3.

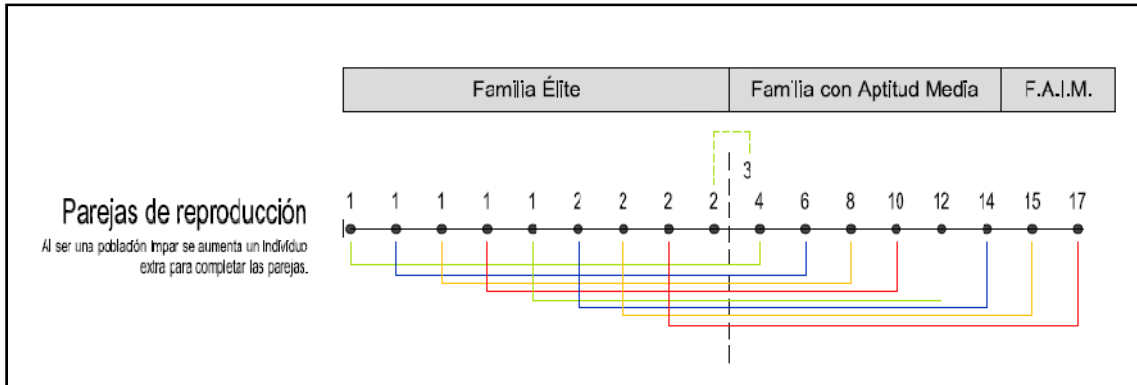


Fig. 100: Creación de las parejas de reproducción

3.5. Cruzamiento

La etapa de cruzamiento es muy importante en los Algoritmos Genéticos, ya que nos permite mejorar la población inicial mediante la reproducción de padres o individuos de la primera generación. La selección de los padres generalmente se realiza de manera aleatoria, teniendo en cuenta su jerarquía. En nuestro caso el cruce se realiza entre las familias con mayor aptitud y las familias con aptitud media o aptitud inferior a la media. Esta selección se ha descrito en el apartado anterior.

El cruce o recombinación se realizará mediante **un punto o dos puntos de corte**, de acuerdo a la opción del investigador. En ambos casos los límites de corte serán los límites entre la zona de soporte y la zona central o voladizo.

A. Estructuras con Apoyos laterales

Un punto de corte generara cuatro hijos diferentes. A continuación presentamos un esquema de este tipo de cruce.

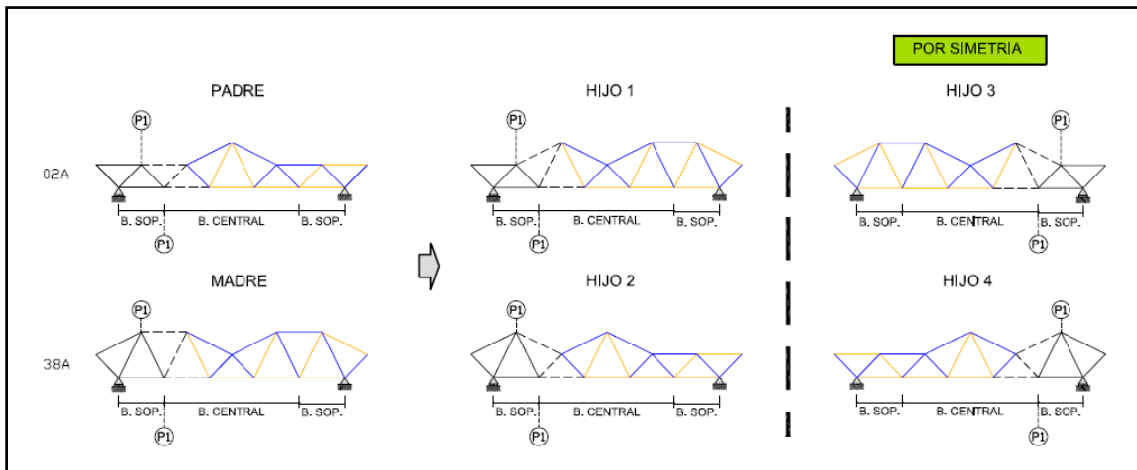


Fig. 101: Esquema de Cruce de un punto de corte-Apoyos laterales

Los **Dos puntos de corte** generan dos hijos, que permitirán dar mejor respuesta a cargas simétricas.

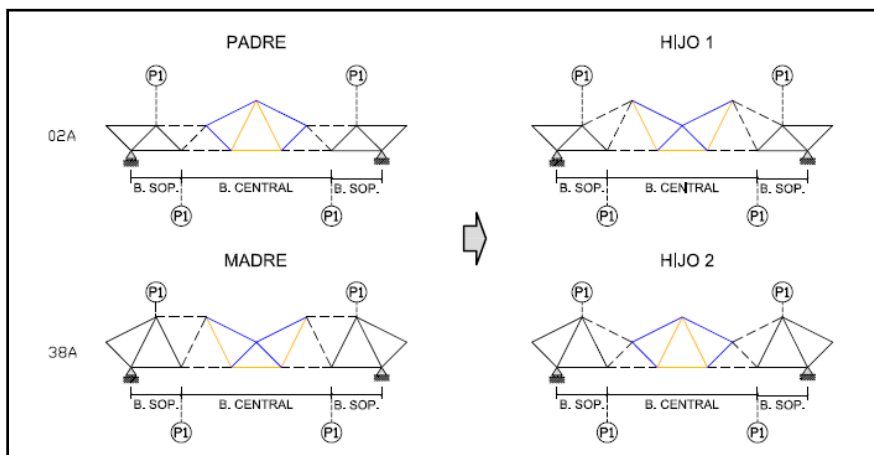


Fig. 102: Esquema de Cruce de dos puntos de corte-Apoyos laterales

B. Estructuras en Voladizo

Un punto de corte generara dos hijos diferentes. A continuación presentamos un esquema de este tipo de cruce.

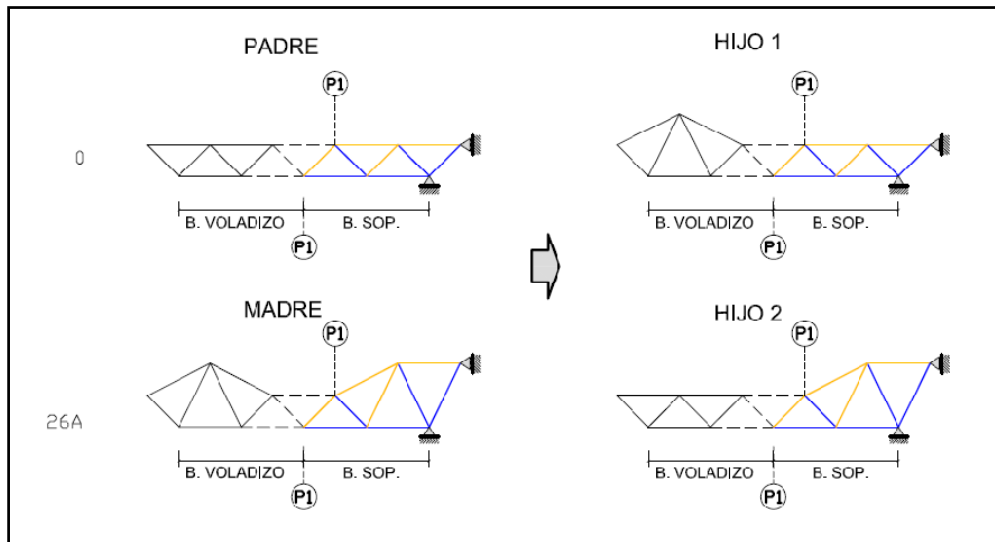


Fig. 103: Esquema de cruce de un punto de corte-Voladizo

Los **Dos puntos de corte** generan dos hijos. El corte en este caso se realiza en dos genes elegidos al azar. El primer corte se encontrara en la banda de voladizo y el segundo corte en la banda soporte. El corte se puede dar también en el límite fronterizo de las zonas.

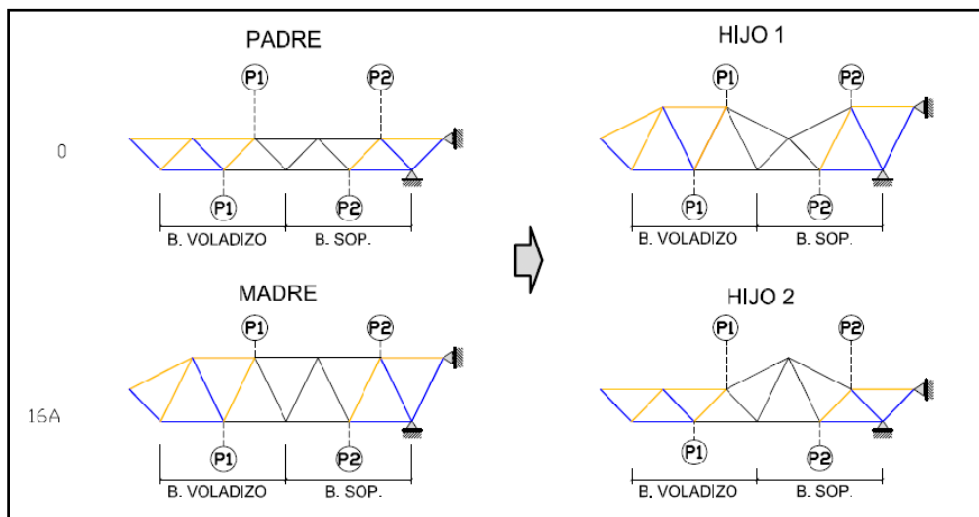


Fig. 104: Esquema de cruce de dos puntos de corte-Voladizo

En la siguiente figura presentamos un ejemplo de cómo es el proceso de cruzamiento con dos puntos de corte. En este proceso se obtienen dos "hijos", que en algunos casos no difieren mucho a los miembros de la población ya existente.

En nuestro ejemplo se pudo observar que el primer hijo no obtiene un puntaje adecuado después de su evaluación, por lo que su posición llegaría a ser el número 18. En el caso del segundo hijo, hemos obtenido un individuo con mayor aptitud que uno de los padres. Este hijo

puede mejorar la evolución de la población y es un claro ejemplo de los beneficios que presenta el operador de cruce.

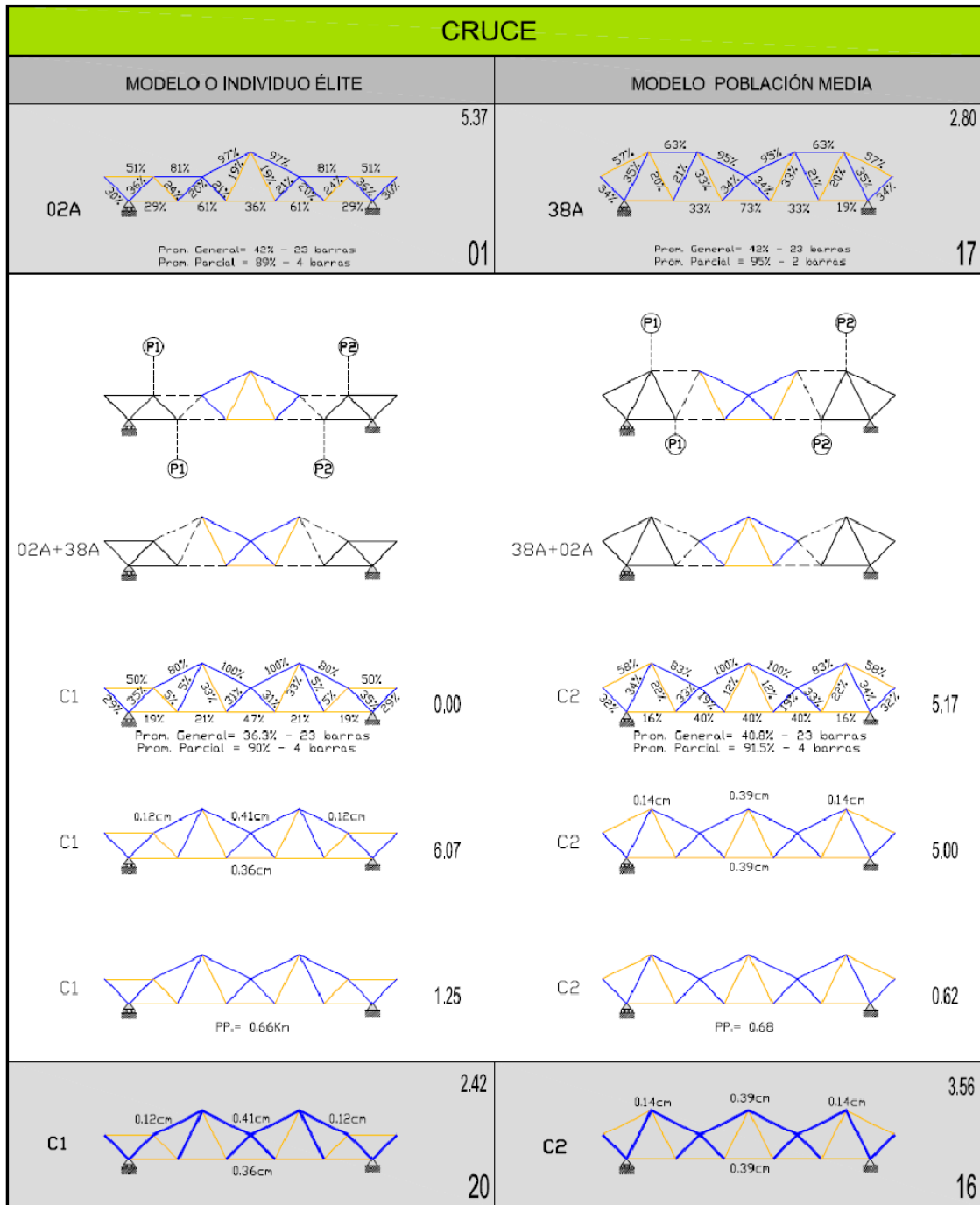


Fig. 105: Ejemplo de reproducción de la población mediante el cruce

3.6. Mutación

La finalidad de este operador genético es evitar que el algoritmo quede atrapado en óptimos locales, donde la diversidad de la población se suele perder. En la mutación se modifica aleatoriamente un gen del individuo. En nuestro caso, ese gen es un módulo de la estructura.

Siempre hay que tener en cuenta que la mutación de cada gen o modulo se da en un porcentaje muy bajo, en nuestra propuesta metodológica esa probabilidad de mutación (p_m) será en base a la expresión empírica de Schaffer:

$$p_m \approx 1,75/\mu n_g$$

Donde:

μ Tamaño de Población

n_g Número de genes en el genoma s.

En nuestra estructura los genes serán los módulos de las celosías (fig.106)

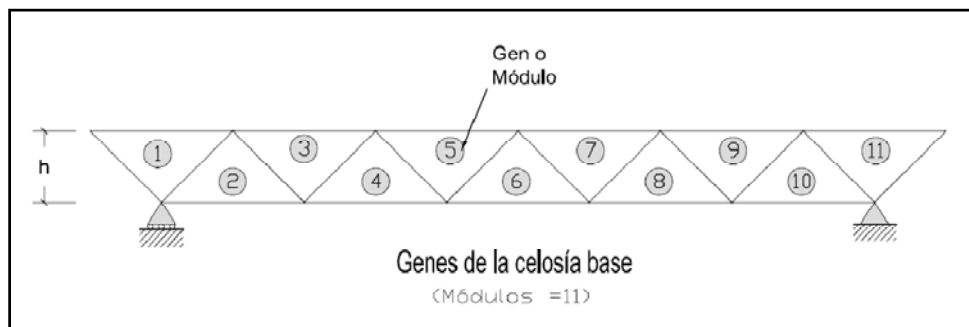


Fig. 106: Distribución de genes en la estructura base

Ejemplo:

$$p_m \approx 1,75 / (17)*(11)$$

$$p_m \approx 0,0093$$

En resumen, en nuestro ejemplo cada modulo del individuo, en estudio, tiene la probabilidad de 0,0093 de ser mutado.

La mutación se realiza en cada generación de estudio, sin considerar los individuos que han sido procreados en esa misma generación, mediante el cruce. La forma como se realiza la mutación es la siguiente:

- A partir del primer gen de cada individuo, se genera un número aleatorio r , entre 0 y 1. Si $r \leq p_m$ se producirá la mutación de ese gen. El proceso se repite hasta alcanzar el último gen.
- La mutación del gen o módulo, se realizará reemplazando el módulo afectado por otro que tenga mayor aptitud, que se encuentre en su misma ubicación y que pertenezca a la Población Fitness. La aptitud se medirá solo con el parámetro de tensión óptima.

La idea de cambiar un gen por otro, teóricamente superior, nos permite controlar positivamente esta mutación. No obstante, la mutación sigue siendo aleatoria debido a que el investigador no selecciona que gen será mutado.

3.6.1. Distribución del Gen de mutación

Como hemos comentado anteriormente, la mutación se podrá realizar en cada gen de un individuo. Sin embargo, existe una alternativa local de distribución, donde la mutación se puede aplicar de forma simétrica o asimétrica.

A. Distribución Simétrica del gen mutado en estructuras con apoyos laterales

Esta alternativa local, permite al investigador poder obtener soluciones coherentes al momento de diseñar una estructura con cargas simétricas. En este caso, sí el gen de mutación se aplica en un modulo de la zona soporte o banda central del lado izquierdo, por simetría esta mutación también se aplicará en su módulo opuesto, es decir en el lado derecho.

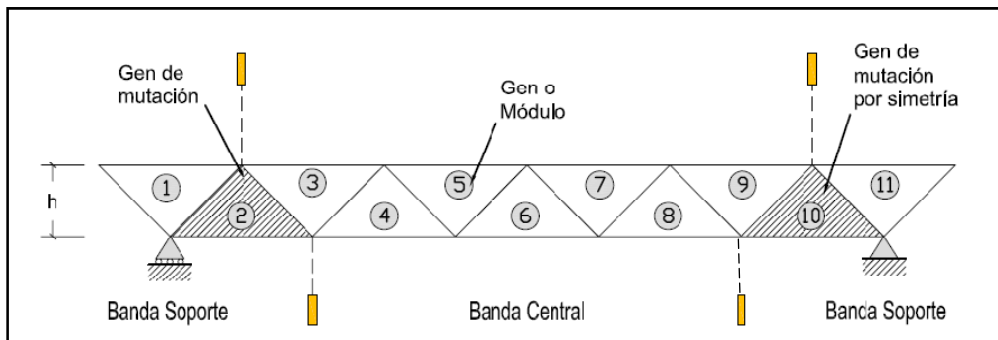


Fig. 107: Distribución Simétrica del Gen mutado - Estructuras con Apoyos laterales
(Módulos = 11)

B. Distribución Asimétrica del gen mutado en estructuras con apoyos laterales y voladizos

Esta distribución tiene el mismo fin que la distribución anterior, sólo que en este caso se aplicará a un solo modulo y no a su opuesto. En la estructura de voladizo esta aplicación tiene un sentido racional más claro, debido a que es una estructura mayormente asimétrica.

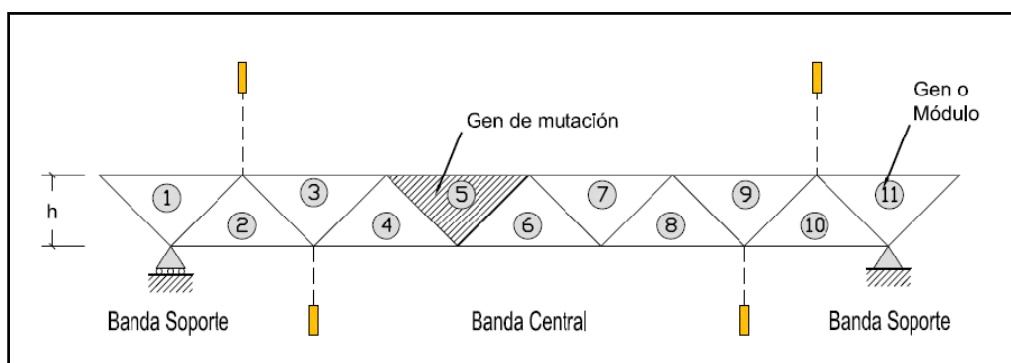


Fig. 108: Distribución Asimétrica del Gen mutado - Estructuras con Apoyos laterales
(Módulos = 11)

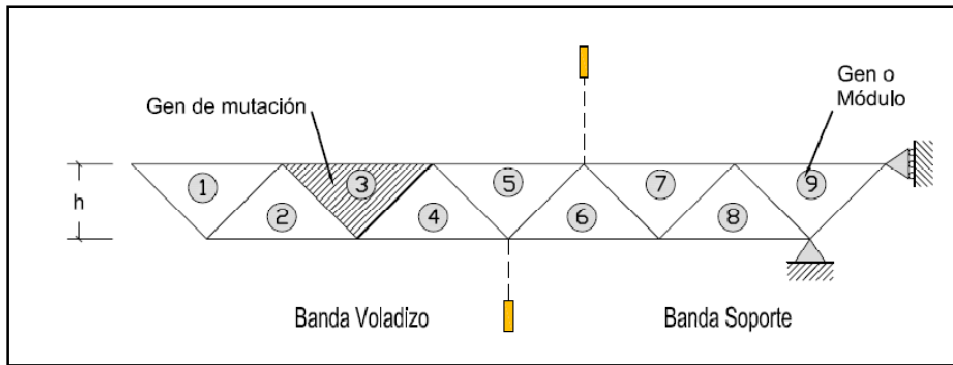


Fig. 109: Distribución Asimétrica del Gen mutado - Estructuras en voladizo (Módulos = 9)

En la **fig.110** presentamos un ejemplo de mutación. En el lado izquierdo de la imagen se observa al individuo 72A, con un puntaje de aptitud de 4.84 y una ubicación en el ranking intermedia, puesto número 9 de la última Población Fitness. Por otro lado, en el lado derecho se encuentra el individuo M2, un individuo resultado de la mutación en su gen 2 y 10, donde los efectos de mutación han sido favorables. Este nuevo individuo tiene un puntaje de aptitud de 5.24 y ocupa el puesto 5.

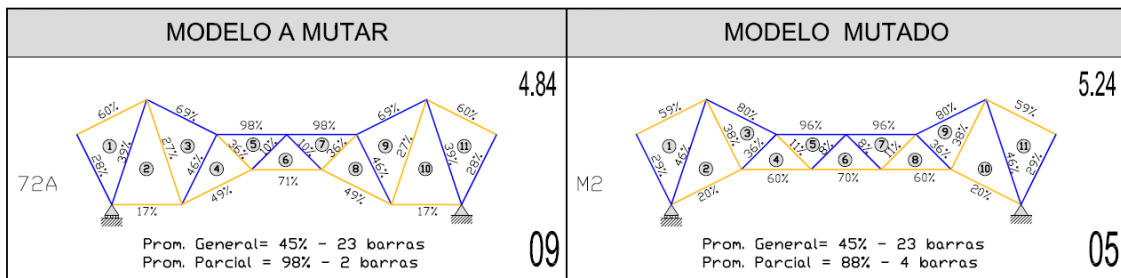


Fig. 110: Estructura 72A en proceso de mutación

El procedimiento de mutación en este ejemplo ha sido el siguiente:

De acuerdo a la teoría, se ha ido analizando cada estructura de la Población Fitness y en el individuo 72A, en su gen 10, el número aleatorio "r" ha sido menor que el índice de probabilidad de mutación de 0,0093. Este resultado indica que su gen 10 sufrirá una mutación. Sin embargo, como las cargas que se han aplicado a esta estructura son simétricas, la distribución de la mutación también será simétrica. Es decir, tanto el gen 10 como el 2 sufrirán el efecto de la mutación.

Para realizar la mutación de los genes seleccionados, se debe buscar una estructura que tenga el mejor promedio de tensiones óptimas en esos mismo genes. En este caso la estructura seleccionada es el modelo 19A, que tiene un promedio de tensión óptima modular de 35%.

El promedio de tensión óptima modular es el promedio de rendimiento que tienen las barras que conforman ese gen.

A continuación presentamos un esquema del proceso de mutación (**fig.111**).

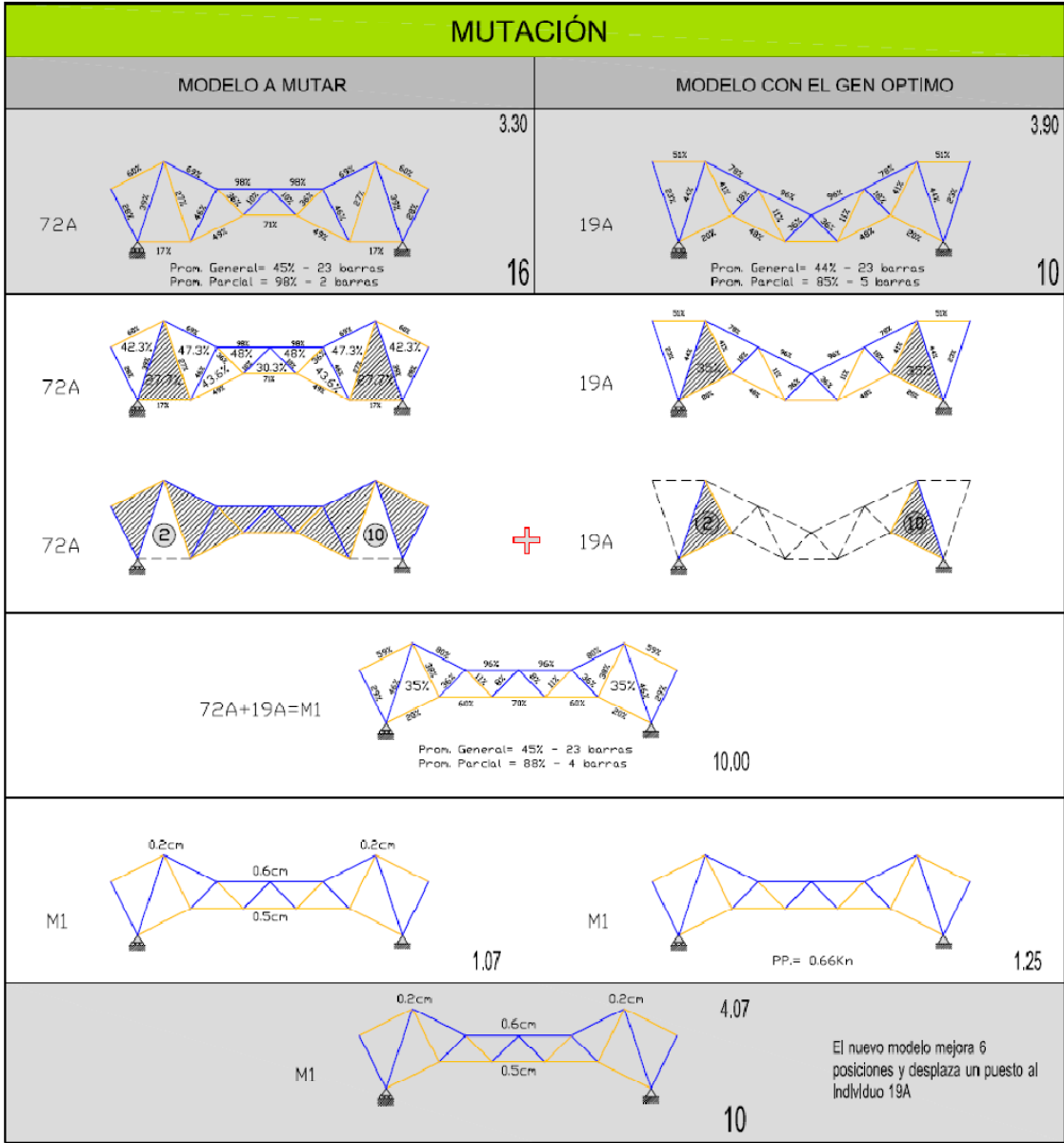


Fig. 111: Proceso de mutación

3.7. Población Óptima

La población optima está compuesta por los individuos que mejor se han adaptado a las condiciones del problema propuesto, superando las fases de selección, cruzamiento y mutación planteadas en el proceso de optimización estructural.

Esta población se divide en tres familias, igual como en el primer ranking, que son: Familia Élite, Familia de Aptitud Media y Familia de Aptitud inferior a la Media. En este último listado de aptitud, la familia que nos interesa observar, es la familia Élite, donde los individuos tienen mayor puntaje que la población promedio.

A continuación presentamos un esquema del proceso de Optimización de Forma de una estructura reticular mediante Algoritmos Genéticos. En este esquema se ha realizado la evaluación de dos generaciones.

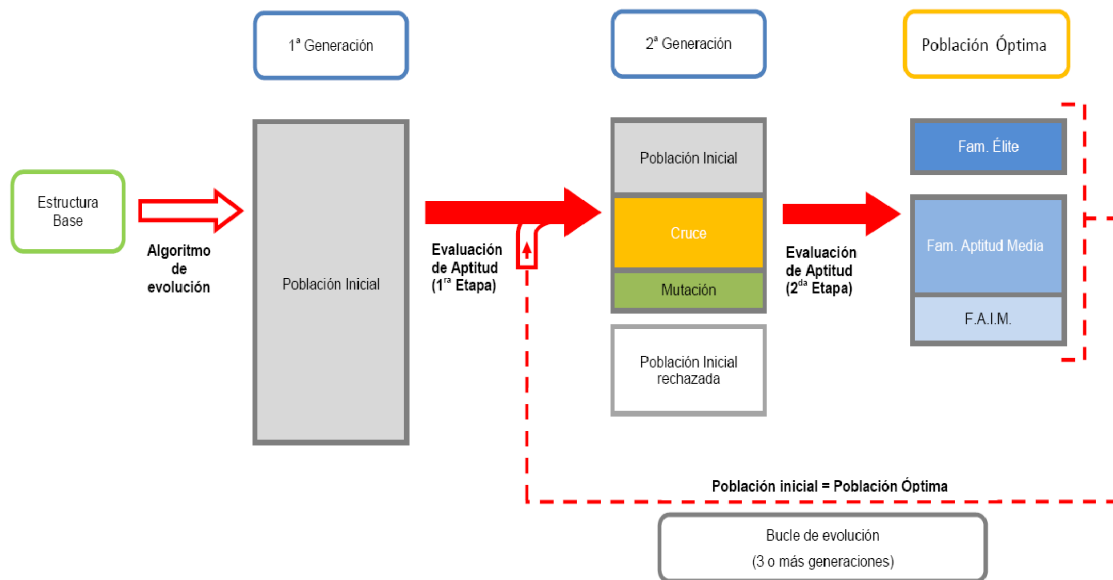


Fig. 112: Esquema de Optimización Estructural mediante Algoritmos Genéticos

Cuando se realice la evaluación de más de dos generaciones, la Población Óptima se transformara en la nueva población inicial y se procederá nuevamente a realizar una selección, cruce y mutación de la nueva población. Este proceso se repite el número de generaciones que se desee generar. Al final de la evaluación, siempre quedará una Población Óptima con una familia Élite, que contiene los mejores resultados de la Evaluación.

En principio, el mejor resultado es el primer individuo de la familia Élite, sin embargo la elección del mejor individuo recaerá sobre el investigador. Nuestra propuesta es crear un grupo reducido de soluciones óptimas donde cada individuo sobre saldrá con respecto a otro, según una determinada característica, ya sea por su deformación, tensión de rendimiento o su peso propio. Para que la elección del usuario sea más clara presentamos un diagrama de Pareto con dos funciones principales, de peso propio y de deformación. Este diagrama permite al usuario identificar el candidato más conveniente según un criterio determinado. Este análisis lo presentamos en el ejemplo práctico.

En nuestro ejemplo práctico hemos realizado dos cruces y una mutación que han complementado nuestra población inicial. El resultado de la Población Fitness se puede observar en el siguiente cuadro.

Tabla de puntuaciones según la función Objetivo-Segunda Generación (Ejemplo práctico)

Puesto	Modelos	Puntuación			Pob. Fitness u Óptima	Grupo $\mu=3.98$ $\sigma=0.42$
		Deformación (D)	Rendimiento tensional (Rt)	Peso (P)	D·33% + Rt·33% + P·33%	
1	2a	4.64	7.55	4.38	5.47	Mod. Élite Modelo \geq 4.40
2	97a	4.46	9.48	1.25	5.01	
3	38a	5.36	6.55	1.88	4.55	
4	49a	3.21	9.16	1.25	4.49	
5	23a	10.00	0.80	2.50	4.39	Pob. Apt. Media 4.40 > Modelo \geq 3.56
6	29d	4.29	8.33	0.62	4.37	
7	5d	1.79	7.30	3.75	4.24	
8	23d	6.07	4.25	2.50	4.23	
9	21a	3.21	7.05	2.50	4.21	
10	mutación	1.07	10.00	1.25	4.07	
11	20d	3.93	6.80	1.25	3.95	
12	19a	2.14	9.79	0.00	3.94	
13	1	1.43	5.40	5.00	3.90	
14	14d	3.57	4.25	3.13	3.61	
15	13d	0.71	8.85	1.25	3.57	Pob. Apt. Inf. Media 3.56 > Modelo
16	cruce 2	5.00	5.17	0.62	3.56	
17	11d	5.71	4.88	0.00	3.49	
18	72a	0.00	9.89	0.00	3.26	
19	9a	0.36	7.70	0.62	2.86	Estructuras que colapsaron (Una o más de sus barras sobrepasaron su límite elástico)
20	cruce 1	6.07	0.00	1.25	2.42	
	6a					
	8d					
	7d					
	30d					

En esta tabla, el individuo con mayor puntaje sigue siendo el mismo que en el primer Ranking, sin embargo la población Élite ha aumentado al doble. Este cambio permite diversificar los resultados óptimos del estudio. La introducción de tres nuevos modelos ha generado un cambio en el rango de medición de cada función objetivo, lo que permite que las generaciones del futuro no se estancan en una solución repetitiva.

Es importante tener en cuenta que los estudios reales tendrán un mínimo de población inicial de 100 individuos, por lo que el cruce y la mutación tendrán una gran influencia en el resultado de la población Óptima.

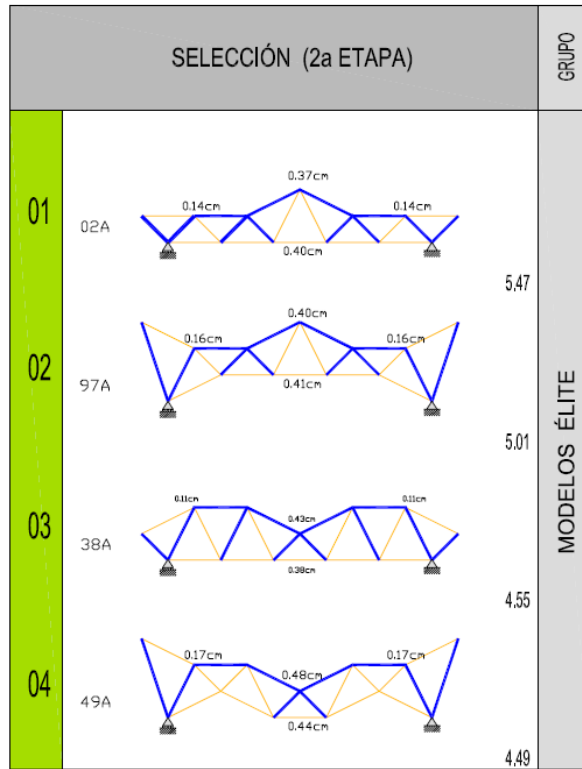


Fig. 113: Población Élite de la Segunda Generación.

Por otro lado, cuando realizamos el diagrama de Pareto, la elección del mejor individuo se realizará teniendo en cuenta los diferentes frentes que se forman en el diagrama. Lo lógico es que el individuo seleccionado se encuentre en el primer frente. A continuación presentamos el diagrama de nuestra última población óptima con los primeros frentes que se ha formado en nuestra evaluación.

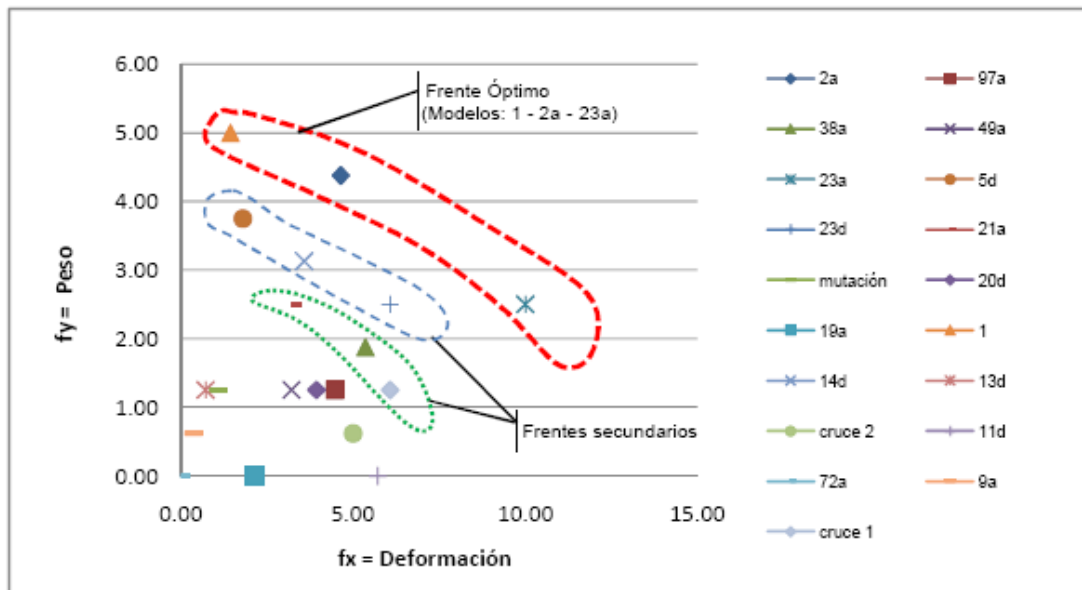


Fig. 114: Diagrama de Pareto con los diferentes frentes formados

4.

Implementación de Software de Optimización de forma OPTWIL

4.1. Introducción al programa

Para la evaluación de nuestra propuesta metodológica de optimización, se ha creado un software llamado OPTWIL. Esta herramienta permite realizar la optimización de una estructura reticular metálica con apoyos laterales y en voladizo, en base a la metodología planteada en capítulo 3.

El programa analiza diferentes modelos de celosías en distintas generaciones, hasta agrupar una población óptima que minimice (o maximice) una de las funciones objetivo, ya sea la minimización de peso, rendimiento tensional o deformación de la estructura.

El programa o código se ha desarrollado en el lenguaje de MATLAB (Matrix Laboratory). Este software permite al usuario analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones, en base a cálculos matriciales.

Esta herramienta informática está formada por 6 módulos o ventanas, que permiten al usuario realizar un análisis adecuado de cada estructura. Estas ventanas son las siguientes:

- Inicio
- Pre-dimensionado
- Datos A.G.
- Cálculo A.G.
- Detalles Evolutivos
- Reacciones

Las dos últimas ventanas mencionadas son módulos complementarios en la optimización. Nos permiten conocer resultados detallados de la evolución de nuestra optimización como: el comportamiento de los operadores genéticos como también las reacciones que tenemos en la estructura por cada hipótesis generada.

4.1.1. Inicio

Se encuentra formado por dos paneles que ayudan a generar la celosía base de la población inicial, estos son: el panel de datos generales de la celosía y el panel de cargas nodales.

En la primer panel, datos generales, el usuario introduce la información básica de la celosía, como: tipo de estructura a analizar, datos geométricos (luz, proporción de canto y base), datos de sección de barra (tipo de perfil, área, inercias), datos del material (E, fy, factor de minoración del material) y demás datos de la normativa EAE.

Es importante completar los primeros datos de la celosía para pasar al apartado de las cargas nodales. Esta recomendación se debe a que una vez se haya completado los datos iniciales, de la columna izquierda (*ver fig.115*), se deberá presionar el botón de **“ingreso de datos”** para guardar los datos. Esta acción nos generará la matriz inicial del modelo base, su matriz de conexión, la agrupación de barras por zonas (banda central o banda soporte) y por lo tanto, la ubicación de los nudos para la introducción de las cargas.

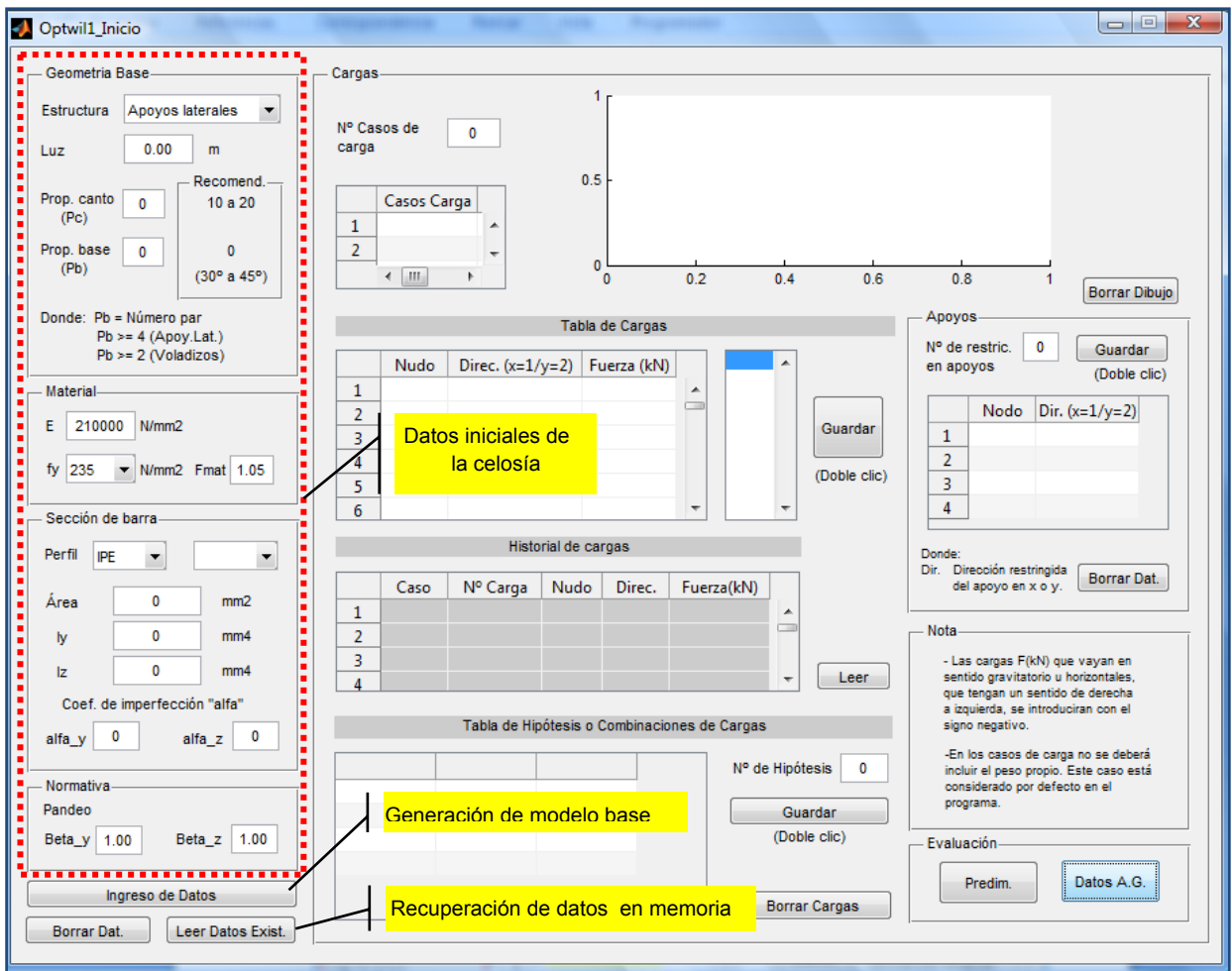


Fig. 115: Ventana de Inicio. Introducción de datos geométricos y de material de la celosía.

En la opción de **“Sección de barra”**, se considera un prontuario de cuatro diferentes tipos de perfiles, como: IPE, IPN, HEA y HEB. Los perfiles que se encuentran en esta opción son perfiles de clase 1, 2 y 3, de acuerdo al límite elástico seleccionado (235, 275 y 355). El cálculo de la estructura se realiza en un régimen elástico.

Para el cálculo de pandeo se utiliza el coeficiente de imperfección (α) para elementos sometidos a esfuerzo axial. La esbeltez máxima de los perfiles se ha limitado a 200 para elementos comprimidos y 300 para elementos traccionados.

En el segundo panel, apartado de las cargas, el usuario puede crear diferentes casos de carga, como: sobre carga de uso, viento, nieve, etc. Primero se debe indicar el número de casos de carga que se quiere crear y luego escribir los nombres (fig.116.Pasos 1 y 2). Es importante conocer que el caso del peso propio (PP) es diferente. El programa lo considera automáticamente en sus cálculos. Sólo en el cuadro de hipótesis se observará el peso propio y se podrá considerar un coeficiente de mayoración.

Cada caso de carga se introducirá en la "Tabla de cargas", de tal manera que cuando se quiera guardar una carga para un determinado caso, se deberá señalar el caso en concreto, escribir las cargas y luego pulsar el botón de guardar (fig.116.Pasos 3, 4 y 5).

En la tabla de cargas se introducirá el número de nudo, dirección de las cargas y su magnitud. La dirección del nudo podrá tener dos opciones. La dirección X u horizontal será representada por el número 1 y la dirección Y o vertical será representada por 2. En el caso de la fuerza, la magnitud debe ir acompañada del sentido de la fuerza. En este programa sí la carga es en sentido gravitatoria o se dirige de derecha a izquierda, se introducirá la carga con el signo negativo.

