

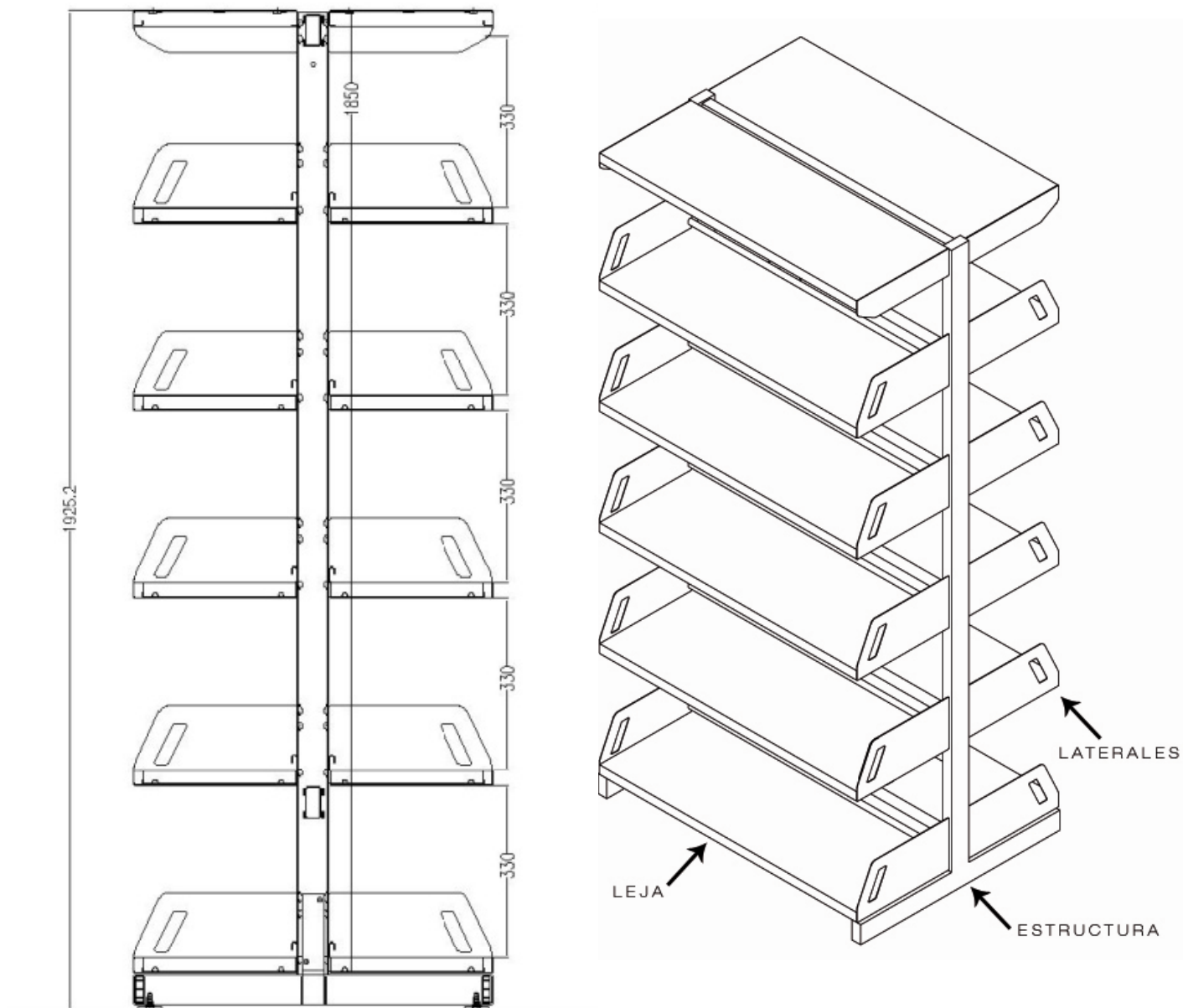
CÁLCULO DE ESTANTERÍA LEVEL

Castalla, Julio de 2013

PETICIONARIO: ACTIU

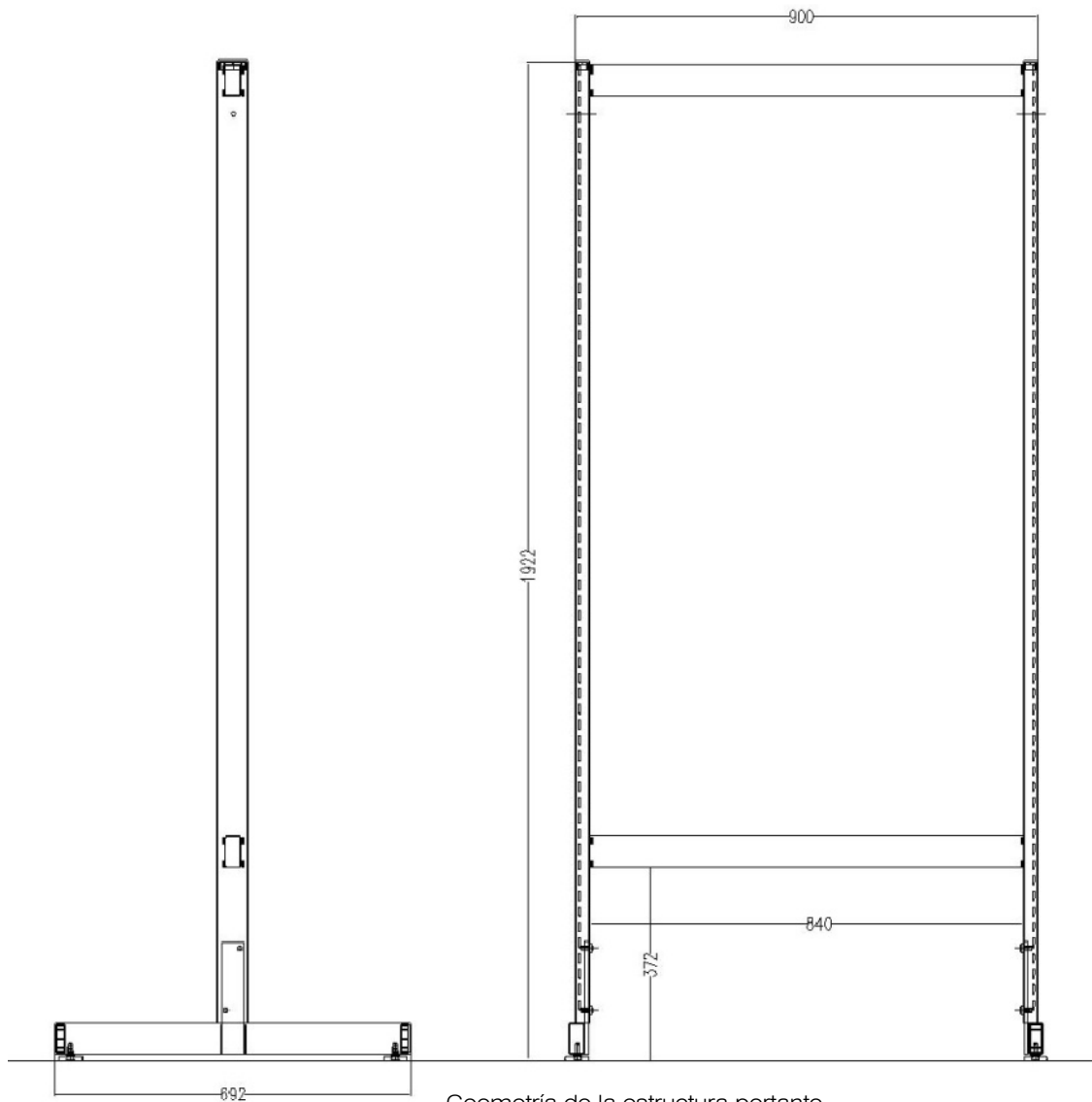
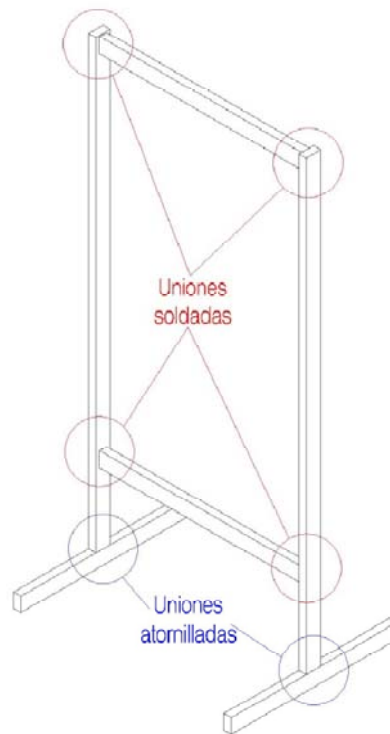
DESCRIPCIÓN.

