

Resumen

El presente Proyecto Final de Carrera está dedicado al análisis de puntales de estanterías metálicas, con objeto de optimizar la sección de un perfil concreto desde el punto de vista resistente a compresión.

El punto de partida son dos secciones de chapa de acero de 1mm de espesor, conformadas en frío y abiertas. La segunda sección es una modificación de la primera obtenida aumentando el desarrollo de plancha, y por lo tanto la cantidad de material empleado, que se diseñó con el objetivo de aumentar considerablemente la capacidad resistente a compresión de aquella. El resultado de los ensayos experimentales sobre estas dos secciones ha puesto de manifiesto que sólo se consigue un aumento importante de resistencia en el caso de longitudes cortas ($L=200$ mm), y que este incremento se reduce progresivamente con la longitud. Así, para longitudes iguales y superiores a 1100 mm el comportamiento de las dos secciones es similar. En el siguiente Proyecto se ha modificado, en fases sucesivas, esta segunda sección, con el objetivo de conseguir un aumento efectivo de su resistencia a compresión, en longitudes de 1100 mm y superiores, que son las que en la práctica se requieren.

El nuevo perfil tiene una serie de limitaciones geométricas de diseño, tales como las dimensiones externas de la sección, las copas (encaje de las grapas), taladros (para las diagonales que forman el bastidor), ancho mínimo (para las diagonales), etc. Estos parámetros configuran las condiciones de contorno de la nueva sección, de modo que las modificaciones aplicadas en los sucesivos diseños deben tenerlas en cuenta.

Se han utilizado dos métodos para el cálculo de la carga última o de fallo del perfil a compresión. En primer lugar se ha estudiado por simulación numérica por elementos finitos utilizando el programa ANSYS v.10.0 y posteriormente con una serie de fórmulas descritas por la FEM (Fédération Européenne de la Manutention) que están extraídas del Eurocódigo-3, obteniendo con ambos procedimientos resultados semejantes, aunque la normativa resulta en general más conservadora.

Para la optimización de la sección se ha tomado la geometría inicial de la segunda sección, cambiando en cada propuesta únicamente una variable geométrica con el fin de aislar las que más influyen sobre su comportamiento resistente a compresión.

Como resultado final del estudio y análisis, se ha obtenido una nueva sección que responde al objetivo planteado, cumpliendo las restricciones fijadas y con un aumento mínimo de material por lo que el coste económico del puntal no se verá incrementado en exceso. Se concluye, por lo tanto, que se ha logrado el objetivo del proyecto en todo su alcance.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. PREFACIO	7
1.1. Origen del proyecto	7
1.2. Motivación	7
2. INTRODUCCIÓN	9
2.1. Objetivos del proyecto	9
2.2. Alcance del proyecto	9
3. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTANTERÍAS	11
4. ANÁLISIS DEL DISEÑO INICIAL	17
4.1. Características geométricas	17
4.2. Simulación numérica por elementos finitos	19
4.2.1. Análisis lineal	20
4.2.2. Análisis no lineal	22
4.3. Normativa FEM 10.2.02 “The design of static steel pallet tracking”	28
4.4. Comparación de resultados y conclusiones	31
5. ESTUDIO DE MEJORAS DEL RENDIMIENTO DEL PERFIL UTILIZANDO CONJUNTAMENTE LOS DOS MÉTODOS ANTERIORES	33
5.1. Modelo B	34
5.1.1. Características geométricas	34
5.1.2. Resultados simulación y FEM	35
5.1.3. Comparación con el diseño inicial	39
5.2. Modelo B-1	42
5.2.1. Características geométricas	42
5.2.2. Resultados simulación y FEM	43
5.2.3. Comparación diseño inicial	44
5.3. Modelo B-2	46
5.3.1. Características geométricas	46
5.3.2. Resultados simulación y FEM	47
5.3.3. Comparación diseño inicial	48
5.4. Modelo B-3	50