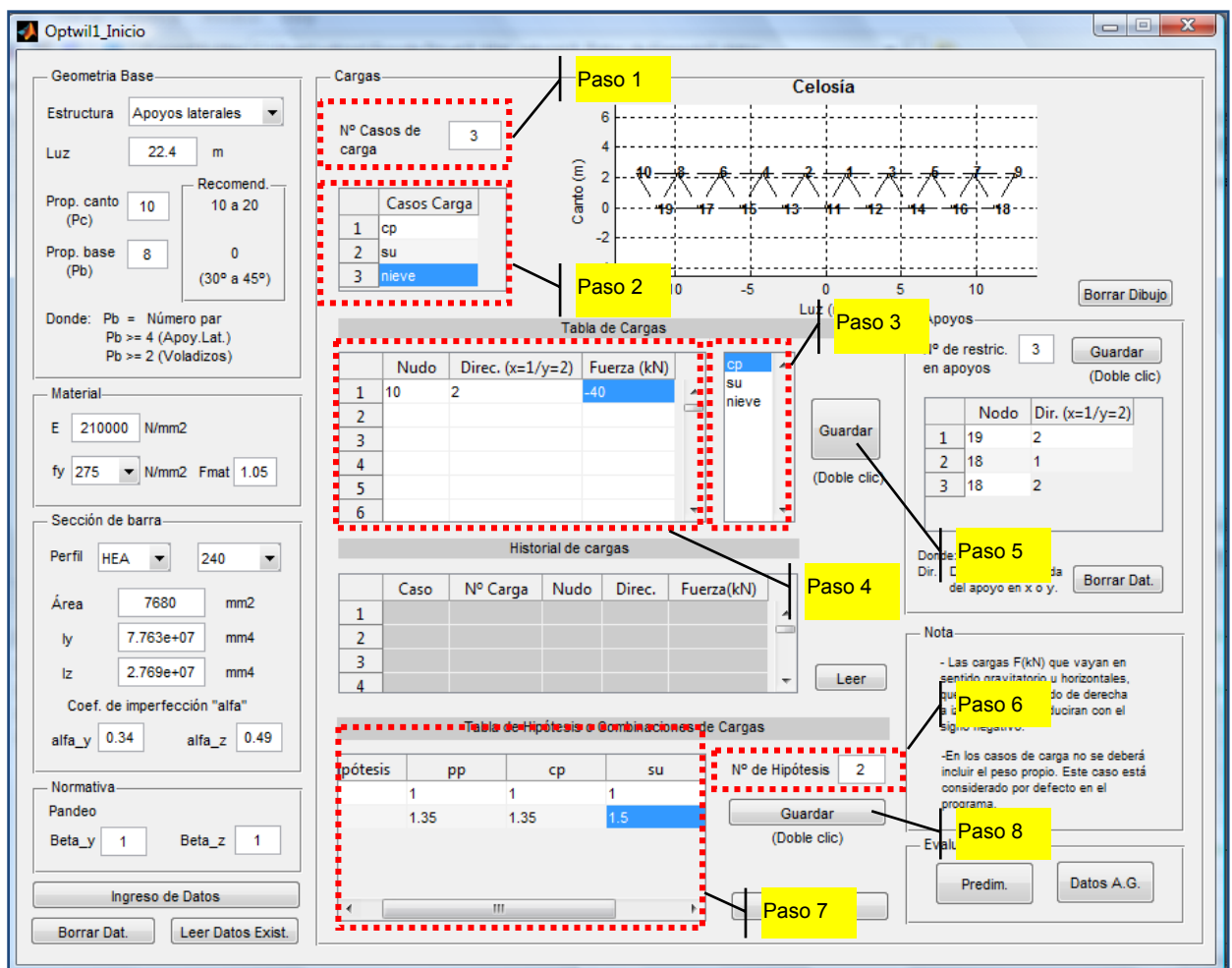


Fig. 116: Ventana de inicio. Introducción de cargas y creación de Hipótesis de carga.

Para revisar si la carga ha sido guardada correctamente, el usuario deberá seleccionar el caso de carga en la “**Tabla de cargas**” y en la tabla de “**Historial de cargas**” pulsará la opción “**Leer**”.

En la “**Tabla de de Hipótesis de Cargas**”, primero señalaremos el número de combinaciones y luego introduciremos el nombre de las combinaciones y los coeficientes de cálculo de cada combinación (fig.116. Pasos 6 y 7). Al final guardaremos toda la información (fig.116. Paso 8).

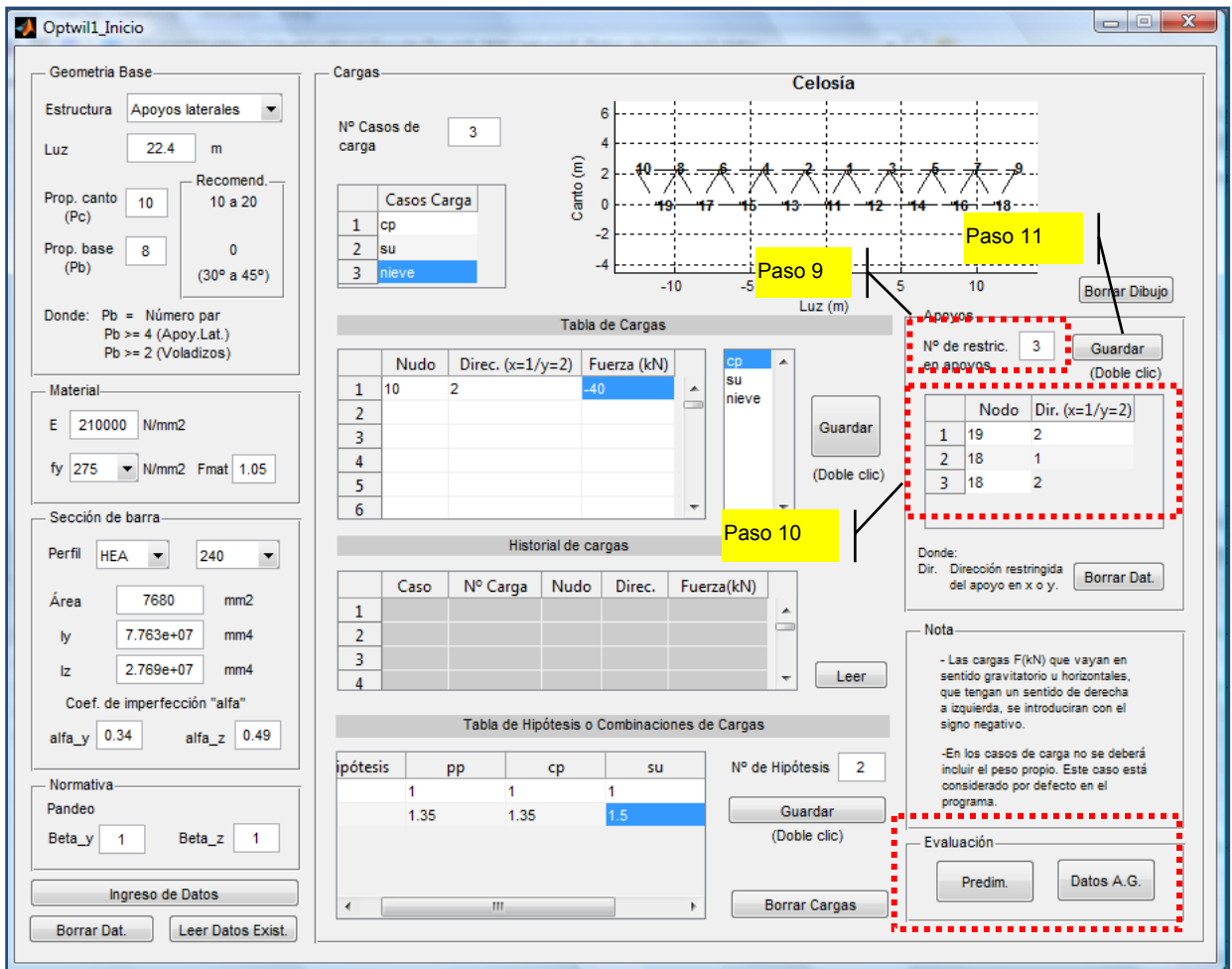


Fig. 117: Ventana de inicio. Opciones de evaluación

Luego se indican los apoyos de la estructura. Se señalan los nudos correspondientes y sus restricciones de movimiento (fig.117. Pasos 8 a 10). En el caso del voladizo, los nudos que se deben restringir son los nudos del extremo derecho. Esta puntualización se realiza debido a que el algoritmo está establecido para que el sector derecho sea la banda de soporte y, por lo tanto, el lado izquierdo sea la banda del voladizo.

Una vez completado todos los datos de la celosía, tenemos dos opciones para continuar la evaluación. La primera opción es la del “**Predimensionado**”, que permite al usuario verificar si la estructura definida, inicialmente, cumple con los parámetros estructurales o no. La segunda opción es la ventana de introducción de los “**Datos A.G.**”, que son los datos necesarios que necesita el algoritmo para generar la población inicial y realizar posteriormente la evaluación de la celosía por generaciones.

4.1.2. Pre-dimensionado

En la ventana de pre-dimensionado se realiza dos cálculos, uno es de comprobación estructural y el segundo de optimización seccional (fig.118).

En el primer cálculo, se comprueba si la estructura es adecuada o no. Se analiza la celosía con una misma sección en todas sus barras, de acuerdo a los datos iniciales de la primera ventana. Luego, se comprueba la flecha de la estructura y las tensiones en cada barra. El cálculo se inicia cuando se presiona el botón de “**calcular**”.

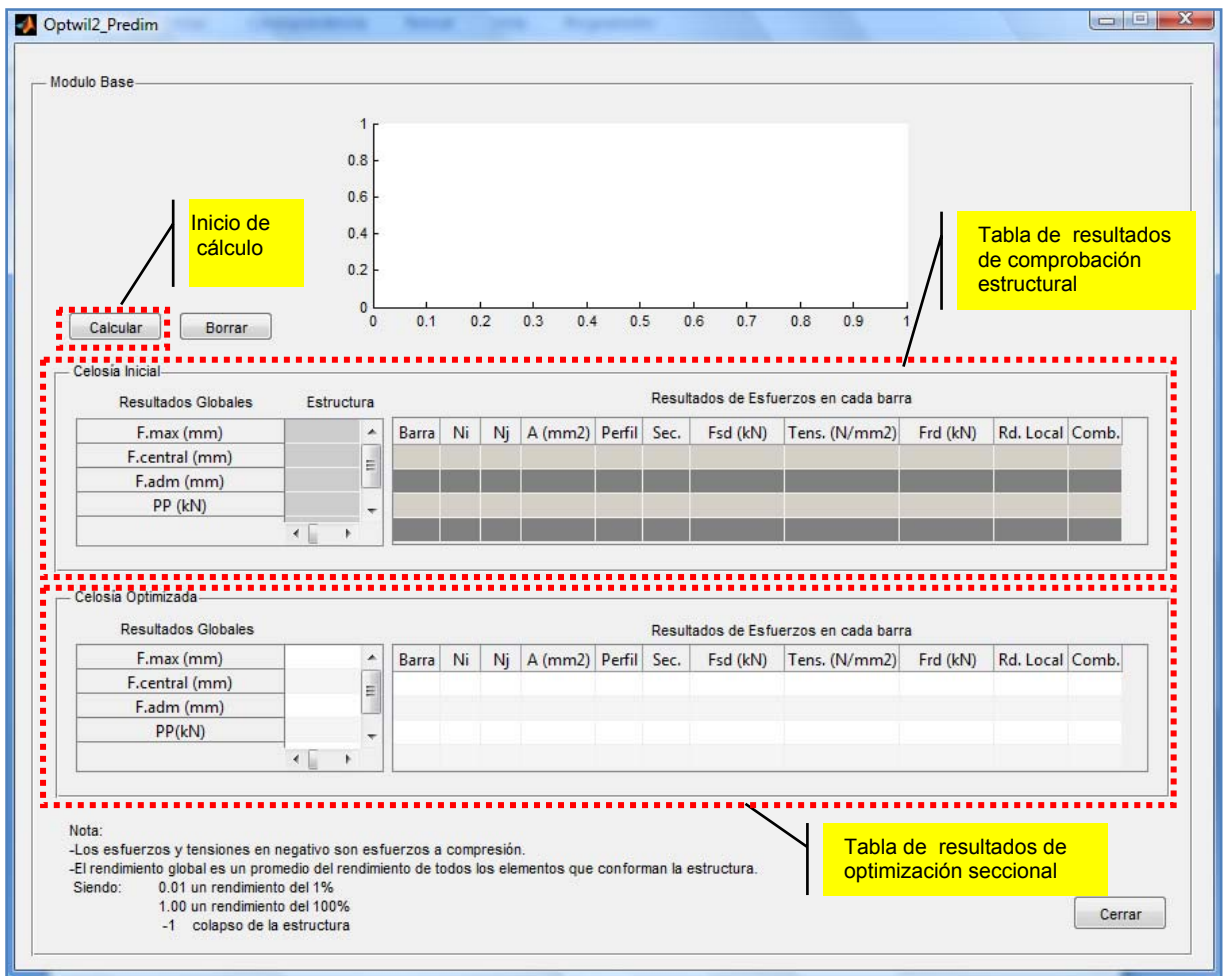


Fig. 118: Ventana de Pre-dimensionamiento. Vista inicial

En caso que la estructura colapse, debido a la superación del límite elástico en una o más barras, se observará un mensaje de “COLAPSO” en el cuadro de “**Resultados Globales**”. Los resultados de la flecha máxima y la flecha central, en este caso, serán 0, y en el cuadro de rendimiento global el resultado será -1 (ver fig.119).

Así mismo, en la tabla de “**Resultados de Esfuerzos en cada barra**” se podrá observar con mayor detalle que barra o barras tienen un esfuerzo axial superior a su resistencia.

En el segundo cálculo se realiza una optimización de sección. Esta optimización se realiza calculando la estructura del *Modelo 0* con la sección inicial. Luego con los esfuerzos obtenidos

en cada barra se crea una lista de perfiles que pueden soportar los esfuerzos de sollicitación. Cada barra tendrá una lista de perfiles y el perfil óptimo, en cada caso, será el perfil de menor área.

El resultado que se puede obtener con este proceso, es la elevación del rendimiento tensional en cada barra. En algunos casos el rendimiento tensional se encuentra cerca a 1 (fig.119.Dato A). Donde 0.01 es un rendimiento del 1% y donde 1 es un rendimiento del 100%.

Para el análisis de pandeo, en las barras comprimidas, se ha establecido que la celosía debe estar arriostrada lateralmente en cada nudo, por lo que el *beta de pandeo* será 1, tanto en "Y" como en "Z".

Luego de obtener una estructura reticular plana optimizada, se cierre la ventana y se procede a continuar con la opción de Datos A.G.

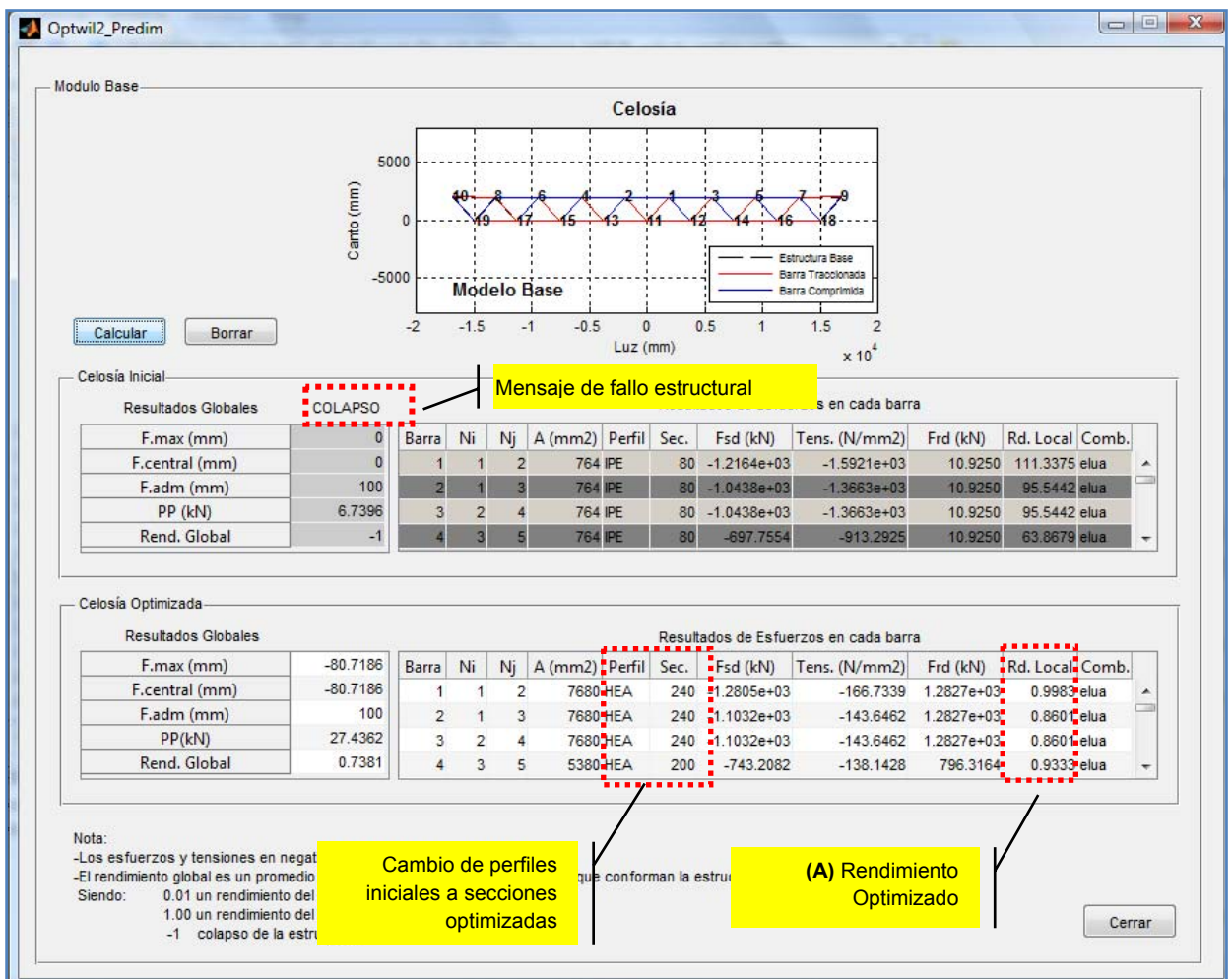


Fig. 119: Ventana de Pre-dimensionamiento. Ejemplo de una celosía con perfiles iniciales IPE-80

4.1.3. Datos A.G.

En esta parte del programa se establecen las reglas del algoritmo, que permiten crear la población inicial (P_0) a evaluar. Para que el algoritmo funcione adecuadamente, se necesita la siguiente información por parte del investigador:

Familia de estructura a desarrollar.

En este caso se tienen tres opciones: Familia Ascendente, Descendente o Ambas.

En el caso que la opción sea “**Ambas**”, el programa utiliza un **algoritmo de transición**, que permite pasar de un ciclo de transformación estructural ascendente a un ciclo de transformación estructural descendente.

El algoritmo de transición se basa en prolongar el descenso de la banda central de una estructura ascendente, hasta el nivel de los apoyos. El objetivo en este proceso es que el algoritmo de la familia descendente inicie su proceso como si estuviera transformando una celosía desde el inicio.

The screenshot shows the 'Optwil3_DatosAG' window with the following settings:

- Familia Estructural:** Fam. Estructural: Ascendente
- Modificación Geométrica:**
 - Canto inicial (ca): 2 m
 - Altura evolutiva parcial: 0.5 m
 - Altura máx sup. (sobre los apoyos): 4 m
 - Altura máx. inf. (bajo los apoyos): 0 m
 - Recomendación:
 - 1 m = (ca/3)
 - 4 m = (2*ca)
 - Debe ser 0
- Población:**
 - Pob. inicial: 150
 - Nº Generaciones: 3
 - Recomendación:
 - 96
 - 3
- Cruce y mutación:**
 - Cruce: Un punto de cruce
 - Mutación: Simétrica
- Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo:**
 - Deformación: 30 %
 - Rendimiento Tensional: 20 %
 - Minimización de Peso: 50 %

Buttons at the bottom: Ingreso de datos, Cálculo A.G., Cerrar

Fig. 120: Ventana de Datos A.G.

Altura evolutiva parcial

Es la distancia de desplazamiento que se aplica a cada nudo de la celosía, de manera paulatina, con el propósito de generar un nuevo modelo o individuo. Se recomienda que esta altura deba ser la tercera parte del canto inicial.

Altura máxima superior

Es la altura máxima que puede desarrollar la estructura. En nuestro trabajo se ha establecido que esta altura no debe superar dos veces el canto inicial.

Altura máxima inferior

Es la distancia máxima bajo los apoyos que puede descender la estructura. Esta altura tiene una distancia distinta de 0 cuando es una estructura descendente o una combinación de familias. En nuestro trabajo se ha establecido que esta distancia deba ser menor o igual a un canto de la estructura.

Población inicial

Es la población generada por el algoritmo de familias. Esta población mínima varía dependiendo de los nodos y tipo de familia que se calcule.

En nuestro trabajo se recomienda que la población inicial sea el número de individuos generados en dos ciclos completos de un algoritmo.

Un ciclo de un algoritmo está compuesto por cuatro pasos de movimientos nodales, explicados en el capítulo 3, Algoritmos de evolución.

Número de Generaciones

El número de generaciones son los ciclos de reproducción y evolución que se producen en una población, ya sea mediante cruces y mutaciones.

Cruce y mutación

Tanto el cruce como la mutación tienen dos opciones.

El cruce tiene la opción de “**Un punto de cruce**” que generan 4 descendientes cuando se tiene una estructura con apoyos laterales y generan 2 descendientes cuando se tiene un voladizo. En el caso de la opción de “**Dos puntos de cruce**” se generan 2 descendientes, tanto en estructuras con apoyos laterales como en voladizos.

Por otro lado, la mutación puede ser “**simétrica**” o “**asimétrica**”. En el caso del voladizo la mutación es sólo asimétrica.

Los detalles de cada opción se pueden observar en el capítulo 3, en el cruce y la mutación.

Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo

Esta opción se refiere al grado de participación que tiene cada función en el cálculo evolutivo. Es recomendable que la Minimización de peso sea la función con mayor porcentaje, debido a que una estructura óptima está ligada al peso mínimo que debe tener una estructura.

Todos los datos se deben almacenar con el botón de “**Ingresos de datos**” antes de realizar el “**Cálculo A.G.**”

4.1.4. Cálculo A.G.

Esta ventana esta formada por dos paneles de resultados. El primer panel, es un resumen del calculo evolutivo de la estructura, llamado “**Evaluación A.G.**”, donde se ha analizado la población total y se ha encontrado una solución optima dentro de una familia Élite.

El segundo panel de resultados es el perteneciente a un modelo específico, llamado “**Evaluación Individual**”, donde el investigador, conociendo el comportamiento de la familia Élite, podrá seleccionar un modelo para ser analizado.

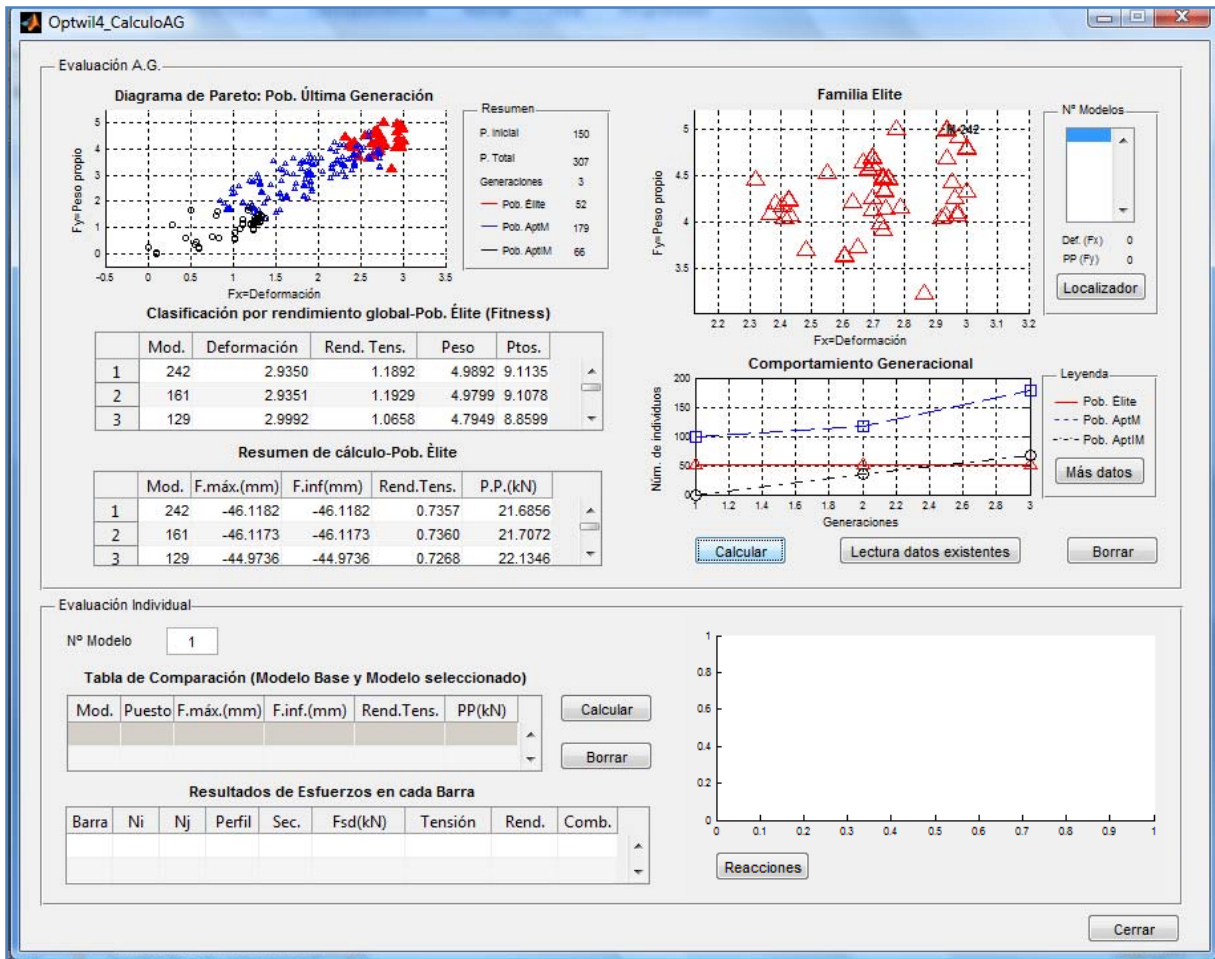


Fig. 121: Ventana de Calculo A.G.

En la “**Evaluación A.G.**” observamos dos diagramas poblacionales, que estan realizados en función a la Deformación, en el “eje x”, y en función al Peso, en el “eje y”.

El primer diagrama es de la Población de la Última Generación (fig.121), donde se muestra las tres distintas clases de familia que existe en nuestro analisis. La familia Élite es de color rojo, la familia de Aptitud Media es de color azul y la familia de Aptitud inferior a la Media es de color negro.

Teniendo en cuenta que nuestro objetivo es encontrar la estructura optima, la familia que nos interesa estudiar es la familia Élite. Esta familia es la que se encuentra en el segundo diagrama, donde se ha señalado el modelo que ocupa el primer puesto de esta familia, como un punto de referencia.

En la *figura 122 y 123* observamos que en el diagrama de pareto se forman diferentes frentes. La solución óptima debería ser la que se encuentre en el frente óptimo o primer frente. Sin embargo, esa decisión la tomará el investigador, debido a que él tendrá que decidir que función debe tener mas prioridad que otra. En este sentido, se ha habilitado una herramienta de localización de modelo (*fig.124*), que permite conocer el número de modelo que se encuentra en el diagrama.

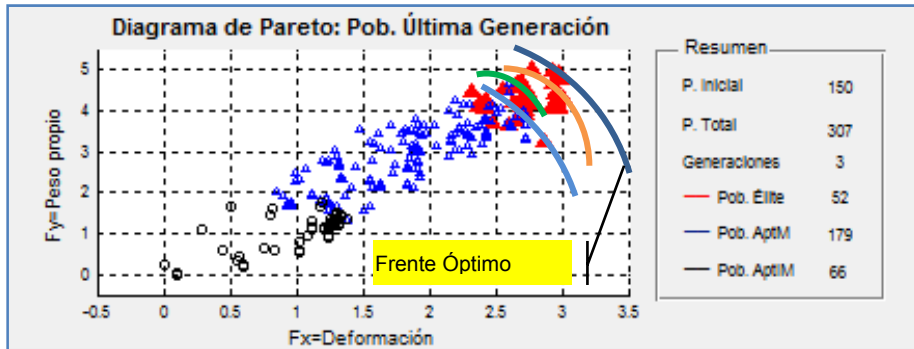


Fig. 122: Diagrama de Pareto de la última Generación

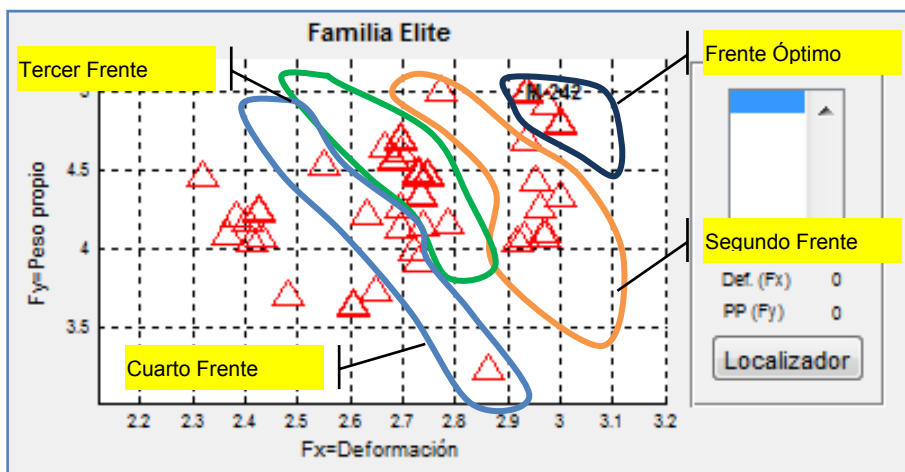


Fig. 123: Diagrama de Pareto. Familia Élite

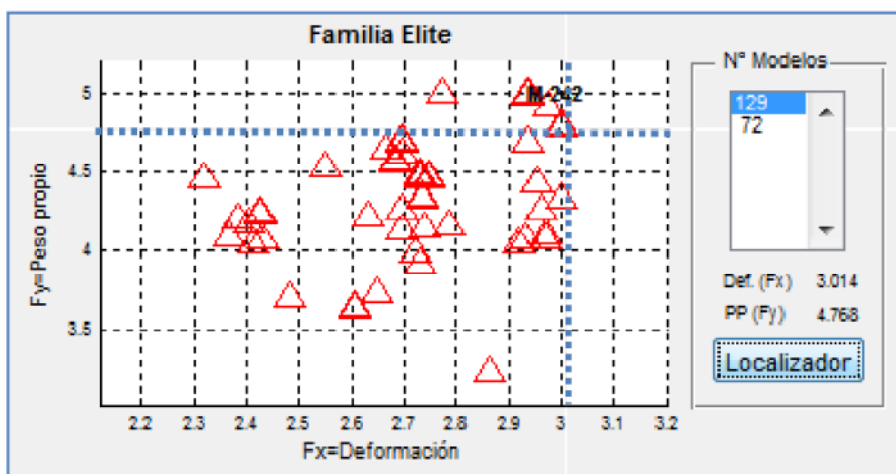


Fig. 124: Diagrama de Familia Élite. Localizador

En este apartado, también contamos con dos tablas de información de los modelos de la familia Élite. La tabla de clasificación por rendimiento global (*fig.125*), donde figura el puntaje que ha obtenido cada modelo de acuerdo a su función objetivo. Cada puntaje ya ha sido multiplicado por su porcentaje de participación o jerarquía. En este caso, de acuerdo a la lista fitness el mejor modelo es el 242, con un puntaje de 9.1135.

Por otro lado, tenemos una tabla de resumen de cálculo, que presenta las magnitudes del análisis de cada función objetivo. Nos muestra la información sobre la deformación máxima, la deformación en el centro de la luz (nudo inferior), el rendimiento tensional global de la estructura y el peso propio de la estructura. En este caso el modelo más óptimo pesa 21.685kN, que es menor al modelo base que pesa 27.43kN.

El cuadro esta restringido para mostrar sólo los primeros 100 individuos Élite.

Clasificación por rendimiento global-Pob. Élite (Fitness)					
	Mod.	Deformación	Rend. Tens.	Peso	Ptos.
1	242	2.9350	1.1892	4.9892	9.1135
2	161	2.9351	1.1929	4.9799	9.1078
3	129	2.9992	1.0658	4.7949	8.8599

Resumen de cálculo-Pob. Élite					
	Mod.	F.máx.(mm)	F.inf(mm)	Rend.Tens.	P.P.(kN)
1	242	-46.1182	-46.1182	0.7357	21.6856
2	161	-46.1173	-46.1173	0.7360	21.7072
3	129	-44.9736	-44.9736	0.7268	22.1346

Fig. 125: Tablas resumen de Resultados

Por último, dentro de este cuadro de “**Evaluación A.G.**” tenemos un diagrama de Comportamiento Generacional, que nos permite ver la evolución de la población en cada generación. Nos presenta el número de individuos que forma cada clase de familia, ya sea Elite, de Aptitud Media o Aptitud inferior a la Media (*fig.126*). En este diagrama encontramos una opción llamada “**Más datos**”, esta opción nos conecta con otra ventana, llamada “**Detalles Evolutivos**” donde se hace un seguimiento a los individuos que han sido procreados por cruce o mutación, en cada generación.

C.

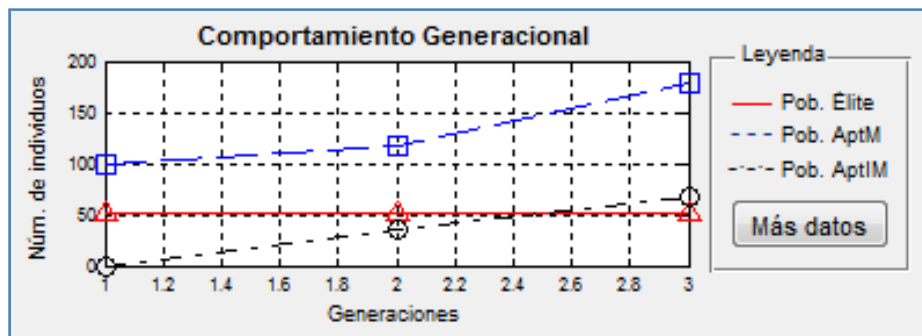


Fig. 126: Diagrama de Comportamiento Generacional

En el panel de “**Evaluación Individual**”, tenemos la opción de evaluar un modelo específico y compararlo con el modelo de la celosía base de sección optimizada.

Se presenta una tabla resumen donde se puede observar las deformaciones y pesos de cada modelo, como también su puesto en el último ranking evolutivo. En caso que el modelo base o “modelo 0” no se encuentre en la última generación, el puesto del modelo será 0, lo que indicaría que los nuevos individuos han superado en un gran margen a la celosía inicial.

También presentamos un esquema gráfico de cómo es la celosía seleccionada, indicando las barras que trabajan a compresión y tracción.

Luego encontramos una tabla de “**Resultados de los esfuerzos en cada barra**”, que permite observar el esfuerzo de sollicitación (F_{sd}), tensión y rendimiento de cada elemento. También se muestra una última columna de combinación, donde se indica que hipótesis es la más perjudicial en cada barra (fig. 127).

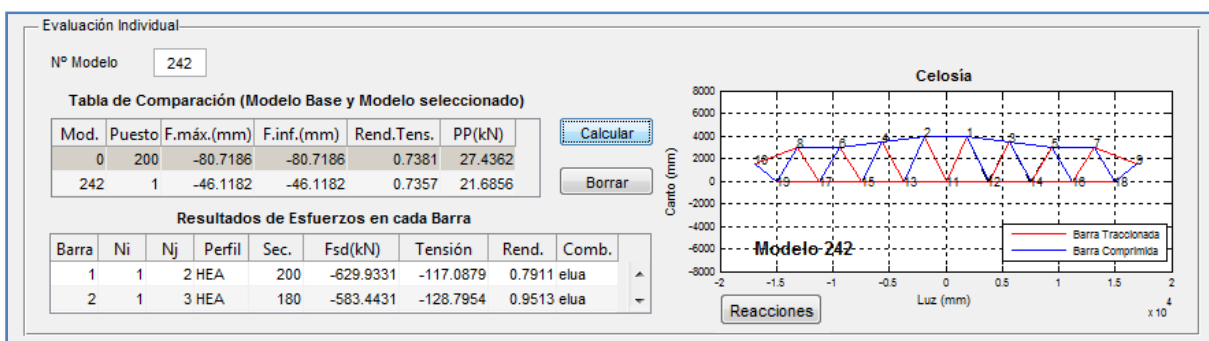


Fig. 127: Evaluación individual

Por último, con la opción de “Reacciones” podemos abrir una ventana donde encontraremos las reacciones de cada hipótesis.

4.1.5. Detalles Evolutivos

En esta ventana encontramos el panel de “**Datos A.G.**” que presenta un resumen de la influencia de los operadores de reproducción, tanto de cruce como de mutación. Tenemos un “**Diagrama Poblacional por Generaciones**” que nos muestra por cada generación si existen individuos generados por el cruce o mutación. Este diagrama de barras está acompañado de una tabla que nos indica, numéricamente, los individuos analizados en el diagrama anterior.

El segundo diagrama de barras, es una imagen en 3D que presenta el resultado de la última generación, donde incluimos la clasificación de individuos generados por el cruce y la mutación. Su magnitud de forma numérica se observa en el cuadro de “**Población Última Generación**”. En la fig. 128, se observa un ejemplo, donde existen 3 generaciones analizadas. En el cuadro de “Población última Generación”, se tiene una familia Élite formada por 25 individuos de la población inicial o generación anterior y 27 individuos generados por el operador de cruce. En este ejemplo no existe ningún individuo mutado que pertenezca a la familia Élite.

Por último, tenemos un cuadro importante, llamado “**Modelos de Última generación Élite**”. Este cuadro identifica los modelos por tipo de población, de tal manera que podemos conocer si el primer puesto de nuestro análisis evolutivo con algoritmos genéticos pertenece a una población inicial o generación anterior, población cruce o población mutada. En nuestro

ejemplo (fig.128), el modelo que ocupa el primer puesto es un individuo generado por el operador de cruce. Sin embargo, la influencia de la población inicial y de cruce es compartida, ya que los individuos que conforman la familia Élite son mitad inicial y de cruce.

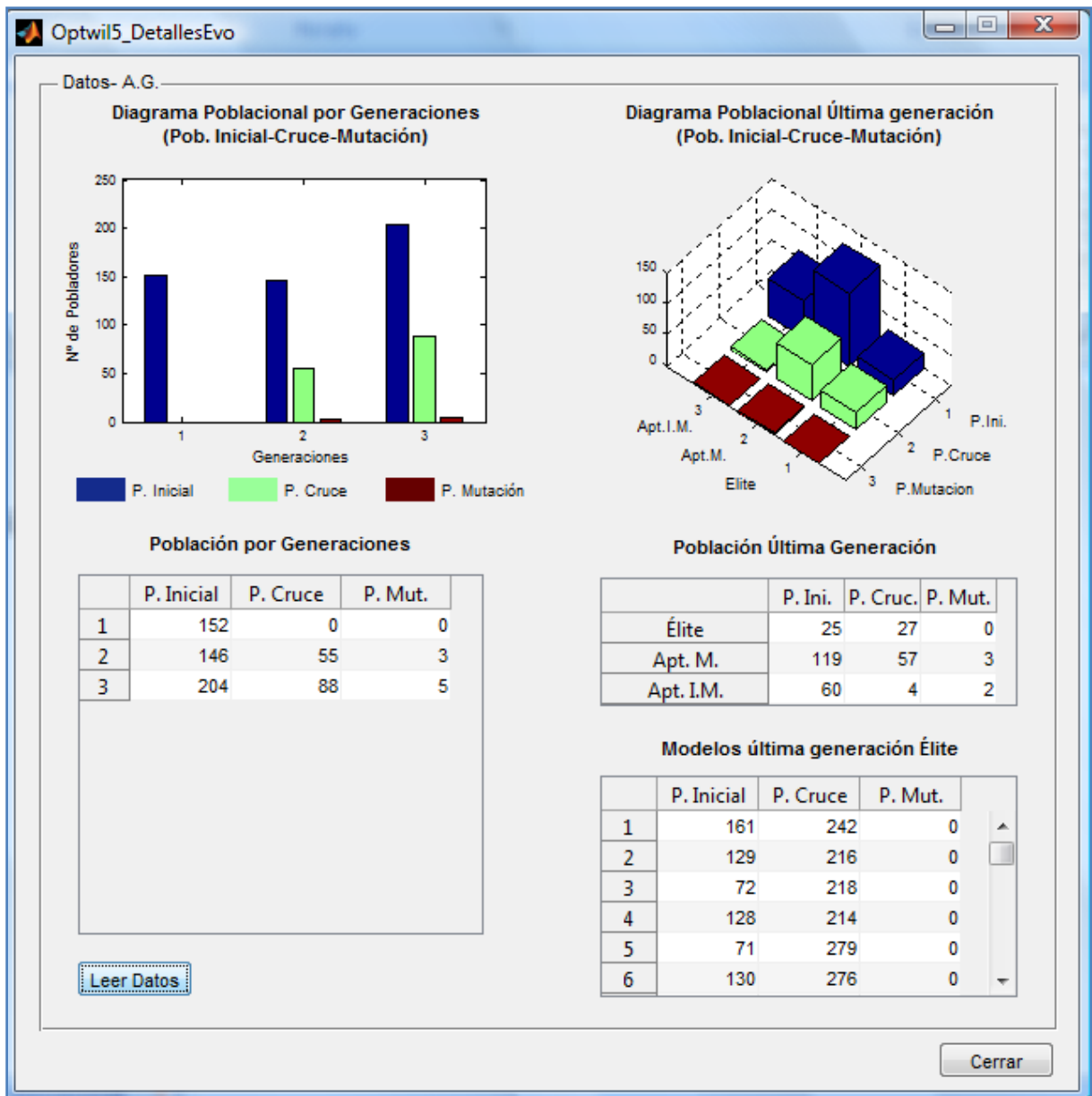


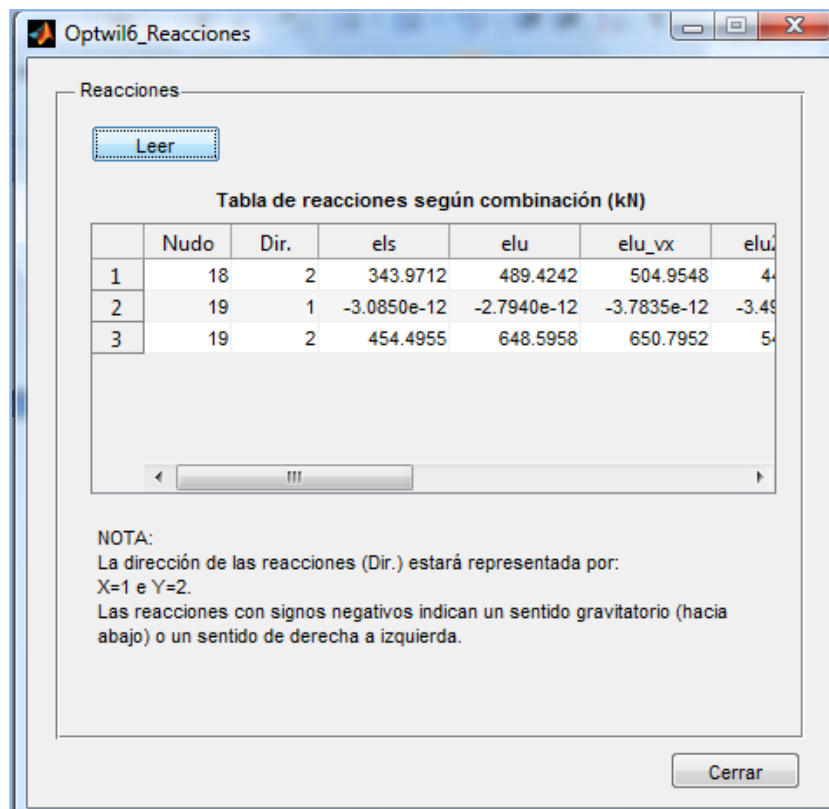
Fig. 128: Ventana de detalles Evolutivos

4.1.6. Reacciones

En esta ventana se presenta un cuadro de reacciones de carga de la estructura, donde se detalla las magnitudes de carga por cada hipótesis.

Estos datos, nos ayudaran al diseño de apoyos considerando la hipótesis más perjudicial.

Por último, la dirección y sentido de las reacciones siguen el mismo criterio de signos que la ventana de cargas. Por ejemplo, en el nudo 18 tenemos una reacción en dirección Y o vertical, con signo positivo, en todas sus combinaciones. El signo positivo indica que la reacción va “hacia arriba”, es una reacción de compresión de la estructura bi-apoyada.