El presente documento desarrolla el cálculo de la estantería LEVEL mediante el programa de cálculo de estructuras SAP 2000. La geometría de la estantería es la que se muestra a continuación.



Geometría general de la estantería objeto de estudio.

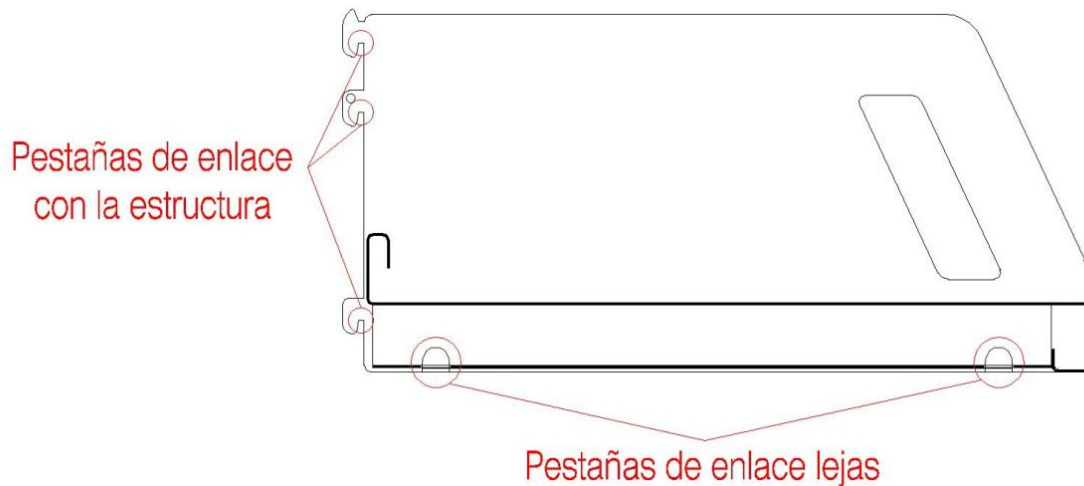
La estantería está formada por varios elementos estructurales. Consta de una estructura o bastidor de 900 mm de ancho por 1850 mm de alto formada por cuatro perfiles huecos soldados entre sí. Las patas, de 682 mm de longitud, llevan soldadas unas pletinas que, mediante tornillos, reciben el bastidor, formando la estructura portante de la estantería.



Geometría de la estructura portante.

Los perfiles verticales del bastidor están agujereados para recibir las chapas que luego soportaran las lejas. Estas uniones se realizan mediante la propia forma de la chapa, sin ir atornilladas. La altura de las lejas puede escogerse dependiendo de las necesidades de uso, pero en un principio, la estantería está diseñada para soportar cinco lejas a cada lado del bastidor con una separación de unos 33 cm entre ellas.

Estas chapas laterales están dobladas en su parte inferior para recibir las lejas, que a su vez son también elementos formados con una chapa laminada en frío y cortada en laser. La forma es la que se describe a continuación.



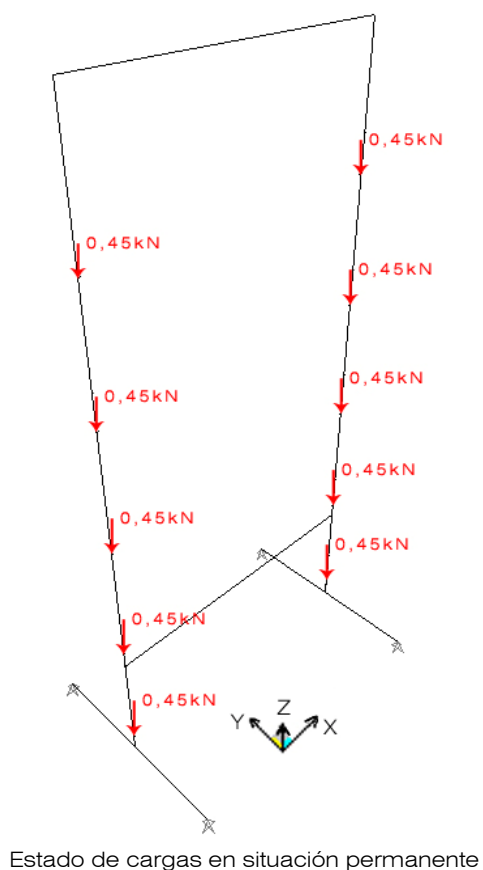
Aunque las uniones de las lejas y los laterales que las sujetan no sean atornilladas, al tratarse de elementos con grandes superficies, cuando la estantería se encuentra totalmente montada, estas confieren una gran estabilidad y rigidez al conjunto.