5.4.1. Características geométricas	50
5.4.2. Resultados simulación y FEM.....	51
5.4.3. Comparación diseño inicial	52
5.5. Conclusiones de los modelos realizados	54
6. PROPUESTA DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DEL NUEVO DISEÑO	59
6.1. Características geométricas	59
6.2. Resultados simulación y FEM	60
6.3. Comparación diseño inicial.....	62
7. COMPARATIVA DE VARIABLES GEOMÉTRICAS DE TODOS LOS MODELOS REALIZADOS	65
8. IMPACTO AMBIENTAL	71
9. PRESUPUESTO	73
CONCLUSIONES	75
AGRADECIMIENTOS	77
BIBLIOGRAFÍA	79
9.1. Referencias bibliográficas	79
9.2. Bibliografía complementaria	79

ANEXO A - OTROS MODELOS ESTUDIADOS

ANEXO B - COMPARACIÓN DE TODOS LOS DISEÑOS REALIZADOS

ANEXO C - SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS





1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

El origen de este proyecto surge de la necesidad de aumentar la carga resistente de este tipo de estantería, aumentando por lo tanto la carga máxima resistida por los puntales a longitudes utilizadas en la práctica; y del gran campo de investigación que hay abierto en torno de los perfiles delgados.

1.2. Motivación

La realización del presente proyecto está motivada por la participación del autor en una beca de investigación realizada de octubre de 2006 a junio de 2007, centrada en el estudio de perfiles delgados, en la simulación numérica de éstos y comparación con ensayos experimentales, observando cómo afectan las imperfecciones en este tipo de perfiles al tipo de fallo sufrido y al valor de carga máxima alcanzado.



2. Introducción

El proyecto trata sobre la optimización de componentes estructurales de estanterías metálicas, en concreto se estudia la sección de los perfiles que las soporta.

2.1. Objetivos del proyecto

El principal objetivo es optimizar la sección del puntal de la estantería. Para ello se ha de realizar un estudio con diferentes alternativas para encontrar qué factores afectan a su comportamiento a compresión.

2.2. Alcance del proyecto

Se ha de optimizar la sección que soporta las estanterías, para obtener cargas cercanas al doble de las actuales para las alturas de entre 1100 y 1300 mm. Se presentan una serie de limitaciones en la geometría del puntal debido a su montaje y funcionalidad que han de ser respetadas. A parte de estas restricciones también se ha de tener en cuenta la cantidad de acero utilizada ya que no interesa aumentar en exceso el coste de los perfiles.

Se estudiarán diferentes alternativas variando únicamente la geometría de la sección, manteniendo su espesor y tipo de material; de este estudio surgirán las variables a modificar de la geometría y se propondrá un nuevo diseño para su posterior fabricación.





3. Características de las estanterías

La estantería estudiada en este proyecto, se trata de un sistema básico de almacenaje manual y archivo destinado a cargas medias y ligeras, Fig. 3.1.



Figura 3.1 Estanterías estudiadas en funcionamiento



En la Fig. 3.2, se observan los dos tipos de puntal. El puntal de la derecha es el primer diseño, el otro corresponde a una propuesta para aumentar el valor de carga máxima a compresión pero no ha dado los resultados esperados. En el presente Proyecto se va a tratar de hallar una nueva propuesta que sí logre un incremento de capacidad resistida a compresión, con un incremento mínimo de material.