Reacciones

Leer

Tabla de reacciones según combinación (kN)

	Nudo	Dir.	els	elu	elu_vx	elu
1	18	2	343.9712	489.4242	504.9548	4
2	19	1	-3.0850e-12	-2.7940e-12	-3.7835e-12	-3.4
3	19	2	454.4955	648.5958	650.7952	5

NOTA:
La dirección de las reacciones (Dir.) estará representada por:
X=1 e Y=2.
Las reacciones con signos negativos indican un sentido gravitatorio (hacia abajo) o un sentido de derecha a izquierda.

Cerrar

Fig. 129: Panel de Reacciones

Para concluir este capítulo, se puede decir que el programa busca poner en práctica los conceptos presentados en el capítulo 3. Se presenta al investigador herramientas básicas para un correcto análisis evolutivo de la estructura reticular plana, como también recomendaciones en el momento de introducir los datos para el análisis estructural. Además, durante el proceso de creación ha existido una retroalimentación entre el programa y el programador, en el sentido que conforme se ha ido diseñando el programa, se ha ido analizando que datos son los más importantes para mostrar al investigador, que proceso podría reducir el coste computacional de esta evaluación y de qué manera el investigador puede tener una plataforma “limpia y clara” para realizar este tipo de estudio evolutivo estructural.

5.

Evaluación de OPTWIL en una estructura existente

5.1. Evaluación

Se ha realizado la evaluación del programa OPTWIL con dos proyectos de cubiertas y cuatro ejemplos de celosías. A continuación se presenta los pasos realizados en cada panel para evaluar dos estructuras bi-articuladas, una en voladizo y otra apoyada-empotrada.

También, realizaremos un análisis de comparación entre dos estructuras bases calculadas con el programa OPTWIL y las mismas estructuras calculadas con un software profesional, llamado "Robot Structural Analysis". Estos estudios lo realizaremos en la celosía 1 y en la estructura en voladizo.

5.2. Estructura bi-apoyada

La estructura que se analizará es un estructura reticular plana, que forma parte de una estructura de cubierta de una nave industrial. El uso de la nave es de una fábrica automotriz. Esta nave tiene una geometría regular en planta, compuesta por dos rectángulos, como se observa en la *figura 129*.

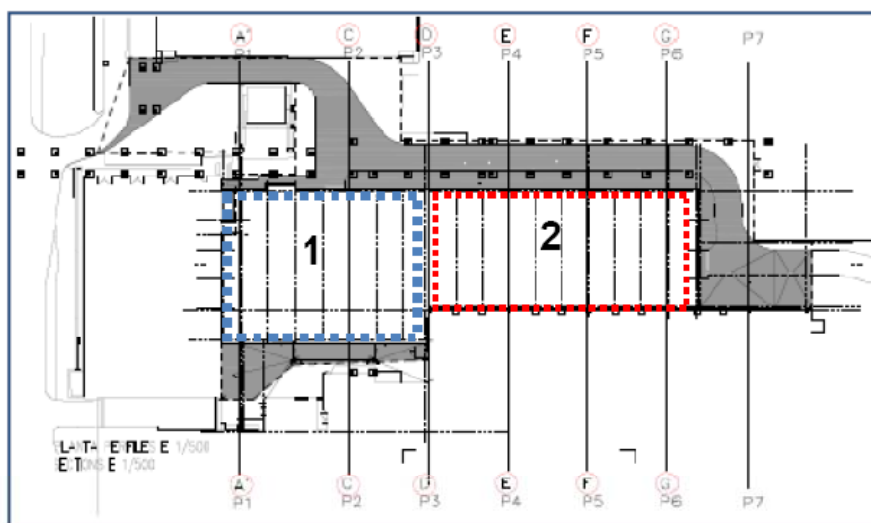


Fig. 130: Planta de nave industrial

El primer rectángulo, tiene una dimensión de 38 x 28 metros y el segundo, tiene una dimensión de 45 x 22,40 metros. Las celosías que optimizaremos con nuestro programa se encuentran en el segundo rectángulo, que es la Zona de ensamblaje.

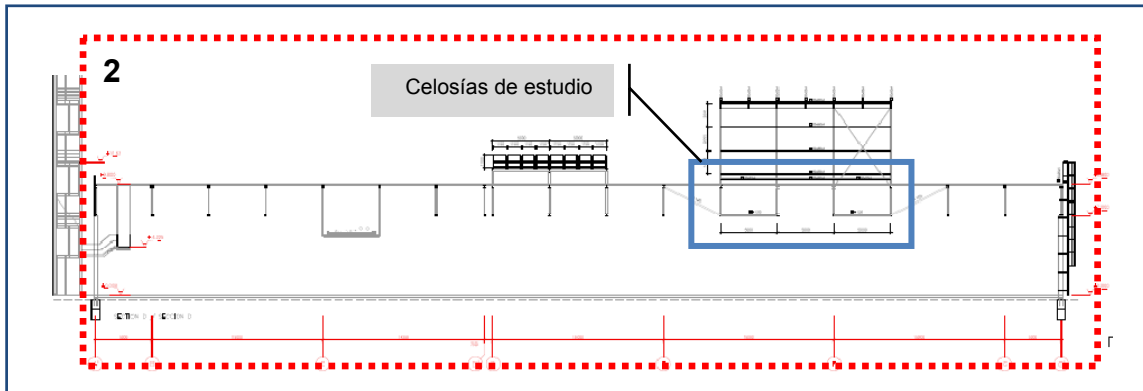


Fig. 131: Sección Longitudinal de Zona de ensamblaje

Esta zona de ensamblaje, se proyecta una cubierta ligera, que es soportada por celosías metálicas transversales, con un distanciamiento entre ejes de 5,00 metros. Estas celosías cubren una luz de 22,40 metros y tienen un canto máximo de 2,80 metros, es decir una proporción de luz y canto de L/8. De las 18 celosías que tenemos en esta estructura, cuatro de ellas soportan una magnitud de carga superior a las demás. Estas celosías son las que estudiaremos.

La zona de estudio tiene una planta y una alzado simétrico, por lo que el análisis se realizará a dos celosías representativas. A ellas las llamaremos celosía 1 o interior y celosía 2 o exterior.

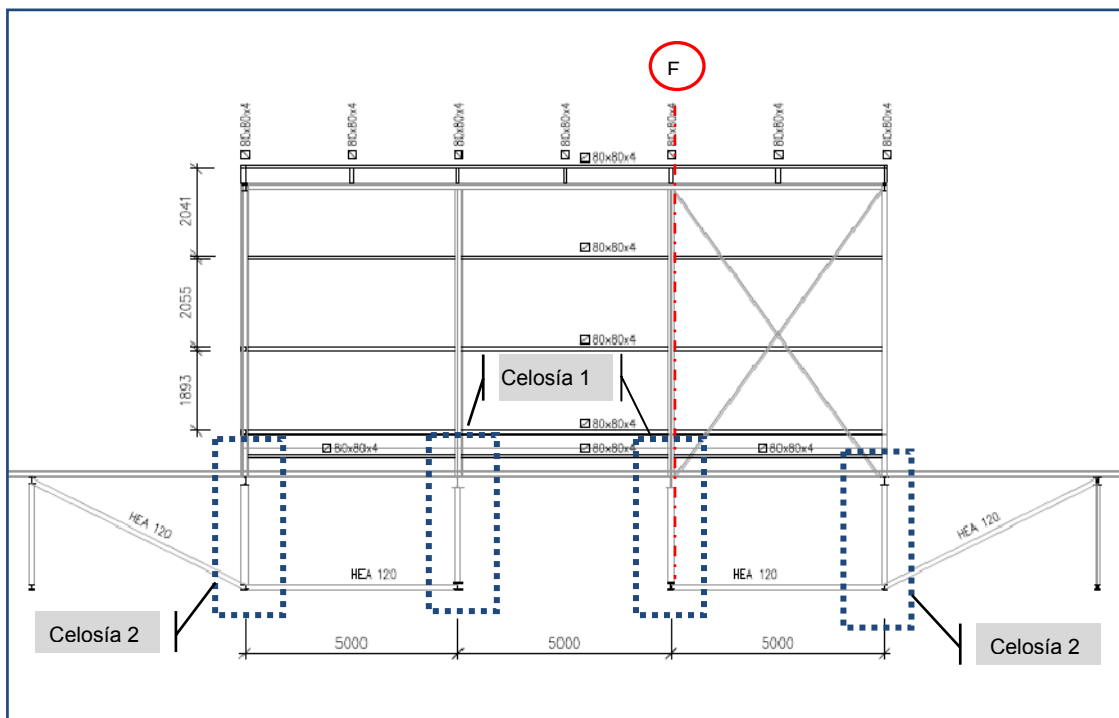


Fig. 132: Sección Transversal de celosías 1 y 2

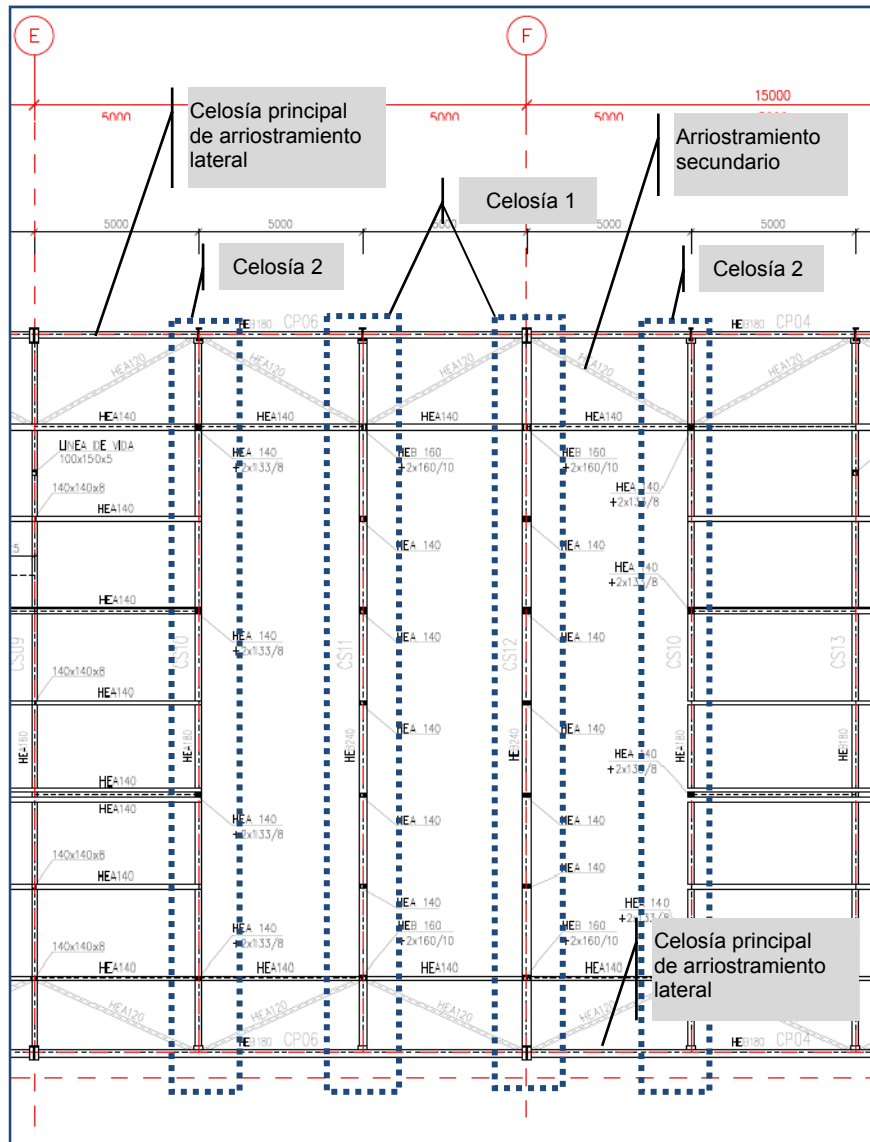


Fig. 133: Planta Superior de Cubierta. Celosía 1 y 2

5.2.1. Celosía 1 o Interior

Esta celosía es la que soporta mayor carga en toda la cubierta. Las cargas más importantes que debe resistir esta estructura es la generada por el uso de la sub-estructura superior y por una sub-estación elevada.

La sub-estructura superior tiene un área de 240 m² y está diseñada para el uso de una oficina. Su estructura está compuesta por pórticos metálicos, una cubierta ligera, igual que la cubierta principal, y una losa de hormigón colaborante. Este forjado descansa en una estructura secundaria que distribuye las cargas a los nudos de las celosías.

La sub-estación elevada se encuentra en el nivel del cordón inferior de la cercha, tiene una plataforma metálica y su peso es de 54kN. Esta sub-estación es soportada por dos celosías (ver fig.134).

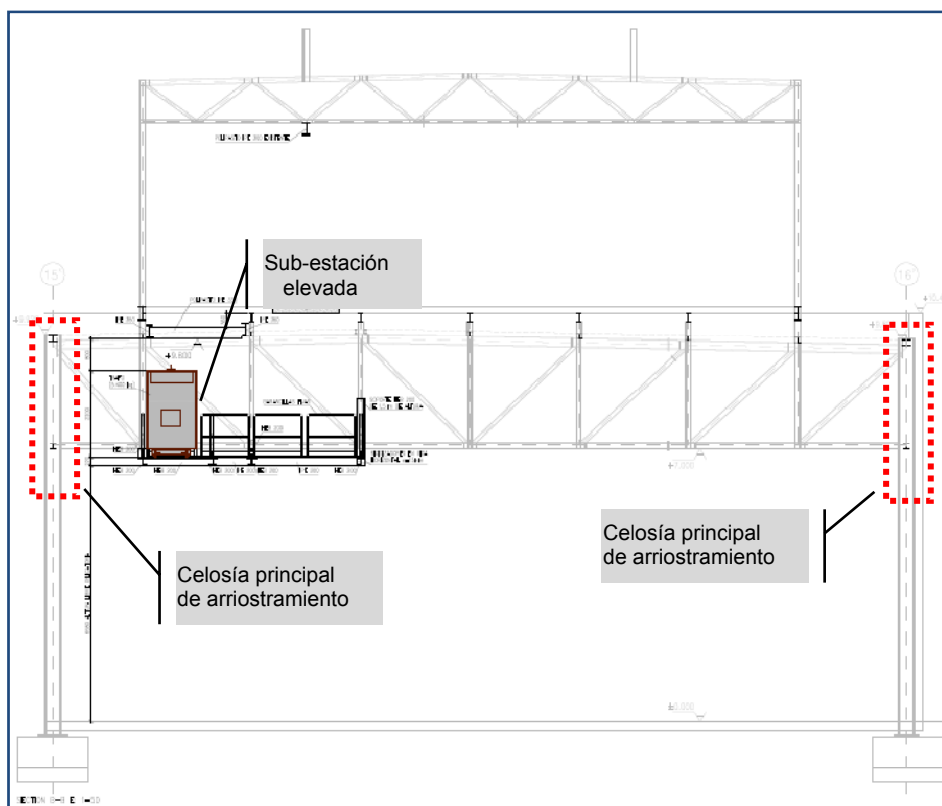


Fig. 134: Alzado de celosía 1 con pilares de soporte

En nuestro análisis, además de considerar las cargas gravitatorias, por efecto de la cubierta principal y de la sub-estructura, consideraremos las reacciones que se producen en cada nudo de la celosía por efecto del viento, cuando dichas fuerzas son aplicadas a la sub-estructura superior. En este caso llegamos a descargar zonas puntuales pero también aumentamos cargas en otros puntos. Hemos considerado esta redistribución de cargas en ambos sentidos.

Para finalizar esta breve descripción de las cargas, es importante mencionar que en los nudos inferiores de todas las celosías, se ha considerado una carga puntual de 14kN, debido a las instalaciones que existen en este tipo de espacios.

Las cargas que se han considerado en el estudio y que son las mismas cargas consideradas en el proyecto original, estas son las siguientes:

Cuadro de Cargas

Cubierta Principal		
PP Cub.	0,20 kN/m ²	Paneles Rockwool Hardrock E-91
CP	0,25 N/m ²	
SU 1	0,40 kN/m ²	Cubierta no transitable
SU 2	54kN	Peso de sub-estación
SU 3	14kN	Cargas puntuales en todos los nudos inferiores
Viento	0,67kN/m ² 0,27kN/m ²	Presión, sentido X e Y Succión, sentido X e Y
Sub-estructura-Oficina		
PP Cub.	0,20 kN/m ²	Paneles Rockwool Hardrock E-91
CP Cub.	0,25 KN/m ²	
SU Cub.	0,40 kN/m ²	Cubierta no transitable
PP Losa	2,91kN	Losa colaborante (e=16 cm)
SU Losa	2,00kN	Oficina
Viento	0,67kN/m ² 0,27kN/m ²	Presión, sentido X e Y Succión, sentido X e Y

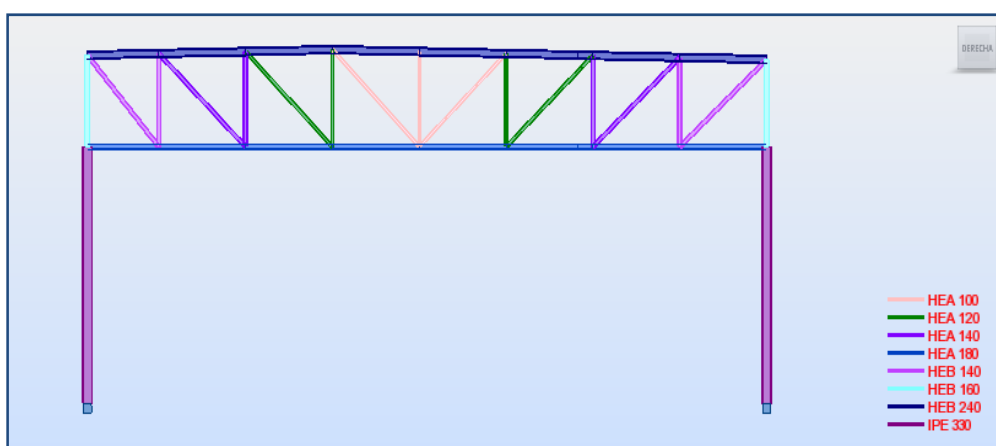


Fig. 135: Alzado de celosía 1 o Interior (Modelo estructural del proyecto)

La celosía del proyecto se encuentra soportada por pilares IPE-330. Las uniones cerchapi-lar son empotradas. Los pilares están arriostrados lateralmente por una celosía principal de 2,80 metros de canto. Además, la estructura cuenta con tirantes de arriostramiento alrededor de la cubierta y de la fachada (fig.134).

La celosía esta compuesta por un cordón superior de HEB-240 , un cordón inferior de HEA-180 y los montantes y las diagonales estan compuestas por una HEA-100, 120 y 140.

Esta estructura tiene una flecha de 1,90cm, considerando la deformacion de los pilares. Esta deformación es muy inferior a la admisible de 7,46cm (L/300). El peso propio de la cercha, excluyendo los pilares IPE-330, es de 40kN.

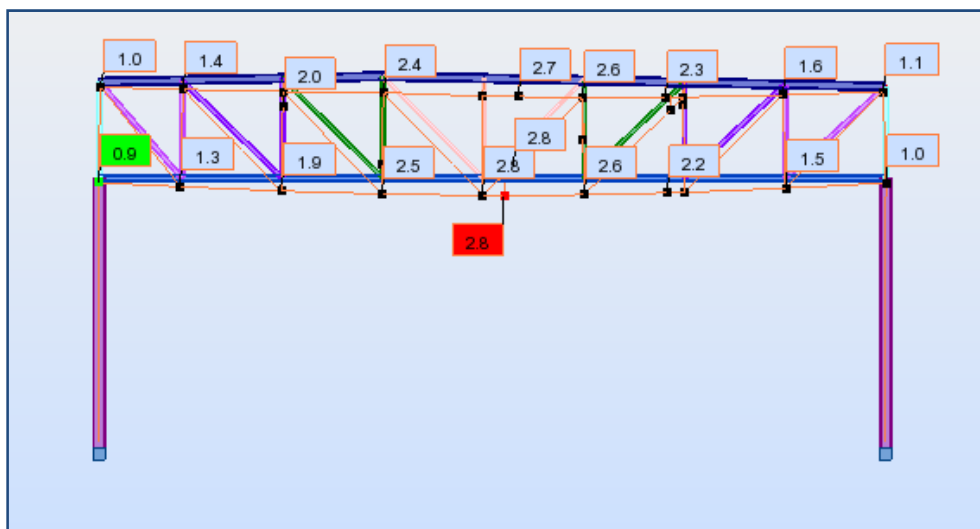


Fig. 136: Deformación de celosía 1 o Interior (Modelo estructural del proyecto)

5.2.1.1. Optimización de Celosía 1

El estudio que se presenta a continuación, se ha realizado teniendo en cuenta que la propuesta de optimización de forma no puede afectar las cotas reales del proyecto, la modulación de la cercha, por temas geométricos y el tipo de material del acero.

El canto inicial de la celosía será de L/10 y no de L/8, como en el proyecto original. Esta diferencia de cantos nos permite tener un pequeño margen de elevación de nudos, al desarrollar nuestro algoritmo para estructuras ascendentes.

Por otro lado, permitiremos que la celosía óptima pueda descender un metro bajo el nivel de los apoyos. Esta variación geométrica cambiaría la altura libre interior de 7 metros a 6 metros. Pensamos que es una opción válida para este tipo de estructuras.

Otro dato importante es el cambio de tipología estructural de cercha, debido a que la celosía original es tipo Pratt y la nueva celosía es tipo Warren. Esta modificación no afectaría en gran magnitud a la estructura superior para oficinas, dado que la modulación de 2,80 metros se mantiene.

Por último, en nuestra propuesta consideraremos que la estructura es una celosía es bi-articulada y no empotrada, como la solución actual. El empotramiento no lo planteamos porque nos obligaría a modificar la solución de los pilares. Sin embargo, pensamos que el empotramiento, en el proyecto original, se ha planteado para controlar la flecha que se presenta en esta zona.

Así mismo, es importante conocer que existe una celosía principal que rodea todo el perímetro de la nave y arriostra lateralmente a los pilares.

A. Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 1)

Se realiza la introducción de todos los datos geométricos, ya comentados.

En el caso de la sección inicial, se selecciona el perfil HEA-240. Sabemos que este perfil es más pequeño que la sección real, un HEB-280. No obstante, queremos observar si en la nueva configuración de la celosía este perfil puede funcionar.

El beta de pandeo será 1, considerando que el cordón comprimido se encuentra arriostrado lateralmente por la estructura que soporta la losa colaborante de la estructura superior.

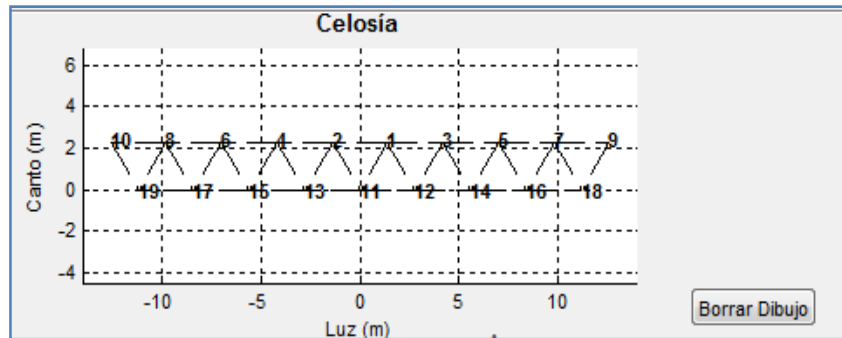


Fig. 137: Esquema estructural de Celosía

Los casos de cargas y combinaciones que tenemos en la nueva estructura, son las siguientes:

Casos de cargas

		NUDOS SUPERIORES									
		10	8	6	4	2	1	3	5	7	9
	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)									
Efecto de la Estructura Superior	pp		-26.28	-3.55	-4.14	-3.42	-1.58	-1.63	-25.33		
	cp		-36.90	-44.76	-41.66	-43.36	-45.28	-45.52	-33.06		
	su		-60.97	-35.30	-40.05	-82.43	-15.62	-15.70	-35.72		
	vx		-1.11	0.24	2.28	0.07	2.88	0.30	-24.36		
	vy		-1.31						2.42		
	-vx		-24.36	0.30	2.88	0.07	2.28	0.24	-1.11		
	-vy			2.42					-1.31		
Carga en cubierta	pp	-1.40	-1.40						-1.40	-2.80	-1.40
	cp	-1.75	-1.75						-1.75	-3.50	-1.75
	su	-2.80	-2.80						-2.80	-5.60	-2.80
	Casos	CARGAS HORIZONTALES EN LOS NUDOS (kN)									
Efec. Estruct. Sup.	vy		8.62						3.96		
	-vy		-3.96						-8.62		
		NUDOS INFERIORES									
		19	17	15	13	11	12	14	16	18	
	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)									
Uso interior	su	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	

Combinaciones de cargas

Nº	Comb	pp y ppb	cp	su	vx	vy	n_vx	n_vy	Comb
1	els	1	1	1					els
2	elu	1.35	1.35	1.5					elu
3	elu_vx	1.35	1.35	1.5	0.9				elu_vx
4	elu2_vx	1.35	1.35	1.05	1.5				elu2_vx
5	elu3_nvz	1.35	1.35	1.5			0.9		elu3_nvz
6	elu4_nvz	1.35	1.35	1.05			1.5		elu4_nvz
7	elu_vy	1.35	1.35	1.5		0.9			elu_vy
8	elu2_vy	1.35	1.35	1.05		1.5			elu2_vy
9	elu3_nvz	1.35	1.35	1.5				0.9	elu3_nvz
10	elu4_nvz	1.35	1.35	1.05				1.5	elu4_nvz

En los apoyos consideramos que el nudo del lado izquierdo, el 19, será un apoyo móvil y el apoyo derecho, el 18, será fijo.

Geometría Base

Estructura: Apoyos laterales
Luz: 22.4 m
Prop. canto (Pc): 10 (Recomend. 10 a 20)
Prop. base (Pb): 8 (4 a 6, 30° a 45°)
Donde: Pb = Número par
Pb >= 4 (Apoy.Lat.)
Pb >= 2 (Voladizos)

Material

E: 210000 N/mm2
fy: 275 N/mm2 Fmat: 1.05

Sección de barra

Perfil: HEA 280
Área: 9730 mm2
Iy: 1.367e+08 mm4
Iz: 4.763e+07 mm4
Coef. de imperfección "alfa"
alfa_y: 0.34 alfa_z: 0.49

Normativa

Pandeo: Beta_y: 1 Beta_z: 1

Cargas

Nº Casos de carga: 7

Tabla de Cargas

Nudo	Dir. (x=1/y=2)	Fuerza (kN)
10	2	-1.4
8	2	-27.7
6	2	-3.6
4	2	-4.1
2	2	-3.4
1	2	-1.6

Historial de cargas

Caso	Nº Carga	Nudo	Dir. (x=1/y=2)	Fuerza(kN)	
3	1	3	6	2	-3.6000
4	1	4	4	2	-4.1000
5	1	5	2	2	-3.4000
6	1	6	1	2	-1.6000

Tabla de Hipótesis o Combinaciones de Cargas

Hipótesis	pp	ppb	cp	su
els	1	1	1	1
elu	1.35	1.35	1.35	1.5
elu_vx	1.35	1.35	1.35	1.5
elu2_vx	1.35	1.35	1.35	1.05
elu3_nvz	1.35	1.35	1.35	1.5

Apoyos

Nº de restr. en apoyos: 3
Guardar (Doble clic)

Nodo	Dir. (x=1/y=2)
19	1
19	2
18	2

Nota:
- Las cargas F(kN) que vayan en sentido gravitatorio u horizontales, que tengan un sentido de derecha a izquierda, se introducirán con el signo negativo.
- En los casos de carga no se deberá incluir el peso propio. Este caso está considerado por defecto en el programa.

Evaluación

Predim. Datos A.G.

Fig. 138: Introducción de datos en la ventana de inicio

B. Comprobación de Cálculo (Celosía 1)

Luego de conocer los estados de cargas del proyecto, realizamos una comprobación de cálculo.

Esta comprobación se realiza calculando nuestra celosía base en un programa comercial llamado "Robot Structural Analysis". Los resultados de este último modelo se compararán con los resultados de nuestro panel de pre-dimensionado. Tanto el nombre de las barras como el de los nudos son iguales en los dos modelos.

La evaluación se realizará considerando las combinaciones 1 y 2, es decir, las del estado límite de servicio (ELS) y las del estado de servicio último (ELU). Se puede ver con más detalle en el cuadro de combinaciones de cargas.

Resultados del Programa OPTIWIL

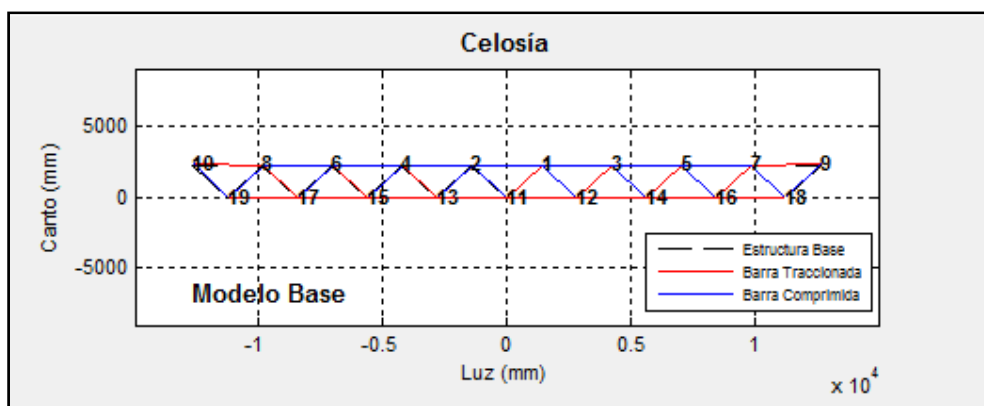


Fig. 139: Esquema de distribución de esfuerzos

Celosía Optimizada	
Resultados Globales	
F.max (mm)	-53.4896
F.cent./vol.	-53.4896
F.adm (mm)	74.6667
PP(kN)	24.3850
Rend. Global	0.8196

Fig. 140: Resumen de resultados Globales

Resultados de Esfuerzos en cada barra										
Barra	Ni	Nj	A (mm ²)	Perfil	Sec.	Fsd (kN)	Tens. (N/mm ²)	Frd (kN)	Rd. Local	Comb.
1	1	2	7680	HEA	240	-1.4793e+03	-192.6162	1.6534e+03	0.8947	elu
2	1	3	6430	HEA	220	-1.3326e+03	-207.2428	1.3376e+03	0.9962	elu
3	2	4	7680	HEA	240	-1.4230e+03	-185.2807	1.6534e+03	0.8606	elu
4	3	5	5380	HEA	200	-1.0453e+03	-194.3014	1.0667e+03	0.9800	elu

Fig. 141: Resultados de los esfuerzos en cada barra, considerando la combinación ELU

Resultados del Programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

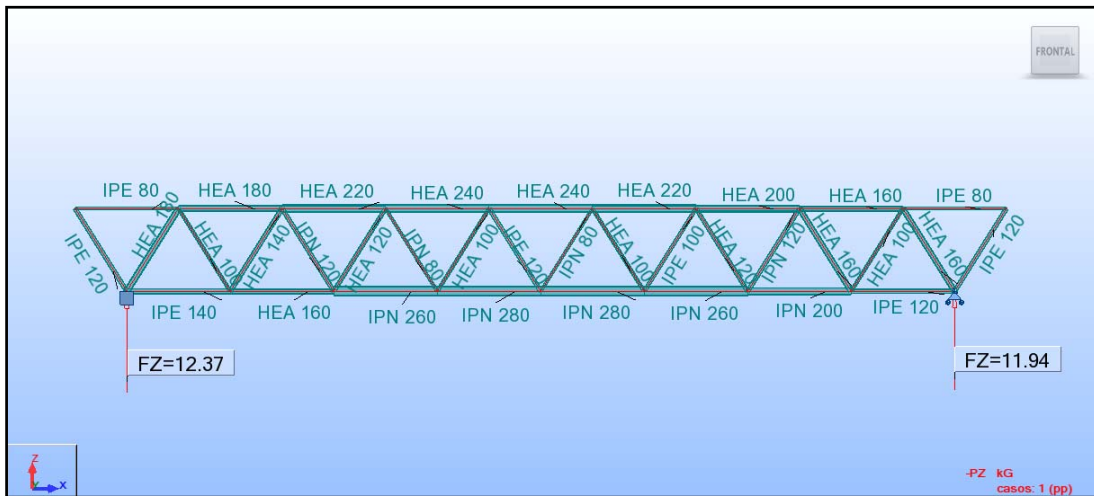


Fig. 142: Modelo de celosía. Reacciones debido al Peso Propio (PP).
(PP = 24,31kN)

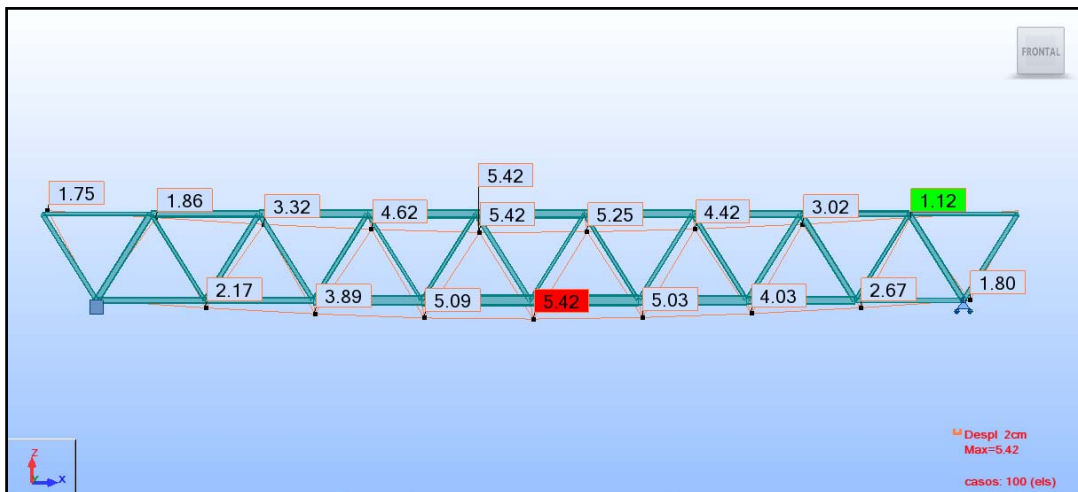


Fig. 143: Deformación (ELS). La flecha es de 5.42cm

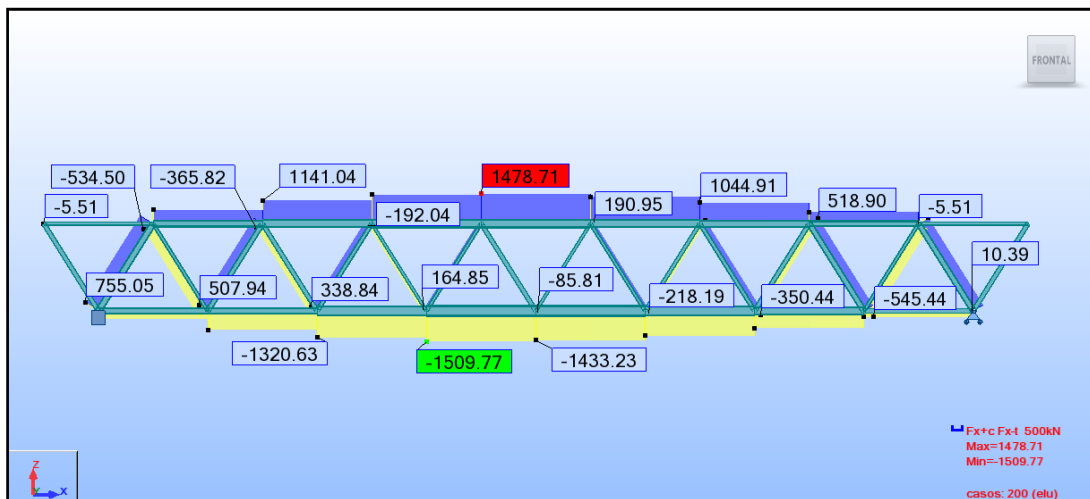


Fig. 144: Diagrama de axiles de celosía

Tabla de comparación de Esfuerzos

	Barra	Ni	Nj	Perfil	Sec.	OPTWIL			ROBOT		Comb
						Esfuerzo (kN)	Resistencia	Rend.	Esfuerzo (kN)	Rend.	
BARRA SUP.	1	1	2	HEA	240	-1,479.20	1,653.40	0.895	-1478.71	0.85	elu
	2	1	3	HEA	220	-1,332.50	1,337.60	0.996	-1332.03	0.95	elu
	3	2	4	HEA	240	-1,422.90	1,653.40	0.861	-1422.41	0.82	elu
	4	3	5	HEA	200	-1,045.30	1,066.70	0.980	-1044.91	0.93	elu
	5	4	6	HEA	220	-1,141.40	1,337.60	0.853	-1141.04	0.81	elu
	6	5	7	HEA	160	-584.37	666.68	0.877	-584.16	0.83	elu
	7	6	8	HEA	180	-678.18	849.56	0.798	-677.95	0.76	elu
	8	7	9	IPE	80	5.51	200.10	0.028	5.51	0.03	elu
	9	8	10	IPE	80	5.51	200.10	0.028	5.51	0.03	elu
BARRA INF.	10	11	12	IPN	280	1,433.80	1,597.60	0.897	1433.23	0.85	elu
	11	11	13	IPN	280	1,510.30	1,597.60	0.945	1509.77	0.9	elu
	12	12	14	IPN	260	1,216.80	1,396.00	0.872	1216.39	0.83	elu
	13	13	15	IPN	260	1,321.10	1,396.00	0.946	1320.63	0.9	elu
	14	14	16	IPN	200	859.48	874.76	0.983	859.17	0.93	elu
	15	15	17	HEA	160	947.48	1,016.20	0.932	947.16	0.89	elu
	16	16	18	IPE	120	295.19	345.71	0.854	295.08	0.81	elu
	17	17	19	IPE	140	394.78	429.52	0.919	394.67	0.87	elu
DIAG.	18	1	11	IPN	80	85.83	198.52	0.432	85.81	0.41	elu
	19	2	11	IPE	120	-58.60	66.27	0.884	-58.61	0.84	elu
	20	1	12	HEA	100	-191.01	237.91	0.803	-190.95	0.76	elu
	21	2	13	HEA	100	-164.90	237.91	0.693	-164.85	0.66	elu
	22	3	12	IPE	100	218.28	269.76	0.809	218.19	0.77	elu
	23	4	13	IPN	80	192.12	198.52	0.968	192.04	0.92	elu
	24	3	14	HEA	120	-323.67	355.02	0.912	-323.55	0.87	elu
	25	4	15	HEA	120	-338.96	355.02	0.955	-338.84	0.91	elu
	26	5	14	IPN	120	350.59	371.90	0.943	350.44	0.9	elu
	27	6	15	IPN	120	365.97	371.90	0.984	365.82	0.94	elu
	28	5	16	HEA	160	-519.07	695.92	0.746	-518.9	0.71	elu
	29	6	17	HEA	140	-508.11	511.53	0.993	-507.94	0.95	elu
	30	7	16	HEA	100	545.63	555.24	0.983	545.44	0.93	elu
	31	8	17	HEA	100	534.70	555.24	0.963	534.5	0.92	elu
	32	7	18	HEA	160	-567.36	695.92	0.815	-567.14	0.78	elu
	33	8	19	HEA	180	-755.27	879.18	0.859	-755.05	0.82	elu
	34	9	18	IPE	120	-10.40	66.27	0.157	-10.39	0.15	elu
	35	10	19	IPE	120	-10.40	66.27	0.157	-10.39	0.15	elu

Los resultados que se han obtenido en la evaluación, nos confirma que el programa OPTWIL, desarrollado para esta investigación, funciona adecuadamente.

Los resultados de los esfuerzos en los dos programas son similares. La deformación de 54,2mm, que se observa en el programa Robot, es muy parecida a la deformación a la flecha central de 53,49mm (fig.140).

En el caso del peso propio, la diferencia es mínima. En el programa Robot tenemos un peso propio de 24,31kN y en el programa OPTWIL tenemos 24,385kN (fig.140).

Podemos concluir, que el proceso optimización puede continuar ejecutándose, ya que no observamos problemas en el funcionamiento del programa OPTWIL.

C. Pre-dimensionamiento (Celosía 1)

En la *fig.145* se observa dos cuadros resumen del análisis que se realiza en esta etapa de pre-dimensionamiento. Se aprecia que en la celosía inicial, con una sección HEA-240 en toda la estructura, los resultados son muy favorables. La flecha instantánea es menos de la mitad de la admisible. Sin embargo, el peso propio de esta cercha (PP = 56,99kN) es superior al peso de la estructura original de 40kN. Esta solución, en términos de la función del peso no es la adecuada.

El segundo cuadro, sin embargo, nos muestra un mejor resultado. El peso de la celosía se reduce más de la mitad que la estructura inicial y a su vez, está por debajo del peso de la estructura original. Esta mejora se ha realizado ajustando las secciones en cada barra, sin llegar a superar su límite elástico. La flecha en esta solución sigue estando por el lado de la seguridad.

Celosía Inicial		Celosía Optimizada	
Resultados Globales		Resultados Globales	
F.max (mm)	-34.9164	F.max (mm)	-52.4805
F.cent./vol.	-34.9164	F.cent./vol.	-52.4805
F.adm (mm)	74.6667	F.adm (mm)	74.6667
PP (kN)	56.9970	PP(kN)	25.1305
Rend. Global	0.3520	Rend. Global	0.7976

Fig. 145: Cuadro Resumen de la Celosía Inicial y Celosía Optimizada

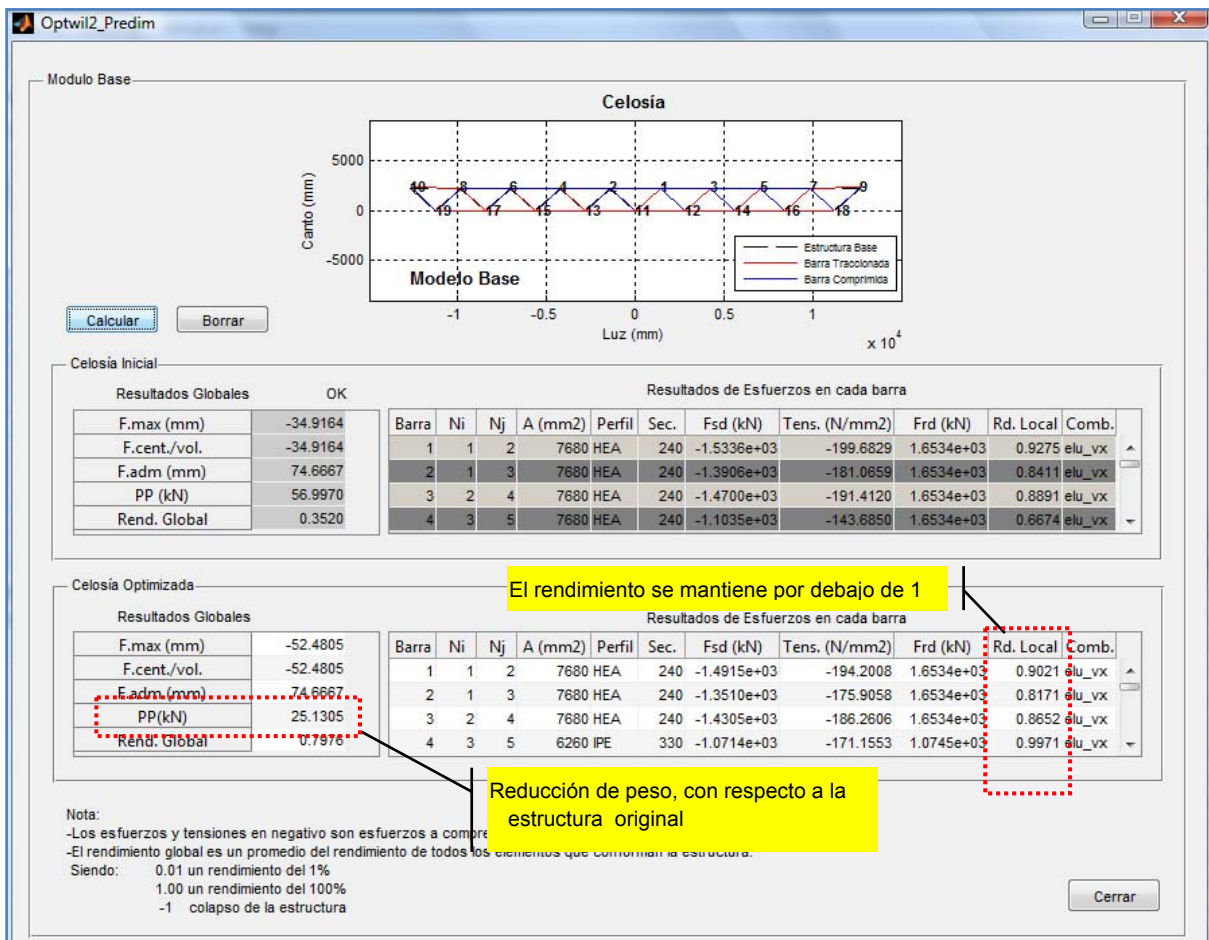


Fig. 146: Resultados del pre-dimensionamiento

D. Datos A.G. (Celosía 1)

En la *fig.147* se presentan los datos que se han considerado en este proyecto. Se ha establecido que la estructura que evolucione será una combinación de la familia de estructuras Ascendentes y Descendentes. Obviamente, en el caso de la primera familia, el movimiento vertical de los nudos es mínimo. Esta restricción, cómo ya se ha comentado anteriormente, se debe al objetivo de mantener las cotas de la propuesta original.