Resumiendo, se trata de elementos diseñados y fabricados con un alto grado de perfección cuyo montaje no permite error. Una estructura principal estable mediante uniones atornilladas y soldadas. Una configuración de lejas versátil con uniones apoyadas que confieren gran estabilidad al conjunto.

HIPÓTESIS DE CÁLCULO.

- SITUACIÓN PERSISTENTE:

La estantería está diseñada para almacenar libros. Este tipo de cargas permanecen inmóviles durante todo el proceso de almacenamiento (puesto que la modificación puntual de uno o varios libros poco modifica este estado. La estantería está fabricada para soportar 45 kg en cada leja. Esta configuración nos determina la situación persistente de la estantería, de modo que se van a comprobar tanto la resistencia mecánica de cada elemento por separado como la del conjunto en sí.



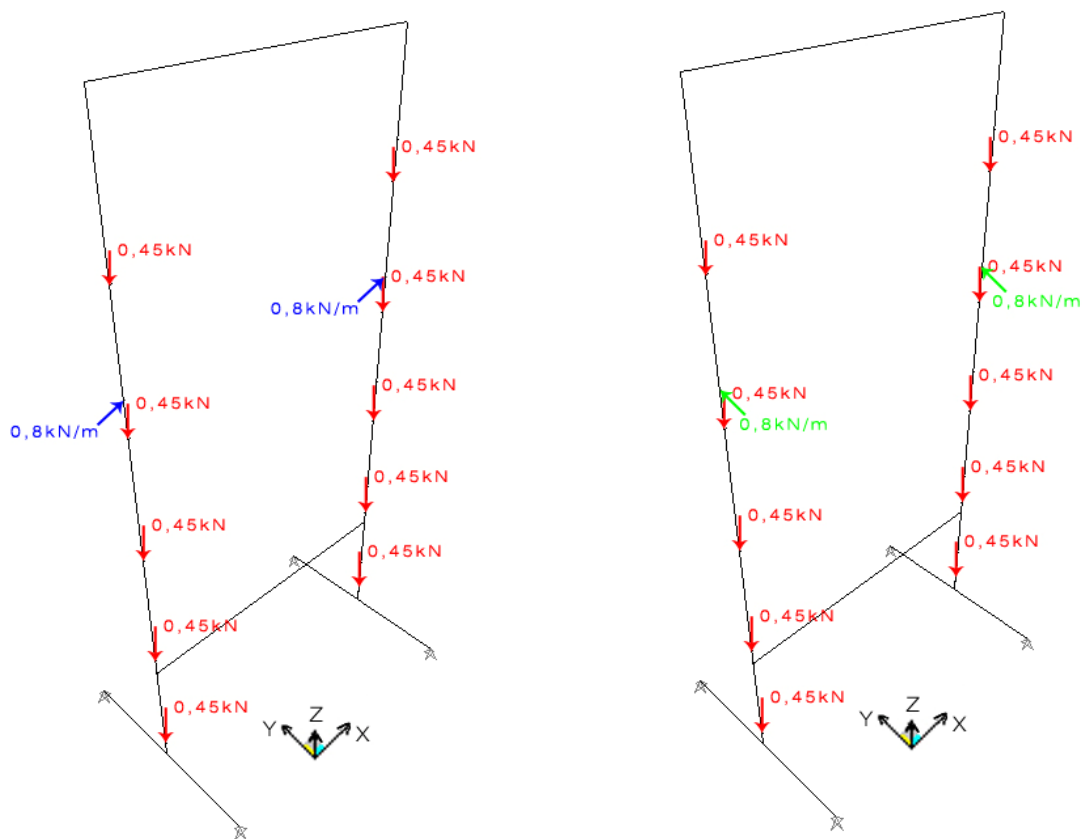
- SITUACIÓN EXTRAORDINARIA:

No obstante, se pueden producir situaciones accidentales donde se puede ver comprometida la estabilidad global de la estantería. Estas situaciones pueden venir causadas, estando la estantería cargada según se ha comentado en la situación persistente, por el choque de personas u otro tipo de objetos en movimiento, produciendo unas fuerzas horizontales que desestabilicen todo el conjunto.

Según el Código Técnico de la Edificación (CTE), en su Documento Básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación (DB-SE-A), en el apartado 3.2 se establecen las acciones a tener en cuenta sobre barandillas y elementos divisorios, es decir, sobre elementos verticales que puedan recibir empujes de los propios usuarios o golpes de objetos, como es el caso de la estantería objeto de este informe. Los elementos verticales deben resistir una fuerza horizontal, uniformemente distribuida, y cuyo valor debe ser, para zonas de acceso al público con mesas y sillas (uso que puede asemejarse a una biblioteca) de $0,8 \text{ kN/m}$. Esta fuerza se considerará aplicada a $1,2 \text{ m}$ de altura.

Esta situación extraordinaria de cálculo se va a aplicar en el estudio de la estructura de la estantería, estando ésta cargada, puesto que puede desestabilizar todo el conjunto e incluso volcarlo. Esta situación de carga se debe estudiar en las dos direcciones principales de la estantería:

- Fuerza en el plano de la estructura (eje X)
- Fuerza en el plano perpendicular de la estructura (eje Y)



Estado de cargas en situación extraordinaria. A la izquierda, según el plano paralelo de la estructura (eje X), a la derecha, según el plano perpendicular a la estructura (eje Y).

ESTRATEGIA DE CÁLCULO.

Para realizar el cálculo de todas las partes de la estantería se ha utilizado el software comercial SAP 2000, que se basa en el método de los elementos finitos. Esta es una herramienta válida para predecir el comportamiento de la estructura. Para introducirla en el programa de cálculo, debemos modelizar todos sus elementos, con sus condiciones de contorno y las cargas aplicadas, así como definir las propiedades del material y la geometría de los perfiles.

El programa permite modelizar los elementos dependiendo de su forma de trabajar. Existen los elementos superficiales que se representan mediante una malla de elementos finitos. En estos objetos, SAP 2000 nos ofrece, mediante unos gráficos en colores, la deformación y el estado tensional que sufren frente a las cargas aplicadas. Por otro lado, los elementos tipo barra se modelizan como líneas. El programa nos dará los esfuerzos a los que se encuentran solicitadas (axil y momento flector).