Figura 3.2 Tipos de columnas de la estantería

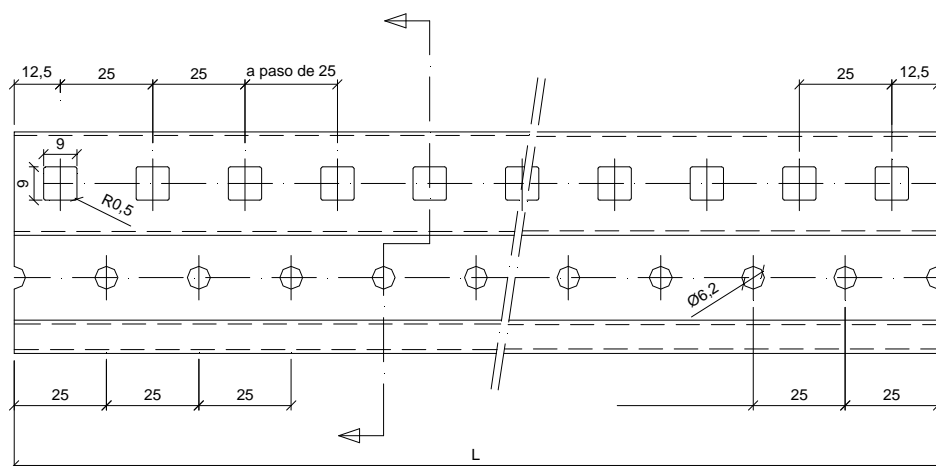


Figura 3.3 Plano de desarrollo del perfil



Estos perfiles, tienen condicionada su geometría debido a una serie de prestaciones y normas de montaje de las estanterías, por lo que deben mantenerse los siguientes parámetros:

- Posición de los agujeros respecto a la base del perfil: esta distancia debe permanecer igual debido a que los agujeros cuadrados se enganchan a paneles metálicos para soportar los objetos de la estantería; y los redondos sujetan la chapa que enfrenta a un puntal con otro.



Figura 3.4 Enganche de paneles al perfil



- Distancia vertical entre agujeros: esto es debido a se ofrece que la altura de las estanterías se pueda regular en múltiplos de 25 mm.



Figura 3.5 Estantería con bandejas a diferentes alturas



- Tamaño de los agujeros: los agujeros redondos han de ser de 6,2 mm de diámetro mientras que los agujeros cuadrados son de ancho 9 mm con las esquinas redondeadas con un radio de 0,5 mm.



Figura 3.6 Enganche de láminas a los agujeros del perfil

- Distancia entre las alas: ha de ser de un mínimo de 4 mm para poder introducir entre ellas la chapa que enfrenta los puntales.



Figura 3.7 Unión de dos perfiles enfrentados



- Separación, de los bordes del rigidizador, que ha de ser de 12 mm, pues entre ellos se ha de poder introducir una lámina de madera aglomerada con acabado de melanina que otorga un aspecto más decorativo.



Figura 3.8 Unión de lámina de madera al perfil



4. Análisis del diseño inicial

4.1. Características geométricas

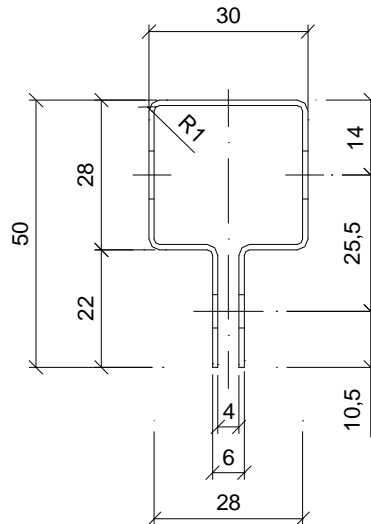


Figura 4.1 Geometría del diseño original



La Tabla 4.1 muestra las propiedades geométricas principales de la sección:

- Área: indica el área de la sección maciza, sin tener en cuenta que está agujereada.
- I_T : inercia a torsión de la sección.
- I_W : constante de alabeo.
- I_z : inercia sobre el eje z o también llamada inercia sobre el eje fuerte.
- I_y : inercia sobre el eje y o inercia sobre el eje débil.
- i_z, i_y : radio de giro sobre los ejes z e y.
- y_o : distancia del centro de masas geométrico de la sección al centro de esfuerzos cortantes.
- A_{eff} : área eficaz de la sección, el área que realmente trabaja, se ha calculado como la carga máxima resistida por el perfil a compresión simple para una longitud de 200 mm dividida entre el límite elástico del acero del perfil.

Área	148,135 mm ²
I_T	49,222 mm ⁴
I_W	2,70E+07 mm ⁶
I_z	34551 mm ⁴
I_y	15140 mm ⁴
i_z	15,27 mm
i_y	10,11 mm
y_o	42,307 mm
A_{eff}	109,62 mm ²

Tabla 4.1 Tabla de propiedades de la sección original



4.2. Simulación numérica por elementos finitos

La modelización por elementos finitos del diseño inicial se ha realizado mediante el programa ANSYS v.10.0, se ha programado una macro, (serie de comandos con los que se genera el perfil con una serie de variables como longitud, tamaño de elemento, punto de aplicación de la carga, etc.) mediante la cual se genera el perfil de forma rápida para diferentes longitudes, esta macro se define y comenta en el anexo C.