Los porcentajes de Participación o Grado de Jerarquía de las funciones objetivo varían entre ellas, teniendo en cuenta, que nos interesa reducir el peso de la estructura más que mejorar el rendimiento tensional de la misma. Por esta razón, damos mayor importancia al puntaje de la “Minimización de peso”.

The screenshot shows the 'Optwil3_DatosAG' window with the following settings:

- Familia Estructural:** Fam. Estructural: Ambas
- Modificación Geométrica:**
 - Canto inicial (ca): 2.24 m
 - Altura evolutiva parcial: 0.50 m
 - Altura máx sup. (sobre los apoyos): 3.50 m
 - Altura máx. inf. (bajo los apoyos): 1.0 m
 - Recomendación:**
 - 0.7 m = (ca/3)
 - 4.5 m = (2*ca)
 - 2.24 m = (ca)
- Población:**
 - Pob. inicial: 300
 - Nº Generaciones: 5
 - Recomendación:**
 - 224
 - 3
- Cruce y mutación:**
 - Cruce: Dos puntos de cruce
 - Mutación: Simétrica
- Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo:**
 - Deformación: 10 %
 - Rendimiento Tensional: 30 %
 - Minimización de Peso: 60 %

Buttons at the bottom: Ingreso de datos, Cálculo A.G., Cerrar

Fig. 147: Datos A.G

E. Cálculo A.G. (Celosía 1)

Los resultados obtenidos nos muestran que se han evaluado 1687 modelos o individuos. De esta población hemos obtenido una población Elite, en la quinta generación, de 231 individuos.

La estructura que ha sobre salido en la familia Élite ha sido el Modelo 721.

El Modelo 721, es una estructura de forma de “lenteja” (*fig. 148*), tiene su cordón comprimido en forma de un arco y su cordón traccionado de forma plana. Este cordón traccionado se encuentra en la cota más baja de los parámetros establecidos, a -1,50 metros del nivel de los apoyos.

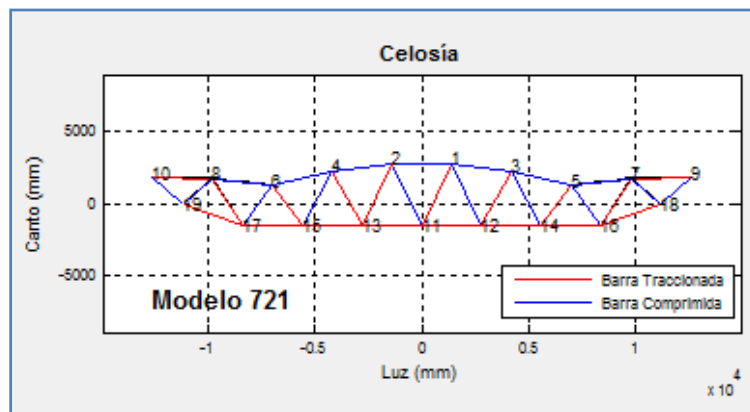


Fig. 148: Geometría Óptima de la Celosía 1-Modelo 721

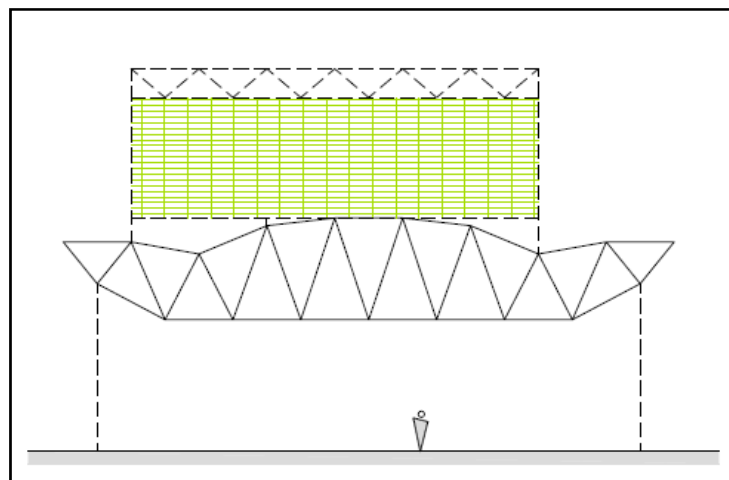


Fig. 149: Esquema estructural de la solución

El promedio de rendimiento tensional de esta estructura es menor que la del Modelo 0 o inicial, sin embargo esta estructura mejora en su deformación y tiene menos peso propio que el Modelo inicial.

La deformación máxima, en el punto medio inferior de la estructura, es de 31mm (*fig. 150*). Esta deformación es menor que la estructura inicial que tiene una flecha de 52,48mm

En el caso del peso, este se ha reducido 15% con respecto al modelo inicial y 46% con respecto al modelo real. El modelo óptimo pesa 21,4kN y la celosía real pesa 40kN.

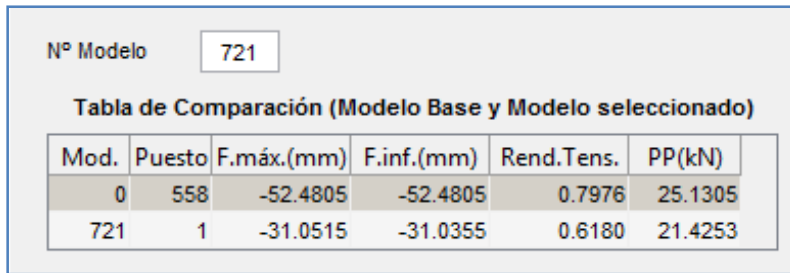


Fig. 150: Resultados Globales del Modelo Óptimo y el Modelo 0

También es importante destacar que el programa, aparte de considerar las reducciones de resistencia por pandeo de la barra, considera que los perfiles comprimidos no podrán tener una esbeltez mayor 200 y los perfiles traccionados no podrán pasar de 300.

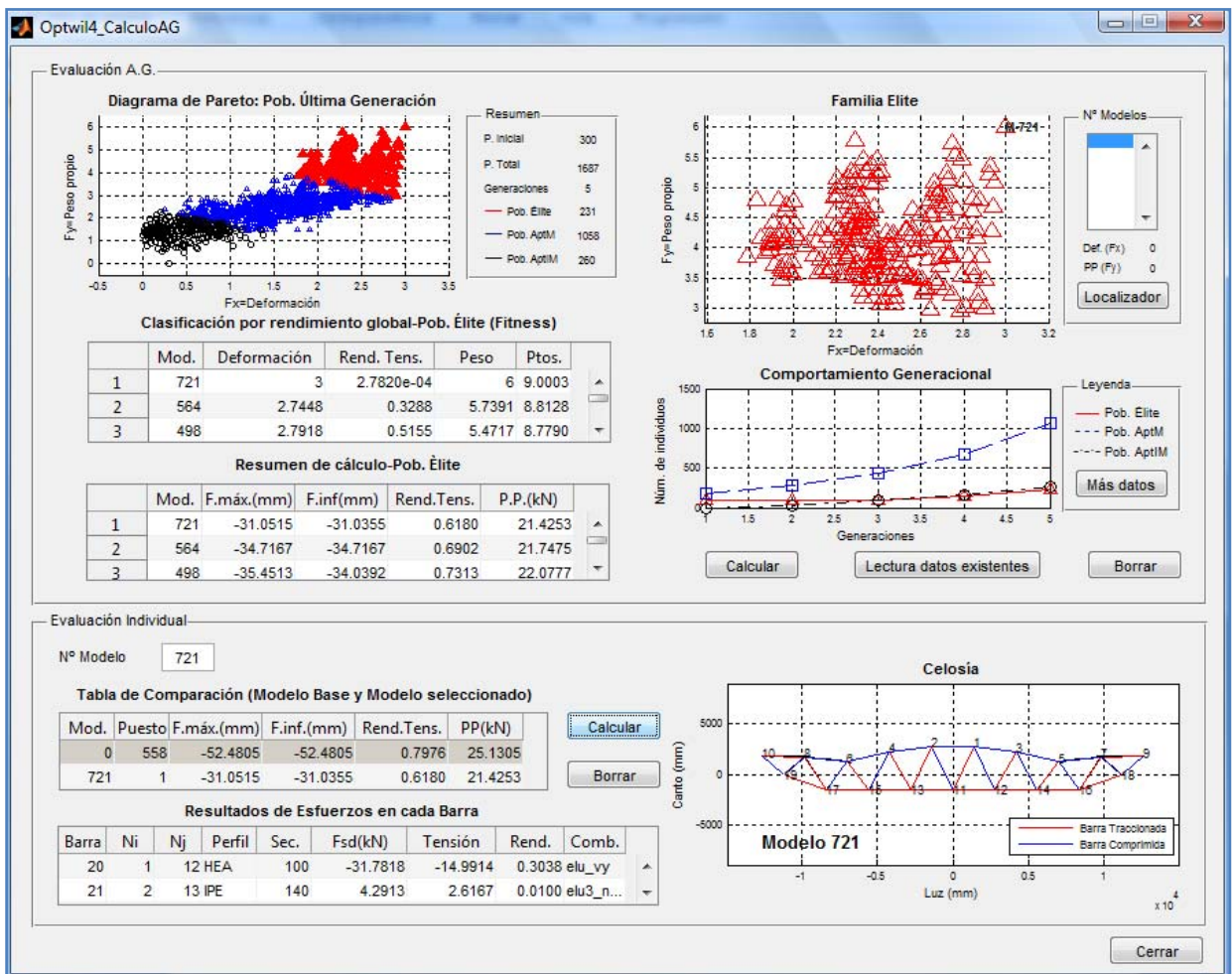


Fig. 151: Resultados del Cálculo A.G.

Cuando observamos los diagramas de la población (fig.151) se puede ver claramente la diferencia de las familias Élite, de Aptitud Media y de Aptitud inferior a la Media. En el diagrama de Familia Élite, resalta mucho el Modelo 721. Este se encuentra en la esquina superior derecha (fig. 151 y 152). Este modelo es la estructura con mejor puntaje de la función de Deformación y de Minimización de Peso, y se podría considerar que es el único individuo en el “Frente Óptimo de Pareto”.

El segundo frente de Pareto está formado por 6 modelos (564, 498, 512, 484, 1209 y 1100). La geometría de estos modelos se observa en la *fig. 154*. Estos modelos tienen una geometría similar al modelo óptimo, sin embargo sus puntajes en las funciones de deformación y peso se encuentran un paso por debajo del Modelo 721.

En el segundo frente los mejores modelos son los que se encuentran en los extremos opuestos del mismo frente. Este comentario lo hacemos teniendo en cuenta que existe un modelo que destaca con la función de deformación (Modelo 1100) y otro modelo que es el mejor con la función de minimización de peso (Modelo 564), sin contar el modelo óptimo.

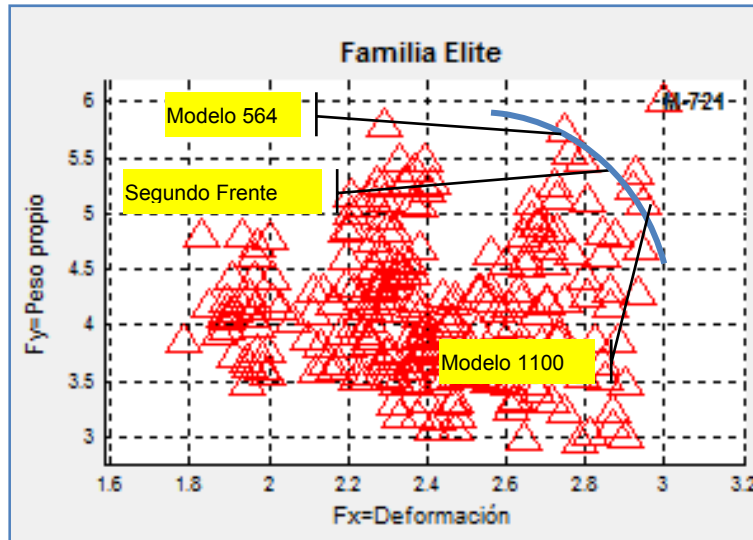


Fig. 152: Diagrama de Familia Élite de la Última Generación

Nº Modelo

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	558	-52.4805	-52.4805	0.7976	25.1305
564	2	-34.7167	-34.7167	0.6902	21.7475

Nº Modelo

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	558	-52.4805	-52.4805	0.7976	25.1305
1100	7	-34.3994	-31.8363	0.7091	22.5487

Fig. 153: Tabla resumen de Modelos 564 y 1100

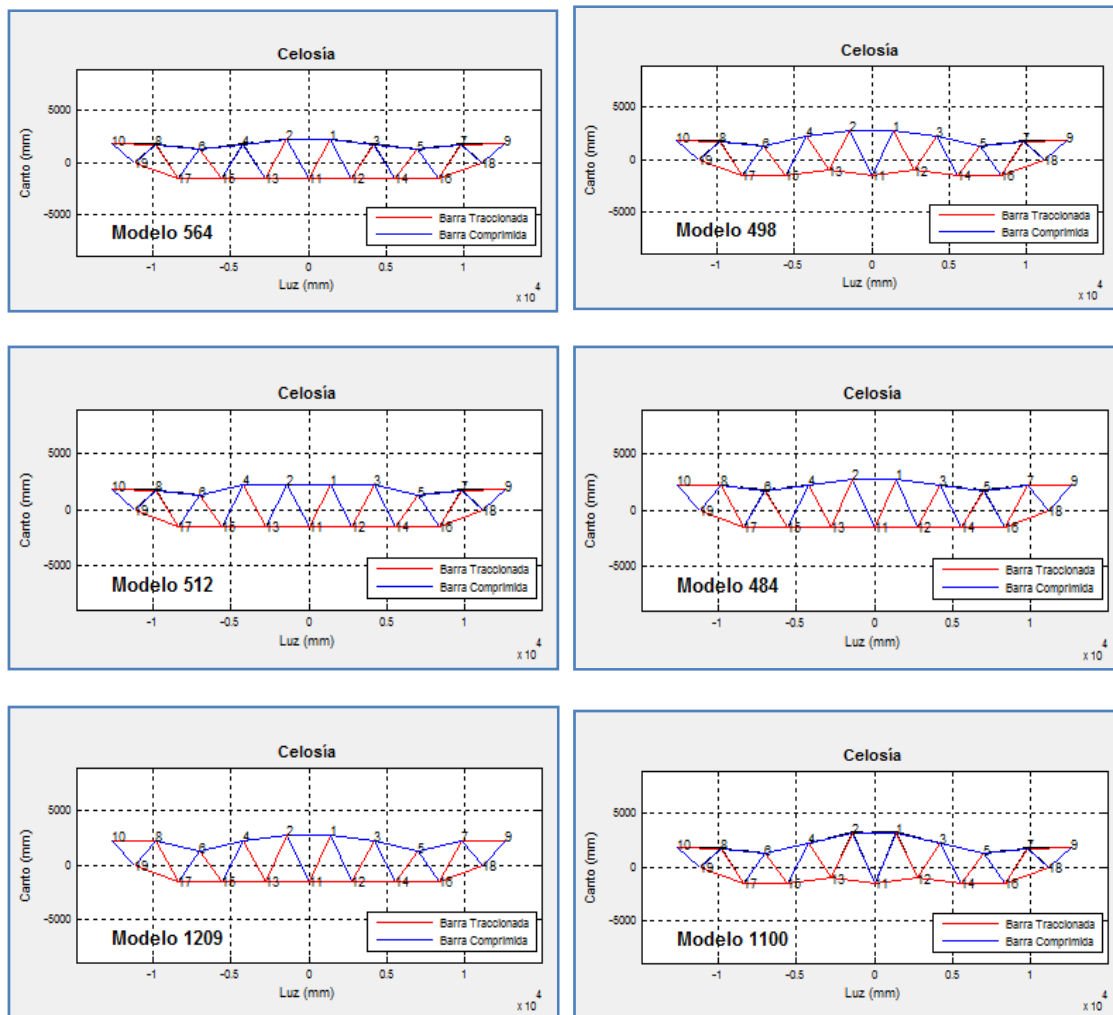


Fig. 154: Modelos de Segundo Frente de Pareto

En las tablas resumen de comparación (fig.153), se observa que la diferencia de flechas entre los modelos 564 y 1100 es muy pequeña. Pensamos que el peso puede tener mayor jerarquía en la elección del mejor individuo. El Modelo 564 debería ser nuestra segunda mejor opción. La diferencia entre el Modelo 564 y 721, es el canto central que tienen las estructuras. En el Modelo 721 se traza una curva más pronunciada que el otro modelo. Esta diferencia de altura le permite al Modelo 721 tener un perfil de menor dimensión, en el cordón superior, que el modelo 564. El modelo 721 tiene un perfil HEA-180 y el Modelo 564 tiene un perfil HEA-200. Esta diferencia le permite aligerar el peso propio de la estructura y ser más óptimo.

El comportamiento generacional, en esta evaluación, presenta una campana de Gauss simétrica. El número de individuos de la población Élite es similar al número de individuos de la Población de Aptitud inferior a la Media (fig. 155).

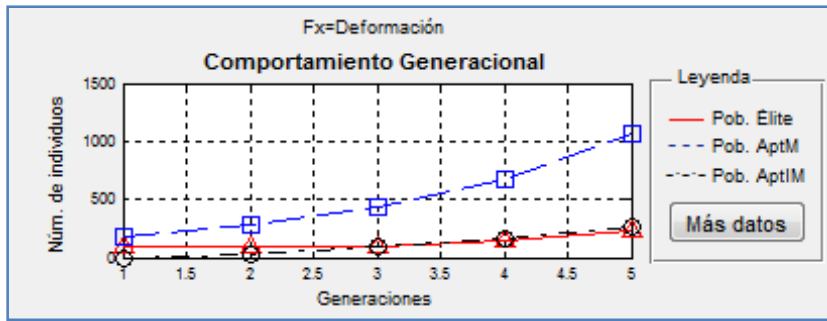


Fig. 155: Diagrama de Comportamiento Generacional

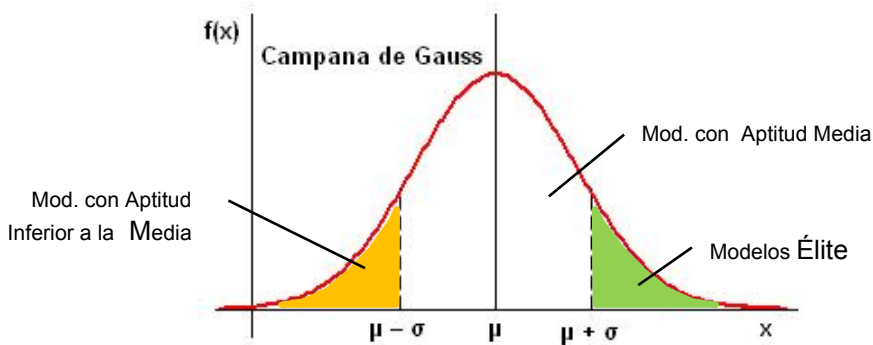


Fig. 156: Distribución de la población Fitness de acuerdo a la campana de Gauss

En algunos estudios esta distribución de la campana de Gauss puede ser ligeramente asimétrica, debido a que la “Moda”, el puntaje que más se repite en la población Fitness, se puede presentar en la zona de la población Élite o en la Población de Aptitud inferior a la Media.

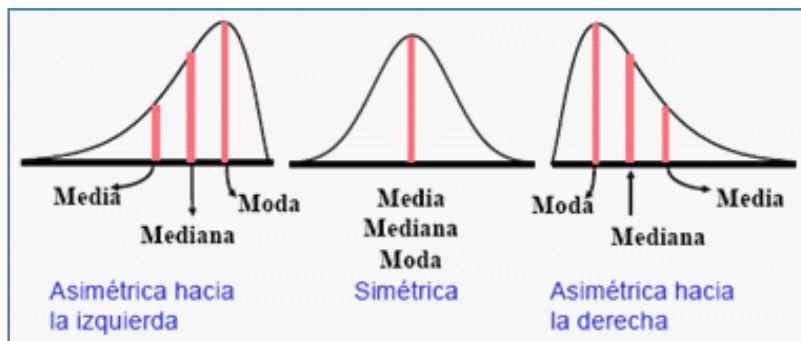


Fig. 157: Distribución Asimétrica en una campana de Gauss

F. Detalles Evolutivos (Celosía 1)

En esta plataforma tenemos los diagramas de comportamiento de los operadores genéticos, cruzamiento y mutación, durante la evaluación de la cercha.

En el diagrama Poblacional por Generaciones (fig.158) se puede concluir que la población inicial ha superado en número a la población mutada y cruzada, como era de esperarse. Se observa en la tabla de Población de Generaciones, en la quinta generación, que la diferencia de número de individuos entre la población inicial y cruzada es más de la mitad.

Sin embargo, lo más importante que debemos valorar son los resultados de la tabla de “Población última Generación”, donde nos muestra que los mejores modelos de la familia Élite pertenecen a población inicial. Además, esta población inicial tiene dentro de sus filas a los 6 primeros finalistas de celosía óptima, incluyendo el Modelo 721.

El operador de cruce ha creado al séptimo y noveno puesto, modelos 1100 y 1143. El mejor finalista del operador de mutación se encuentra en el puesto 205, Modelo 1636. Este finalista sigue perteneciendo a la familia Élite.

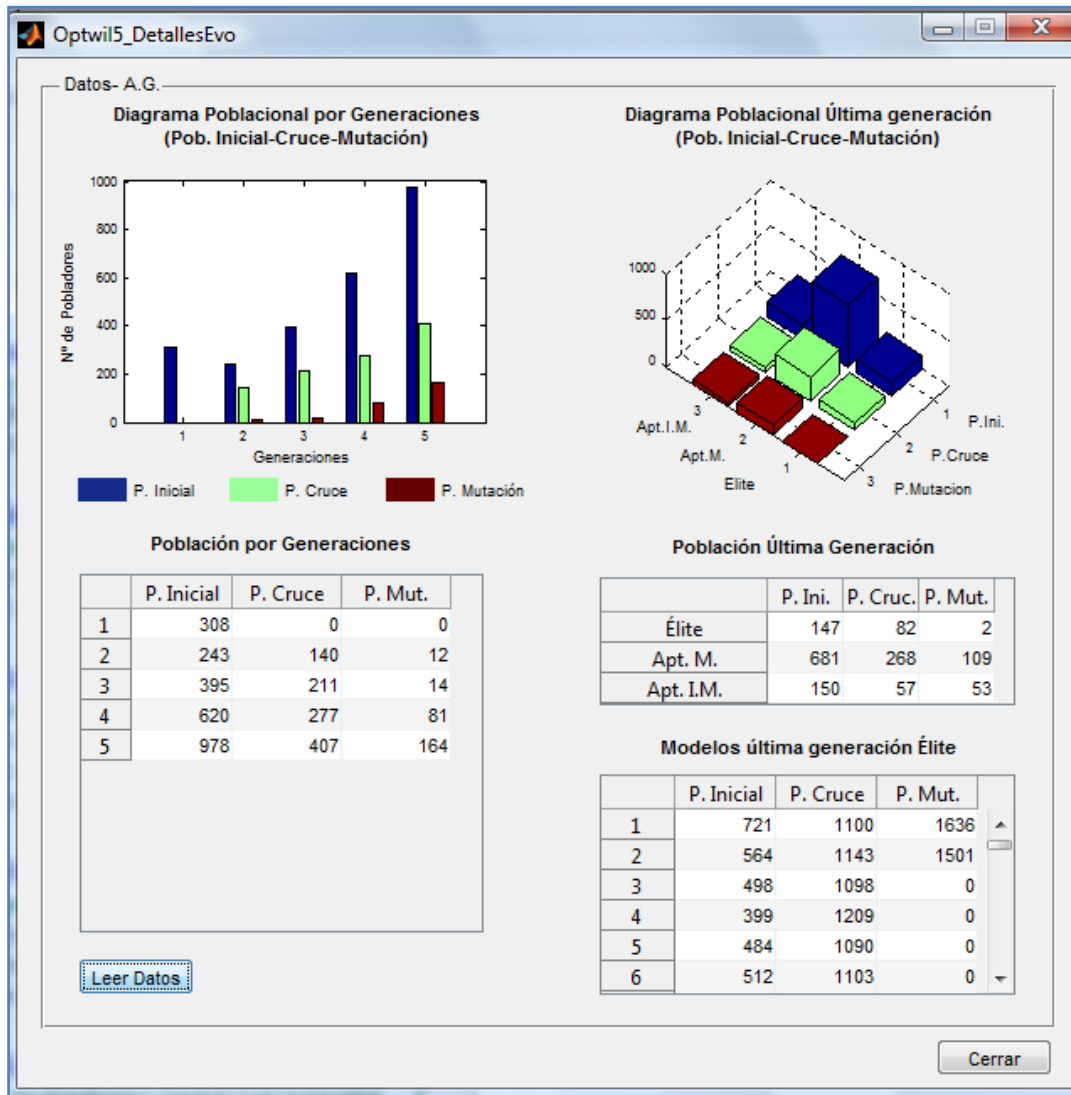


Fig. 158: Detalles Evolutivos de la Evaluación

Para concluir la evaluación de la Celosía 1, podemos comentar que la mejor opción como modelo óptimo sigue siendo el Modelo 721. Este modelo con respecto a los modelos del segundo Frente de Pareto, no muestra un gran cambio geométrico pero sus resultados reflejan que llega a obtener los mejores resultados en las funciones evaluadas. Es una mezcla del mejor individuo con la función de deformación y el mejor individuo con la función de minimización de peso. También se debe tener en cuenta que hemos respetado parámetros de cotas de proyecto, que han orientado a una solución con un canto controlado. Quizás la solución más óptima para una estructura sin límites de altura sería una cercha con más altura. No obstante, para nuestro proyecto el Modelo 721 cumple con nuestros requisitos y por lo tanto es la celosía óptima.

5.2.2. Celosía 2 o Exterior

Esta celosía, como ya se ha comentado, debe ser capaz resistir las cargas de una estructura de oficina, en la parte superior de la cubierta. Estas cargas son inferiores a las cargas que recibe la celosía 1. Sin embargo, en el caso del viento intervienen cargas puntuales que podrían marcar diferencia al momento de diseñar la estructura.

Los esfuerzos que produce el viento en las zonas con cruces de san Andrés, son compresiones y tracciones de 31kN, en nudos puntuales.

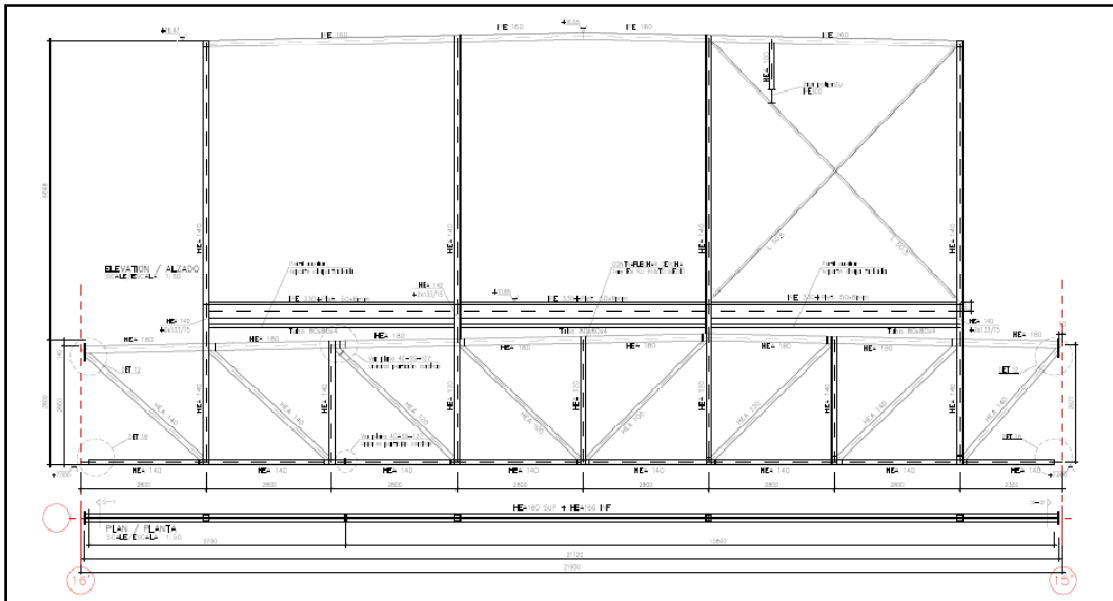


Fig. 159: Alzado de celosía 2, incluyendo sub-estructura que descansa sobre ella.

Los demás esfuerzos de la estructura son producidos por las mismas cargas comentadas en la celosía 1.

Cuadro de Cargas

Cubierta Principal		
PP Cub.	0,20 kN/m ²	Paneles Rockwool Hardrock E-91
CP	0,25 kN/m ²	
SU 1	0,40 kN/m ²	Cubierta no transitable
SU 2	54kN	Peso de sub-estación
SU 3	14kN	Cargas puntuales en todos los nudos inferiores
Viento	0,67kN/m ²	Presión, sentido X e Y
	0,27kN/m ²	Succión, sentido X e Y

Sub-estructura-Oficina		
PP Cub.	0,20 kN/m ²	Paneles Rockwool Hardrock E-91
CP Cub.	0,25 KN/m ²	
SU Cub.	0,40 kN/m ²	Cubierta no transitable
PP Losa	2,91kN	Losa colaborante (e=16 cm)
SU Losa	2,00kN	Oficina
Viento	0,67kN/m ²	Presión, sentido X e Y
	0,27kN/m ²	Succión, sentido X e Y

La celosía 2 del proyecto, también se encuentra soportada por pilares IPE-330. Las uniones cercha- pilar son empotradas. Los pilares están arriostrados lateralmente por una celosía principal de 2,80 metros de canto.

La celosía está compuesta por un cordón superior de HEA-180, un cordón inferior de HEB-140 y los montantes y las diagonales están compuestas por una HEA-100, 120 y 140.

Esta estructura tiene una flecha de 1,10cm, considerando la deformación del pilar. Esta flecha es muy inferior a la admisible de 7,46cm (L/300). El peso propio de la cercha, excluyendo los pilares IPE-330, es de 25,75kN.

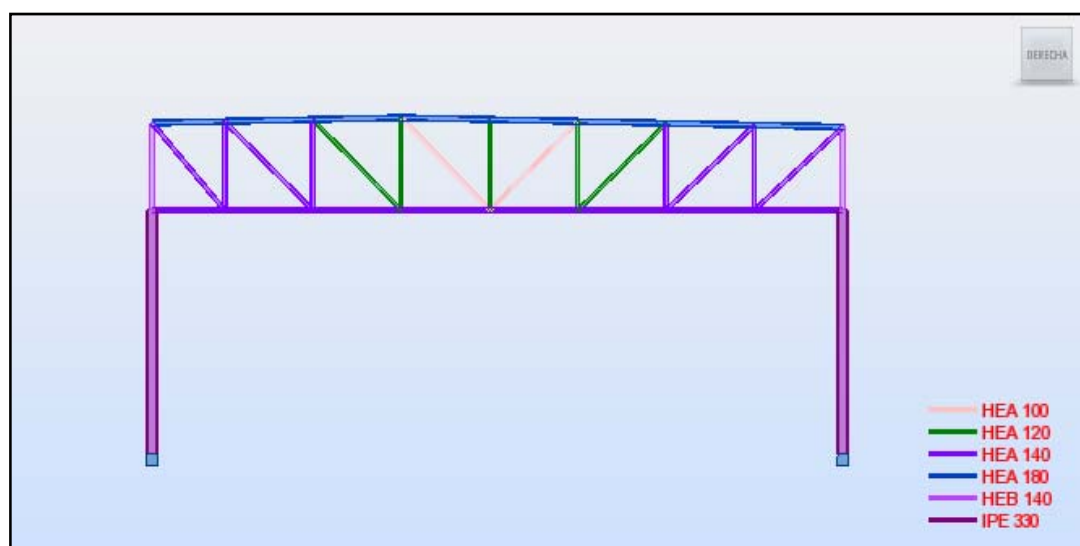


Fig. 160: Alzado de celosía 2 o Exterior (Modelo estructural del proyecto)

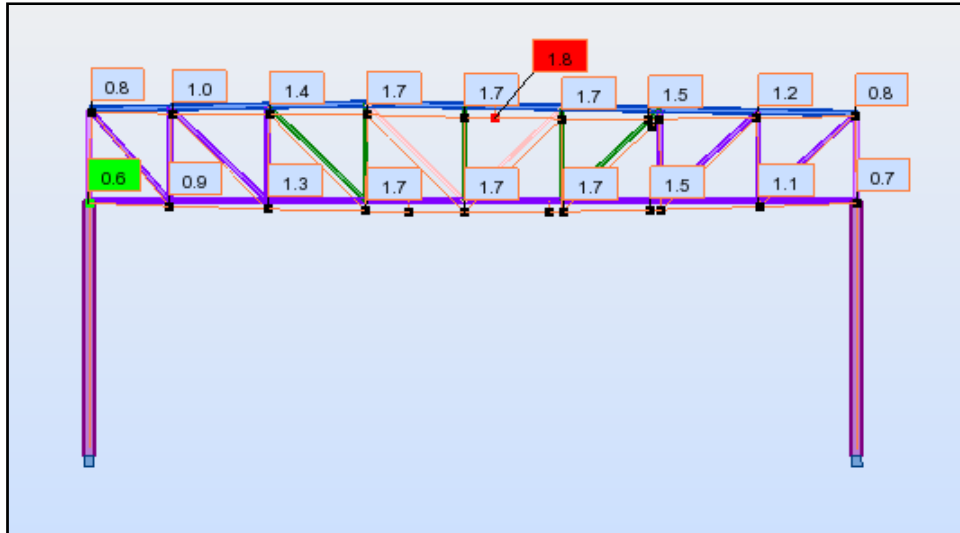


Fig. 161: Deformación de celosía 2 o Exterior (Modelo estructural del proyecto)

5.2.2.1. Optimización de Celosía 2

En este estudio se realiza los mismos pasos realizados en el estudio de la celosía 1. La única diferencia que encontraremos en este estudio, dejando de lado los estados de carga, es el número de generaciones que evaluaremos en la “Población Inicial”.

Desde un inicio se ha recomendado que la evaluación de una estructura se debe realizar, como mínimo, en 3 generaciones. En estas 3 generaciones los operadores de reproducción podrán crear individuos óptimos y aumentar la variedad de la solución.

Para el diseño de la nueva estructura se sigue considerando que la geometría del nuevo individuo no altere las cotas existentes del proyecto real. También se respeta la modulación de la cercha, por temas geométricos y el tipo de material del acero (S275).

El canto inicial de la celosía será de $L/10$ y no de $L/8$, como en el proyecto original.

Por otro lado, permitiremos que la celosía óptima pueda descender 1,5 metros bajo el nivel de los apoyos. Esta variación geométrica cambiaría la altura libre interior de 7 metros a 5,50 metros. Pensamos que es una opción válida para este tipo de estructuras.

Otro dato importante es el cambio de tipología estructural de cercha, debido a que la celosía original es tipo Pratt y la nueva celosía es tipo Warren. Esta modificación no afectaría en gran magnitud a la estructura superior para oficinas, dado que la modulación de 2,80 metros se mantiene.

Por último, en nuestra propuesta consideraremos que la estructura es una celosía es bi-articulada y no empotrada, como la solución actual. El empotramiento no lo planteamos porque nos obligaría a modificar la solución de los pilares. Sin embargo, pensamos que el empotramiento, en el proyecto original, se ha planteado para controlar la flecha que se presenta en esta zona.

A. Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 2)

Se realiza la introducción de todos los datos geométricos, ya comentados.

En el caso de la sección inicial, se selecciona el perfil HEA-180. Utilizamos este perfil debido a que es la sección más grande que tiene la celosía original. Esta sección debería trabajar adecuadamente en nuestra propuesta. No obstante, sabemos que nuestra estructura puede tener más compresiones en el cordón superior debido a que es una estructura bi-articulada y no empotrada en sus apoyos.

El beta de pandeo será 1, considerando que el cordón comprimido se encuentra arriostrado lateralmente por la estructura que soporta la losa colaborante de la estructura superior.

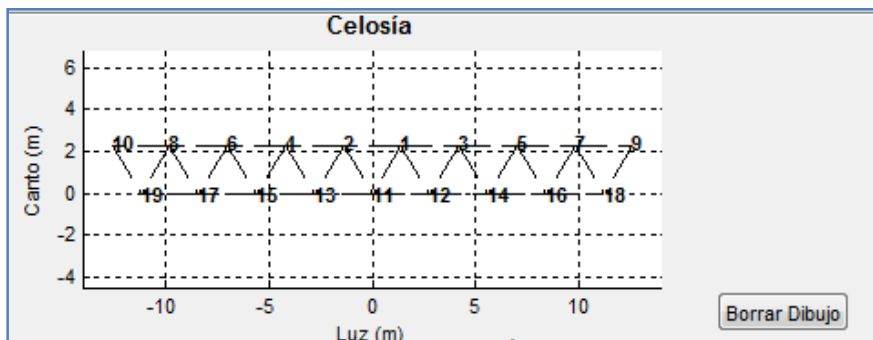


Fig. 162: Esquema estructural de Celosía

Los casos de cargas y combinaciones que tenemos en la nueva estructura, son las siguientes:

Casos de cargas- Celosía 2

NUDOS SUPERIORES												
		10	8	6	4	2	1	3	5	7	9	
Efecto de la Estructura Superior	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)										
	pp		-7.24		-11.89		-10.10		-6.60			
	cp		-18.10		-35.60		-34.20		-17.50			
	su		-11.10		-30.40		-18.40		-7.90			
	vx		-28.10		-0.80		-2.50		-0.80			
	vy		-2.1		0.9		31.2		-31.20			
	-vx		-0.80		-2.50		-0.80		-28.10			
	-vy		-31.2		31.2		0.9		-2.10			
Carga en cubierta	pp	-1.40	-2.10	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-2.10	-2.80	-1.40	
	cp	-1.75	-2.63	-1.75	-1.75	-1.75	-1.75	-1.75	-2.63	-3.50	-1.75	
	su	-2.80	-4.20	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-2.8	-4.20	-5.60	-2.80	
Efec. Estruct. Sup.	Casos	CARGAS HORIZONTALES EN LOS NUDOS (kN)										
	vy		17.5		15.9		0.01		2.1			
	-vy		-2.1		-0.01		-15.9		-17.5			
NUDOS INFERIORES												
		19	17	15	13	11	12	14	16	18		
Uso interior	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)										
	su	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	-14.00	

Combinaciones de cargas – Celosía 2

Nº	Comb	pp y ppb	cp	su	vx	vy	n_vx	n_vy	Comb
1	els	1	1	1					els
2	elu	1.35	1.35	1.5					elu
3	elu_vx	1.35	1.35	1.5	0.9				elu_vx
4	elu2_vx	1.35	1.35	1.05	1.5				elu2_vx
5	elu3_nvx	1.35	1.35	1.5			0.9		elu3_nvx
6	elu4_nvx	1.35	1.35	1.05			1.5		elu4_nvx
7	elu_vy	1.35	1.35	1.5		0.9			elu_vy
8	elu2_vy	1.35	1.35	1.05		1.5			elu2_vy
9	elu3_nvvy	1.35	1.35	1.5				0.9	elu3_nvvy
10	elu4_nvvy	1.35	1.35	1.05				1.5	elu4_nvvy

En los apoyos consideramos que el nudo del lado izquierdo, el 19, será un apoyo móvil y el apoyo derecho, el 18, será fijo.

Geometría Base

Estructura: Apoyos laterales

Luz: 22.4 m

Prop. canto (Pc): 10 (Recomend. 10 a 20)

Prop. base (Pb): 8 (Recomend. 0 (30° a 45°))

Donde: Pb = Número par
Pb >= 4 (Apy.Lat.)
Pb >= 2 (Voladizos)

Material

E: 210000 N/mm²

fy: 275 N/mm² Fmat: 1.05

Sección de barra

Perfil: HEA 180

Área: 4530 mm²

Iy: 2.51e+07 mm⁴

Iz: 9.246e+06 mm⁴

Coef. de imperfección "alfa"

alfa_y: 0.34 alfa_z: 0.49

Normativa

Pandeo: Beta_y: 1 Beta_z: 1

Cargas

Nº Casos de carga: 7

Casos Carga	Dir.
5	vy
6	nvx
7	nvvy

Tabla de Cargas

Nudo	Direc. (x=1/y=2)	Fuerza (kN)	
1	10	2	-1.4
2	8	2	-9.3
3	6	2	-1.4
4	4	2	-13.3
5	2	2	-1.4
6	1	2	-11.5

Historial de cargas

Caso	Nº Carga	Nudo	Direc.	Fuerza(kN)	
3	1	3	6	2	-1.4000
4	1	4	4	2	-13.3000
5	1	5	2	2	-1.4000
6	1	6	1	2	-11.5000

Tabla de Hipótesis o Combinaciones de Cargas

Hipótesis	pp	ppb	cp
els	1	1	1
elu	1.35	1.35	1.35
elu_vx	1.35	1.35	1.35
elu2_vx	1.35	1.35	1.35
elu3_nvxy	1.35	1.35	1.35

Apoyos

Nº de restric. en apoyos: 3

Nodo	Dir. (x=1/y=2)	
1	19	1
2	19	2
3	18	2

Nota

- Las cargas F(kN) que vayan en sentido gravitatorio u horizontales, que tengan un sentido de derecha a izquierda, se introducirán con el signo negativo.

- En los casos de carga no se deberá incluir el peso propio. Este caso está considerado por defecto en el programa.

Evaluación

Predim. Datos A.G.

Fig. 163: Introducción de datos en la ventana de inicio (Celosía 2)

B. Pre-dimensionamiento (Celosía 2)

En la **fig. 164** se observa dos cuadros resumen del análisis que se realiza en esta etapa.

En el primer cuadro se observa que la celosía inicial, que tiene una sección HEA-180 en toda la estructura, ha colapsado con la aplicación de las cargas. El resultado nos muestra que tenemos una compresión máxima de 1020kN, en el cordón superior y el perfil solo puede resistir 849kN, considerando la reducción de la resistencia axial por pandeo.

En el segundo cuadro, la estructura “funciona”. Al realizar el cambio de secciones en cada barra, el axil más grande se ha reducido de 1020kN a 1000kN. Esta reducción nos permite considerar el perfil HEA-200 como el perfil óptimo para este caso.

Celosía Inicial		Celosía Optimizada	
Resultados Globales		Resultados Globales	
F.max (mm)	0	F.max (mm)	-47.2261
F.cent./vol.	0	F.cent./vol.	-47.2261
F.adm (mm)	74.6667	F.adm (mm)	74.6667
PP (kN)	28.7954	PP(kN)	18.5764
Rend. Global	-1	Rend. Global	0.7683

Fig. 164: Cuadro Resumen de la Celosía Inicial y Celosía Optimizada

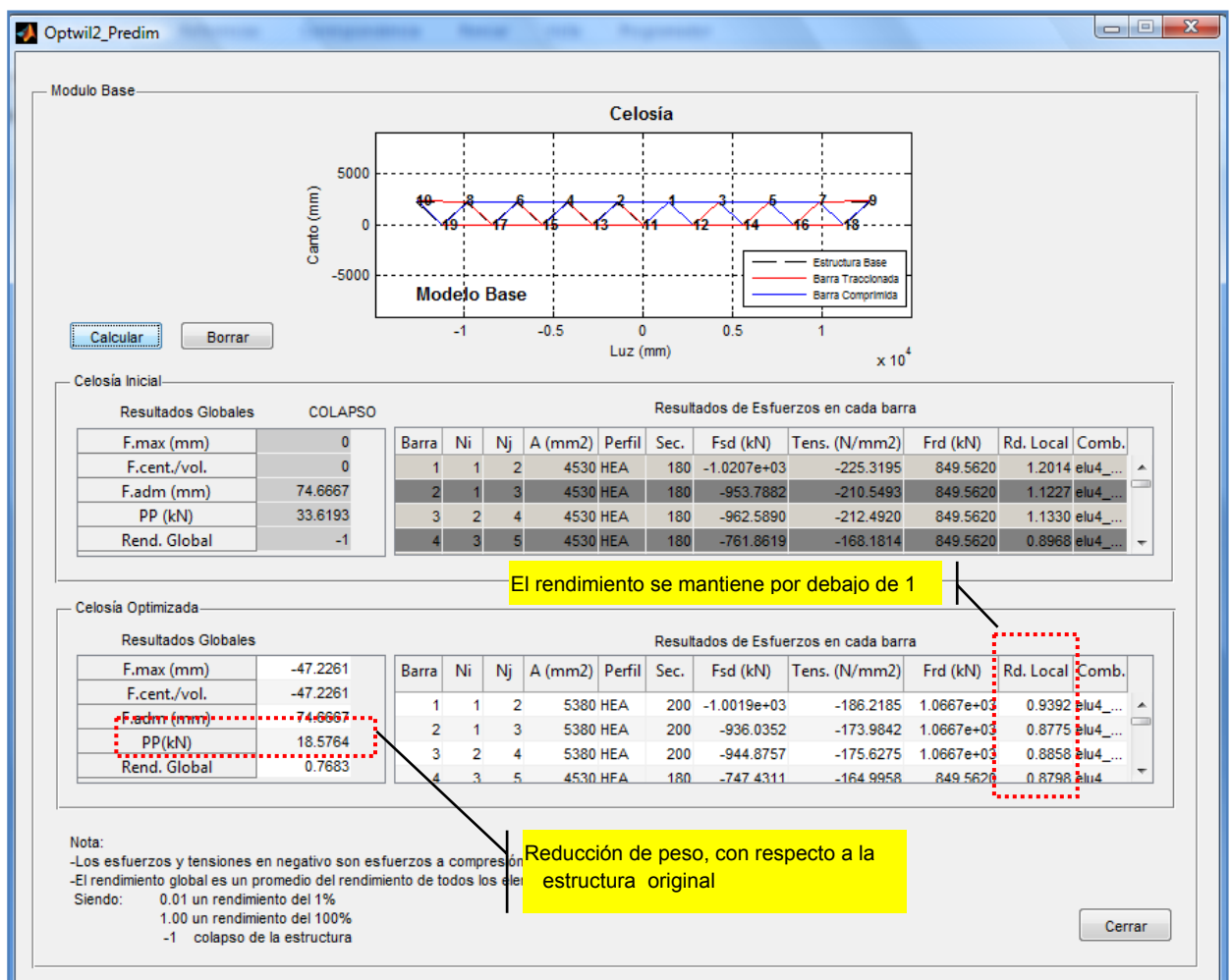


Fig. 165: Resultados del pre-dimensionamiento

En esta estructura peso propio es de 18,57kN, un 27,8% menor que la celosía real.