Puesto que la estantería está compuesta de varios elementos individuales, se ha realizado el análisis de todos estos por separado introduciendo, eso sí, las condiciones de contorno que los unen. De este modo tenemos modelos de cálculo más sencillos que nos permiten estudiar mejor cada elemento por separado pero que representan la realidad del modo más fidedigno posible. Estas partes son:

- Leja: es el primer elemento, el que recibe el peso de los libros u objetos a sustentar. Se trata de una chapa de acero conformada en frío. El modelo en el programa de cálculo se ha introducido mediante elementos superficiales.

- Laterales: son los encargados de soportar las lejas y, al igual que estas, están fabricados con chapas, por lo que también se han modelizado como elementos superficiales.

- Estructura general: es el conjunto de perfiles en los que se enganchan los laterales, recibiendo las cargas para transmitirlos al suelo. Se trata de perfiles tubulares de acero, por lo que en el modelo de cálculo se han introducido como elementos lineales.

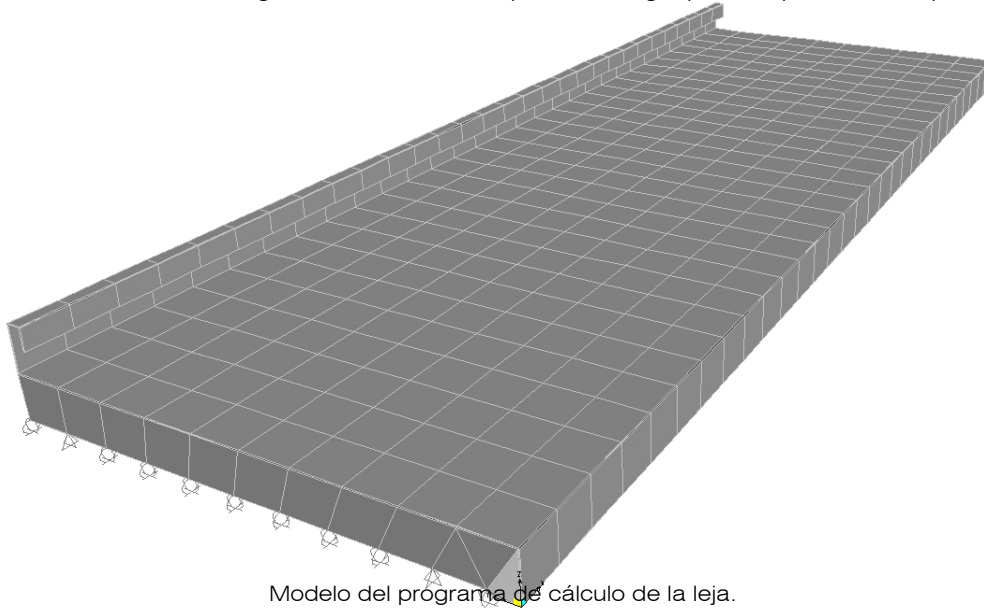
Por tanto, el problema es cerrado: la estrategia a seguir en el cálculo ha sido la de evaluar qué deformación y estado tensional tienen cada elemento y establecer qué factor de seguridad tienen en relación con su límite elástico.

ELEMENTO LEJAS.

Las lejas están formadas por una chapa plegada conformada en frío de 315 mm de profundidad y 880 mm de ancho con un espesor de 0,7 mm, de modo que se han modelizado como elementos superficiales. Lleva una plegadura tanto en su parte delantera como en su parte posterior que va a darle rigidez.

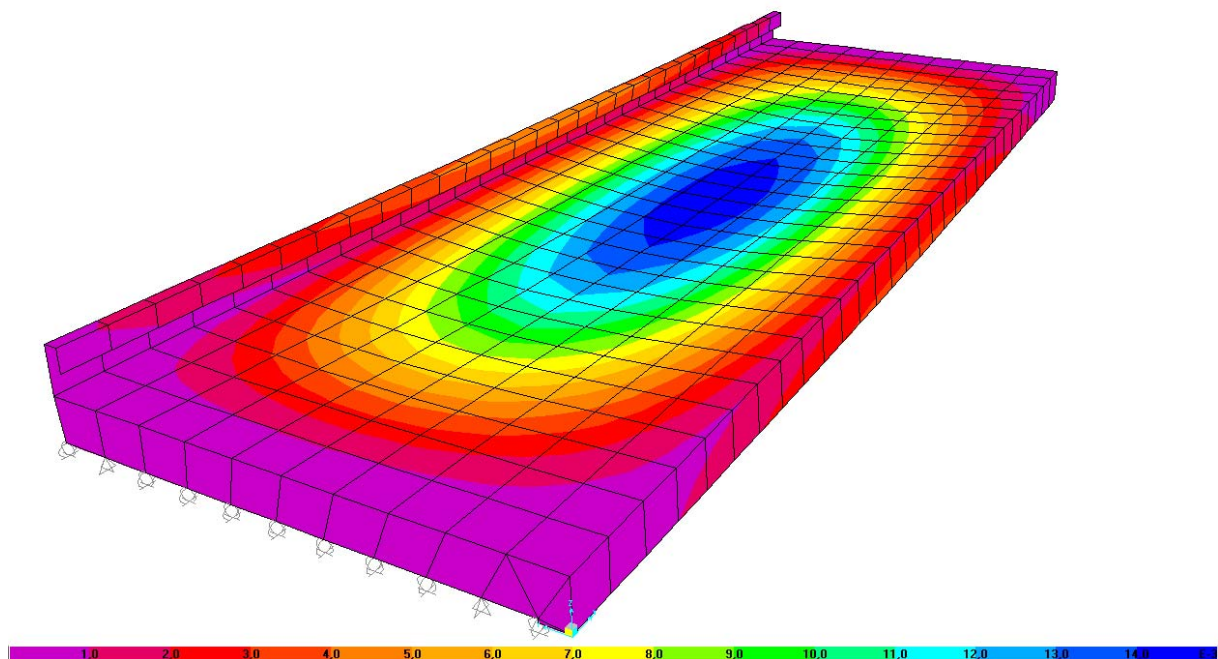
Estos elementos se representan por una malla plana bidimensional. En el modelo se han establecido las condiciones de contorno que la relacionan con los laterales que las sustentan en forma de apoyos que permiten el giro pero no el desplazamiento.

También se ha introducido la carga de diseño. Se han aplicado 45 kg repartidos por toda la superficie.