El ensayo realizado en esta simulación trata de una compresión simple sobre el perfil, por lo que antes de realizar todos los ensayos sobre diferentes longitudes de éste, se ha de obtener el centro de masas eficaz del perfil, punto en el cual se aplicará la carga para realizar una compresión simple; para obtenerlo se realiza un procedimiento en el cual se prueban varios ensayos sobre un puntal de longitud $L=200$ mm, aplicando la fuerza en la vertical del centro geométrico de masas y el ensayo que resulte con mayor valor de carga máxima alcanada es el que corresponde al centro de masas eficaz del puntal, y que se utilizará como punto de aplicación de la carga para el resto de longitudes.

La modelización del ensayo, Fig. 4.2, consta del puntal a estudiar, más dos placas en los extremos de éste con el fin de aplicar la carga de forma repartida sobre la sección, estas placas se han simulado de 20 mm de espesor y con un tipo de elemento que hace de estas placas un elemento rígido que únicamente transmite el esfuerzo de forma repartida al puntal.

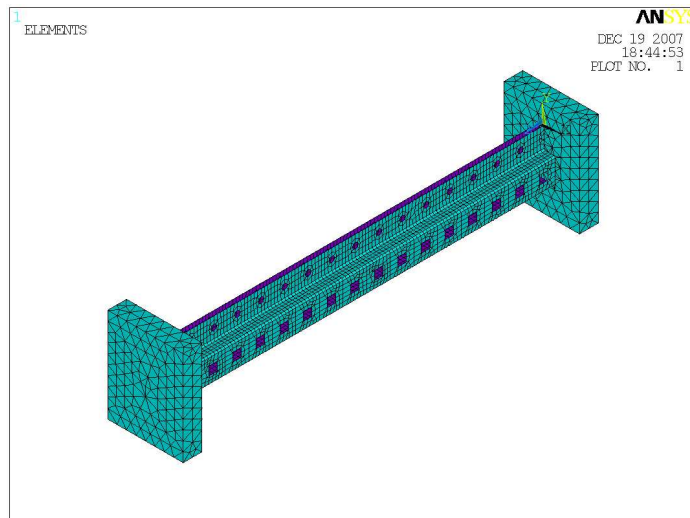


Figura 4.2 Imagen modelo por elementos finitos



Se realizan dos tipos de ensayo en esta simulación, primero un ensayo lineal en el cual se observa el tipo de fallo que sufre el perfil y la carga crítica de éste y en segundo lugar un análisis no lineal, que ofrece un resultado más cercano a la realidad.

4.2.1. Análisis lineal

Este ensayo se realiza para obtener los diferentes modos de fallo del perfil, en este caso sólo interesa el primer modo ya que es por el cual falla el puntal. Además del tipo de fallo, este análisis ofrece el resultado de carga crítica de fallo, dato que corresponde al valor en el cual se producirá el fallo de la estructura por ese modo, este valor no es comparable a la realidad ya que no tiene en cuenta las imperfecciones que pueda tener el perfil ni el límite elástico del material de éste, únicamente se tiene en cuenta su módulo de elasticidad y datos geométricos.

Las cargas críticas del diseño inicial así como el modo de fallo correspondiente se pueden observar en la Tabla 4.2:

L (mm)	N _{CRIT} (N)	Tipo
200	68889	Local
300	68423	Local
400	68220	Local
500	59563	Global
600	46455	Global
700	36495	Global
800	29080	Global
900	23596	Global
1100	16256	Global
1300	11839	Global
1500	8994	Global
1700	7062	Global

Tabla 4.2 Tabla de resultados del análisis lineal



Se observan dos tipos de fallo, uno local, mostrado en la Fig 4.3, que corresponde a la abolladura únicamente de una placa del perfil, este tipo de fallo se suele dar en longitudes cortas y tiene la peculiaridad de que las cargas máximas de fallo obtenidas son similares para diferentes longitudes. El otro tipo de fallo es el global, en este caso por la flexo-torsión, que es un fallo marcado por la flexión del perfil en el eje débil a la vez que gira. Fig. 4.4.