Tenemos una deformación de 47,2 mm, en el punto medio inferior de la celosía. Esta flecha es inferior que la admisible de 74,7mm. Sin embargo, la estructura original flecha sólo 11mm. Por lo tanto, debemos comprobar que tanto puede mejorar en la deformación con la optimización de la forma.

C. Datos A.G. (Celosía 2)

En la *fig.166* se presentan los datos que se han considerado en este proyecto. Estos datos son los mismos que en la Celosía 1. Sólo el número de Generaciones varía de 5 a 3.

Se ha establecido que la estructura que evolucione de manera ascendentes como descendentes. Se mantiene las alturas críticas superior de 3,50 metros e inferior de 1,50 metros.

La población, sigue haciendo referencia a la población mínima recomendada. Y los porcentajes de Participación o Grado de Jerarquía de las funciones objetivo se siguen inclinando a la minimización de peso como la función de mayor jerarquía.

The screenshot shows the 'Optwil3_DatosAG' window with the following settings:

- Familia Estructural:** Fam. Estructural: Ambas
- Modificación Geométrica:**
 - Canto inicial (ca): 2.24 m
 - Altura evolutiva parcial: 0.5 m
 - Altura máx. sup. (sobre los apoyos): 3.5 m
 - Altura máx. inf. (bajo los apoyos): 1.5 m
 - Recomendación:** 0.7 m = (ca/3), 4.5 m = (2*ca), 2.24 m = (ca)
- Población:**
 - Pob. inicial: 300
 - Nº Generaciones: 3
 - Recomendación:** 224, 3
- Cruce y mutación:**
 - Cruce: Dos puntos de cruce
 - Mutación: Simétrica
- Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo:**
 - Deformación: 30 %
 - Rendimiento Tensional: 10 %
 - Minimización de Peso: 60 %

Buttons at the bottom: Ingreso de datos, Cálculo A.G., Cerrar

Fig. 166: Datos A.G

D. Cálculo A.G. (Celosía 2)

Los resultados obtenidos nos muestran que se han evaluado 801 modelos durante todo el cálculo. Como referencia se puede decir que este número es la mitad de modelos evaluados en la Celosía 1.

La familia Élite de la última generación tiene 81 miembros y el modelo con más puntaje es el número 358 (fig. 167).

El Modelo 358, es una estructura que también tiene forma de “lenteja”, como la estructura de la celosía 1, pero en el cordón superior no forma un arco de descarga tan pronunciado como en el caso anterior. La geometría del cordón superior de este modelo es más plana que curvo.

El cordón inferior tiene la misma forma que la solución de la celosía 1.

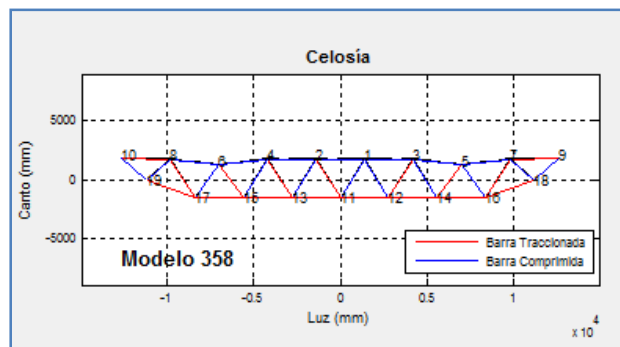


Fig. 167: Modelo Óptimo de la Celosía 2

El promedio de rendimiento tensional de esta estructura es menor que la del Modelo 0, sin embargo esta estructura mejora en su deformación y tiene menos peso propio que el Modelo inicial.

La deformación máxima en el centro de la luz es de 34,4mm. Esta geometría tiene 13 mm menos de deformación que el Modelo 0. En el caso del peso, la estructura tiene un peso propio de 17,1kN, un 8% menos que el Modelo 0 y un 33,6% menos que la estructura real. Se puede afirmar que la evaluación nos ha dado un resultado óptimo y que su efectividad no ha sido afectada por la reducción de número de generaciones.

Nº Modelo		Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)				
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)	
0	0	-47.2261	-47.2261	0.7683	18.5764	
358	1	-34.4818	-34.4818	0.7512	17.1019	

Fig. 168: Resultados Globales del Modelo Óptimo y el Modelo 0

También es importante destacar que el programa, aparte de considerar las reducciones de resistencia por pandeo de la barra, considera que los perfiles comprimidos no podrán tener una esbeltez mayor 200 y los perfiles traccionados no podrán pasar de 300.

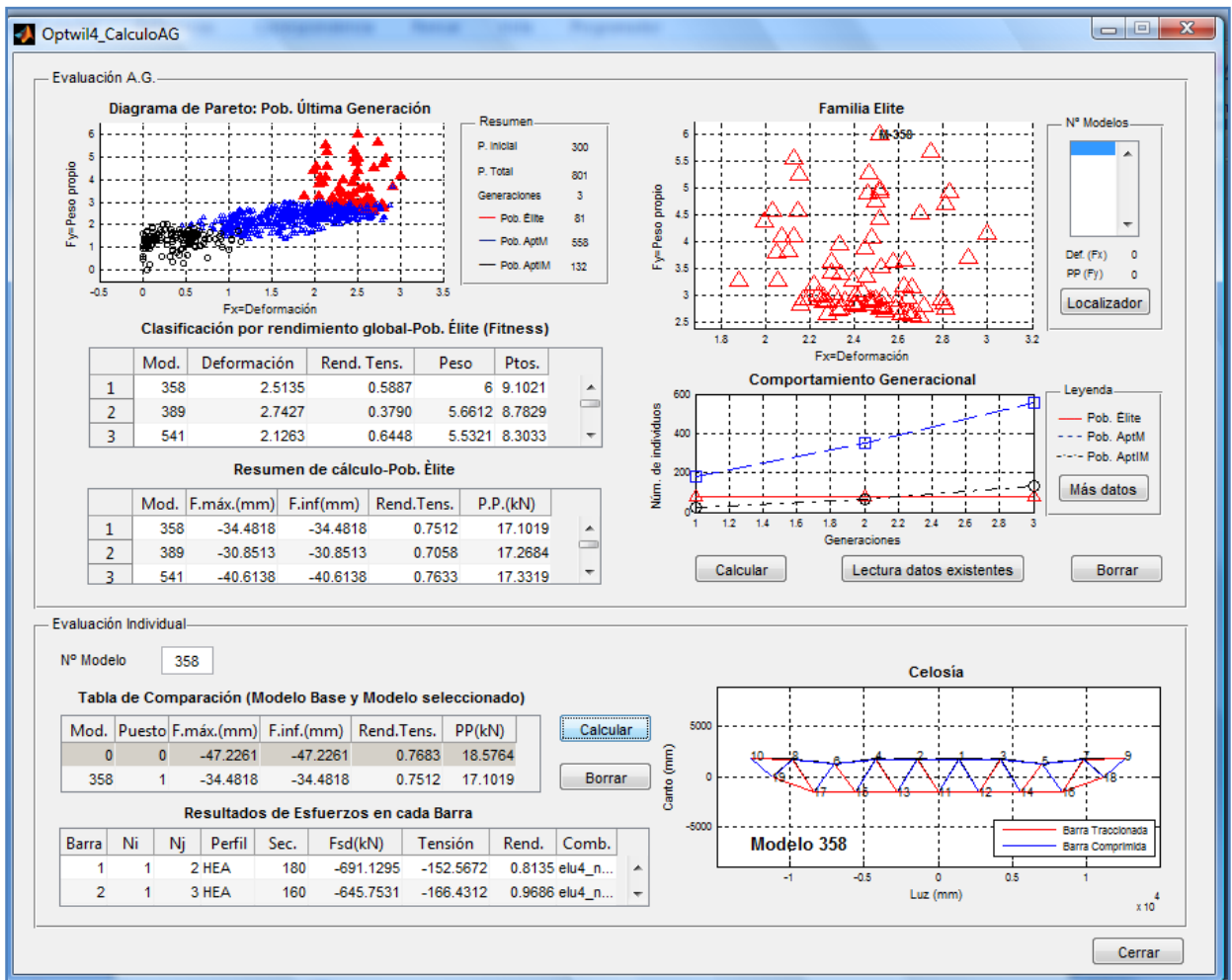


Fig. 169: Resultados del Cálculo A.G.

Cuando observamos los diagramas de la población (fig.169), se puede observar que la familia Élite está formada por un grupo de soluciones dispersas unas de otras, que permite tener una mayor “*distancia de apilamiento*” entre los modelos o individuos.

Esta *distancia de apilamiento* se refiere a la distancia que se encuentra un individuo respecto a sus “vecinos”, en el diagrama poblacional, y donde a mayor distancia de apilamiento la solución del problema es más heterogénea, logrando así obtener un gran abanico de soluciones óptimas para un mismo problema.

En nuestra familia Élite se refleja que el Modelo 358 forma parte de un frente óptimo compuesto por 5 miembros y que este modelo es el mejor con la función de Minimización de peso o peso propio. Esta solución, no destaca a primera vista de los demás modelos, como en el caso de la solución óptima de la celosía 1.

Los modelos que acompañan al modelo 358 en el frente óptimo son: los modelos 389, 341, 502 y 704. De estos últimos cuatro modelos mencionados, el mejor es el modelo 389. Este

modelo llega a tener menos flecha que el modelo óptimo 358 y su peso sólo se incrementa un 1% más que dicho modelo. La diferencia geométrica entre ellos dos se encuentra en los dos nudos centrales. Los nudos 1 y 2 del modelo 389, se encuentran 0,50 metros más elevados que los nudos del modelo óptimo 358. Se puede concluir que cualquiera de los dos modelos puede ser el adecuado. La Aptitud de dichas estructuras, frente a las solicitaciones, son similares.

En este ejemplo nos inclinamos por el modelo 358 como el mejor individuo.

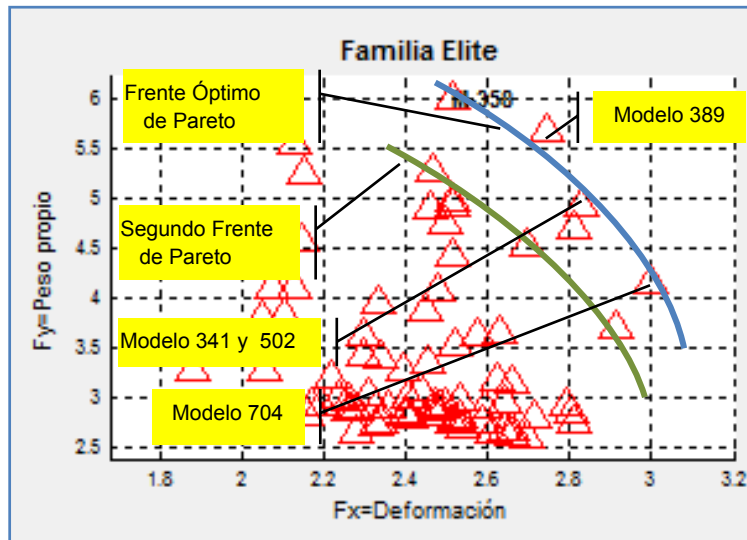


Fig. 170: Diagrama de familia Élite Celosía 2 (Pini. = 300 y 3 Generaciones)

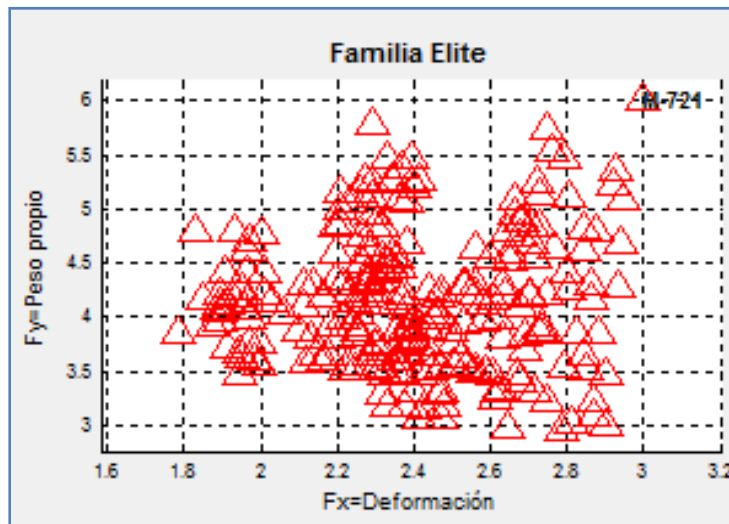


Fig. 171: Diagrama de familia Élite Celosía 1 (Pini. = 300 y 5 Generaciones)

Nº Modelo

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	0	-47.2261	-47.2261	0.7683	18.5764
389	2	-30.8513	-30.8513	0.7058	17.2684

Fig. 172: Tabla resumen de Modelos 389

Nº Modelo 341

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	0	-47.2261	-47.2261	0.7683	18.5764
341	4	-30.3733	-29.4922	0.7210	17.6348

Nº Modelo 502

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	0	-47.2261	-47.2261	0.7683	18.5764
502	428	-42.9914	-42.9914	0.7006	21.3926

Nº Modelo 704

Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)

Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	0	-47.2261	-47.2261	0.7683	18.5764
704	17	-26.7753	-26.7753	0.6237	18.0049

Fig. 173: Tabla resumen de Modelos 341, 502 y 704

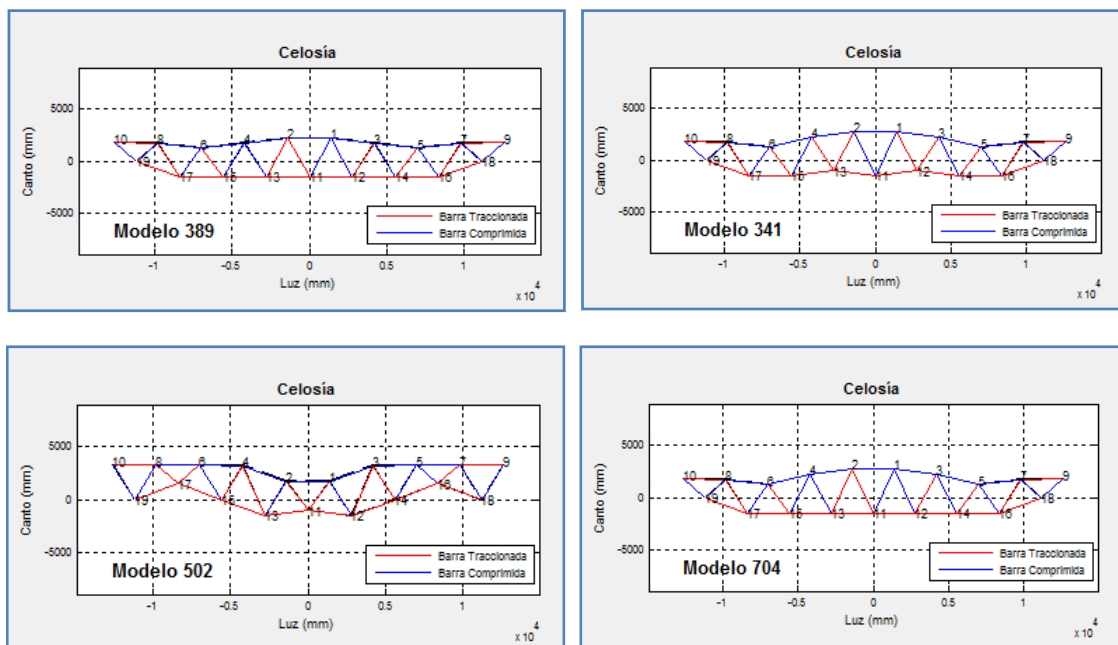


Fig. 174: Modelos del Frente Óptimo de Pareto

El comportamiento generacional (fig. 175), en esta evaluación, presenta una diferencia entre el número de individuos que conforma la población Élite y la población de Aptitud Inferior a la Media. La población Élite se mantiene en menos de 100 individuos y en cambio la población de Aptitud inferior a la Media se incrementa linealmente. En este caso la distribución poblacional presenta una campana de Gauss ligeramente asimétrica.

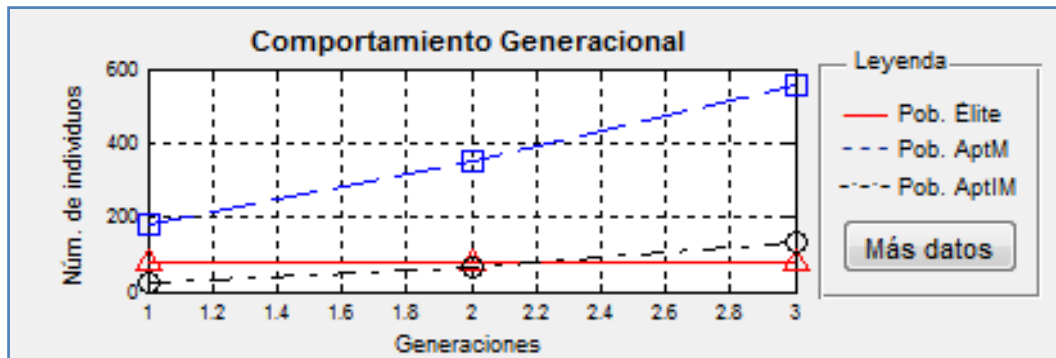


Fig. 175: Diagrama de Comportamiento Generacional

Recordemos que la campana de Gauss puede ser ligeramente asimétrica, debido a que la “Moda”, el puntaje que más se repite en la población Fitness, se puede presentar más cerca a la zona de la población Élite o en la zona de la Población de Aptitud inferior a la Media. En esta evaluación nuestra campana de Gauss es asimétrica hacia la izquierda.

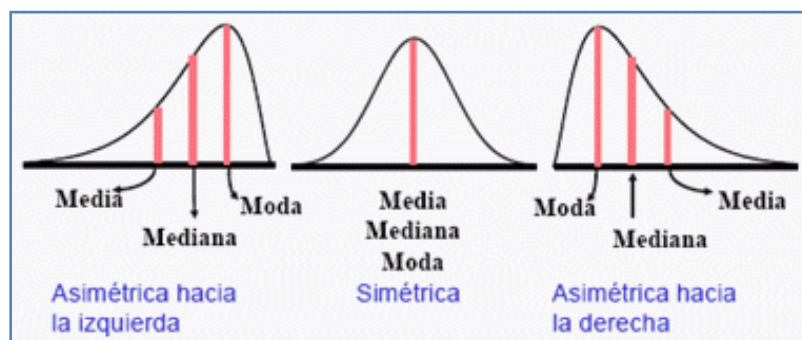


Fig. 176: Distribución Asimétrica en una campana de Gauss

E. Detalles Evolutivos (Celosía 2)

En esta plataforma tenemos los diagramas de comportamiento de los operadores genéticos, cruzamiento y mutación, durante la evaluación de la cercha.

En el diagrama Poblacional por Generaciones (fig.177) se puede observar que el operador de mutación sólo se ha presentado en la segunda generación. No se han generados individuos que creen mayor diversidad en la población. Este aspecto puede ser negativo para una evolución óptima.

En el diagrama y tabla Poblacional de la Última Generación se aprecia que la familia Élite está formada por individuos procedentes de un cruce. En esta evaluación, el operador de cruce ha sido eficaz para la evolución del individuo óptimo.

El operador de cruce ha creado al tercer, sexto, noveno y décimo puesto de la familia Élite. Los otros seis primeros puestos pertenecen al grupo de la población inicial, des esta última generación.

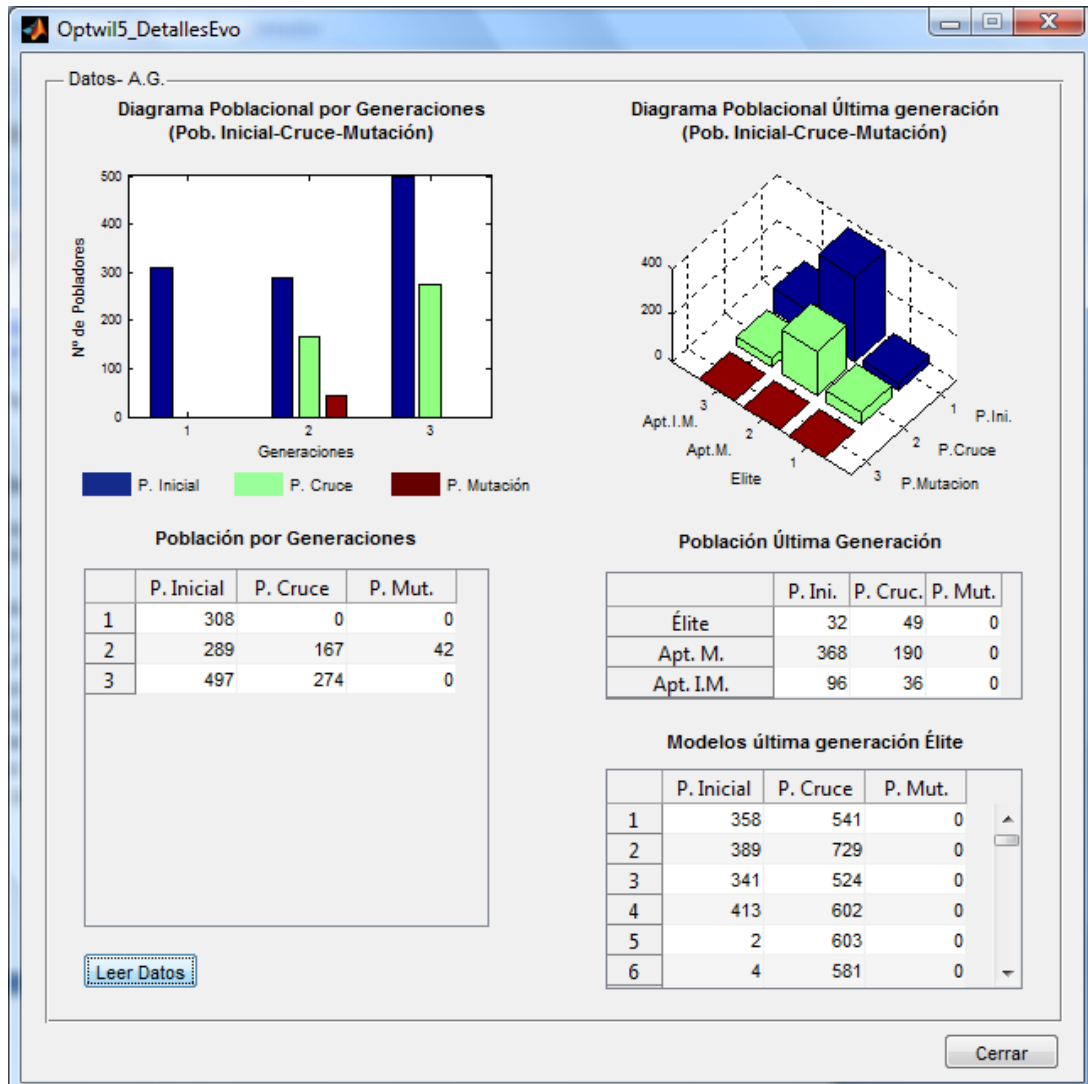


Fig. 177: Detalles Evolutivos de la Evaluación

Para concluir, se puede afirmar que la optimización de una estructura utilizando el parámetro mínimo de 3 generaciones es aceptable. Los resultados, en este ejercicio, nos muestran que la optimización, con este número limitado de generaciones, permite optimizar el peso una estructura en un 33,6%, con respecto al peso obtenido con un diseño convencional.

Se debe tener en cuenta que este porcentaje se reducirá cuando se realice una "compatibilidad de secciones" en las barras que conforman la estructura, en el momento de su fabricación. Esta acción que se da en un proceso de fabricación convencional, es un aspecto importante que deseamos complementar en nuestro en el programa.

5.3. Estructura en Voladizo

Esta estructura en voladizo forma parte de una estructura de cubierta de un auditorio. La propuesta arquitectónica tenía la necesidad de crear un elemento envolvente que sirva de espacio de transición entre el auditorio y su entorno (*fig.178*). En este apartado realizaremos el estudio de una estructura que tiene un voladizo de 11,45 metros de largo.

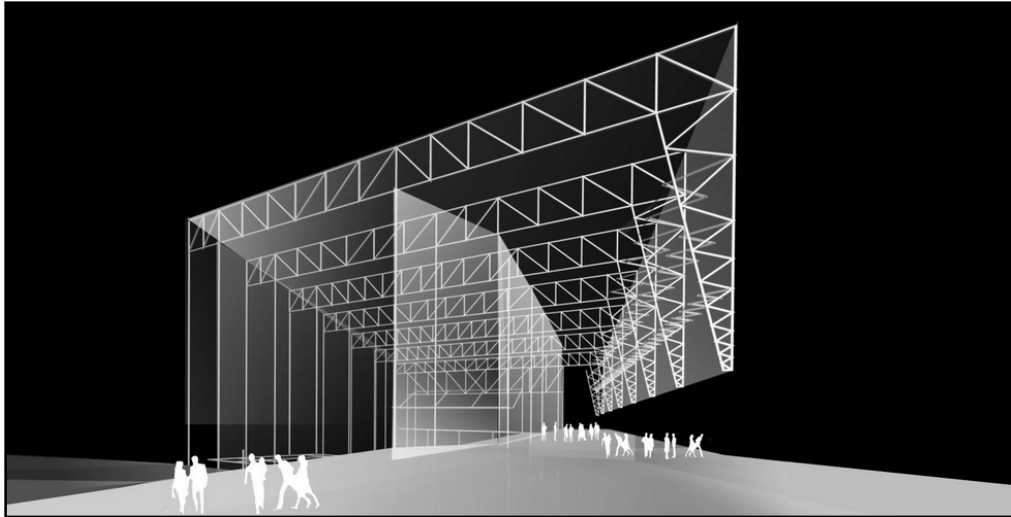


Fig. 178: Perspectiva de propuesta estructural de cubierta de Auditorio.



Fig. 179: Maqueta de Auditorio

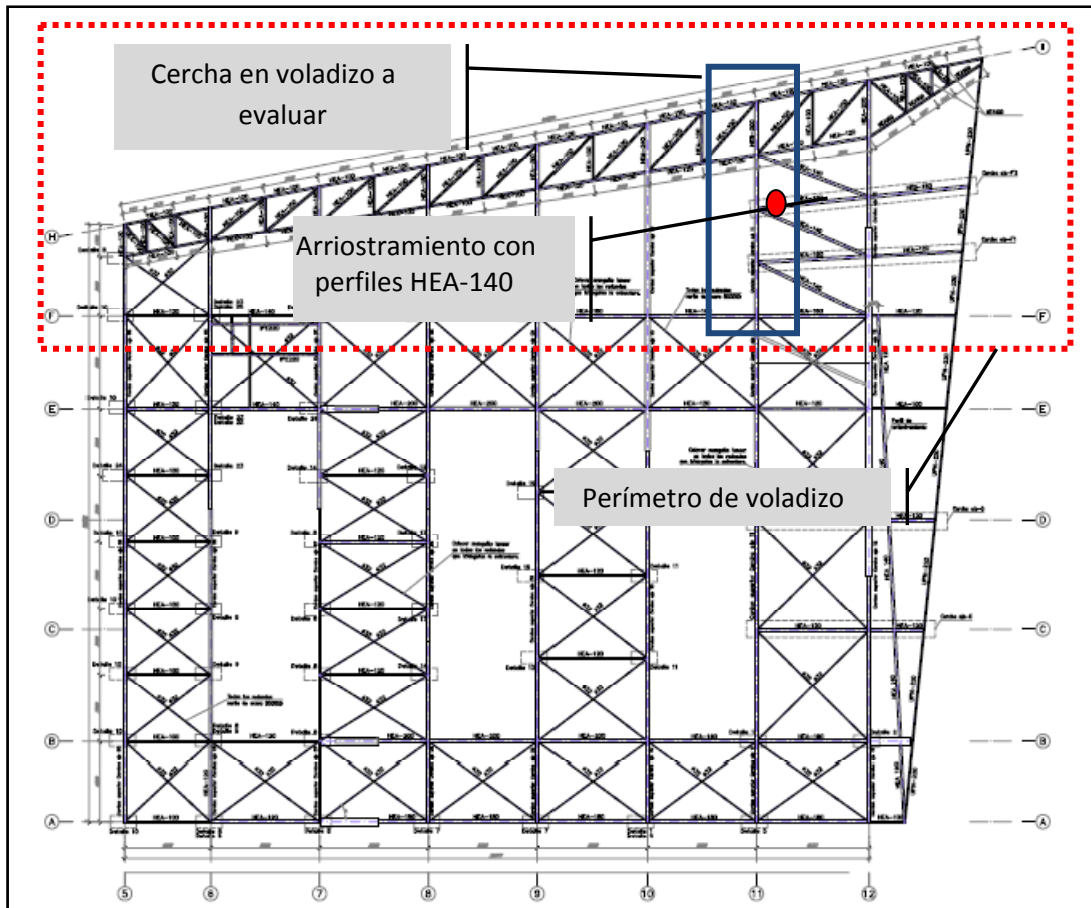


Fig. 180: Planta Inferior de cubierta

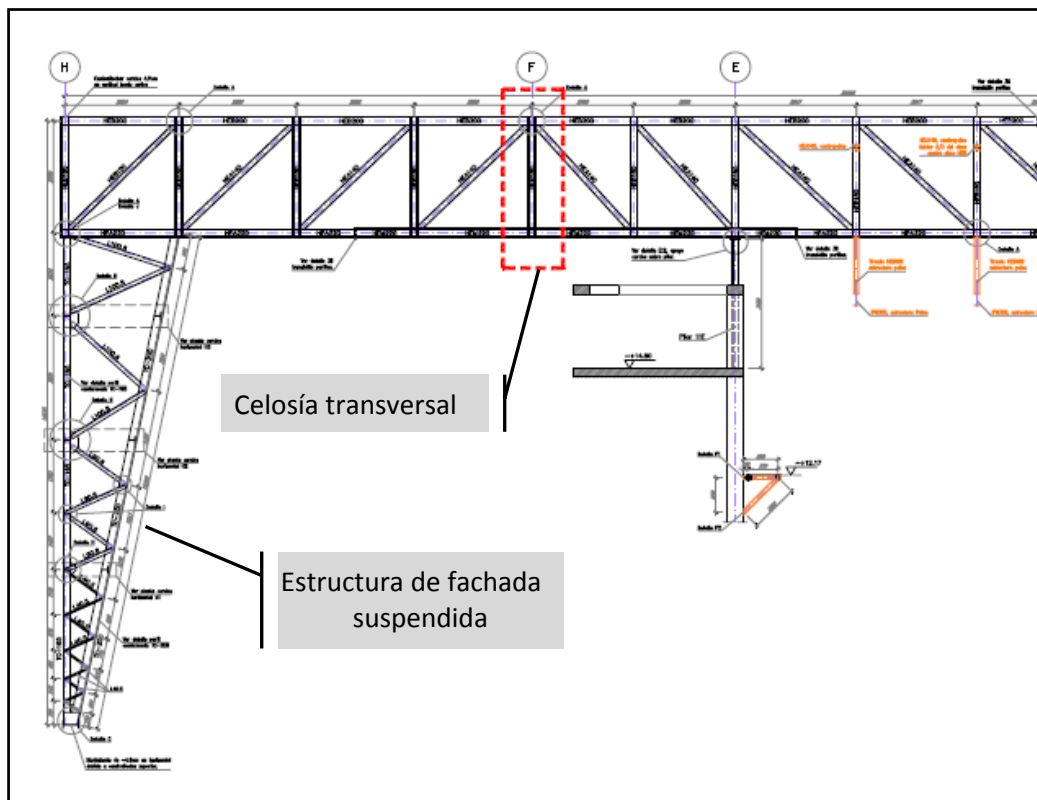


Fig. 181: Alzado de voladizo del proyecto real (Eje 11)

El voladizo que estudiaremos es parte de una celosía principal que tiene 38,40 metros de largo y un canto de 2,90 metros. Es una celosía tipo Pratt, donde sus diagonales trabajan a tracción y tienen una inclinación de 45°. Toda la cubierta esta arriostrada lateralmente con cruces de san Andrés. En la zona del voladizo este arriostramiento cobra mayor importancia debido a la compresión que debe soportar el cordón inferior. En este caso el arriostramiento lateral se realiza con unos perfiles HEA-140 (*fig. 180*).

La celosía se apoya en muros, pilares de hormigón y en una celosía transversal del eje F (*fig. 181*). El voladizo se inicia en este último apoyo. El peso de la estructura es de 26,85kN.

Esta estructura forma parte de 8 cerchas principales que soportan una “fachada suspendida”, con una distancia entre ejes de 6 metros. En nuestra evaluación consideraremos esta fachada como una carga muerta. Esta carga, aplicada a nuestro voladizo, será complementada con las fuerzas que se generen por efecto del viento. Al ser un voladizo de estructura ligera, el viento puede provocar efectos de inversión de esfuerzos.

Las cargas que se han considerado en el estudio y que son las mismas cargas consideradas en el proyecto original, son las siguientes:

Cuadro de Cargas

Cubierta Principal		
CP	1,80 kN/m ²	
SU	1,00 kN/m ²	Cubierta no transitable
Nieve	0,30 kN/m ²	La carga real es 0,50kN/m ² pero considerando su inclinación se ha reducido
Viento	0,28kN/m ²	Presión (perpendicular a la cubierta)

Sub-estructura de Fachada		
PP	54,86kN	Estructura de soporte (ancho de banda=6mts)
CP	133,35 kN	Paneles en fachada (ancho de banda=6mts)
Viento	1,10 kN/m ² 0,69 kN/m ²	Presión (perpendicular a la fachada) Succión (perpendicular a la fachada)

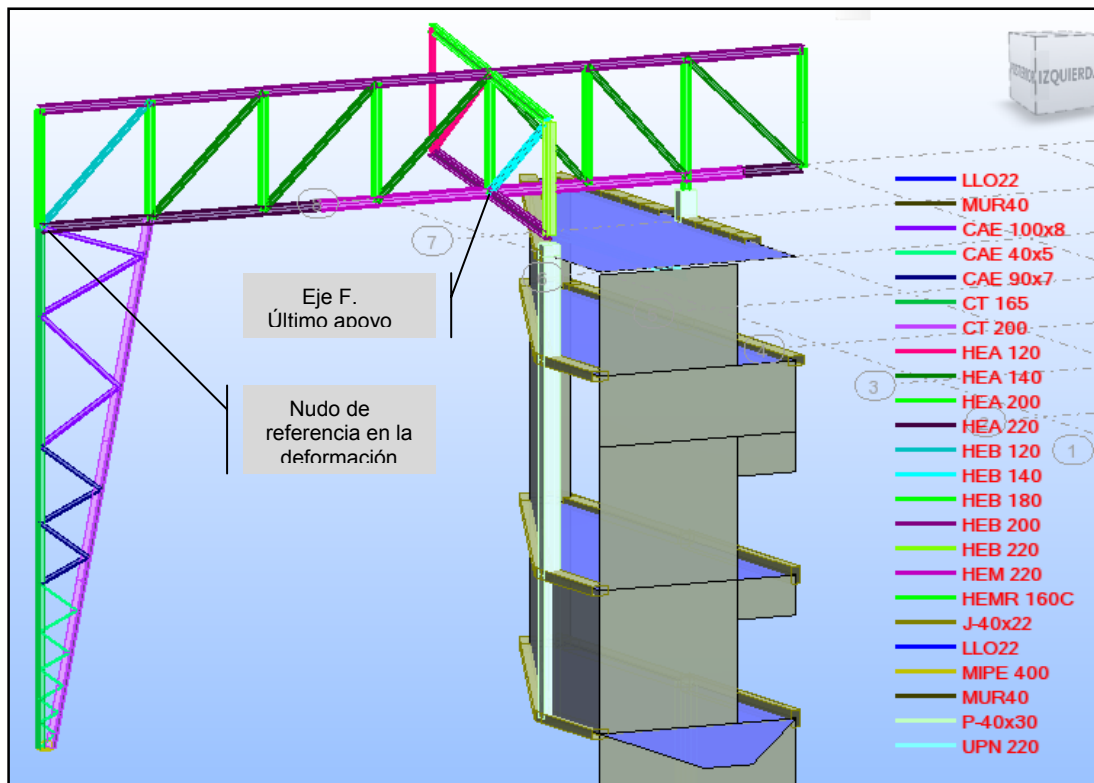


Fig. 182: Alzado de voladizo (Modelo estructural del proyecto)

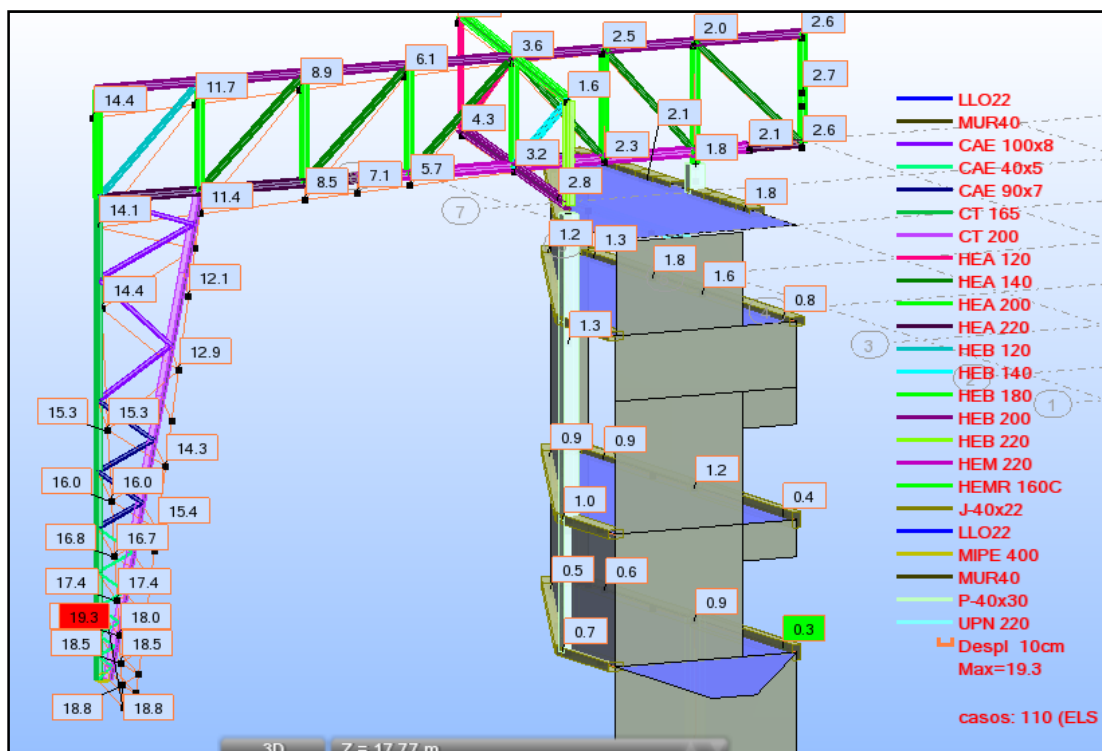


Fig. 183: Deformación de voladizo (Modelo estructural del proyecto). El voladizo tiene una flecha de 10,90mm.

5.3.1. Optimización de Celosía en voladizo

Este estudio ha sido enfocado como los dos casos anteriores, donde la modulación es un criterio a respetar y donde las cotas de nivel no deben generar grandes cambios en el proyecto actual.

La altura de nuestro canto inicial será inferior a la del canto del proyecto, que es de 2,90m. En nuestra propuesta este canto será un quinto del voladizo, es decir 2,30 metros. En la evolución de la celosía se permitirá que el nudo superior pueda llegar a una cota de +3,50 metros, considerando la cota 0 el nivel de los apoyos. En el caso del cordón inferior este podrá descender un canto inicial, es decir 2,30 metros, bajo el nivel de los apoyos.

En este caso, también existe un cambio de tipología estructural de cercha. Se pasa de una cercha Pratt a una Warren. Esta modificación no afectaría en gran magnitud a la estructura, dado que la modulación del proyecto original se repite en la nueva propuesta.

Por último, las cargas que afecten a la fachada suspendida, ya sea cargas de peso propio, cargas permanentes y de viento, serán consideradas como cargas puntuales en los dos nudos inferiores del voladizo. Cada caso de carga será aplicado en nuestra “tabla de cargas” individualmente y no como una carga global externa.

En el caso de los apoyos, sólo permitiremos movimientos verticales en el nudo superior de la zona de soporte. Esta restricción la realizamos teniendo en cuenta que existe una continuidad de la cercha y nos interesa obtener una fuerza de tracción, para verificar si la estructura contigua puede soportar los esfuerzos que hemos generado. El nudo inferior será fijo.

A. Inicio de Propuesta en el programa (Voladizo)

Se realiza la introducción de todos los datos geométricos, ya comentados.

En el caso de la sección inicial, se selecciona el perfil HEA-240. Sabemos que este perfil es más pequeño que la sección real, un HEB-280. No obstante, queremos observar si en la nueva configuración de la celosía este perfil puede funcionar.

El beta de pandeo será 1, considerando que el cordón comprimido se encuentra arriostrado lateralmente por la estructura que soporta la losa colaborante de la estructura superior.

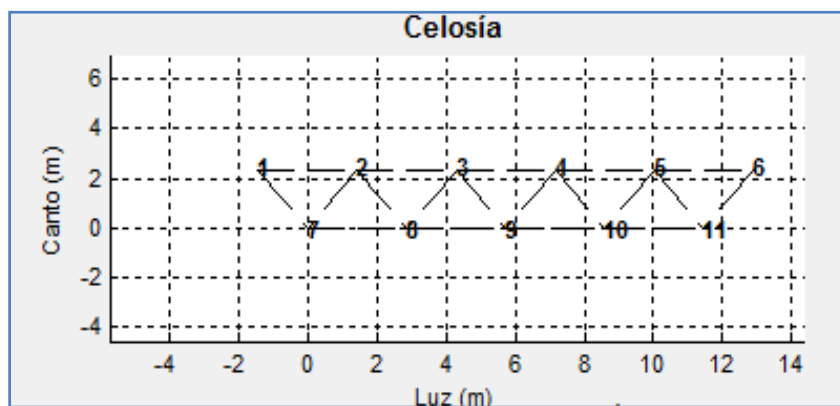


Fig. 184: Esquema estructural de Celosía

Los casos de cargas y combinaciones que tenemos en la nueva estructura, son las siguientes:

Casos de cargas

		NUDOS SUPERIORES					
		1	2	3	4	5	6
	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)					
Cubierta Superior	cp	-14.6	-29.20	-29.20	-29.20	-29.20	-14.60
	su	-8.1	-16.20	-16.20	-16.20	-16.20	-8.10
	nieve	-4.1	-8.10	-8.10	-8.10	-8.10	-4.10
	vx	-2.3	-4.50	-4.50	-4.50	-4.50	-2.30

		NUDOS INFERIORES					
		7	8	9	10	11	
	Casos	CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)					
Cubierta inferior	cp		-14.6	-29.20	-29.20	-14.60	
	su		-8.1	-16.20	-16.20	-8.10	
Efecto de Estructura inferior	ppb	-37.00	-18.00				
	cp	-84.45	-48.90				
	VX	-18.70	-7.60				
	vy	106.50	-79.20				
	-VX	24.25	6.80				
	-vy	-219.30	171.60				

	Casos	CARGAS HORIZONTALES EN LOS NUDOS (kN)					
Efec. Estruct. Inf.	vy	-48.3					
	-vy	92.6					

Combinaciones de cargas

Nº	Comb	pp y ppb	cp	su	nieve	vx	vy	n_vx	n_vy	Comb
1	els	1	1	1						els
2	elu	1.35	1.35	1.5						elu
3	elu_nieve	1.35	1.35		1.5				0.75	elu_nieve
4	elu_vx	1.35	1.35	1.5		0.9				elu_vx
5	elu2_vx	1.35	1.35	1.05		1.5				elu2_vx
6	elu3_nvz	1.35	1.35	1.5				0.9		elu3_nvz
7	elu4_nvz	1.35	1.35	1.05				1.5		elu4_nvz
8	elu_vy	1.35	1.35	1.5			0.9			elu_vy
9	elu2_vy	1.35	1.35	1.05			1.5			elu2_vy
10	elu3_nvz	1.35	1.35	1.5					0.9	elu3_nvz
11	elu4_nvz	1.35	1.35	1.05					1.5	elu4_nvz

En los apoyos consideramos que el nudo del lado derecho inferior, nudo 11, será un apoyo fijo en ambas direcciones y el nudo superior derecho, nudo 6, será móvil en el eje "Y".