Modelo del programa de cálculo de la leja.

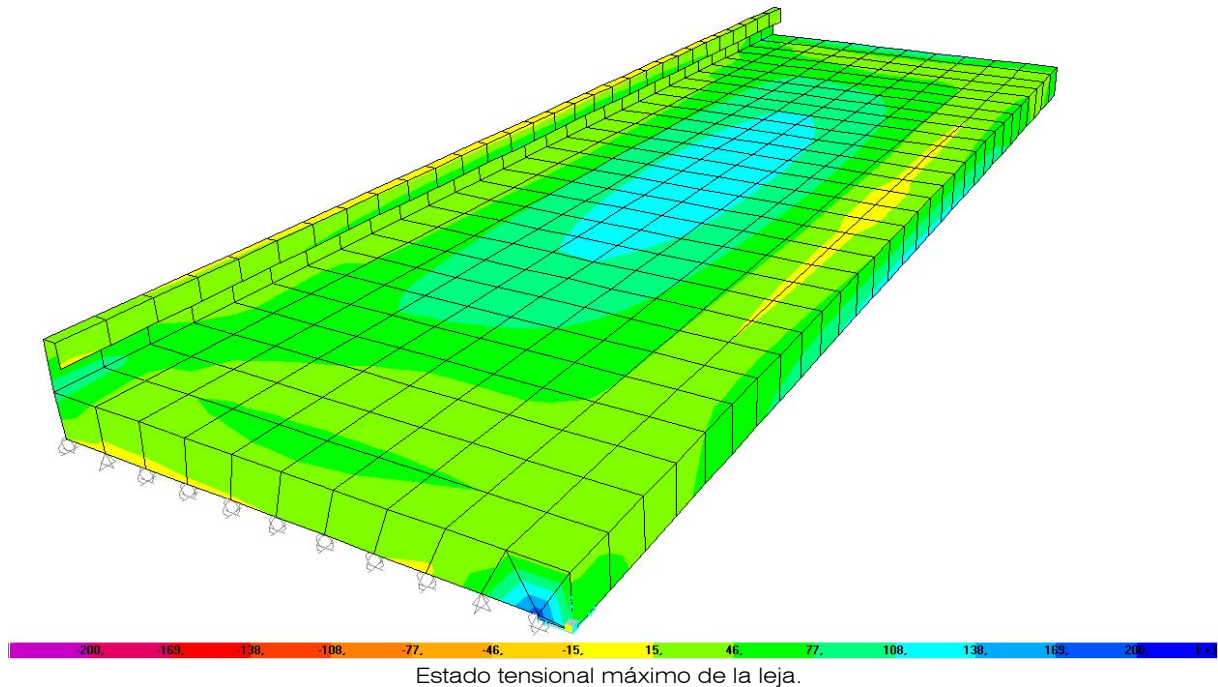
Un primer dato que nos puede informar de cómo está trabajando este elemento es su deformada.



Estado de deformaciones de la leja.

Como se puede observar en el gráfico de la deformada, y como cabía esperar, ésta sufre un ligero abombamiento en su parte central de unos 14 mm.

Pero será el estado tensional el que nos dé los datos reales de cómo de agotado se encuentre el material.



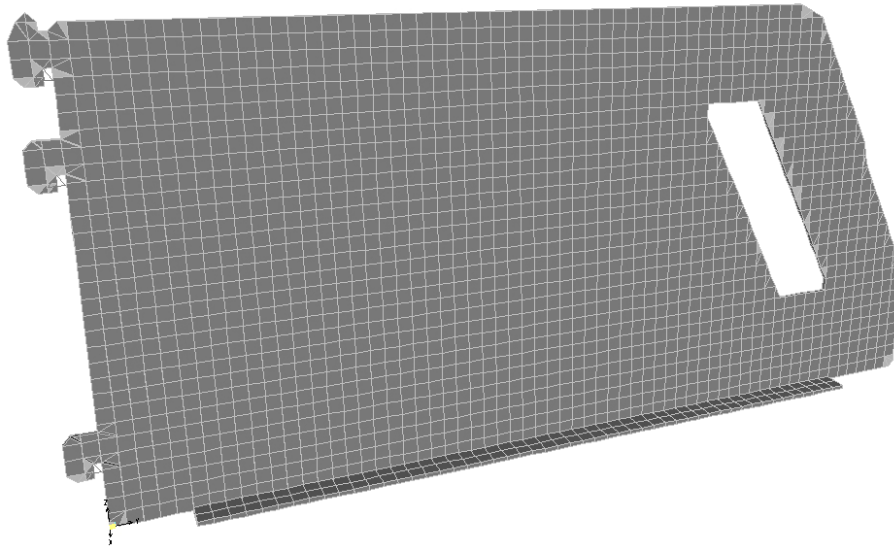
En este diagrama, el programa nos muestra la tensión en cada punto de la malla con una escala de colores. En general la chapa se encuentra a una tensión entre los 40-60 MPa (tonos verdes). El máximo se producen en el centro y en la pregadura delantera en su parte central (que es realmente la que esta rigidizando toda la pieza) de 120 MPa de tracción (tono cian).

El acero utilizado en la elaboración de este elemento es el DC01, cuyo límite elástico es de 200 MPa (tonos azul oscuro y magenta).

Por tanto, podemos decir que el material está trabajando a un 60% en régimen elástico o, lo que es lo mismo, que tiene un coeficiente de seguridad de 1,66.