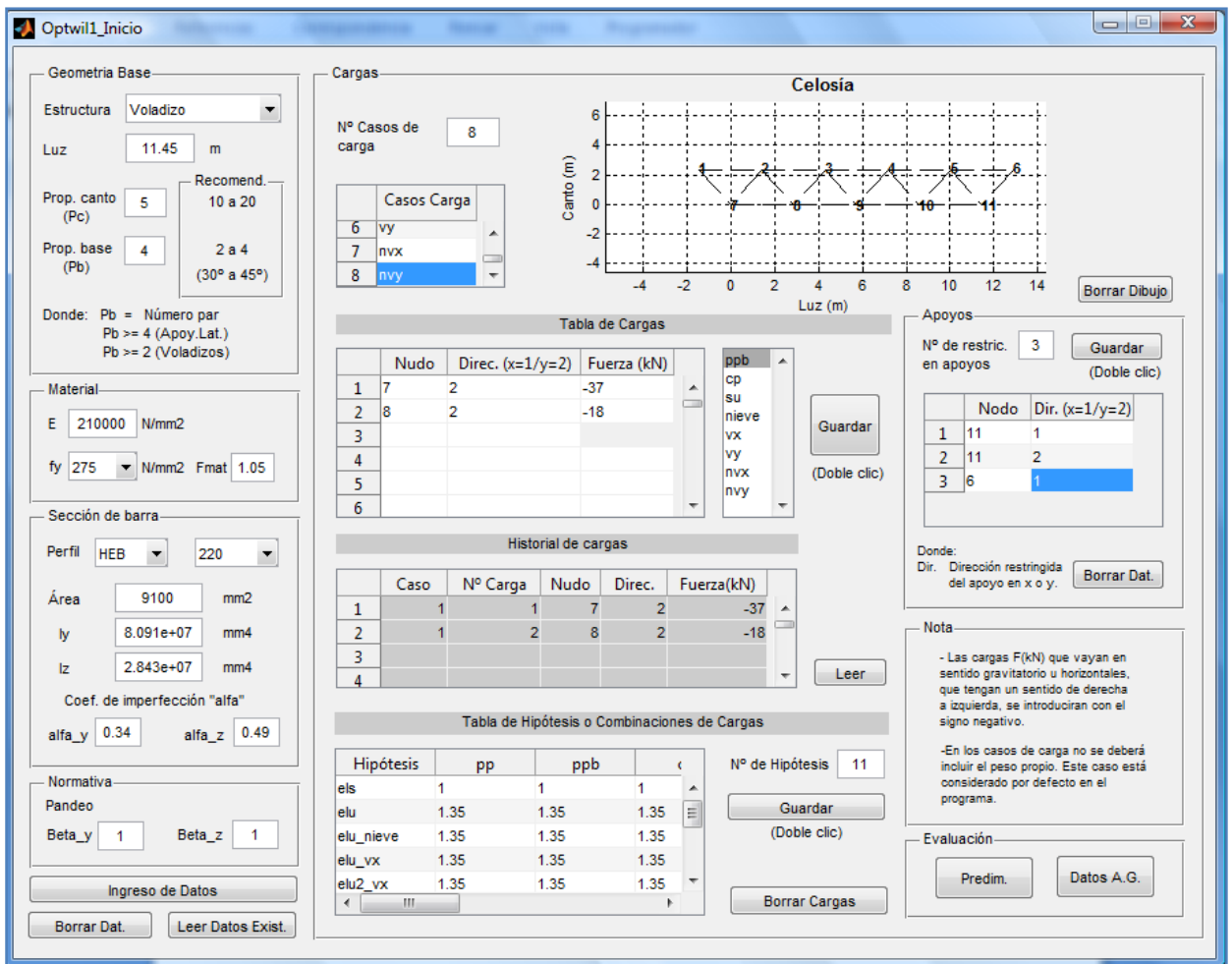


Fig. 185: Introducción de datos en la ventana de inicio

B. Comprobación de Cálculo (Voladizo)

Luego de conocer los estados de cargas del proyecto, realizamos una comprobación de cálculo.

Esta comprobación se realiza calculando nuestra celosía base en un programa comercial llamado "Robot Structural Analysis". Los resultados de este último modelo se compararán con los resultados de nuestro panel de pre-dimensionado. Tanto el nombre de las barras como el de los nudos son iguales en los dos modelos.

La evaluación se realizará considerando las combinaciones 1 y 2, es decir, las del estado límite de servicio (ELS) y las del estado de servicio último (ELU). Se puede ver con más detalle en el cuadro de combinaciones de cargas.

Resultados del Programa OPTIWIL

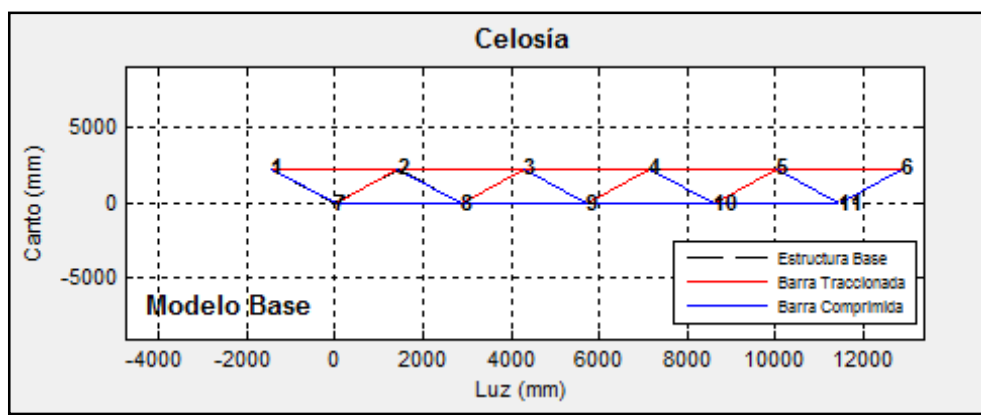


Fig. 186: Esquema de distribución de esfuerzos

Celosía Optimizada	
Resultados Globales	
F.max (mm)	-76.0870
F.cent./vol.	-65.8339
F.adm (mm)	76.3333
PP(kN)	15.0860
Rend. Global	0.8254

Fig. 187: Resumen de resultados Globales

Resultados de Esfuerzos en cada barra										
Barra	Ni	Nj	A (mm ²)	Perfil	Sec.	Fsd (kN)	Tens. (N/mm ²)	Frd (kN)	Rd. Local	Comb.
1	1	2	764	IPE	80	20.1018	26.3112	200.0952	0.1005	elu
2	2	3	1320	IPE	120	306.4912	232.1903	345.7143	0.8865	elu
3	3	4	3340	IPN	200	828.6137	248.0879	874.7619	0.9472	elu
4	4	5	6100	IPN	280	1.5155e+03	248.4463	1.5976e+03	0.9486	elu

Fig. 188: Resultados de los esfuerzos en cada barra, considerando la combinación ELU

Resultados del Programa ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS

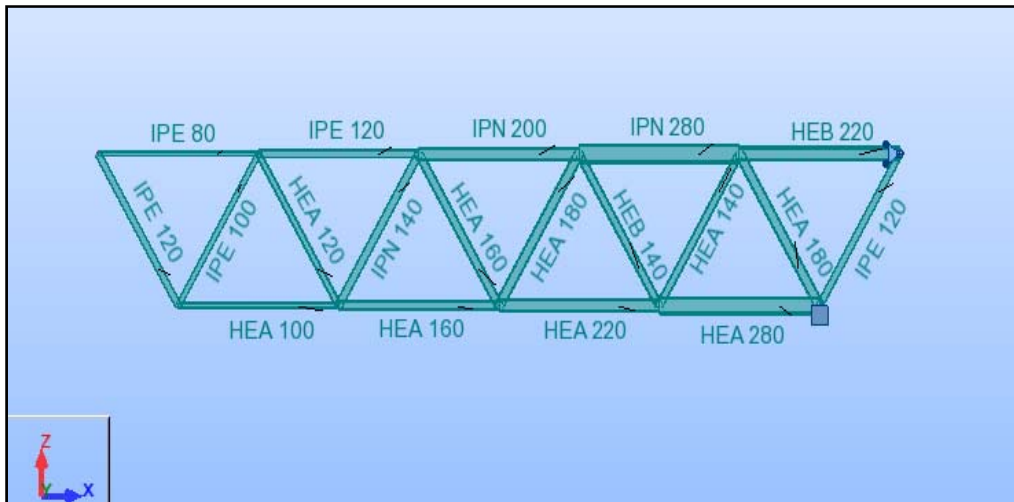


Fig. 189: Modelo de celosía (PP = 15,67kN)

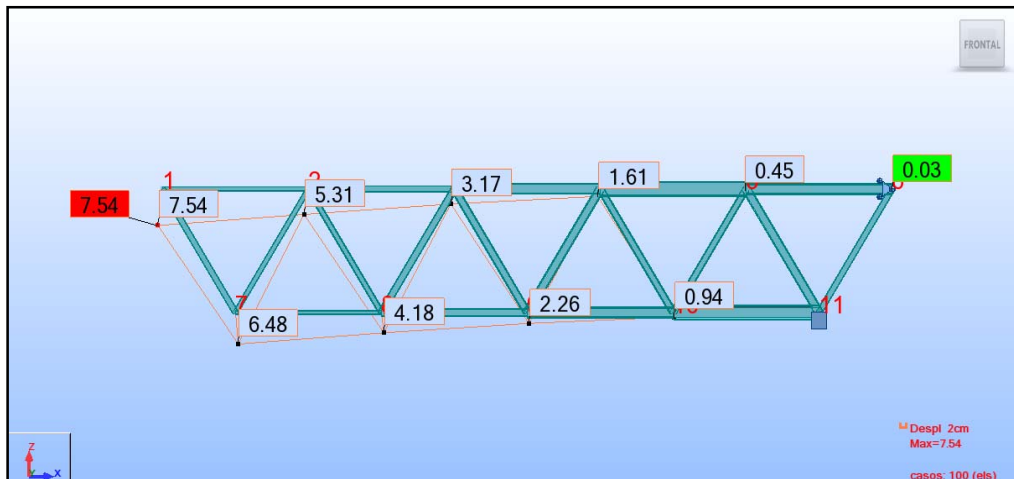


Fig. 190: Deformación (ELS). La flecha inferior es de 8,9cm

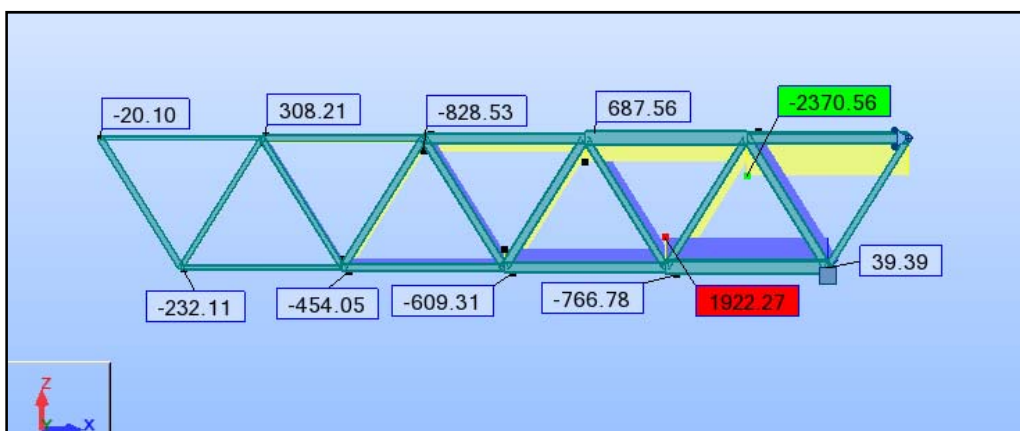


Fig. 191: Diagrama de axiles de celosía

Tabla de comparación de Esfuerzos

	Barra	Ni	Nj	Perfil	Sec.	OPTWIL			ROBOT		Comb
						Esfuerzo (kN)	Resistencia	Rend.	Esfuerzo (kN)	Rend.	
BARRA SUP.	1	1	2	IPE	80	20.10	200.10	0.101	20.10	0.100	elu
	2	1	3	IPE	120	306.49	345.71	0.887	306.47	0.840	elu
	3	2	4	IPN	200	828.61	874.76	0.947	828.53	0.900	elu
	4	3	5	IPN	280	1515.50	1,597.60	0.949	1515.87	0.900	elu
	5	4	6	HEB	220	2369.70	2,383.30	0.994	2370.56	0.950	elu
BARRA INF.	6	5	7	HEA	100	-143.13	212.98	0.672	-143.11	0.640	elu
	7	6	8	HEA	160	-547.17	655.16	0.835	-547.11	0.800	elu
	8	7	9	HEA	220	-1151.40	1,324.60	0.869	-1151.47	0.830	elu
	9	8	10	HEA	280	-1921.60	2,188.80	0.878	-1922.27	0.840	elu
DIAG.	10	11	12	IPE	120	-37.93	63.69	0.596	-37.92	0.570	elu
	11	11	13	IPE	100	232.12	269.76	0.861	232.11	0.820	elu
	12	12	14	HEA	120	-308.23	346.50	0.890	-308.21	0.850	elu
	13	13	15	IPN	140	454.11	479.29	0.948	454.05	0.910	elu
	14	14	16	HEA	160	-531.03	685.05	0.775	-530.97	0.740	elu
	15	15	17	IPE	180	609.06	625.95	0.973	609.31	0.490	elu
	16	16	18	HEB	140	-687.00	696.40	0.987	-687.56	0.940	elu
	17	17	19	HEA	140	766.26	822.38	0.932	766.78	0.890	elu
	18	1	11	HEA	180	-845.39	868.20	0.974	-845.84	0.930	elu
	19	2	11	IPE	120	-39.41	63.69	0.619	-39.39	0.590	elu

Los resultados que se han obtenido en la evaluación, nos confirma que el programa OPTWIL, desarrollado para esta investigación, funciona adecuadamente.

Los resultados de los esfuerzos en los dos programas son similares. La deformación de 64,8mm, que se observa en el programa Robot, es muy parecida a la deformación a la flecha de voladizo de 65,83mm (*fig.187*).

En el caso del peso propio, la diferencia es mínima. En el programa Robot tenemos un peso propio de 15,67kN y en el programa OPTWIL tenemos 15,86kN (*fig.187*).

Podemos concluir, que el proceso optimización puede continuar ejecutándose, ya que no observamos problemas en el funcionamiento del programa OPTWIL.

C. Pre-dimensionamiento (Voladizo)

En la **fig.192** se observa dos cuadros resumen del análisis que se realiza en esta etapa de pre-dimensionamiento. Se aprecia que en la celosía inicial, con una sección HEB-220 en toda la estructura, los resultados son negativos. En este caso, la estructura ha colapsado. La sección inicial no ha podido resistir los esfuerzos máximos de compresión de 1996,5kN y de tracción de 2460 kN. El rendimiento es de 1,05 en el perfil comprimido y 1,03 en el perfil traccionado.

El segundo cuadro, sin embargo, nos muestra un mejor resultado. El peso de la celosía se reduce el 44% con respecto a la celosía del proyecto, que pesa 26,85kN. Esta mejora se ha realizado ajustando las secciones en cada barra, sin llegar a superar su límite elástico. La flecha en esta solución sigue estando por el lado de la seguridad.

Celosía Inicial		Celosía Optimizada	
Resultados Globales		Resultados Globales	
F.max (mm)	0	F.max (mm)	-57.8950
F.cent./vol.	0	F.cent./vol.	-50.6392
F.adm (mm)	76.3333	F.adm (mm)	76.3333
PP (kN)	37.4542	PP(kN)	19.5788
Rend. Global	-1	Rend. Global	0.8556

Fig. 192: Cuadro Resumen de la Celosía Inicial y Celosía Optimizada

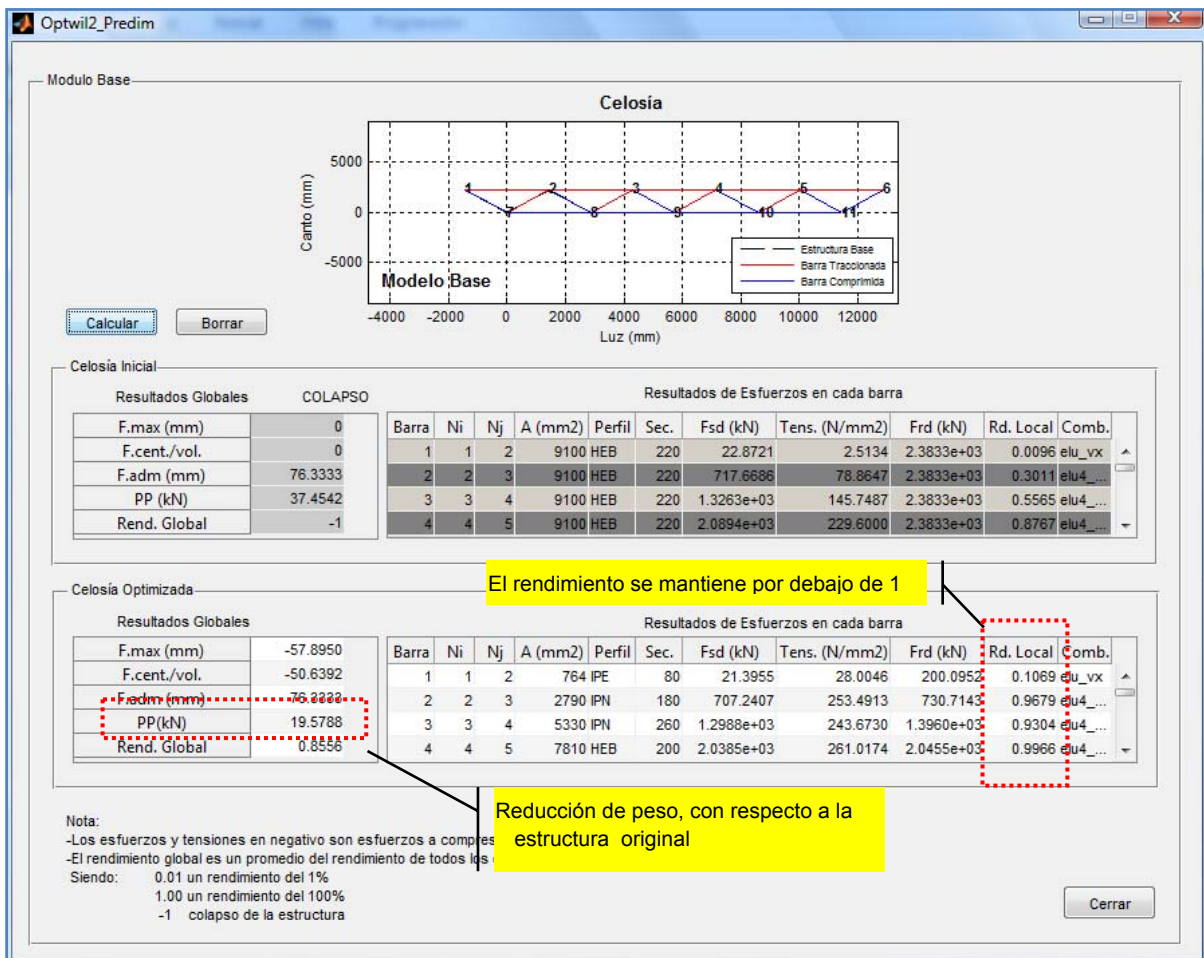


Fig. 193: Resultados del pre-dimensionamiento de Voladizo

D. Datos A.G. (Voladizo)

En la *fig.194* se presentan los datos que se han considerado en este proyecto. Se ha establecido que la estructura que evolucione será una combinación de la familia de estructuras Ascendentes y Descendentes. El movimiento vertical ascendente está limitado a una altura de 3,50 metros, sobre los apoyos. El límite de movimientos descendentes lo acotamos a una distancia de 2,30 metros, por debajo de los apoyos. En resumen, le damos más libertad a los movimientos descendentes que ascendentes debido a que queremos respetar la cota superior del proyecto.

Los porcentajes de Participación o Grado de Jerarquía de las funciones objetivo varían entre ellas, teniendo en cuenta, que en este estudio también nos interesa reducir el peso de la estructura más que mejorar el rendimiento tensional de la misma. Por esta razón, damos mayor importancia al puntaje de la “*Minimización de peso*”.

The screenshot shows the 'Optwil3_DatosAG' window with the following settings:

- Familia Estructural:** Fam. Estructural: Ambas
- Modificación Geométrica:**
 - Canto inicial (ca): 2.29 m
 - Altura evolutiva parcial: 0.5 m
 - Altura máx. sup. (sobre los apoyos): 3.5 m
 - Altura máx. inf. (bajo los apoyos): 2.3 m
 - Recomendación:**
 - 0.8 m = (ca/3)
 - 4.6 m = (2*ca)
 - 2.29 m = (ca)
- Población:**
 - Pob. inicial: 300
 - Nº Generaciones: 5
 - Recomendación:**
 - 224
 - 3
- Cruce y mutación:**
 - Cruce: Dos puntos de cruce
 - Mutación: Asimétrica
- Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo:**
 - Deformación: 30 %
 - Rendimiento Tensional: 10 %
 - Minimización de Peso: 60 %

Buttons: Ingreso de datos, Cálculo A.G., Cerrar

Fig. 194: Datos A.G

E. Cálculo A.G. (Voladizo)

Los resultados obtenidos nos muestran que se han evaluado 1503 modelos o individuos. De esta población hemos obtenido una población Elite, en la quinta generación, de 219 individuos.

La estructura que ha sobre salido en la familia Élite ha sido el Modelo 98.

El Modelo 98, es una estructura de canto variable (fig. 195). El mayor canto se encuentra en los apoyos y es de 3,29 metros, superior al canto real de 2,80. Los nudos inferiores del extremo izquierdo se encuentran un nivel superior que los nudos inferiores de la zona de soporte. La solución pertenece a la familia de estructuras Ascendentes.

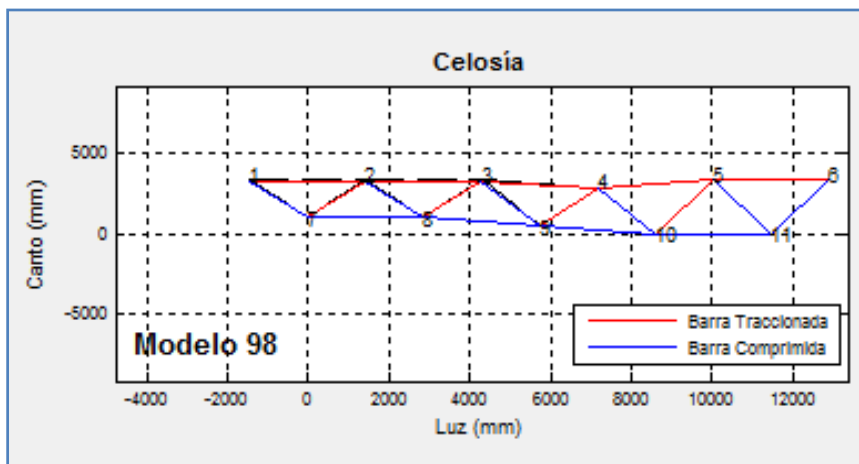


Fig. 195: Geometría Óptima del Voladizo-Modelo 98

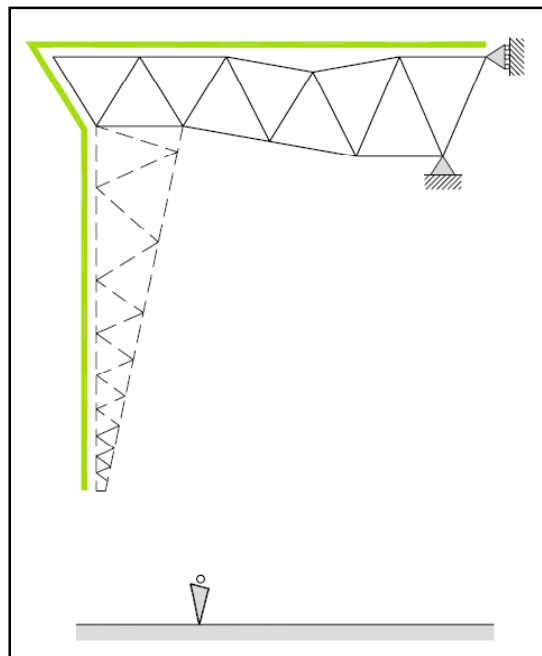


Fig. 196: Esquema estructural de solución

Los resultados de la Tabla de Comparación entre el “Modelo 0 y 98”, muestran que este último modelo supera en todos los aspectos al modelo inicial. La flecha inferior, la del voladizo, se reduce 10mm y tiene un resultado de 40,37mm. El rendimiento global tensional aumenta de 0,85 a 0,86 y por último, el peso se reduce de 19,57 a 17,30kN.

Nº Modelo		98			
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	465	-57.8950	-50.6392	0.8556	19.5788
98	1	-45.8842	-40.3739	0.8617	17.3049

Fig. 197: Tabla resumen del Modelo 98

También es importante destacar que el programa, aparte de considerar las reducciones de resistencia por pandeo de la barra, considera que los perfiles comprimidos no podrán tener una esbeltez mayor 200 y los perfiles traccionados no podrán pasar de 300.

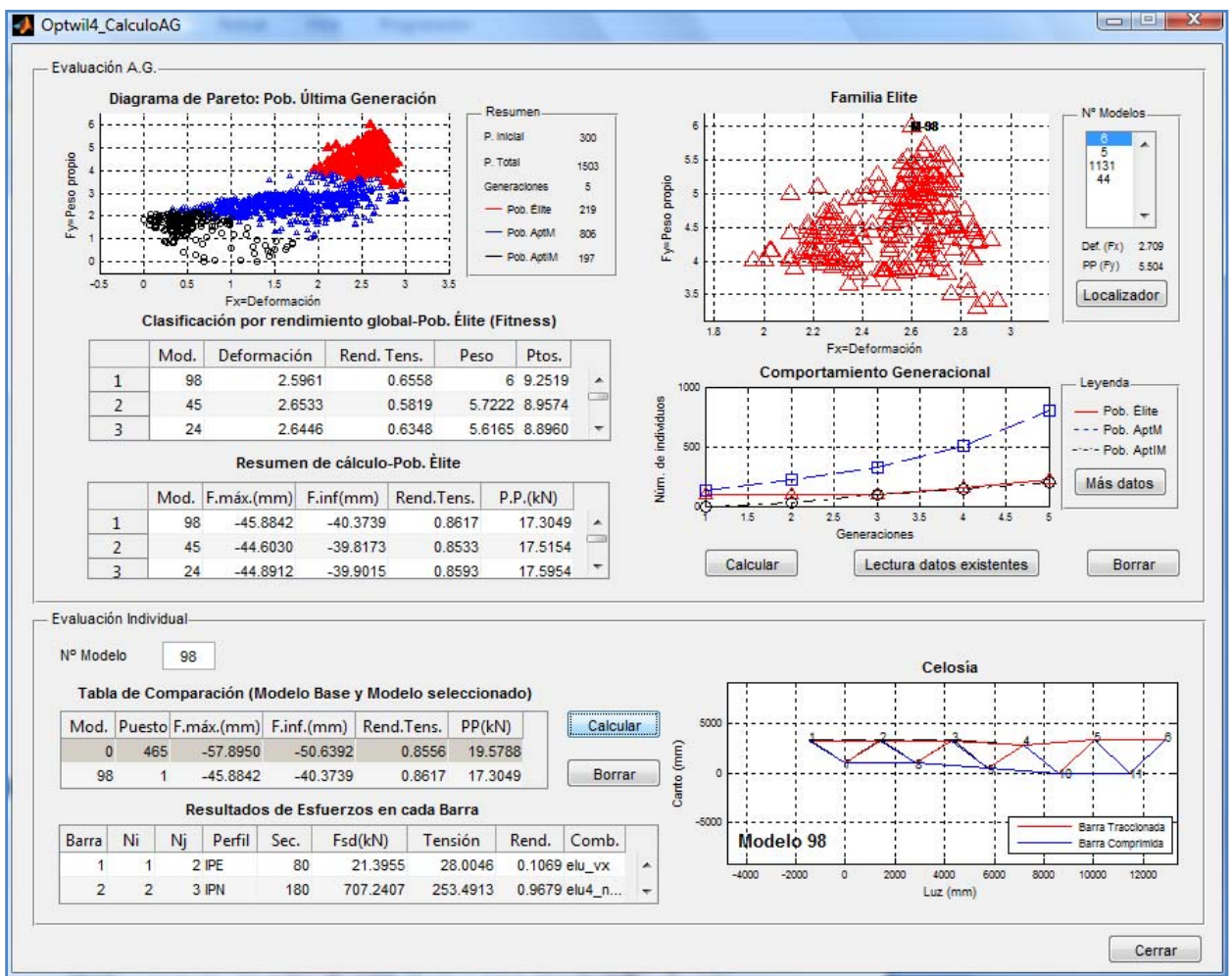


Fig. 198: Resultados del Cálculo A.G.

Cuando observamos los diagramas de la población de la última Generación (*fig.198*) se puede ver claramente la diferencia de las familias Élite, de Aptitud Media y de Aptitud inferior a la Media. En el diagrama de Familia Élite, el modelo con mayor puntuación, el individuo 98, destaca sobre toda la población. Este modelo tiene mayor puntaje con la función de peso que con la de deformación.

En el diagrama de la familia Élite (*fig.199*), el modelo con mayor puntaje, el modelo 98, se encuentra en el extremo del primer frente de Pareto. Esta ubicación nos indica que con la función de deformación su resultado es menor que otros modelos. Sin embargo, debido a que hemos dado mayor prioridad a la función de peso, el modelo que se obtiene como modelo óptimo es la estructura más ligera.

Por lo tanto, verificaremos si los modelos 5, 6 y 59, podrían ser elegidos como el modelo más óptimo para el investigador, desplazando así al modelo 98.

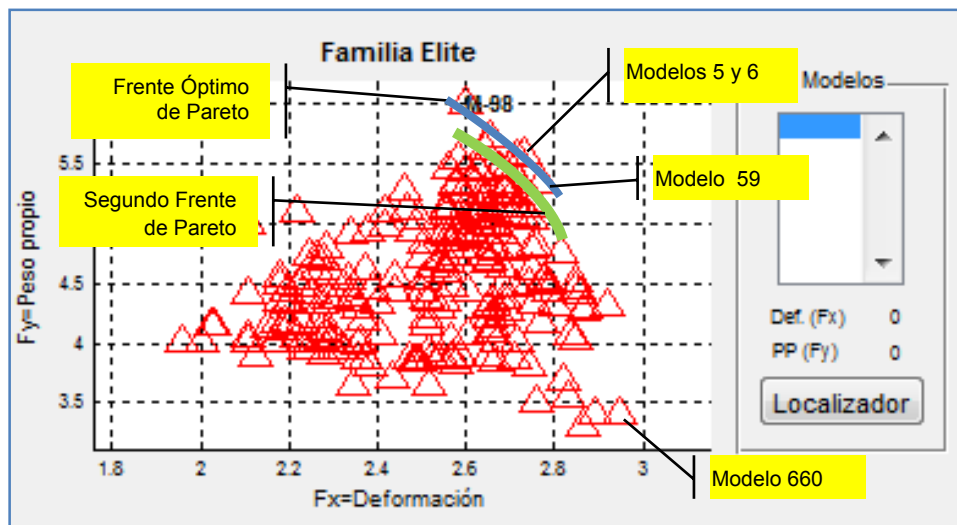


Fig. 199: Diagrama de Familia Élite de la Última Generación

Los modelos 5 y 6 tienen la misma geometría que el modelo 98. La diferencia de flecha no es tan grande, es sólo 1mm. En el caso del peso, los modelos 5 y 6 son 0,30kN más pesados, cerca del 2%. Las diferencias no son tan grandes entre los modelos pero se puede decir que el modelo 98 es mas óptimo.

Nº Modelo <input type="text" value="5"/>					
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	465	-57.8950	-50.6392	0.8556	19.5788
5	5	-44.2972	-39.0846	0.8411	17.6257

Nº Modelo <input type="text" value="6"/>					
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	465	-57.8950	-50.6392	0.8556	19.5788
6	4	-44.2747	-39.2287	0.8496	17.6357

Fig. 200: Tabla resumen de Modelos 5 y 6

Nº Modelo		59			
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	465	-57.8950	-50.6392	0.8556	19.5788
59	14	-43.7267	-38.6984	0.8349	17.7963

Fig. 201: Tabla resumen de los Modelos 6 y 59

En el caso del Modelo 59, la flecha de la estructura no es muy diferente al Modelo 98. La diferencia es de tan solo de 2mm. En el caso del peso, esta estructura 59 es más pesada que la estructura 5 y 6, y por ende que la 98. La diferencia de peso entre el Modelo 98 y 59 es de 0,43kN, cerca del 3%. Estos resultados nos muestran que el Modelo 98 sigue siendo la mejor elección dentro de todo este grupo, dado que la diferencia de peso es la característica más importante.

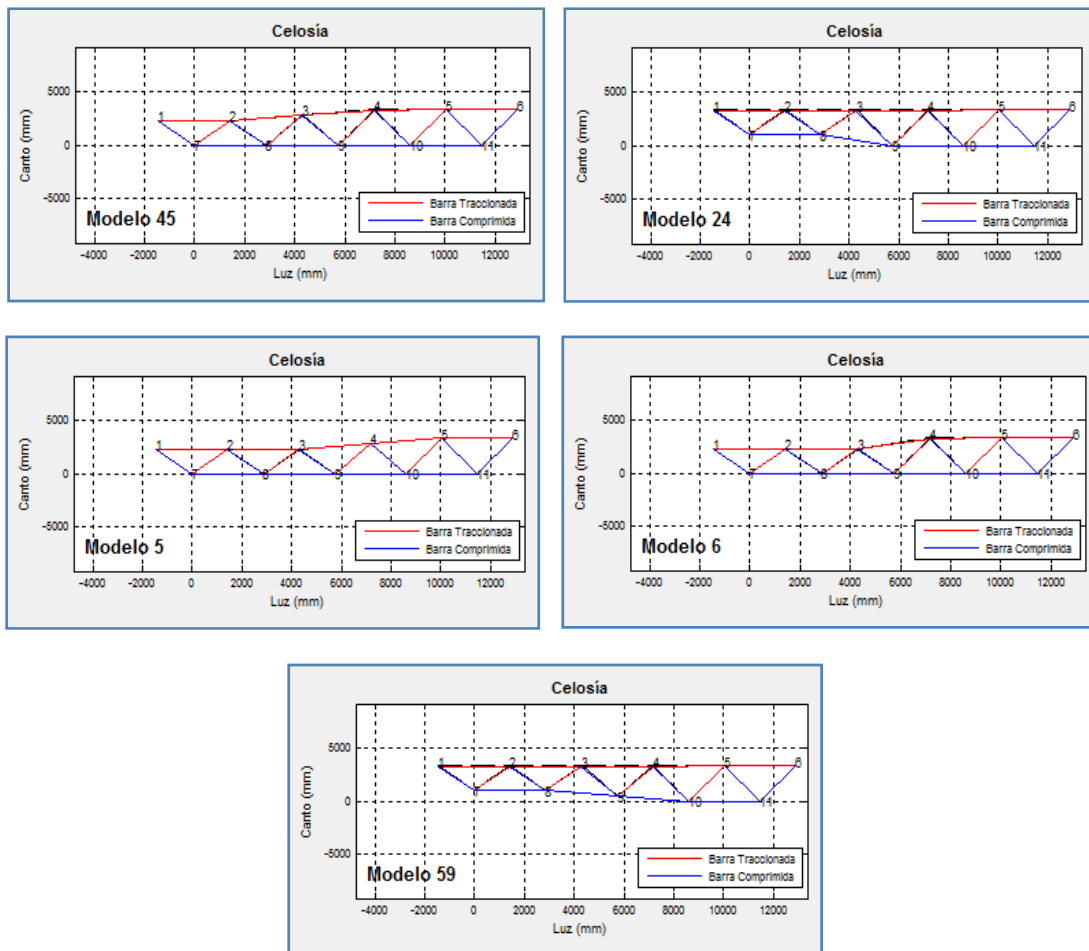


Fig. 202: Geometría de Modelos del Primer de Pareto

Por otro lado, encontramos al modelo que tiene mayor puntuación en la función de Deformación. Este Modelo es el número 660. Tiene una flecha inferior de 36,94mm y la estructura pesa 19,26kN.

El resultado de la flecha sigue sin diferenciarse mucho de la flecha del individuo 98, que es de 40,4 mm. No podemos elegir a este modelo como el más óptimo porque seleccionaríamos a

una estructura que ha disminuido muy poco su flecha y que su peso ha aumentado un 11% con respecto al mejor individuo, el modelo 98.

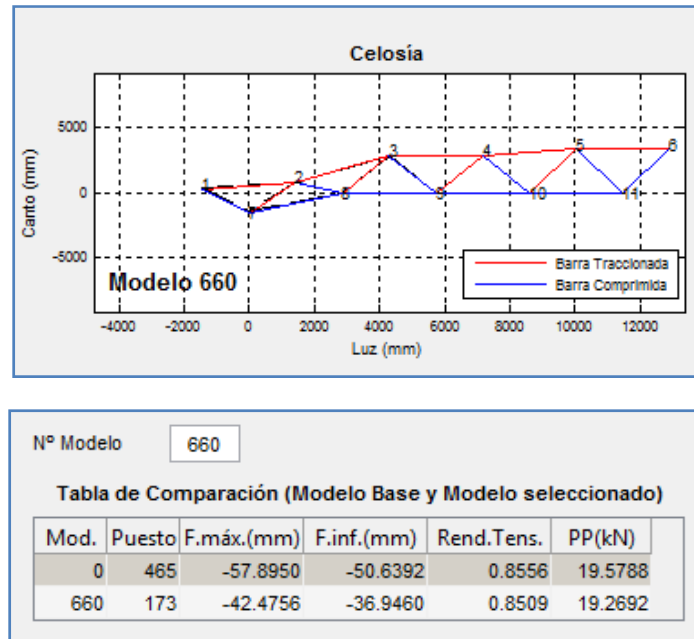


Fig. 203: Geometría y Tabla resumen del Modelo 660

El comportamiento generacional, en esta evaluación, presenta una campana de Gauss simétrica. El número de individuos de la población Élite es similar al número de individuos de la Población de Aptitud inferior a la Media (fig.204). La población de Aptitud Media crece más rápido que las otras dos poblaciones.

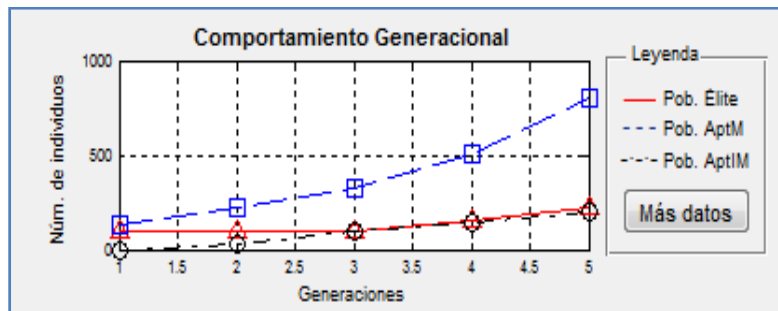


Fig. 204: Diagrama de Comportamiento Generacional

F. Detalles Evolutivos (Voladizo)

Los diagramas en esta plataforma nos ayudan a comprender que grado de participación tienen los diferentes operadores generacionales, como el cruce y la mutación.

En el diagrama Poblacional por Generaciones (fig.205) se observa que en cada generación la población inicial crece rápidamente. Este crecimiento notable se debe a que la mutación y los cruces están procreando individuos aptos para su inclusión en las nuevas generaciones. Es importante recordar que el cruce o la mutación no siempre generan individuos aptos, su selección y cruce es al azar.

En la tabla del “Diagrama Poblacional Última Generación”, se muestra que los mejores modelos de la familia Élite pertenecen a la población inicial, incluso llegan a ser modelos de la primera generación. Los cinco primeros puestos de la familia Élite son procedentes de la primera generación. Estos individuos son: el modelo 98, 45, 24, 6 y el 5.

El operador de cruce ha creado al sexto, séptimo y al décimo puesto, modelos 1321, 1131 y 1142, respectivamente. El mejor finalista del operador de mutación se encuentra en el puesto 66, Modelo 1364. Este finalista sigue perteneciendo a la familia Élite.

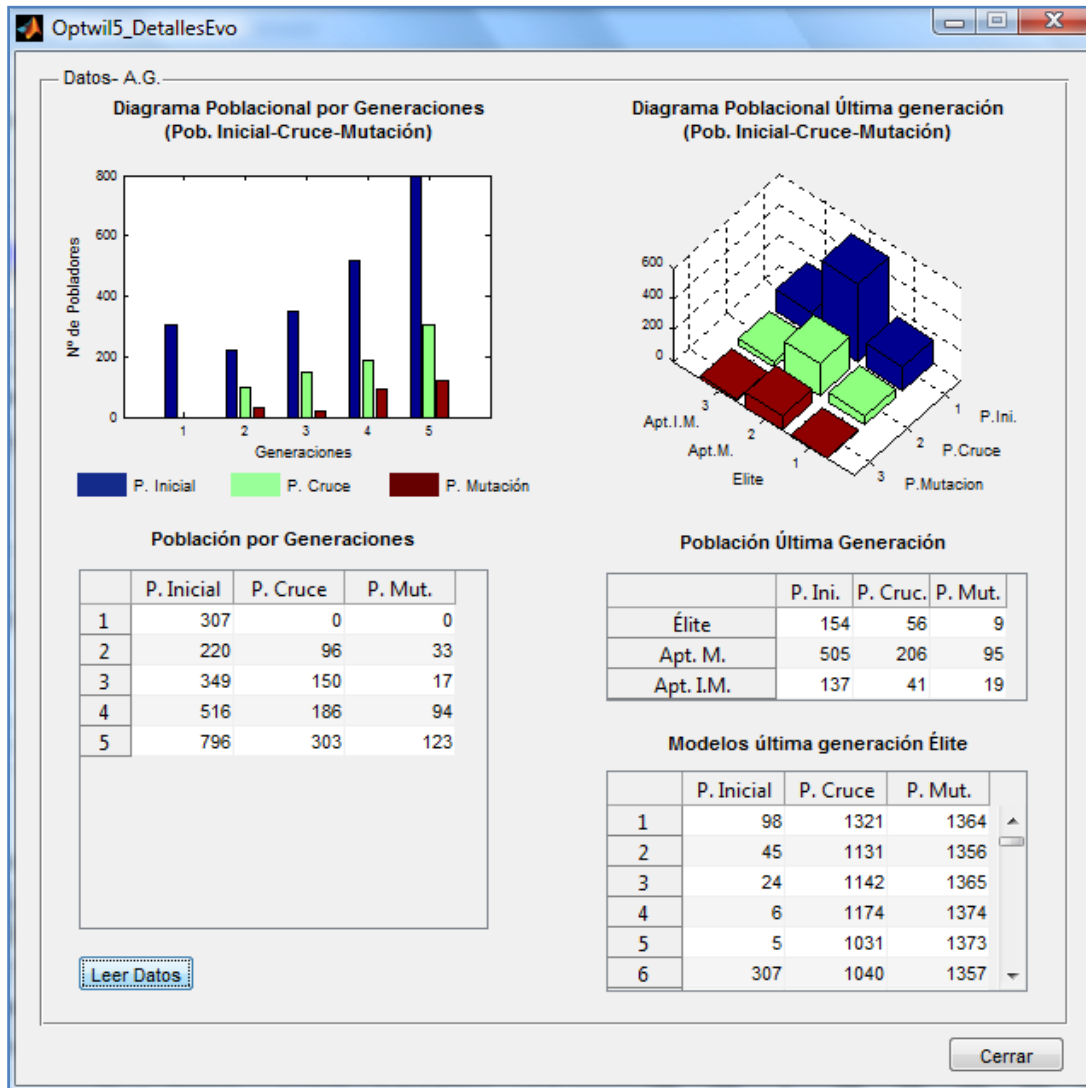


Fig. 205: Detalles Evolutivos de la Evaluación

Para concluir la evaluación de la Celosía en voladizo, podemos afirmar que el Modelo 98 es la mejor opción como modelo óptimo y que los modelos de su alrededor no han marcado diferencia a la hora de realizar las comparaciones. En la elección de esta estructura también puede contar el parámetro de forma. Este parámetro puede influir en caso que estemos buscando un modelo que tenga una misma cota para todos sus nudos superiores. Todo dependerá del investigador y de los requisitos que el establezca en su búsqueda de la estructura optima.

G. Reacciones (Voladizo)

Las reacciones que obtenemos en este panel nos ayudaran en el análisis del último ejemplo. En este caso las reacciones máximas se presentan cuando se considera el viento en dirección Y, es decir en dirección paralela al voladizo.

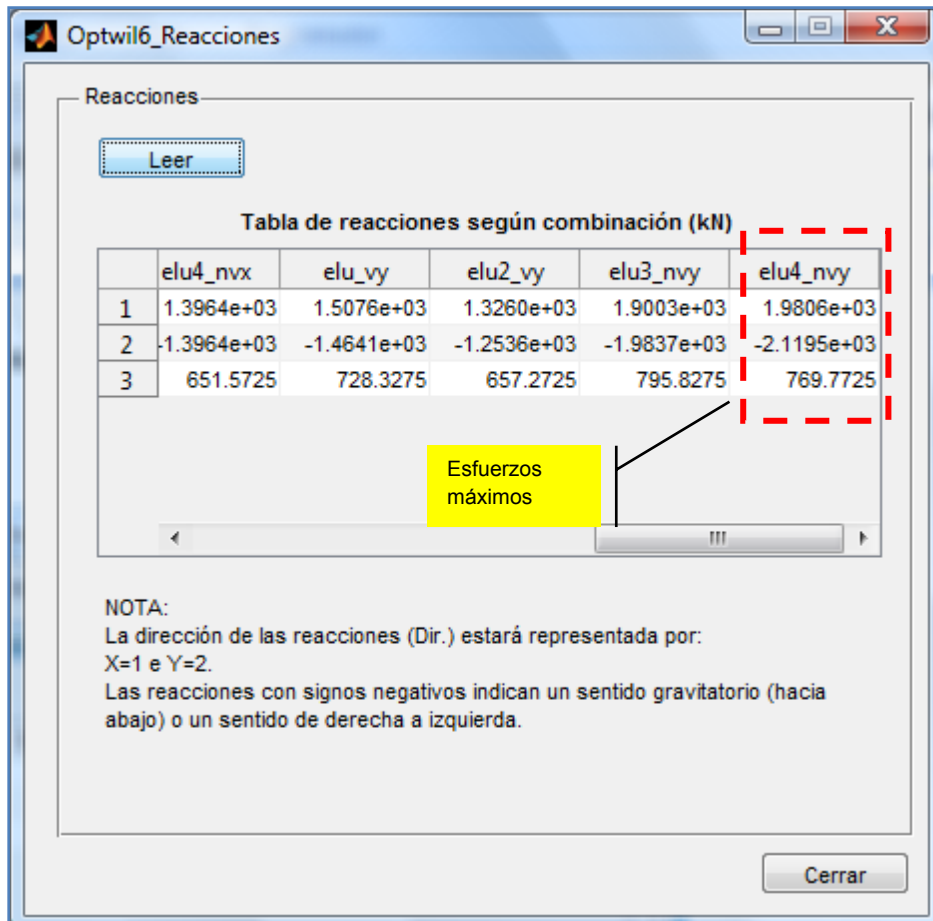


Fig. 206: Panel de reacciones

5.4. Estructura Apoyada-empotrada

En este ejemplo analizaremos la segunda parte de la celosía en voladizo del ejemplo 5.3. Esta celosía es una estructura que tiene una longitud total de 38,40 metros. El voladizo tiene 11,40 metros y la estructura que analizaremos, celosía 4, tiene 27,00 metros. Tiene un canto de 2,90 m y es una viga tipo Pratt, con diagonales trabajando en tracción. La geometría de esta estructura se puede apreciar en la *fig.207*.

La celosía 4 forma parte de la cubierta del auditorio, específicamente del escenario. Esta estructura, además de soportar las cargas de cubierta, soporta la carga de dos sub-estructuras de servicio, peine y contrapeine.

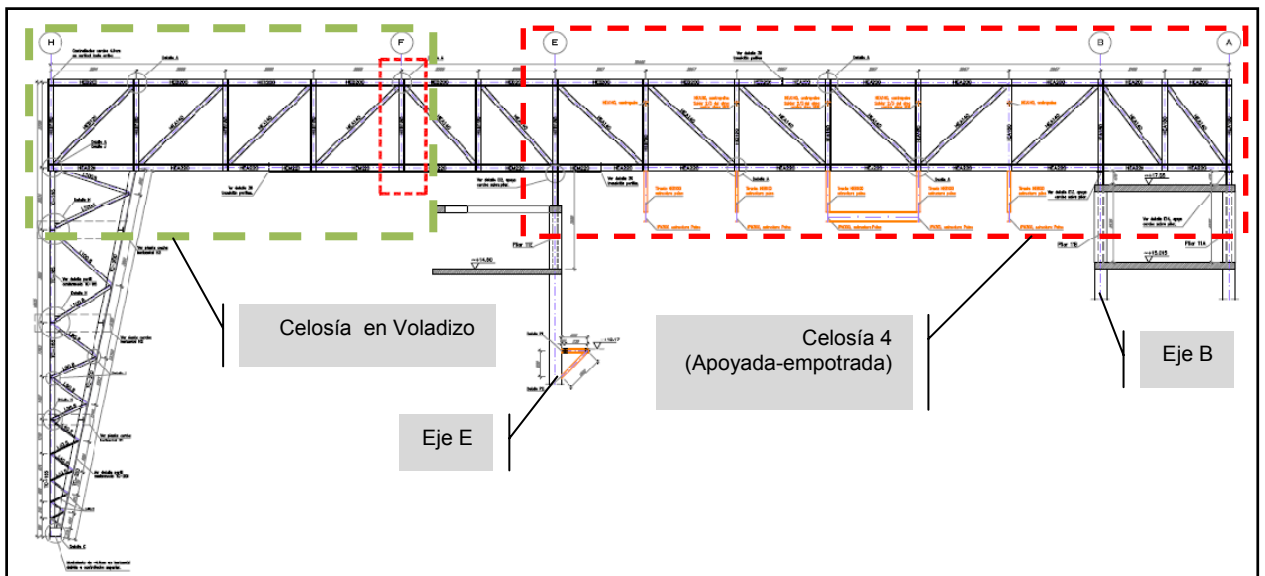


Fig. 207: Alzado del eje 11. Celosía Apoyada-empotrada con voladizo.

La estructura del peine y contrapeine soportan el peso de pasarelas, cargas de poleas importantes y cargas de motores. El contrapeine, ubicado por encima del peine, también cumple la función de arriostamiento lateral del cordón superior que se encuentra comprimido.

La cercha descansa sobre pilares mixtos. El primer tramo de estos pilares, conectados a la cercha, es metálico. Luego estos pilares se encuentran embebidos en pilares de hormigón. La luz en este sector, entre el eje B y E, es de 17,80 metros.

El cordón superior e inferior de esta celosía está compuesto por secciones HEA-200 y HEA-220. Los montantes son HEA-180 y las diagonales son HEA 140. En el sector del eje E los esfuerzos de tracción y compresión son mayores. En esta zona las secciones aumentan un nivel más. El cordón superior cambia a un perfil HEB-200 y el cordón inferior a un perfil HEM-200. El peso de la cercha es de 33,11kN. Para obtener el peso de la estructura se ha considerado la cercha que va del eje B al E.

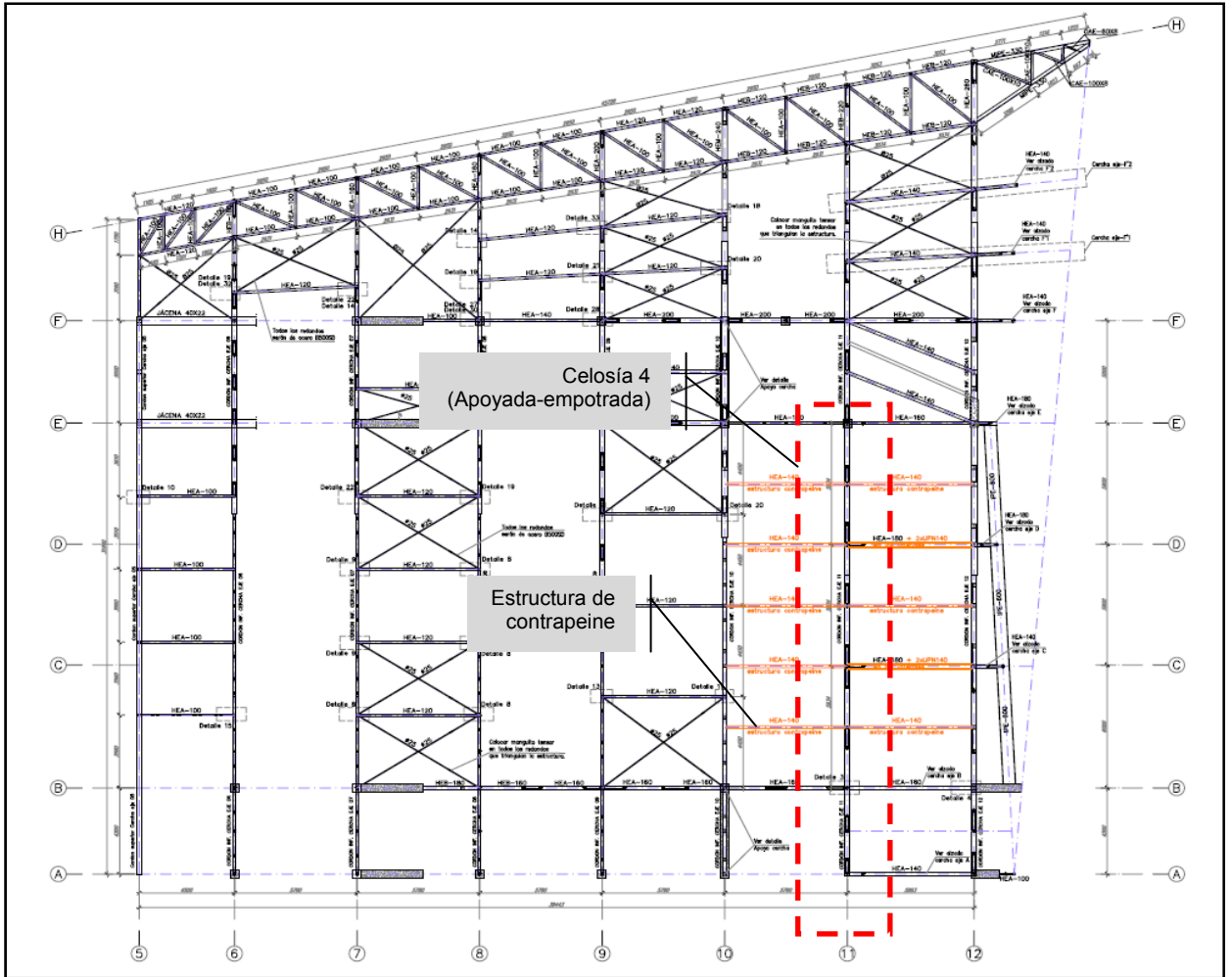


Fig. 208: Planta superior de Cubierta

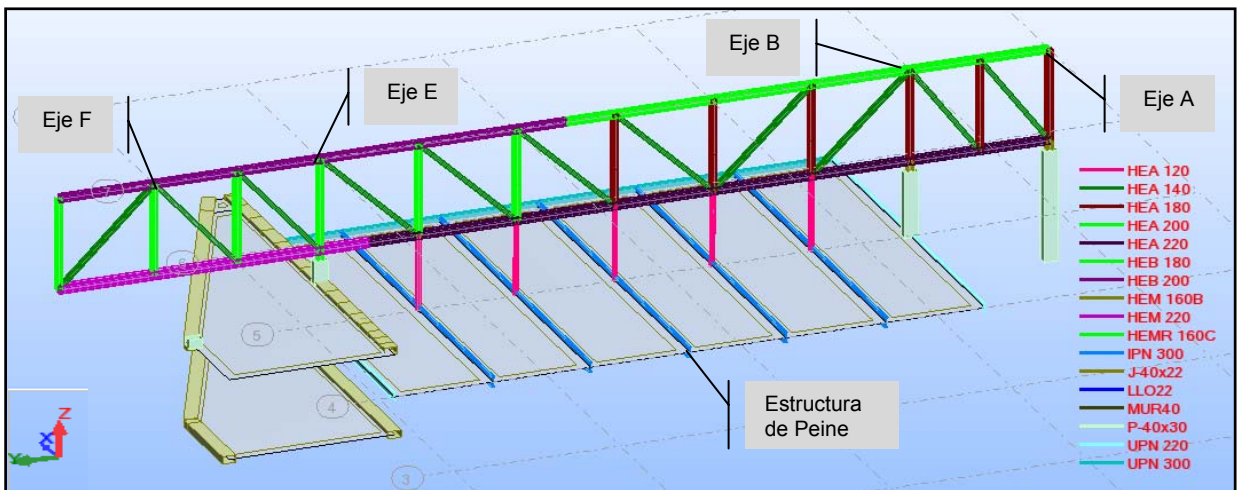


Fig. 209: Modelo de Celosía eje 11

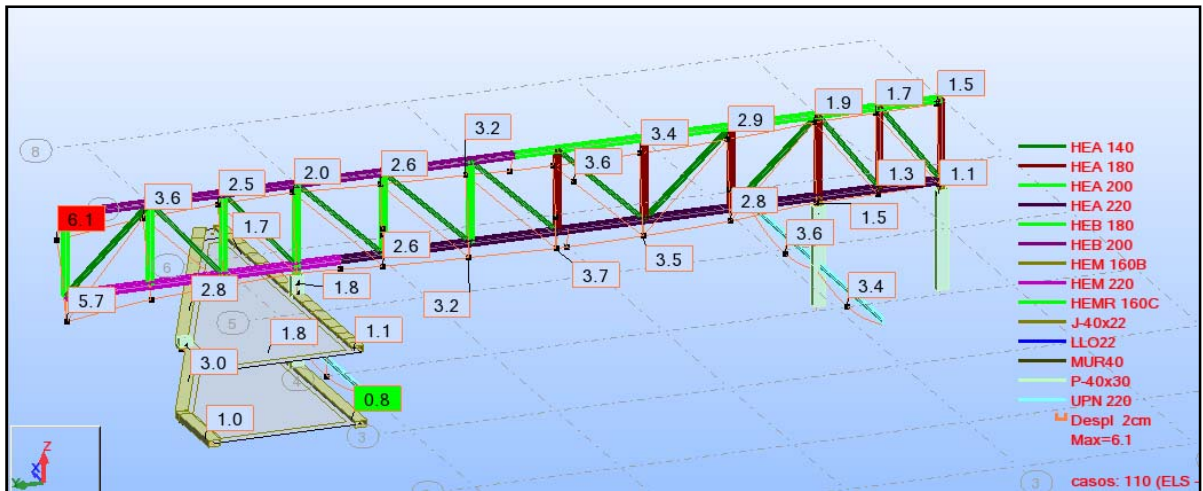


Fig. 210: Deformación de Cercha del eje 11.

La flecha máxima de estudio es 2,20cm, considerando la deformación de los pilares

Las cargas que se han considerado en el estudio y que son las mismas cargas consideradas en el proyecto original, son las siguientes:

Cuadro de Cargas

Cubierta Principal		
CP	1,80 kN/m ²	
SU	1,00 kN/m ²	Cubierta no transitable
Nieve	0,30 kN/m ²	La carga real es 0,50kN/m ² pero considerando su inclinación se ha reducido
Viento	0,28kN/m2	Presión (perpendicular a la cubierta)

Sub-estructura (Peine y Contrapeine)		
PP	29,50 kN	Estructura (ancho de banda=6mts)
CP	151,80 kN	Pasarelas (ancho de banda=6mts)
SU	321,70 kN	Equipos y otros (ancho de banda=6mts)

5.4.1. Optimización de Celosía apoyada-empotrada

Para realizar el estudio de esta celosía, que incluye un voladizo y un tramo de celosía con tres apoyos, es necesario que el programa OPTWIL sea capaz de optimizar una estructura con más de un tramo. Donde se estudie como la deformación del voladizo ayuda a reducir la flecha del tramo central, entre los ejes E y B; y donde también se estudie la distribución de esfuerzos máximos, tanto de tracción como de compresión. Un ejemplo importante de dichos esfuerzos máximos son los que se encuentran entre los ejes F y E, en este caso el efecto del voladizo es muy importante.

A pesar que OPTWIL no es capaz de optimizar una estructura de varios tramos de manera automática, creemos que el programa puede optimizar este tipo de estructuras continuas utilizando modelos equivalentes. Estos modelos equivalentes nos permiten estar muy cerca de la solución real.

En este caso el modelo equivalente de la celosía del eje 11 trabaja con las reacciones del voladizo y se introducen como cargas en la nueva estructura, que llamaremos celosía 4. Sabemos que el efecto de deformación no será transmitida por completo pero si garantizamos que los esfuerzos de compresión y tracción máxima que se producen alrededor del eje F, por efecto del voladizo, participen en la nueva cercha.

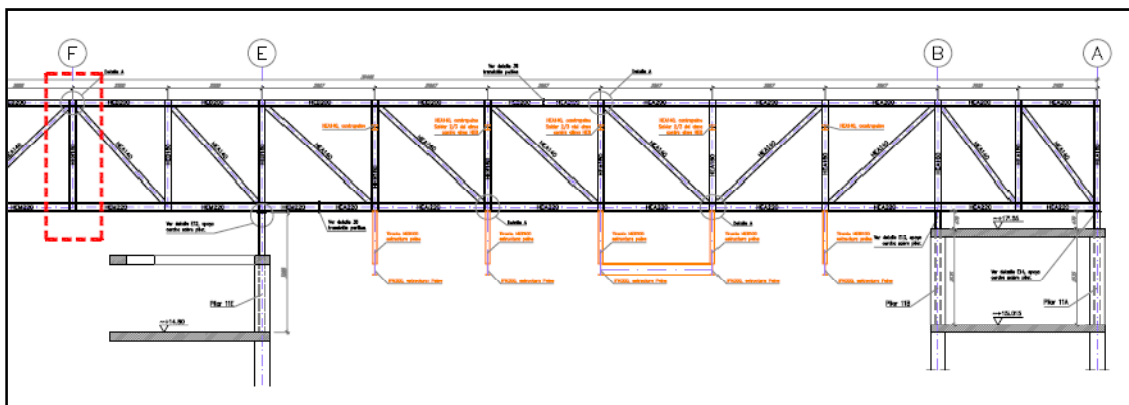


Fig. 211: Alzado de celosía del Eje 11

Para elaborar el “Modelo base”, que posteriormente optimizaremos, hemos seguido los siguientes pasos:

- Primero se ha analizado las reacciones del voladizo. Se ha considerado los datos obtenidos de la última evaluación, del punto 5.3. Se ha seleccionado las reacciones que consideraremos más perjudiciales.

Estas reacciones son las siguientes:

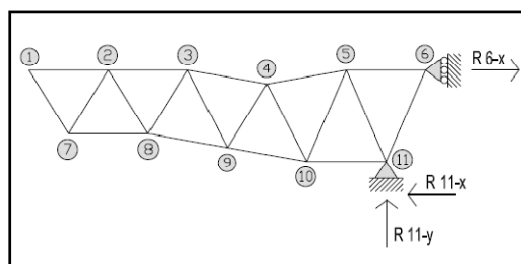


Fig. 212: Esquema Estructural de Voladizo Óptimo (Modelo 98)

Reacciones del Voladizo

		NUDOS			Esfuerzos Importantes
		11		6	
Estructura en Voladizo	Comb	R 11-x (kN)	R 11-y (kN)	R 6-x (kN)	
	els	-1,193.50	544.20	1,193.50	si
	elu	-1,641.90	752.89	1,641.90	si
	elu_nieve	-1,726.10	667.32	1,656.60	si
	elu_vx	-1,753.70	796.91	1,753.70	si
	elu2_vx	-1,736.30	771.57	1,736.30	no
	elu3_nvz	-1,549.80	724.91	1,549.80	no
	elu4_nvz	-1,396.40	651.57	1,396.40	no
	elu_vy	-1,464.10	728.33	1,507.60	no
	elu2_vy	-1,253.60	657.27	1,326.00	no
	elu3_nvz	-1,983.70	795.83	1,900.30	no
	elu4_nvz	-2,119.50	769.77	1,980.60	si

Las reacciones verticales no serán consideradas en el análisis de la nueva celosía, debido a que estas cargas afectan a la cercha transversal, ubicada en el eje F.

En el caso de las reacciones provocadas por el viento, se han considerado sólo dos combinaciones, una por sentido del viento, tanto en X como en Y. Es importante indicar que el viento en "X" es aquel que está orientado en sentido perpendicular a la cercha y el viento en "Y" está orientado en dirección a la cercha.

- Una vez que tenemos las reacciones seleccionadas, estas serán aplicadas como fuerzas en los nudos 8 y 15 de la celosía 4 (*fig.213*).
El apoyo en el nudo 15 es móvil, debido a que nos interesa transmitir la fuerza de compresión, proveniente del voladizo, a las barras del cordón inferior.
El apoyo fijo en el nudo 14 repite la restricción de movimientos del proyecto real.
Y el apoyo móvil en el nudo 7, nos permite tener una fuerza de tracción que es absorbida por la última parte de la celosía que se apoya en el pilar. Incluso en esta zona tenemos una diagonal que podría transmitir directamente esta tracción al apoyo en el eje A.
- Por último, se aplican las cargas permanentes, sobrecarga de uso, nieve y viento de cubierta. También se le suman las cargas de la estructura del peine y contrapeine.

La geometría inicial de la cercha sigue la misma modulación del proyecto real, se usan seis módulos. Sin embargo, su canto es inferior al del proyecto, tiene 1,17 metros menos. Esta celosía base tiene 1,80 metros de canto y su módulo mide 2,97 metros.

En este caso, también existe un cambio de tipología estructural de cercha. Se pasa de una cercha Pratt a una Warren. De acuerdo al esquema de la Celosía 4 (*fig.213*), se observa que el cambio de tipología no afectaría en gran magnitud al proyecto original.

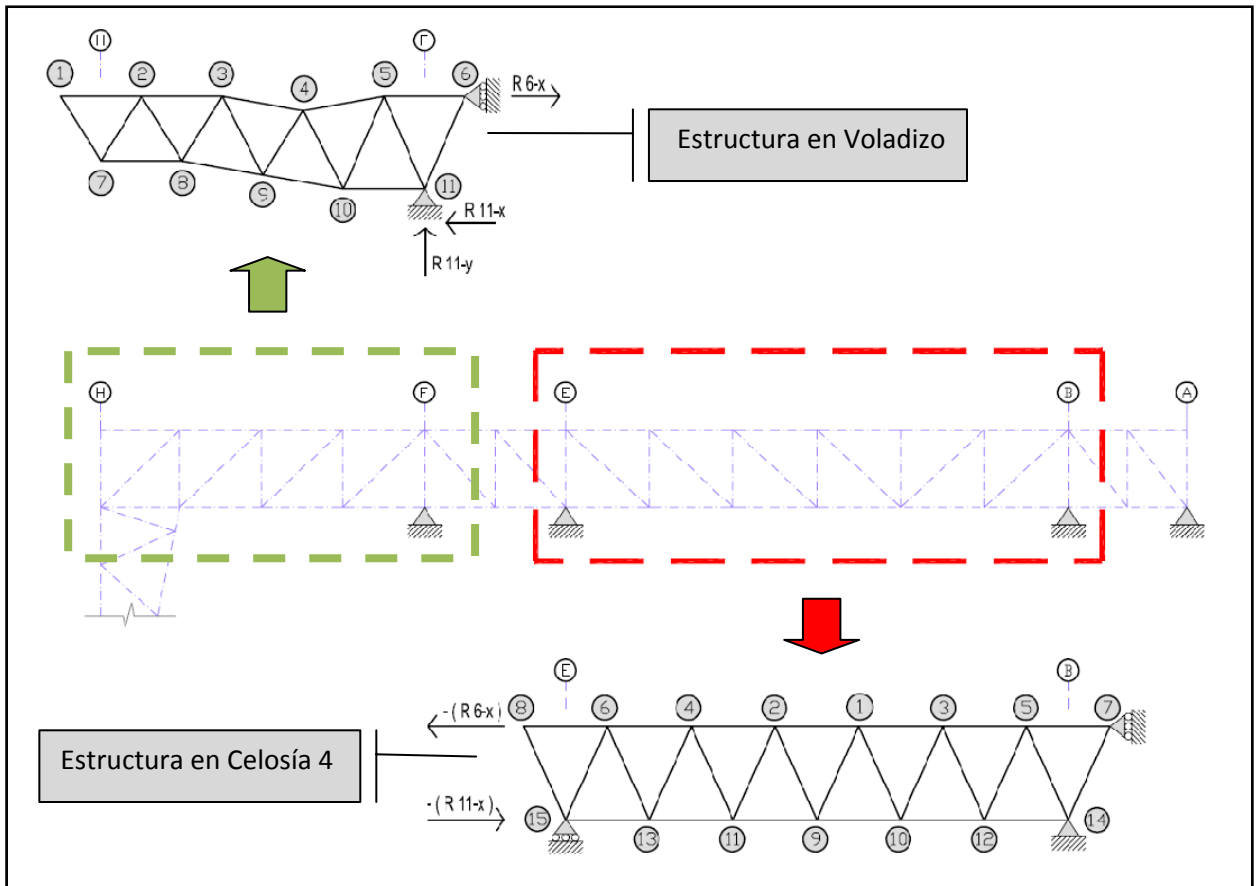


Fig. 213: Esquema estructural de Voladizo y Celosía 4.

Aplicación de cargas externas en Celosía 4 que sustituyen el efecto del voladizo

A. Inicio de Propuesta en el programa (Celosía 4)

Se realiza la introducción de todos los datos geométricos, ya comentados.

En el caso de la sección inicial, se selecciona el perfil HEB-220. Este perfil reemplaza a la sección real, HEA-200 y HEA-220. El aumento de sección se debe a la reducción del canto de la celosía. Al reducir el canto estamos reduciendo el brazo de palanca y por lo tanto, las fuerzas de compresión y tracción, en los cordones, aumentan.

El beta de pandeo será 1, considerando que el cordón comprimido se encuentra arriostrado lateralmente por la estructura del contrapeine.

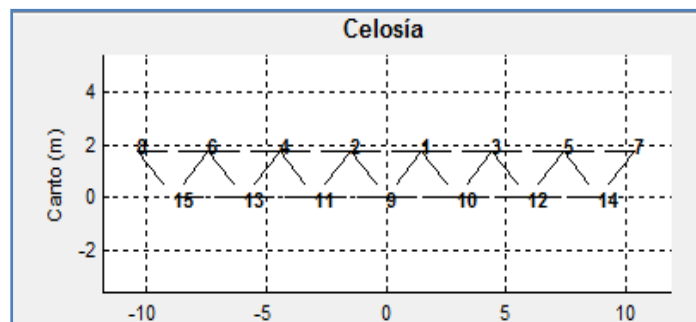


Fig. 214: Esquema estructural de Celosía

Los casos de cargas y combinaciones que tenemos en la nueva estructura, son las siguientes:

Casos de cargas

		NUDOS SUPERIORES							
		8	6	4	2	1	3	5	7
Casos		CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)							
Cubierta Superior	cp	-16.00	-32.10	-32.10	-32.10	-32.10	-32.10	-32.10	-16.00
	su	-8.90	-17.80	-17.80	-17.80	-17.80	-17.80	-17.80	-8.90
	nieve	-2.70	-5.35	-5.35	-5.35	-5.35	-5.35	-5.35	-2.70
	vx	-2.50	-4.98	-4.98	-4.98	-4.98	-4.98	-4.98	-2.50

		NUDOS INFERIORES							
		15	13	11	9	10	12	14	
Casos		CARGAS VERTICALES EN LOS NUDOS (kN)							
Estructura superior (Contrapeine)	ppb		-1.90	-1.90	-1.90	-1.90	-1.90		
	cp		-6.50	-11.80	-20.20	-11.80	-6.50		
	su		-8.30	-16.20	-16.20	-16.20	-8.30		
Estructura inferior (Peine)	ppb		-4.00	-4.00	-4.00	-4.00	-4.00		
	cp		-19.00	-19.00	-19.00	-19.00	-19.00		
	su		-51.30	-51.30	-51.30	-51.30	-51.30		

Casos de cargas por efecto del voladizo

		NUDOS	
		8	15
Comb		C. HORIZ. (kN)	
Efec. de la estructura en Voladizo	els	-1,193.5	1,193.5
	elu	-1,641.9	1,641.9
	elu_nieve	-1,656.6	1,726.1
	elu_vx	-1,753.7	1,753.7
	elu4_nvy	-1,980.6	2,119.5

Combinaciones de cargas

Nº	Comb	Cargas por efecto del voladizo									
		pp	cp	su	nieve	vx	v_els	v_elu	v_elu_neu	v_elu_vx	v_elu4_nvy
1	els	1	1	1			1				
2	elu	1.35	1.35	1.5				1			
3	elu_nieve	1.35	1.35		1.5				1		
4	elu_vx	1.35	1.35	1.5		0.9				1	
5	elu4_nvy	1.35	1.35	1.05							1

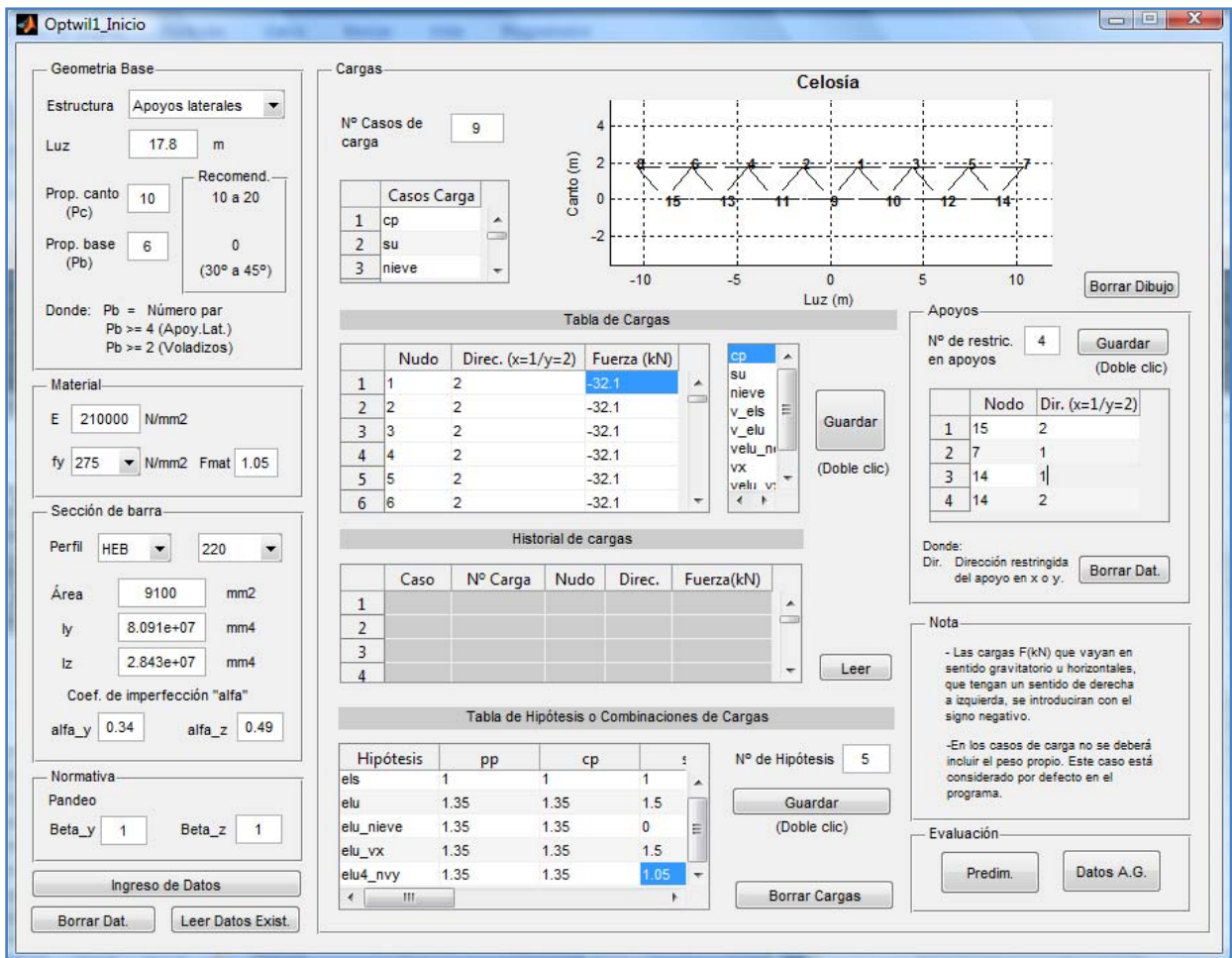


Fig. 215: Introducción de datos en la ventana de inicio

B. Pre-dimensionamiento (Celosía 4)

En la *fig.216* se observa dos cuadros resumen del análisis que se realiza en esta etapa de pre-dimensionamiento. En los dos cuadros los resultados convergen.

En el primer panel, se aprecia que la celosía inicial, con una sección HEB-220 en toda la estructura, tiene mayor peso que la estructura del proyecto original. Recordemos que la celosía original, desde el eje E al B, pesa 33,11kN. Es decir la propuesta inicial pesa 51% más que la celosía original. Se puede concluir que esta cercha no es óptima.

El segundo cuadro, sin embargo, con la optimización de secciones el resultado es mejor. El peso de la celosía optimizada se acerca a la mitad del peso de la celosía original. Tenemos un ahorro de material equivalente a 15,98kN. Además la flecha no difiere mucho con respecto a la flecha del proyecto. En la celosía optimizada la flecha es de 24,4 mm y en la celosía del proyecto tenemos una flecha 22mm.

En cuanto al rendimiento tensional, se observa un promedio alto de 0,85. Este rendimiento nos indica que las barras están trabajando cerca de su límite elástico.

Celosía Inicial		Celosía Optimizada	
Resultados Globales		Resultados Globales	
F.max (mm)	-7.7693	F.max (mm)	-24.3990
F.cent./vol.	-7.7693	F.cent./vol.	-24.3990
F.adm (mm)	59.3333	F.adm (mm)	59.3333
PP (kN)	50.3995	PP(kN)	17.1321
Rend. Global	0.2708	Rend. Global	0.8462

Fig. 216: Cuadro Resumen de la Celosía Inicial y Celosía Optimizada

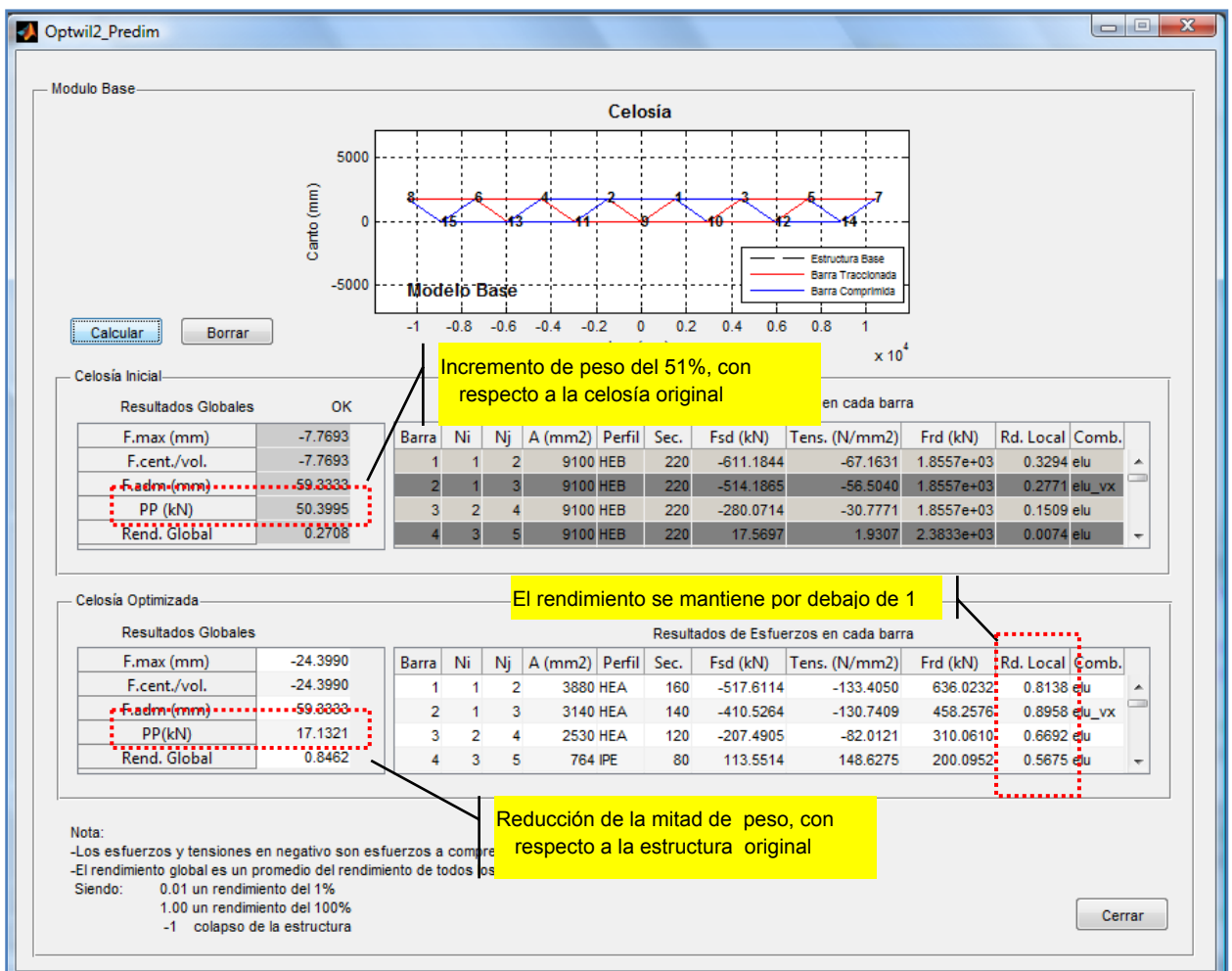


Fig. 217: Resultados del pre-dimensionamiento de la Celosía 4 (Apoyada-empotrada)

C. Datos A.G. (Celosía 4)

En la *fig.218* se presentan los datos que se han considerado en este proyecto. Se ha establecido que la estructura que evolucione será una combinación de la familia de estructuras Ascendentes y Descendentes.

Las restricciones en altura son las mismas que se utilizó en el análisis del voladizo. El movimiento vertical ascendente está limitado a una altura de 3,50 metros, sobre los apoyos. El límite de movimientos descendentes lo acotamos a una distancia de 2,30 metros, por debajo de los apoyos. En resumen, le damos más libertad a los movimientos descendentes que ascendentes debido a que queremos respetar la cota superior del proyecto.

Los porcentajes de Participación o Grado de Jerarquía de las funciones objetivo varían entre ellas, teniendo en cuenta, que en este estudio también nos interesa reducir el peso de la estructura más que mejorar el rendimiento tensional de la misma. Por esta razón, damos mayor importancia al puntaje de la “*Minimización de peso*”.

The screenshot shows the 'Optwil3_DatosAG' window with the following settings:

- Familia Estructural:** Fam. Estructural: Ambas
- Modificación Geométrica:**
 - Canto inicial (ca): 1.78 m
 - Altura evolutiva parcial: 0.5 m (Recomendación: 0.6 m = (ca/3))
 - Altura máx sup. (sobre los apoyos): 3.5 m (Recomendación: 3.6 m = (2*ca))
 - Altura máx. inf. (bajo los apoyos): 2.3 m (Recomendación: 1.78 m = (ca))
- Población:**
 - Pob. inicial: 340 (Recomendación: 336)
 - Nº Generaciones: 5 (Recomendación: 3)
- Cruce y mutación:**
 - Cruce: Dos puntos de cruce
 - Mutación: Simétrica
- Grado de Jerarquía de las Funciones Objetivo:**
 - Deformación: 30 %
 - Rendimiento Tensional: 10 %
 - Minimización de Peso: 60 %

Buttons at the bottom: Ingreso de datos, Cálculo A.G., Cerrar.

Fig. 218: Datos A.G

D. Cálculo A.G. (Celosía 4)

Los resultados obtenidos nos muestran que se han evaluado 1706 modelos o individuos. De esta población hemos obtenido una población Elite, en la quinta generación, de 153 individuos.

La estructura que ha sobre salido en la familia Élite ha sido el Modelo 909.

El Modelo 909, es una estructura de canto variable (fig. 219). Tiene forma de “lenteja” en la banda central y en los apoyos aumenta medianamente su canto inicial. Se puede decir que su geometría es coherente. La solución pertenece a la combinación de familias.

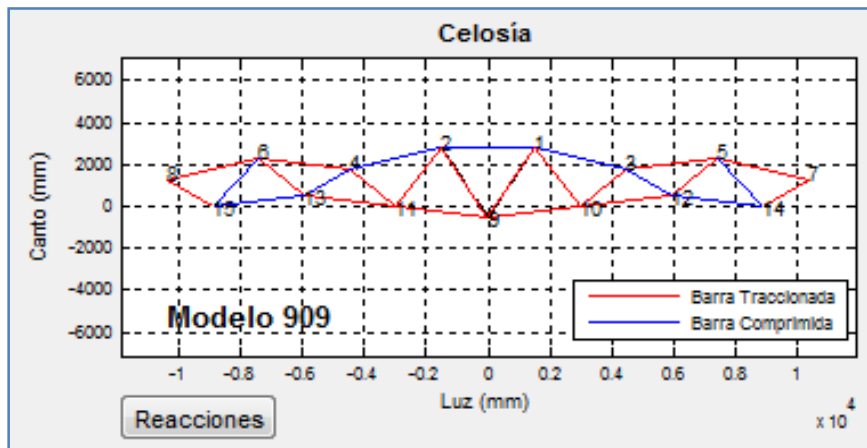


Fig. 219: Geometría Óptima del Voladizo-Modelo 98

Los resultados de la Tabla de Comparación entre el “Modelo 0 y 909”, muestran que este último modelo supera ligeramente al modelo inicial. La flecha del último modelo es igual que la flecha de la celosía de proyecto. En el caso del peso la celosía “Modelo 909” tiene 7% menos de peso que la celosía inicial, pero 51,5% menos que la celosía del proyecto. Este último dato es lo que convierte a este modelo como la posible solución a nuestro problema. Además, el rendimiento global tensional continua siendo alto y aceptable.

Por otro lado, cabe destacar que los resultados de la optimización estructural, después de 5 generaciones, no han mostrado una gran evolución. Se podría decir que con la optimización de sección del pre-dimensionado hemos encontrado un modelo optimo para nuestro proyecto.

Nº Modelo		Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)				
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)	
0	495	-24.3990	-24.3990	0.8462	17.1321	
909	1	-22.2353	-22.2353	0.7985	16.0616	

Fig. 220: Tabla resumen del Modelo 909

También, se observa que entre el Modelo 909 y Modelo 0, existen 493 modelos intermedios, con resultados muy similares a los primero. Por lo tanto debemos entender que el parámetro de “Geometría” inclinará la balanza en la elección del modelo óptimo.

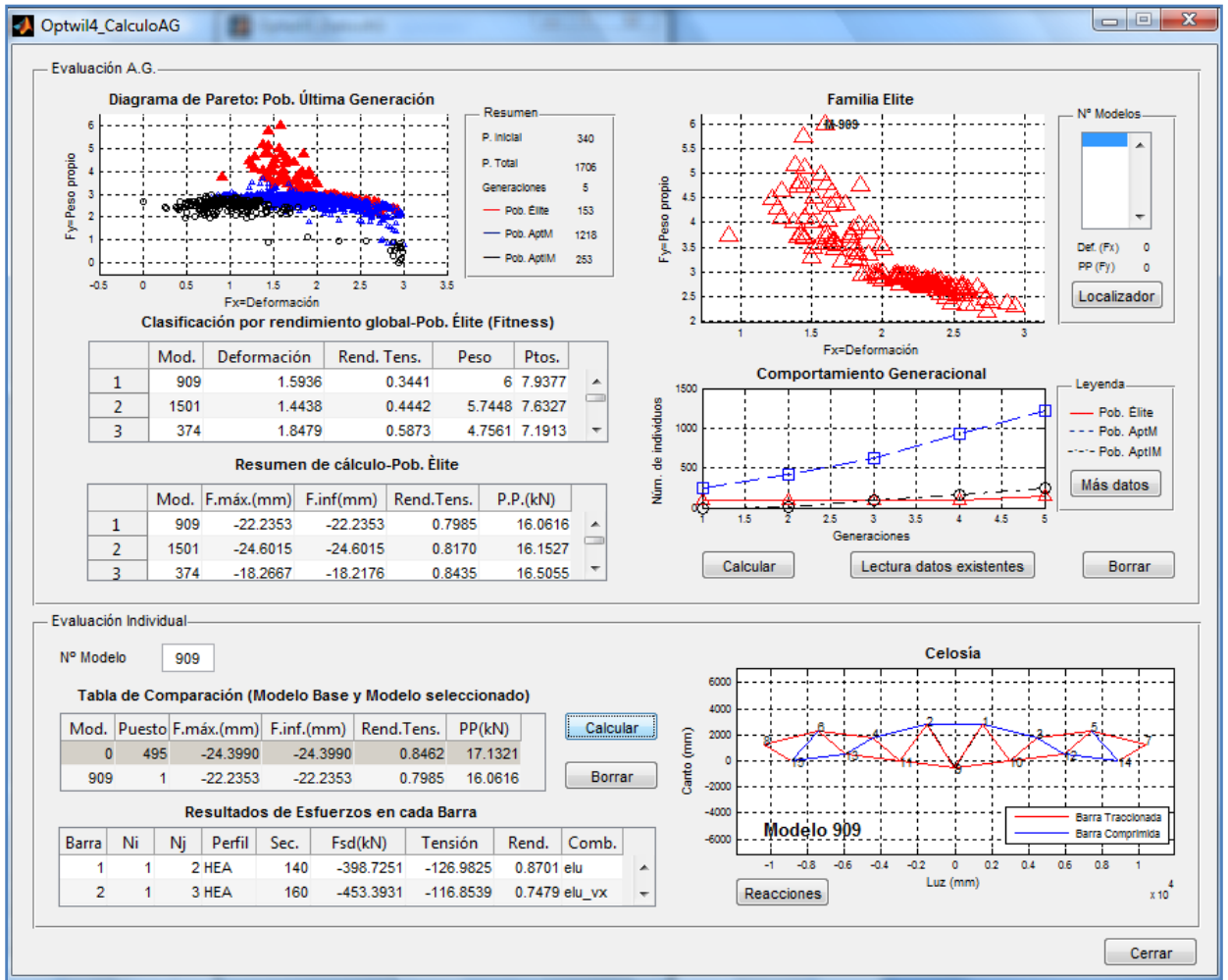


Fig. 221: Resultados del cálculo A.G. de la Celosía 4

Quando observamos los diagramas de la población de la última Generación (fig.221 y 222) se puede observar que existe una separación entre los grupos que destacan por su peso y otros que destacan por su deformación, creando así dos “corrientes” de resultados. Nuestra celosía óptima es la que tiene mayor puntuación en la corriente de estructuras ligeras.