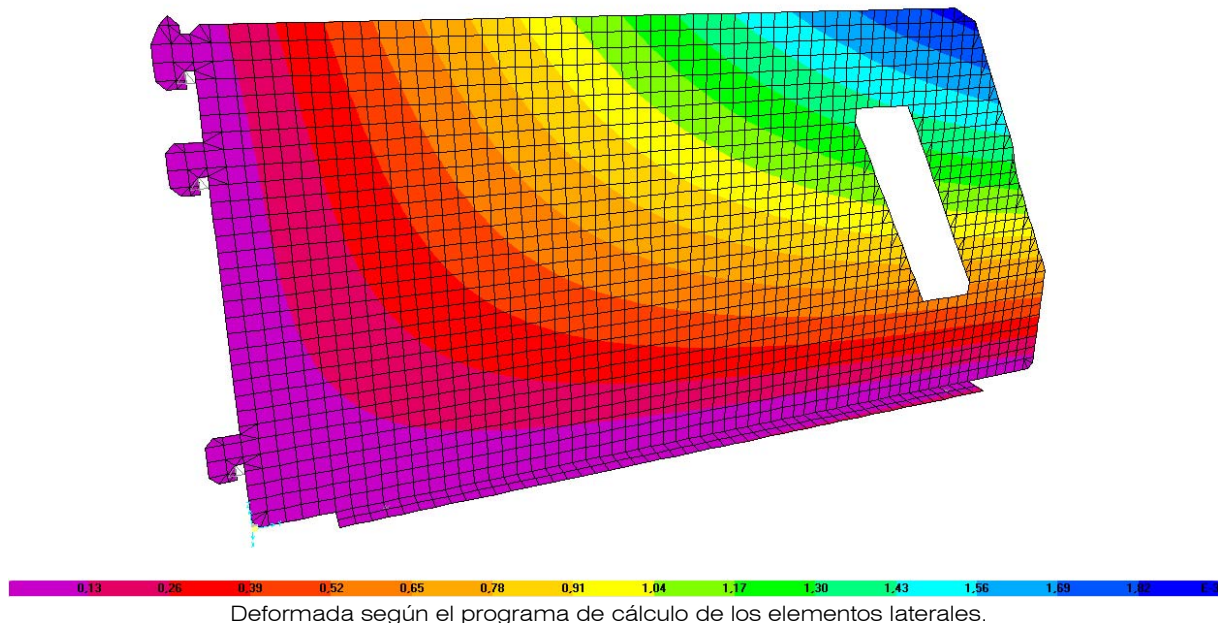
ELEMENTO LATERAL.

Al igual que las lejas, los laterales que las sostienen también se fabrican con chapa plegada de modo que estos también se han modelizado como elementos superficiales. Se trata de una chapa plana de 315 mm de ancho por 155 mm de canto, con un espesor de 1,5 mm. En su parte delantera se le ha practicado un gran agujero decorativo y en su parte inferior tiene una doblez para recoger el apoyo de las lejas. Puesto que cada leja soporta 45 kg y ésta se apoya en dos laterales, se ha introducido una carga de 22,5 kg en el modelo de cálculo.



Modelo de cálculo del programa SAP 2000.

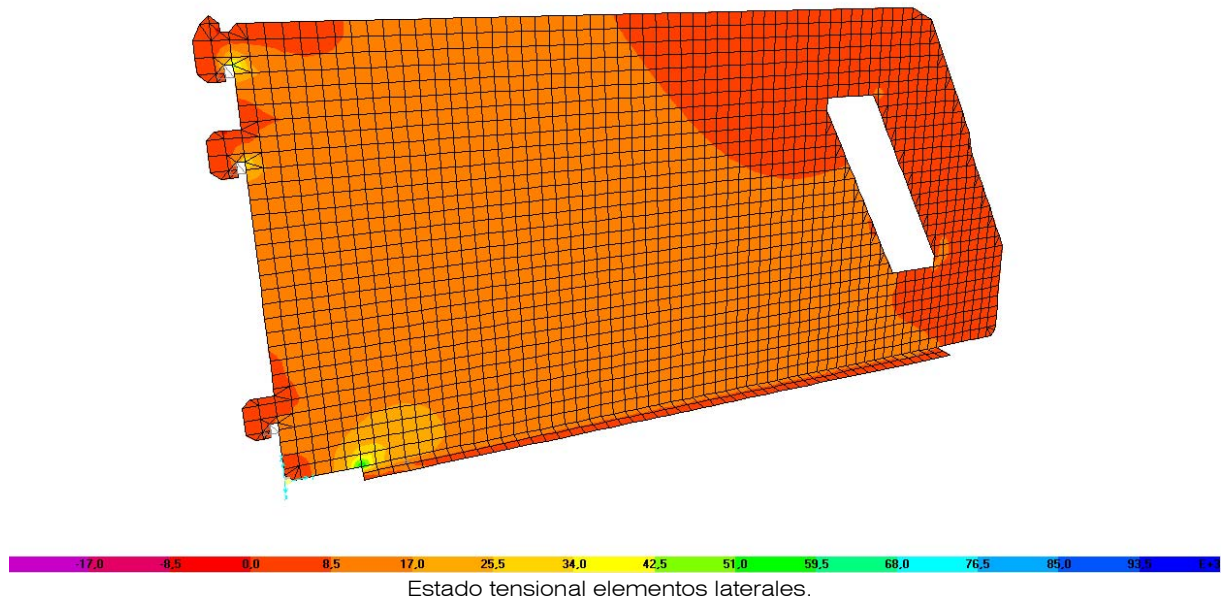
Estos elementos van enganchados con las pestañas al perfil de la estructura de la estantería. Estas son las condiciones de contorno exteriores del modelo que, de nuevo, al permitir el giro pero no el desplazamiento, se han modelizado como simplemente apoyadas. También se ha introducido el efecto de arriostramiento que ofrece la leja en esta chapa, ya que en su parte inferior no permite el movimiento horizontal.



Deformada según el programa de cálculo de los elementos laterales.

La imagen de deformada que nos ofrece el programa nos da bastante información de cómo trabajan estos elementos. Como se puede observar, se deforma 1,9 mm en su extremo libre hacia el interior. Esto es debido

al giro que se produce en la parte inferior de la pieza ya que la carga no se encuentra centrada en su eje. Debido a su gran canto, en su componente vertical a penas se deforma, haciendo de estos unos elementos muy efectivos para el fin para el que pensados.



El estado tensional es el que nos indica realmente como trabajan los laterales de la estantería. Como cabía esperar, éstas funcionan como ménsulas traccionadas de gran canto en el que realmente trabaja la parte de chapa englobada en el triángulo cuyos vértices son el extremo delantero del apoyo de la leja y las pestañas superior e inferior. El extremo de la chapa donde se encuentra la perforación apenas trabaja.

Debido al gran canto, las tensiones son muy bajas. En general, se encuentra a unos 20 MPa (tonos naranja) llegando en algunos puntos hasta los 55 MPa (tonos verdes).

Al igual que en las lejas, el acero utilizado en la elaboración de este elemento es el DC01, cuyo límite elástico es de 200 MPa.

Por tanto, podemos decir que el material está trabajando a un 27% en régimen elástico o, lo que es lo mismo, que tiene un coeficiente de seguridad de 3,64.

ESTRUCTURA GENERAL.

La estructura de la estantería también se ha procesado en el programa de cálculo de estructuras SAP 2000. Está formada por barras de sección rectangular de 60 x 30 mm y de 2 mm de espesor, que se han modelizado en el programa como líneas.

En este caso, las condiciones de contorno son:

- Apoyo de las patas en el suelo: el diseño de la estantería prevé su apoyo con el suelo mediante unos pequeños silembloques de goma que permiten el giro en sus tres ejes pero no el desplazamiento vertical. En cuanto al desplazamiento en el plano horizontal, este dependerá de la fuerza de rozamiento entre el silembloque de goma y el suelo. Este cálculo no va a ser objeto de este estudio puesto que se desconoce el coeficiente de rozamiento del suelo donde se van a colocar las estanterías, pero se va a suponer que mientras que las reacciones horizontales sean menores a las verticales producidas por el peso de los libros, la presión vertical ejercida mantendrá estable al conjunto, evitando su desplazamiento en bloque (como sólido rígido).

- Fuerzas externas: son las que transmiten los elementos que sujetan las lejas. Puesto que estos elementos se relacionan en tres puntos, se van a introducir las mismas cargas obtenidas del cálculo anterior en cada punto donde se prevé la configuración estándar de la estantería.

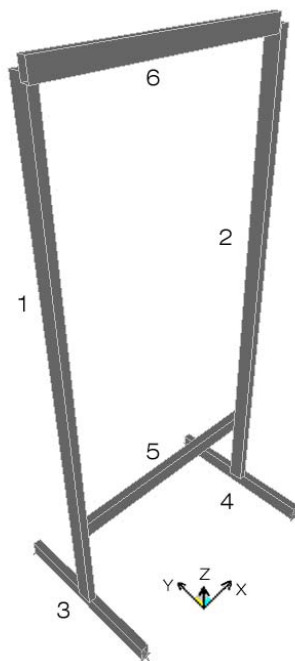
- Situación extraordinaria: como se ha comentado anteriormente, se introducen una fuerza uniformemente distribuida de 0,8 kN/m a una altura de 1,2 m. Esta fuerza se debe colocar en dos direcciones ortogonales. Se dispondrá en los dos ejes principales de la estantería X e Y. El ámbito en el plano perpendicular (eje Y) es de 0,9 m, de modo que la fuerza a aplicar será de 0,72 kN. En el plano paralelo a la estructura (eje X), el ámbito es de 0,69 m, por lo tanto, tenemos una fuerza de 0,55 kN.

La calidad del acero de estos perfiles es E260, con un límite elástico de 290 MPa. Las características mecánicas de este perfil, que dependen de su geometría y el acero utilizado son:

- Área de la sección: 3,39 cm²
- Módulo elástico yy (eje principal): 6,616 cm³
- Módulo elástico zz (eje secundario): 4,026 cm³
- Radio de giro yy (eje principal): 2,15 cm
- Radio de giro zz (eje secundario): 1,24 cm

Con estos datos, obtenemos la resistencia elástica de los perfiles.

- Axil máximo resistido: 98 kN.
- Momento flector yy máximo resistido (eje principal): 1,92 mkN.
- Momento flector zz máximo resistido (eje secundario): 1,17 mkN.

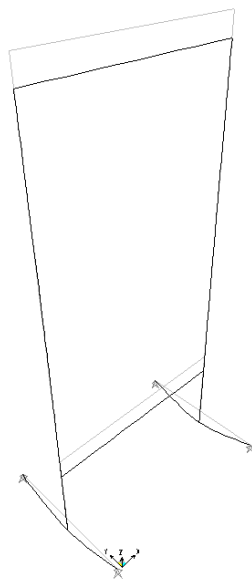


Modelo de barras de la estructura general.

RESULTADO DE CÁLCULOS.

SITUACIÓN PERSISTENTE

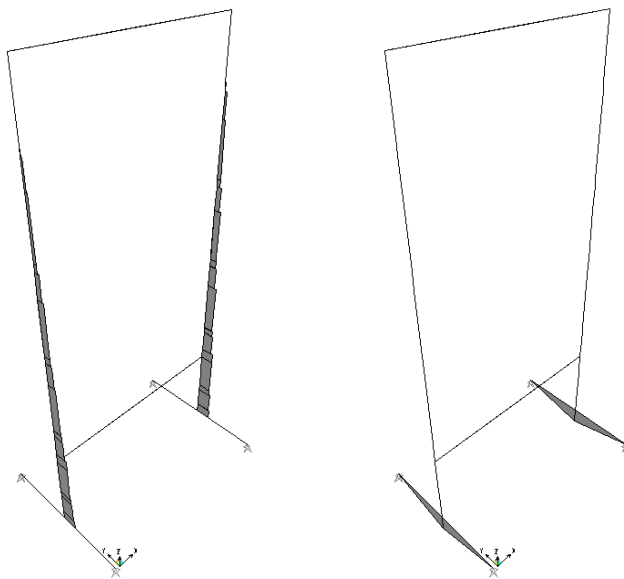
Como hemos hecho con anterioridad, un primer tanteo de cómo funciona la estructura nos lo dará la deformada.



Estructura deformada. (Factor de ampliación: 200)

Como podemos observar en la deformada, los montantes verticales (barras 1 y 2) recogen el peso de los estantes y los transmiten a las patas (barras 3 y 4), que son los únicos elementos que se deforman puesto que están sometidos a flexión. Esta deformación es muy pequeña, de unos 0,4 mm en su parte central hacia abajo (eje Z), aunque en el programa se ha ampliado por 200 esta deformación para poder observar su efecto.

Los diagramas de esfuerzos en barras son los siguientes:



De izquierda a derecha: Esfuerzo Axil y Momento Flector.

Los resultados numéricos así como el coeficiente de seguridad con respecto al límite elástico del material se resumen en la siguiente tabla:

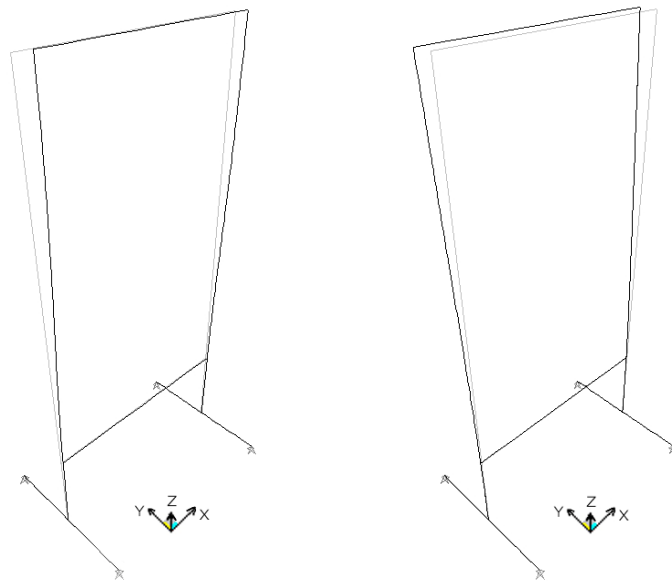
| Barra | Axil (kN) | Momento kNm | Coef. de Seguridad |
|-------|-----------|-------------|--------------------|
| 1 | 2,38 | 0 | 41,18 |
| 2 | 2,38 | 0 | 41,18 |
| 3 | 0 | 0,38 | 5,05 |
| 4 | 0 | 0,38 | 5,05 |
| 5 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 0 | 0 | 100 |

Como podemos observar en la situación de carga persistente la estantería cumple con una seguridad de 5. En esta situación, los travesaños 5 y 6 no trabajan puesto que la carga discurre centrada por los montantes 1 y 2.