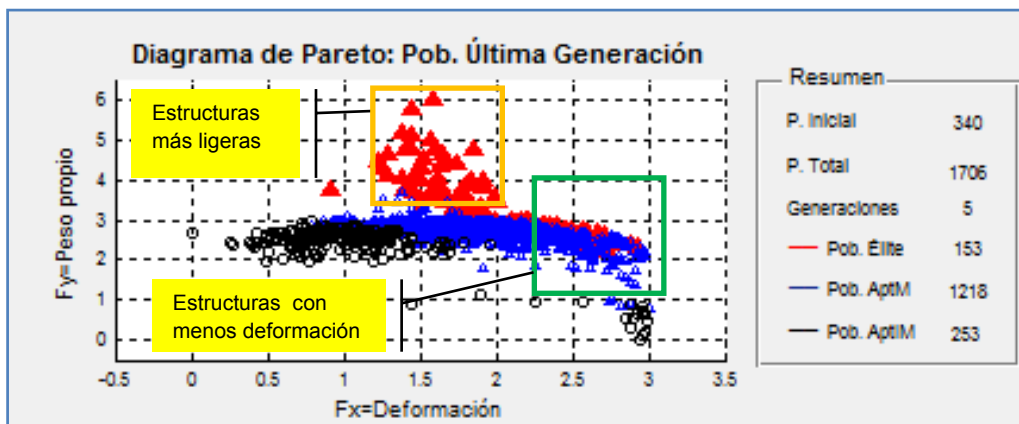


Fig. 222: Diagrama Poblacional de la Última generación

En el diagrama de la familia Élite (fig.223), el modelo con mayor puntaje, el Modelo 909, se encuentra como único modelo óptimo. Después de este modelo encontramos el segundo frente óptimo compuesto por los modelos 1501 y 374 (fig. 224). Estos modelos tienen un peso similar al modelo óptimo 909. Su diferencia de peso es menor al 3%.

El Modelo 374 destaca en su deformación. Este modelo tiene una flecha de 18,27mm. Creemos que este modelo puede considerarse como una segunda opción del modelo óptimo de la Celosía 4.

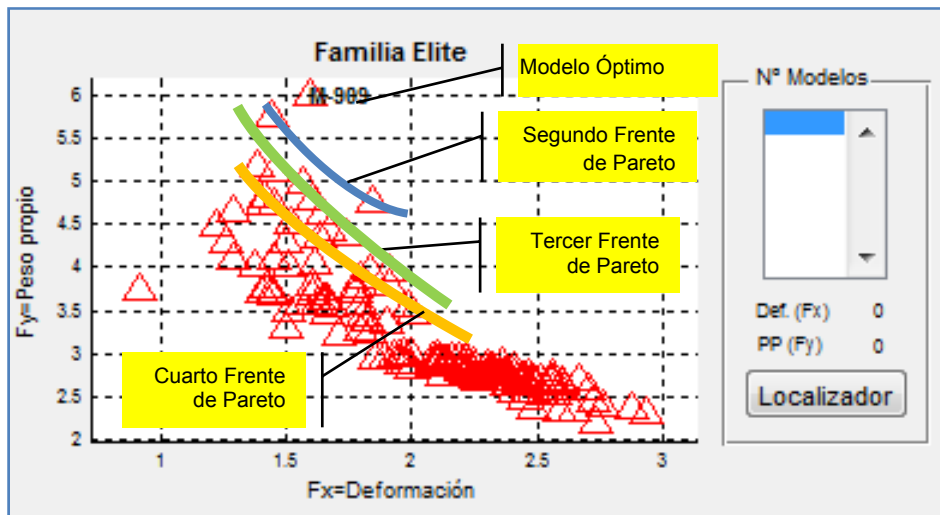


Fig. 223: Diagrama de Familia Élite de la Última Generación

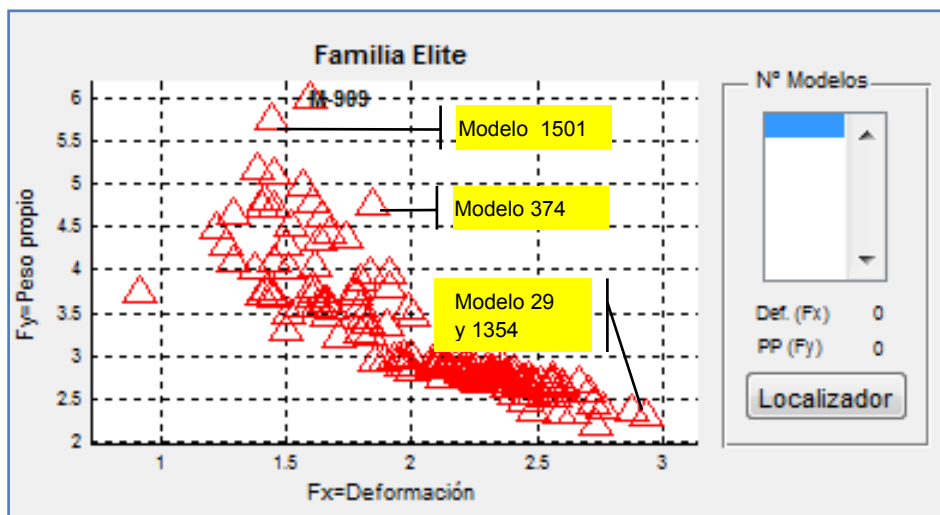


Fig. 224: Modelos del Segundo Frente de Pareto y los dos mejores modelos de la función de Deformación

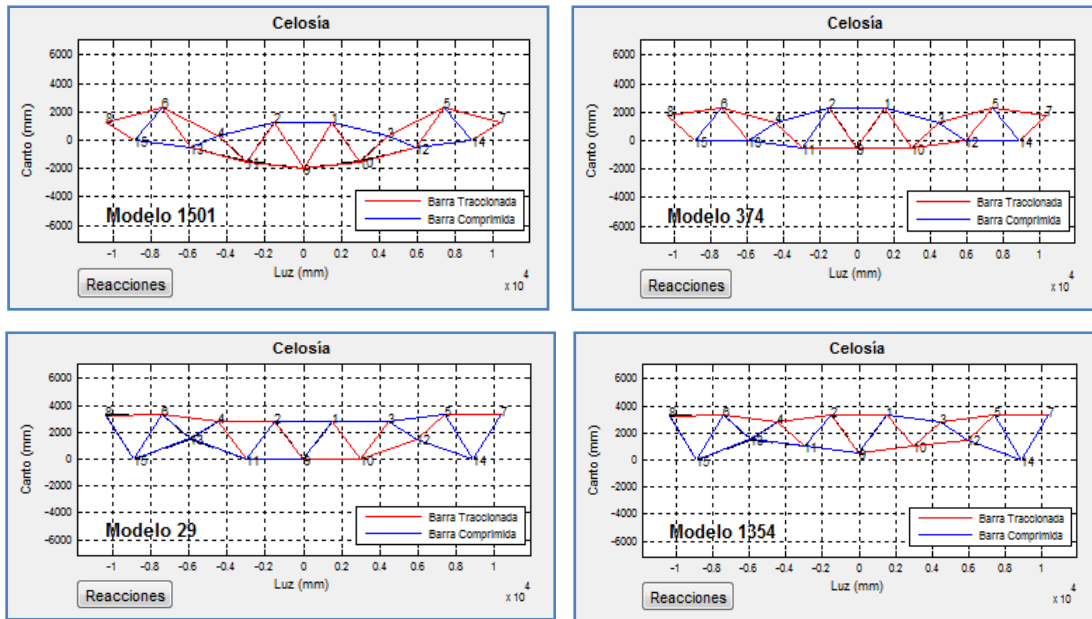


Fig. 225: Geometría de los Modelos Óptimos

Nº Modelo	1501				
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	495	-24.3990	-24.3990	0.8462	17.1321
1501	2	-24.6015	-24.6015	0.8170	16.1527

Nº Modelo	374				
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	495	-24.3990	-24.3990	0.8462	17.1321
374	3	-18.2667	-18.2176	0.8435	16.5055

Nº Modelo	29				
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	495	-24.3990	-24.3990	0.8462	17.1321
29	136	-6.2830	-1.1083	0.8052	23.3665

Nº Modelo	1354				
Tabla de Comparación (Modelo Base y Modelo seleccionado)					
Mod.	Puesto	F.máx.(mm)	F.inf.(mm)	Rend.Tens.	PP(kN)
0	495	-24.3990	-24.3990	0.8462	17.1321
1354	409	-6.9545	-0.9104	0.7628	23.2263

Fig. 226: Tabla de Resumen de modelos óptimos.

Por otro lado, los modelos con mayor puntaje en la función de deformación son los modelos 29 y 1354. El peso de ambos modelos es igual, son modelos que tienen un promedio de 45% más de peso que la celosía óptima 909. La flecha de ambas estructuras no supera los 7 mm y su rendimiento de tensión global es de 0.8.

La geometría de los modelos 29 y 1354 parece ser más compatible que la geometría de los modelos anteriores. El canto de los soportes de estas celosías de 3,28 metros es similar al canto de soporte del voladizo. Solo tiene una diferencia de 1 centímetro. Esta compatibilidad de cantos ayudaría a transmitir de manera “limpia” los esfuerzos de tracción, en el cordón superior como se observa en el esquema de la *fig. 228*. Sin embargo, el incremento de peso del 45% con respecto al Modelo 909, hace poco atractivo la selección de uno de estos modelos como modelo óptimo de la Celosía 4.

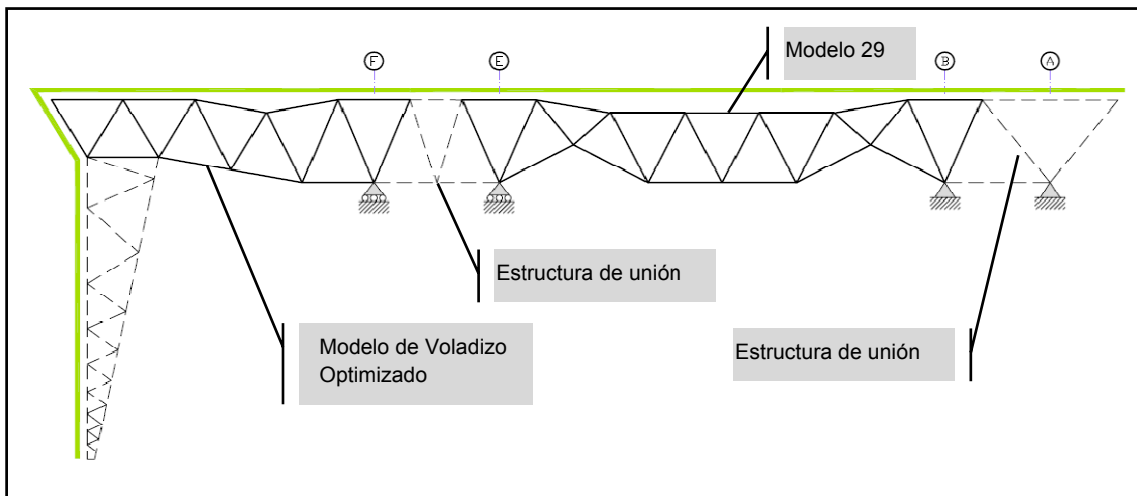


Fig. 227: Configuración completa de Celosía del eje 11, con la incorporación del Modelo 29.

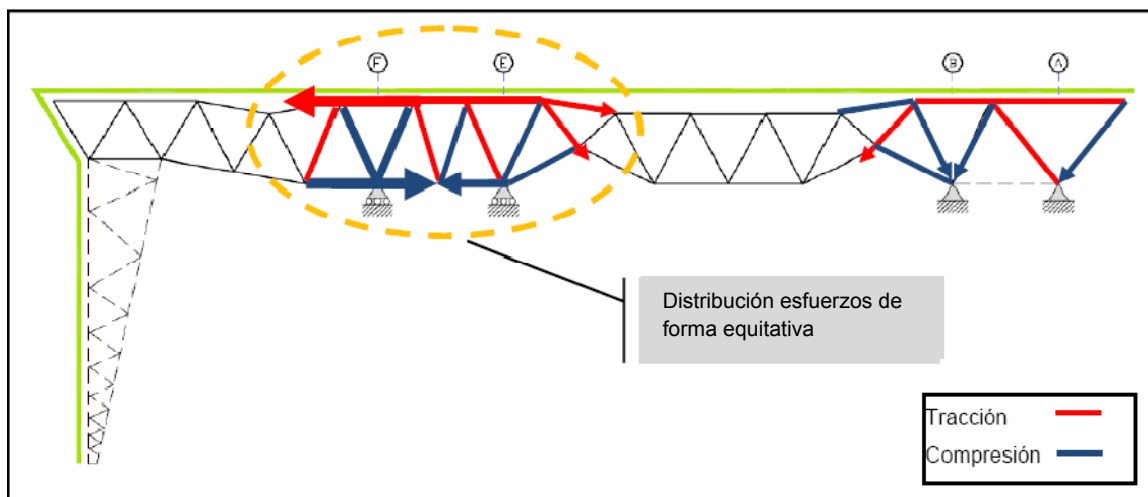


Fig. 228: Distribución de esfuerzos en estructuras de unión.
Celosía del eje 11 con la incorporación del Modelo 29.

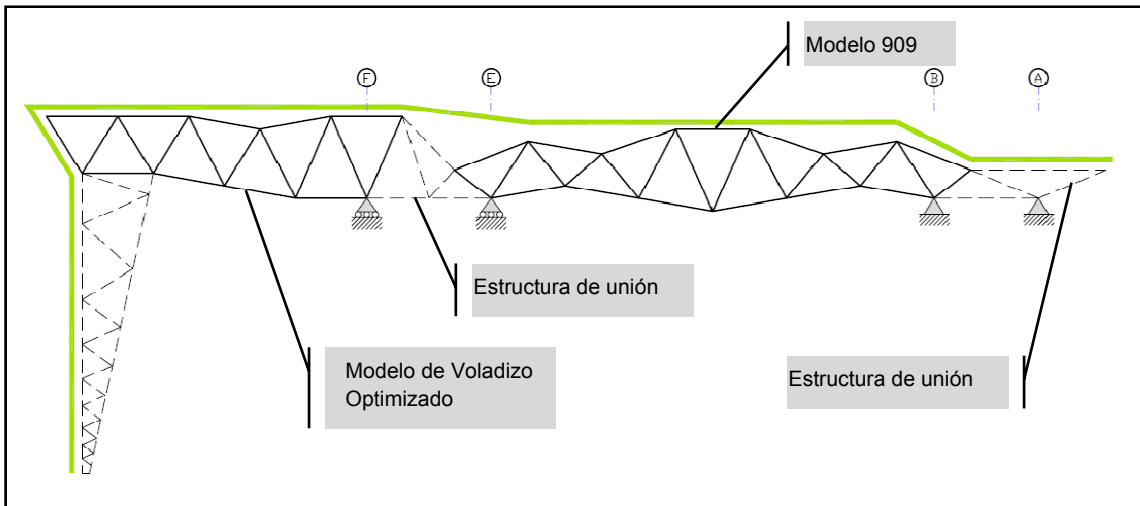


Fig. 229: Configuración completa de Celosía del eje 11, con la incorporación del Modelo 909.

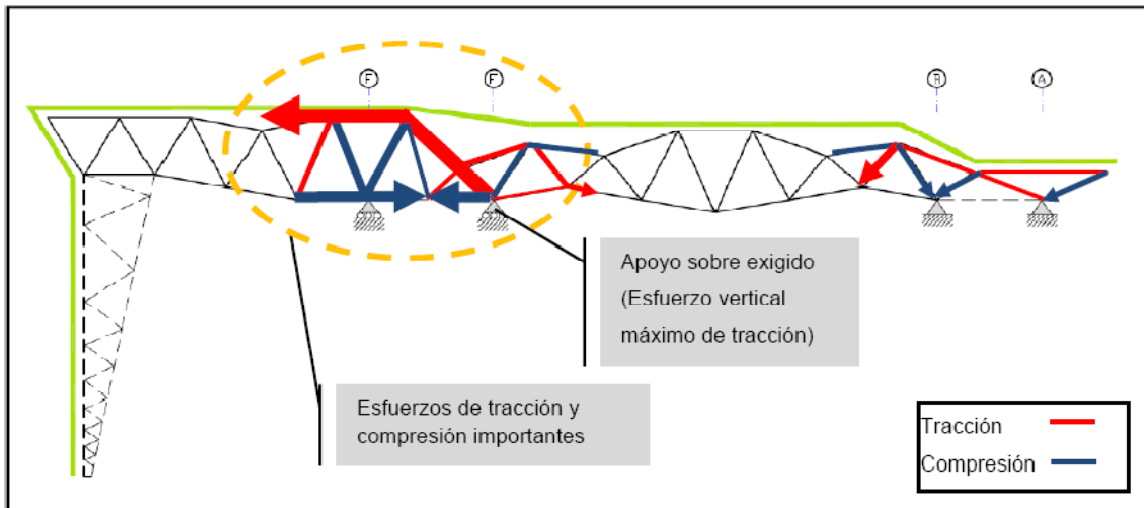


Fig. 230: Distribución de esfuerzos en estructuras de unión.
Configuración completa de Celosía del eje 11, con la incorporación del Modelo 909.

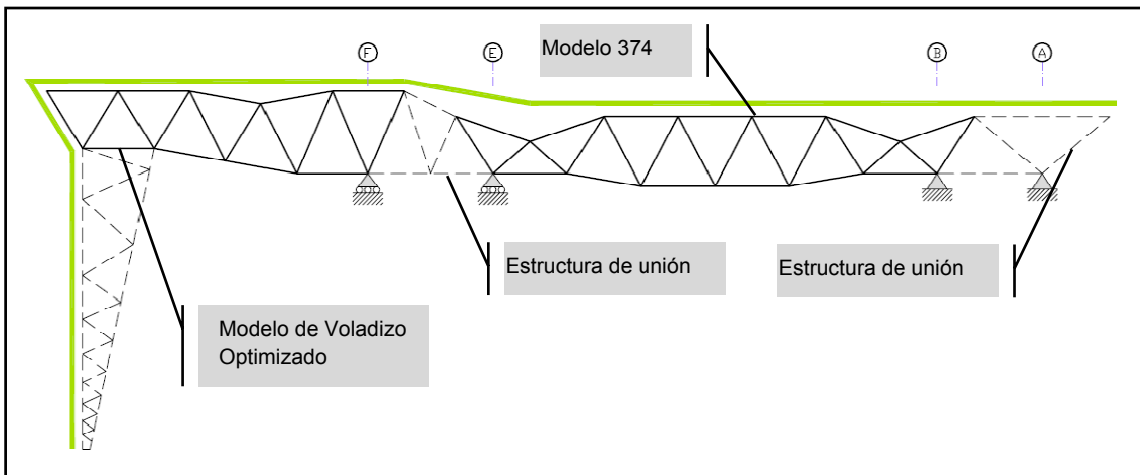


Fig. 231: Configuración completa de Celosía del eje 11, con la incorporación del Modelo 374.

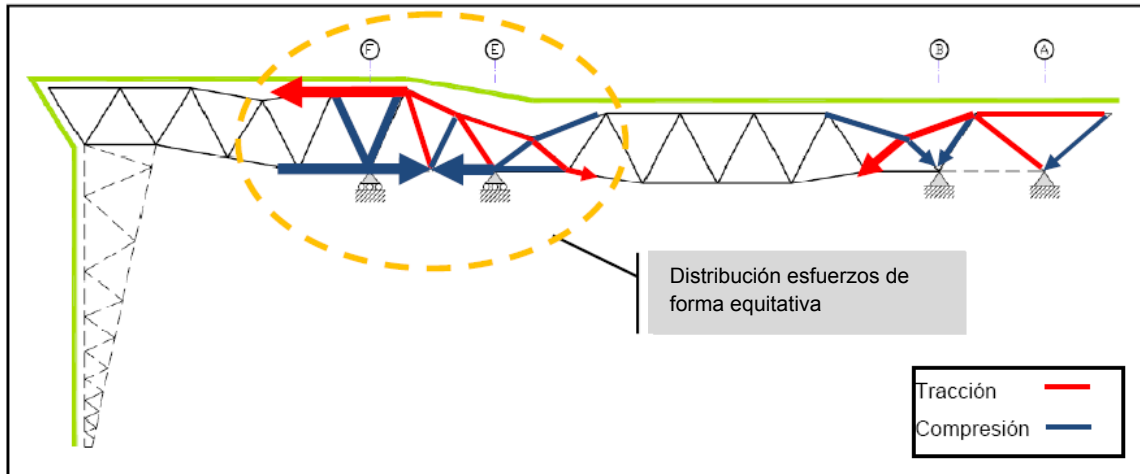


Fig. 232: Distribución de esfuerzos en estructuras de unión.
Configuración completa de Celosía del eje 11, con la incorporación del Modelo 374.

Analizando la geometría de los primeros modelos, como: el modelo 909, 1501 y 374, observamos que la estructura que mejor se adapta a la configuración completa de la cercha es el Modelo 374. Este modelo transmite las tracciones del voladizo a toda la banda soporte de la celosía 4. Distribuye los esfuerzos de forma equitativa (fig.232). No concentra todo el esfuerzo de tracción en un solo punto, como lo hace Modelo 909 (fig.230). Es último modelo concentra el mayor esfuerzo de tracción en el apoyo del eje E. Esta configuración estructural es la que más sobre exige a esta unión, por lo que concluimos que este modelo no es tan óptimo en la configuración general.

En resumen, nuestra celosía óptima en este análisis es el modelo 374.

El comportamiento generacional, en esta evaluación, presenta una campana de Gauss asimétrica. El número de individuos de la población Élite es menor que la Población de Aptitud inferior a la Media (fig.233).

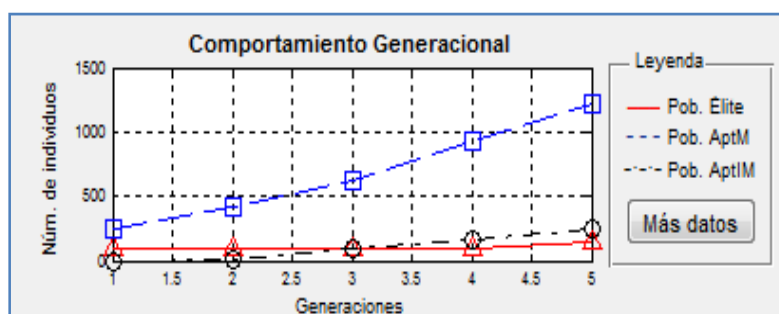


Fig. 233: Diagrama de Comportamiento Generacional

E. Detalles Evolutivos (Celosía 4)

El diagrama Poblacional por Generaciones (fig.234) muestra que la población inicial crece rápidamente. Tanto el cruce como la mutación han generado individuos aptos para la evolución de la celosía. Se observa que la mutación se ha generado más veces en la tercera y cuarta generación. Esta mutación ha llegado a afectar al 18% de la población inicial, un índice muy alto para este tipo de operador genético.

En la tabla del “Diagrama Poblacional Última Generación”, se muestra que los mejores modelos de la familia Élite pertenecen a la población inicial. El 78% de la población Élite pertenece a esta población.

Además encontramos a 8 individuos en los diez primeros puestos de la familia Élite. El segundo y noveno puesto pertenecen a individuos generados por el operador de cruce. En la familia élite, de la quinta generación, no existe ningún individuo producto de la mutación.

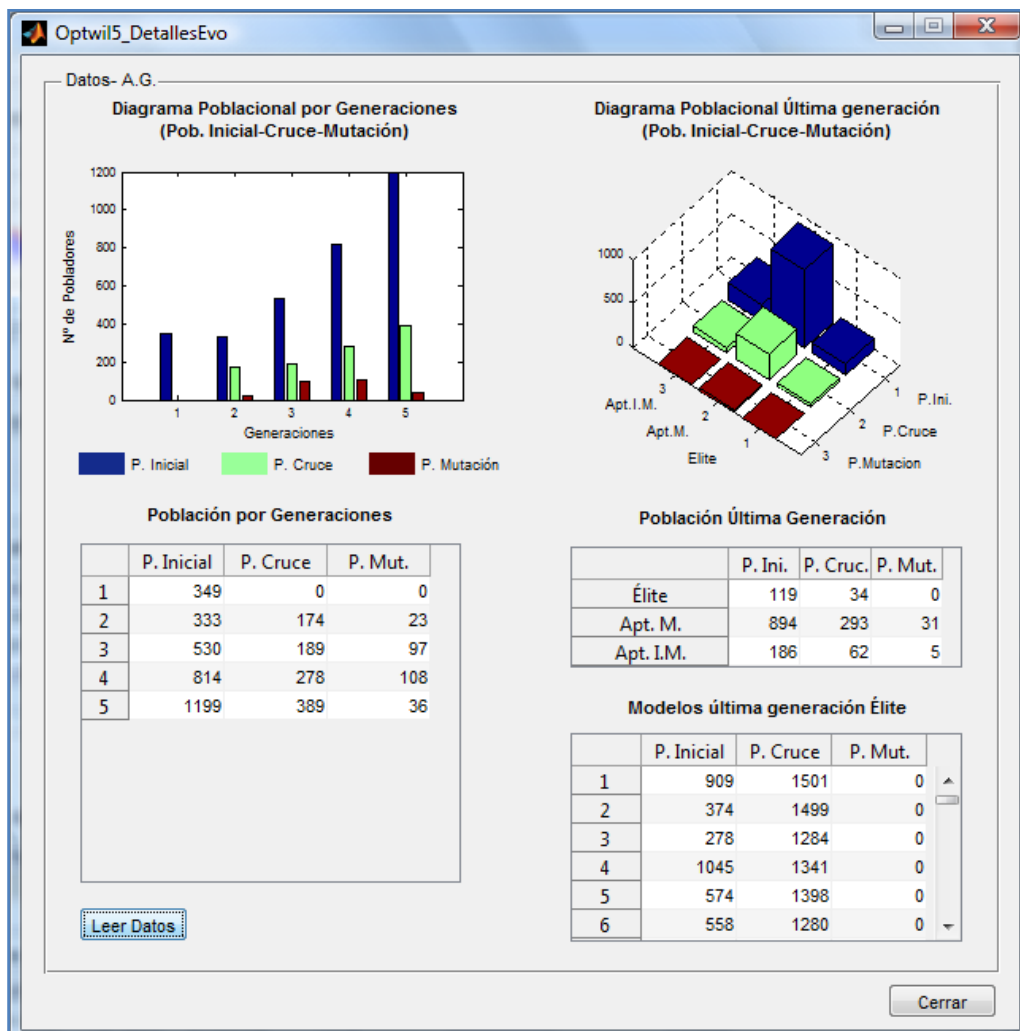


Fig. 234: Detalles Evolutivos de la Evaluación

Para concluir con la evaluación de la Celosía 4, podemos afirmar que la elección del Modelo 374 como modelo óptimo, ha sido mediante el análisis de los resultados de la familia Élite final que nos ha generado el programa. Es importante mencionar que la elección de una estructura óptima no es la que nos ha presentado el programa como modelo con mayor puntuación, sino que la selección de la estructura óptima debe ser realizada después de observar, estudiar y analizar los resultados. El investigador debe evaluar los parámetros globales y requisitos generales que requiere cada problema.

Se puede resumir, que los pasos de evaluación o algoritmo que se ha seguido para llegar a un resultado óptimo de una estructura con más de un tramo son los siguientes:

1. Selección de Celosía Óptima del primer Tramo. A esta celosía la llamaremos "*Celosía Tramo Inicial*".
2. Selección de reacciones máximas (R_m) de *Celosía Tramo Inicial*.
3. Aplicación de reacciones R_m como cargas en "*Celosía Complementaria*". Esta celosía es la estructura que se conectará al *Tramo Inicial*. Se utiliza la configuración de *estructura Base o Modelo 0*.

Previamente se analiza que restricciones de movimientos que debe tener la *estructura Complementaria* en sus apoyos. Analizar la configuración estructural global de la cercha.

4. Optimización de *Celosía Complementaria*, incluyendo todas las cargas. Aplicación de Optimización de forma mediante A.G. (OPTWIL)
5. Selección de mejores individuos de la familia Élite de la última generación de la *Celosía Complementaria*. Se analiza los frentes de Pareto y se selecciona más de 3 individuos óptimos.
6. Ensamblaje de *Celosías óptimas Complementarias* con *Celosía Tramo Inicial*. Evaluación de cada estructura ensamblada.
7. Selección de *Estructura Óptima Ensamblada* considerando los siguientes puntos:
 - a. Estructuras ligeras
 - b. Estructura con menos deformación
 - c. Distribución de magnitudes de esfuerzos de forma equitativa en las uniones de ensamblaje. Evitar concentraciones de esfuerzos en una sola barra.
8. La nueva celosía ensamblada será la nueva Celosía Tramo Inicial. En caso que el análisis se realice en una cercha de más de dos tramos se debe repetir el paso 1, hasta completar el análisis de todos los tramos de cercha.

A continuación presentamos el algoritmo descrito anteriormente de manera gráfica.

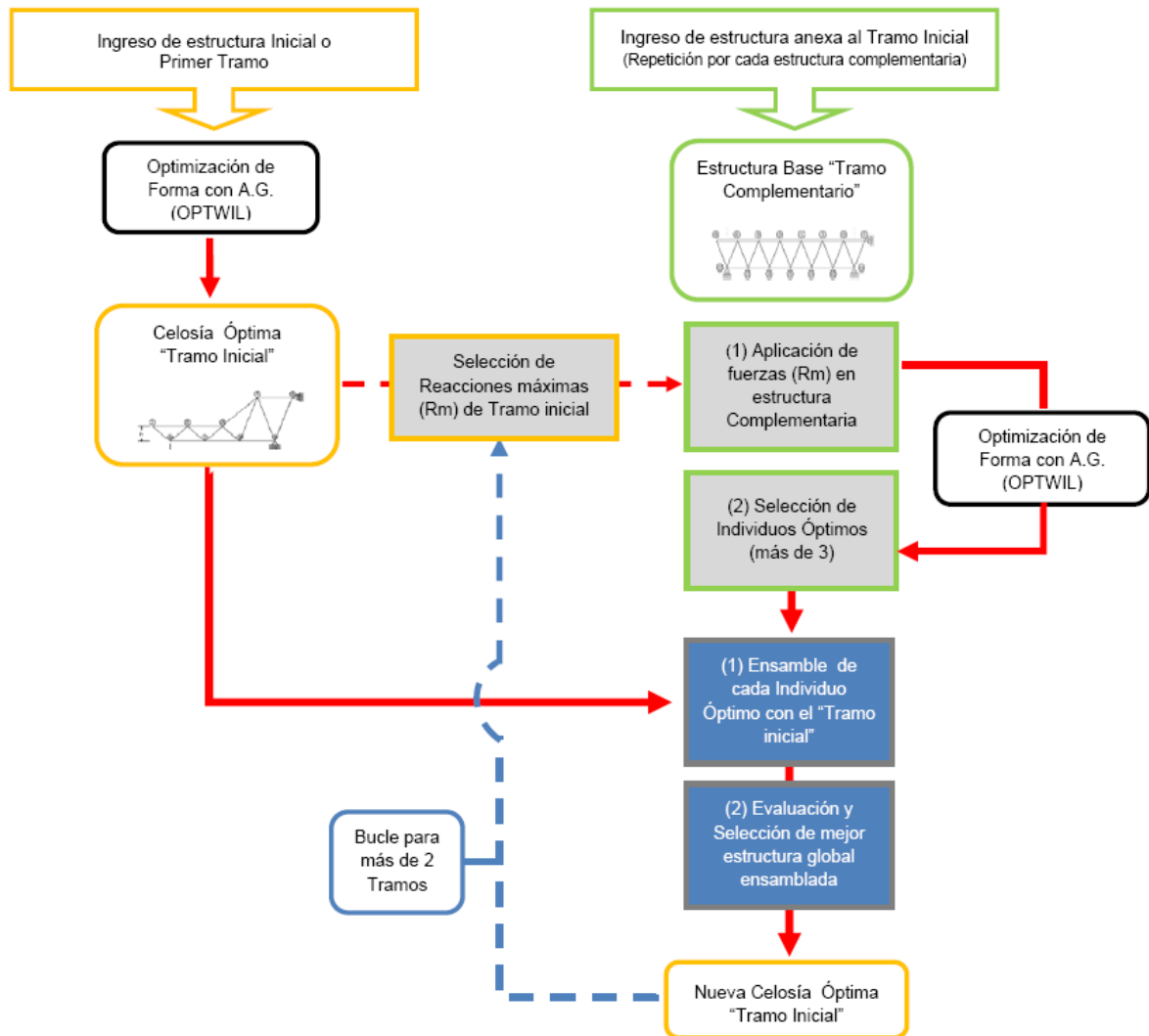


Fig. 235: Algoritmo de Optimización para Celosías de más de un Tramo.

6.

Conclusiones

6.1. Verificación del Objetivo

El objetivo sigue siendo el mismo, desarrollar una metodología de cálculo para la optimización de estructuras reticulares planas como las celosías. Sin embargo, conforme hemos ido avanzando la investigación debemos complementar nuestro algoritmo, basado en movimientos verticales de los nudos, con un algoritmo que incluya movimientos horizontales de los nudos. Esta nueva inclusión nos ayudaría a tener una mayor diversidad, geométrica, en el Frente Óptimo de Pareto.

No obstante los resultados obtenidos hasta el momento han sido alentadores y la programación de la metodología nos ha ayudado a comprender un poco más la evolución de nuestra estructura.

6.2. Conclusiones Generales

- La metodología que se ha propuesto funciona adecuadamente, dentro de sus límites (cambio de geometría con movimientos verticales, cálculo de estructuras con cargas nodales y en un régimen elástico). Los operadores de reproducción, como el cruce y la mutación, han ayudado a crear modelos óptimos, que en muchos casos han ocupado los primeros puestos de la evolución.

Estos modelos óptimos llegan a pesar un 33-50% menos que las estructuras calculadas con un método convencional. Se observa que existe un aumento en la flecha de estas estructuras óptimas, sin embargo estos desplazamientos verticales se encuentran por debajo de las flechas admisibles.

A continuación presentamos cuatro cuadros que resumen la eficacia de esta metodología

Resultados de optimización de forma A.G.

CELOSÍA 1					
Evaluación	Celosía Real (CR)	Celosía base (CB)	Celosía Opt. (CO)	Comparación CR vs. CO	Resultado
Peso	40.00 kN	25.13 kN	21.43 kN	-46.42%	Reducción
Flecha	19.00 mm	52.48 mm	31.05 mm	0.12 mm	Incremento
Rend. Tens.	0.63	0.79	0.62	-1.58%	Reducción
Flecha adm.	74.66 mm				
Luz	22.40 m				

CELOSÍA 2					
Evaluación	Celosía Real (CR)	Celosía base (CB)	Celosía Opt. (CO)	Comparación CR vs. CO	Resultado
Peso	25.75 kN	18.57 kN	17.10 kN	-33.60%	Reducción
Flecha	11.00 mm	47.23 mm	34.48 mm	23.48 mm	Incremento
Rend. Tens.	0.43	0.77	0.75	74.40%	Incremento
Flecha adm.	74.66 mm				
Luz	22.40 m				

CELOSÍA 3 O VOLADIZO					
Evaluación	Celosía Real (CR)	Celosía base (CB)	Celosía Opt. (CO)	Comparación CR vs. CO	Resultado
Peso	26.85 kN	19.58 kN	17.30 kN	-35.56%	Reducción
Flecha	10.90 mm	50.63 mm	40.37 mm	29.47 mm	Incremento
Rend. Tens.	0.51	0.86	0.86	68.63%	Incremento
Flecha adm.	76.33 mm				
Voladizo	11.45 m				

CELOSÍA 4					
Evaluación	Celosía Real (CR)	Celosía base (CB)	Celosía Opt. (CO)	Comparación CR vs. CO	Resultado
Peso	33.11 kN	17.13 kN	16.50 kN	-50.16%	Reducción
Flecha	22.00 mm	24.39 mm	18.21 mm	3.79 mm	Reducción
Rend. Tens.	0.49	0.85	0.84	71.43%	Incremento
Flecha adm.	59.33 mm				
Voladizo	17.80 m				

- También, se ha podido comprobar que **para obtener una población inicial adecuada se debe realizar como mínimo dos bucles de transformación de la geometría**. Esta conclusión se obtiene después de observar que una vez pasado el segundo bucle de generación geométrica el individuo comienza a crear más copias de manera seguida, mostrando así el nivel necesario que debemos alcanzar para iniciar nuestra evaluación multiobjetivo.

- Debemos tener en cuenta que con una mayor población podemos generar un abanico más grande de posibles soluciones pero teniendo en cuenta que tenemos un coste computacional más elevado.
En el programa OPTWIL recomendamos un número de población inicial considerando la premisa de dos bucles de transformación geométrica. Así mismo, en este programa también recomendamos trabajar con 3 generaciones, como mínimo. Los resultados de la celosía 2, respaldan esta recomendación.
- Con respecto al programa, **se debe disminuir el tiempo de convergencia del problema**. Actualmente para optimizar una estructura bi-articulada (celosía 1), con 19 nudos, 1686 individuos como población final, 10 hipótesis de carga y la evaluación de la estructura en 5 generaciones, el programa tarda 10 horas en obtener resultados. Se debería complementar en el programa un algoritmo de selección más restringida que permita trabajar las listas Fitness con menos individuos aptos para reducir el coste informático.
- Por último, realizando la evaluación de ejemplos reales, **hemos descubierto la necesidad de poder generar la optimización de forma de una estructura que tenga dos vanos o más**, de manera automática. En el caso del ejemplo del voladizo, podríamos realizar una evaluación más completa de las deformaciones y la transmisión de esfuerzos en todas las barras, de manera más real. No obstante, **estamos satisfechos con los resultados de la propuesta del algoritmo para la evaluación de este tipo de estructuras**. En un futuro cercano nos gustaría comparar los resultados de estas dos metodologías.

6.3. Futuras líneas de investigación

- Como ya se ha comentado, la metodología que se ha planteado busca optimizar una estructura reticular plana o celosía mediante la *Forma*, se propone que este estudio sea complementado con la **Optimización Topológica** de la misma cercha, como una etapa de refinamiento de la evaluación. Pensamos que sería conveniente cambiar la topología en las bandas o sectores donde el rendimiento de las barras sea muy bajo.
- Otro punto de **investigación y desarrollo es la evolución del programa OPTWIL**. Esta herramienta de trabajo debería ser capaz de trabajar con estructuras continuas, que permitan realizar estudios de estructuras más complejas. También es necesaria la implementación de un algoritmo que permite el desplazamiento horizontal de los nudos, al momento de la generación de la población inicial.
- Por último, **la evolución final de esta metodología será cuando la optimización de estructuras se realice sobre un elemento tridimensional, como la malla espacial**. Esta es la propuesta que dio origen a esta tesis y esperamos poder plantear una evaluación en este campo de estudio.

Referencias

- [1] LE RICOLAIS, ROBERT.
Visiones y Paradojas. Madrid: COAM, 1997.
- [2] SASAKI, MUTSURO
Flux structure. Japón: TOTO Shuppan, 2005.
- [3] FELIPE, SYLVIA; TRUCO, JORDI.
“Hybgrid: Sistema estructural adaptable, Cubierta Activa”. *New Architecture made in Catalonia*, (2002-2009).
- [4] G.A.R. PARKER; DISNEY (eds.).
Space Structures 5, vol. 2. Reino Unido: University of Surrey, 2002.
- [5] NOOSHIN, H. (ed.)
Third International Conference on Space Structures. Londres: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.
- [6] MARGARIT, J; BUXADÉ, C.
Las mallas espaciales en arquitectura. Barcelona: Gil, 1972.
- [7] MROGINSKI, J. L.; GUTIERREZ, G. J.; BENEYTO, P. A. Y DI RADO, H. ARIEL.
“Optimización Topológica de Sistemas Estructurales Bidimensional Discretos Mediante Algoritmos Genético”. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional de Tandil*, vol XXVIII, 2009, p. 2657-2674.
- [8] PARÍS LÓPEZ, JOSÉ.
Restricciones en Tensión y Minimización del Peso: Una Metodología General para la Optimización Topológica de Estructuras. Tesis Dr. Universidad da Coruña. E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto, 2007.
- [9] BHATTACHARYYA, S.P.; DATTA, A.; KEEL, L.H.
Linear Control Theory :Structure, Robustness, and Optimization. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis, 2009.
- [10] ARNOUT, SAARTJE; DOOMS, DAVID; DE ROECK, GUIDO.
“Shape and Size Optimization of Shell Structures with Variable Thickness”. *Spanning Nano to Mega, Proceedings of the 6th conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, 2008.
- [11] BENDSOE, M.P.; SIGMUND, O. (eds)
Topology Optimization : Theory, Methods and Applications. Berlin: Springer, 2004.
- [12] BENDSOE, M.P.
Optimization of Structural Topology, Shape, and Material. Berlin: Springer, 1995.
- [13] DOMINGUEZ, A; STIHARU, I; SEDAGHATI, R.
“Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithm”. *Research in Engineering Design*, 2006, p. 74-84 y 365-379.
- [14] SHALLAN, OSMAN; ERAKY, ATEF; SAKR, THARWAT, HAMDY, OSMAN.
“Optimization of Plane and Space Trusses Using Genetic Algorithms”. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 3, 2014, p. 66-73.

- [15] SU, RUIYI; GUI, LIANGJIN; FAN, SIJIE.
 “Truss Topology Optimization Using Genetic Algorithm with Individual Identification Technique”. *Proceedings of the World Congress of Engineering 2009*, vol 2.
- [16] ZHANG, W.; SUN, S.
 “Scale-Related Topology Optimization from Unit Cell Homogenization to Superelement Mode”. *World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization: Brazil 2005*.
- [17] TUGRUL, T.
 “A New Genetic Algorithm Methodology for Design Optimization of Truss Structures: Bipopulation-Based Genetic Algorithm with Enhanced Interval Search”. *Modeling and Simulation in Engineering*, 2009.
- [18] PAPAPAVLOU, A.
Structural Evolution: A genetic algorithm method to generate structurally optimal Delaunay triangulated space frames for dynamic loads. Master Thesis. University College of London, 2008.
- [19] CHU-YIN, WU; KO-YING, TSEN.
 “Topology Optimization of Structure Using Differential Evolution”. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, vol 6, 2008.
- [20] GUEST J.K.
 “Topology optimization considering fabrication errors and length scale constrains”. *6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, 2008.
- [21] DE STURLER, E.; PAULINO, H.G.; WLANG, S.
 “Topology optimization with adaptative mesh refinement”; *6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, 2008.
- [22] NAKASONE, P.H.; SILVA, E.C.N.
 “Design of dynamic laminate piezoelectric sensors and actuators using topology optimization”. *6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures*, 2008.
- [23] KALYMANOY, DEB; SURENDRA, GULATI.
 “Design of Truss-Structures for minimum Weight using Genetic Algorithms”. *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 37, 2001.
- [24] BAIRÁN, JESÚS M.
 “Generación automática de esquemas de bielas y tirantes considerando criterios constructivos”. *Hormigón y Acero - Universidad Politécnica de Cataluña*, vol 63, nº 264, 2012, p.67-79.
- [25] PRENDES GERO, MARÍA BELÉN.
Optimización del diseño y construcción de edificios metálicos en base a Algoritmos Genéticos; Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, Gijón, 2002.
- [26] CAÑAVETE, FERNANDO.
Aplicación a curvas al Diseño Optimo de Formas. Tesis de Master. Universidad de Murcia-Cartagena, Colombia, 2004.
- [27] LOZANO TREJO, DAVID.
Optimización Estructural Evolutiva: Diseño de cavidades internas en elementos planos. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Mexico, 2010.
- [28] CAMACHO LÓPEZ, CARLOS.
Optimización Topológica Estructural de Ensamblés. Tesis de Master. Facultad de Ingeniería: Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2011.

[29] GESCAL, M.; RIVERO, D.; RABUÑAL, J.R.; DORADO, J; PAZOS, A.
Introducción a los Algoritmos Genéticos y a la Programación Genética. A Coruña: Universidade da Coruña, 2010.

[30] GARCÍA LÓPEZ DE LA OSA, GREGORIO.
Origen y Evolución de la cercha. Tesis de Master. Universidad Politecnica de Madrid, 2009.

[31] VICTORIA NICOLÁS, MARIANO.
Optimización de Forma y topología con Malla Fija y Algoritmos Genéticos. Tesis de Grado. Universidad Politécnica de Cartagena, 2006.