SITUACIÓN EXTRAORDINARIA

En la situación extraordinaria, se estudia el efecto de la carga horizontal tanto sobre la resistencia mecánica de cada elemento por separado como la del conjunto en sí. Además, se estudia en dos direcciones ortogonales, que coinciden con los ejes principales de la estantería.

De nuevo, vamos a empezar por analizar la deformada del conjunto.

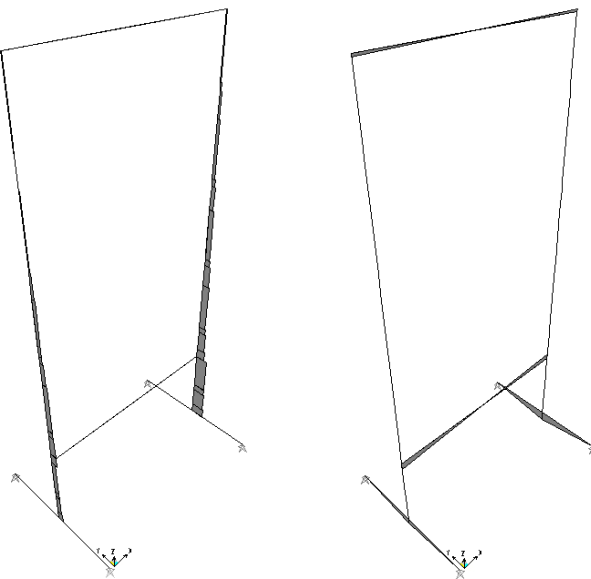


A la izquierda, deformada según la fuerza en el plano de la estructura eje X (factor de ampliación: 8)

A la derecha, deformada según la fuerza en el plano perpendicular de la estructura eje Y (factor de ampliación: 6)

Como podemos observar, al aplicar la fuerza horizontal, la deformación se traslada a los montantes verticales (barras 1 y 2) que deberán soportar dicha fuerza como ménsulas libres en su extremo superior. Esta deformación es de 0,84 cm según el eje X cuando la fuerza actúa en el plano de la estructura y de 1,16 cm según el eje Y cuando la fuerza es perpendicular al plano de la estructura.

Los diagramas de esfuerzos en barras son los siguientes para la fuerza actuando en el plano de la estructura (eje X):



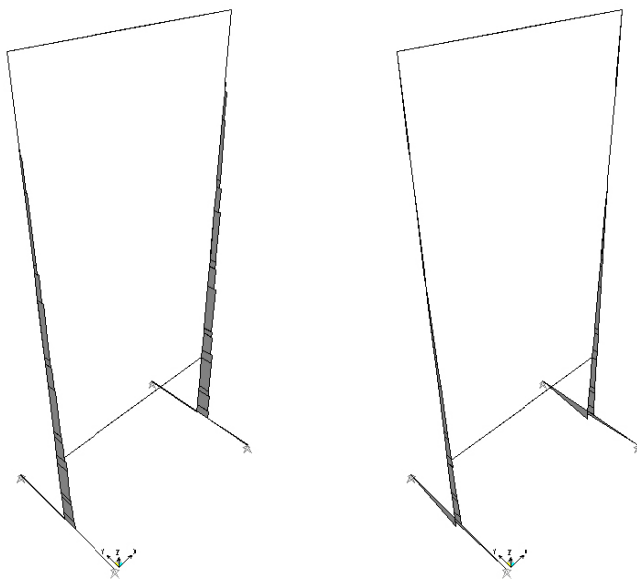
A la izquierda, diagrama de esfuerzo Axil. A la derecha, diagrama de Momento Flector.

Numéricamente, estos resultados son:

| Barra | Axil (kN) | Momento kNm) | Coef. de Seguridad |
|-------|-----------|--------------|--------------------|
| 1 | 1,7 | 0,18 | 6,50 |
| 2 | 3,28 | 0,19 | 6,16 |
| 3 | 0 | 0,23 | 8,35 |
| 4 | 0 | 0,52 | 3,69 |
| 5 | 0 | 0,31 | 6,19 |
| 6 | 0 | 0,1 | 19,20 |

Se puede observar cómo al deformarse la estructura hacia un lado, ésta carga más hacia ese lado (en este caso, hacia la barra 2 y la pata 4). No obstante esto, la estructura sigue cumpliendo con una seguridad de 3,69. En esta situación, sí que entran a trabajar los travesaños 5 y 6, puesto que deben arriostrar el conjunto de la estructura.

Por último, los diagramas de tensiones en las barras cuando la fuerza actúa en la dirección perpendicular al plano de la estructura (eje Y) son los siguientes:



De izquierda a derecha: diagrama de esfuerzo Axil, diagrama de Momento Flector.

| Barra | Axil (kN) | Momento kNm | Coef. de Seguridad |
|-------|-----------|-------------|--------------------|
| 1 | 2,38 | 0,41 | 2,85 |
| 2 | 2,38 | 0,37 | 3,16 |
| 3 | 0,18 | 0,58 | 3,31 |
| 4 | 0,14 | 0,56 | 3,43 |
| 5 | 0 | 0 | 100 |
| 6 | 0 | 0 | 100 |

Como podemos observar, esta es la hipótesis de carga que más penaliza a la estructura, obteniendo el coeficiente de seguridad más bajo. Pero aún así, seguimos teniendo una seguridad de 2,85. Como puede observarse, nuevamente los travesaños 5 y 6 no entran en carga puesto que son los montantes 1 y 2 los que llevan la fuerza hasta las patas 3 y 4.

César Sempere García

Ingeniero Técnico Industrial
Nº Colegiado 3.621



Colegio de Ingenieros
Técnicos Industriales de Alicante