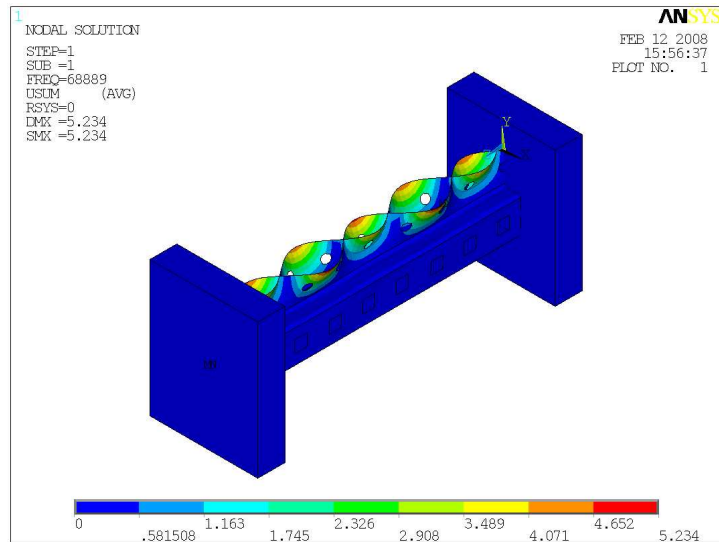


Figura 4.3 Resultado análisis lineal (L=200 mm)

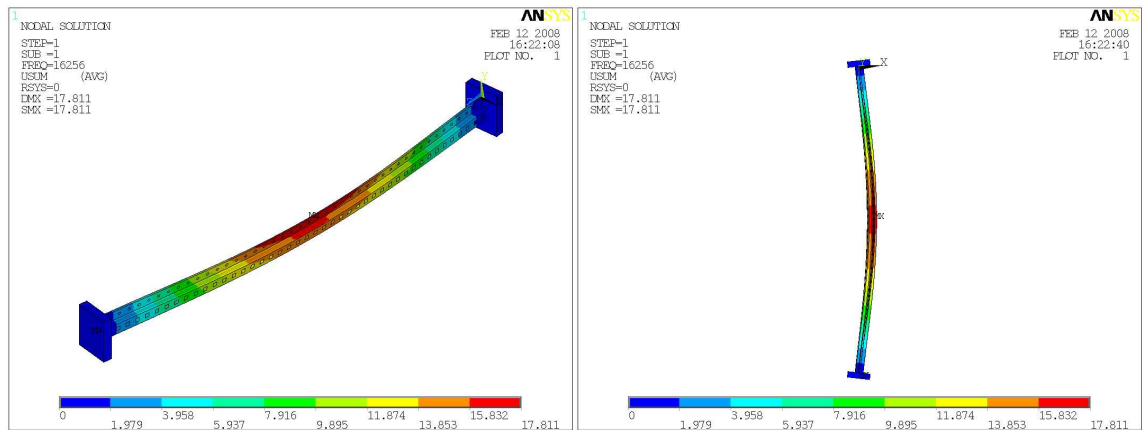


Figura 4.4 Resultados análisis lineal (L=1100 mm)



4.2.2. Análisis no lineal

En este tipo de análisis se obtiene como resultado una carga máxima comparable a la real; para ello se utiliza el modo de fallo observado en el ensayo lineal, y el límite elástico real del acero utilizado.

Este ensayo se realiza, aplicando en la simulación un desplazamiento en un extremo del puntal, manteniendo el otro fijado, este desplazamiento se va aplicando de forma incremental, por medio de subpasos, Fig. 4.5, en cada uno de ellos se recalcula la deformación sufrida por el perfil y la fuerza resultante que se genera en extremo fijado, para cada paso intermedio, se regenera la geometría del puntal hasta que llega un momento que éste colapsa, y la fuerza resultante en el extremo comienza a disminuir.

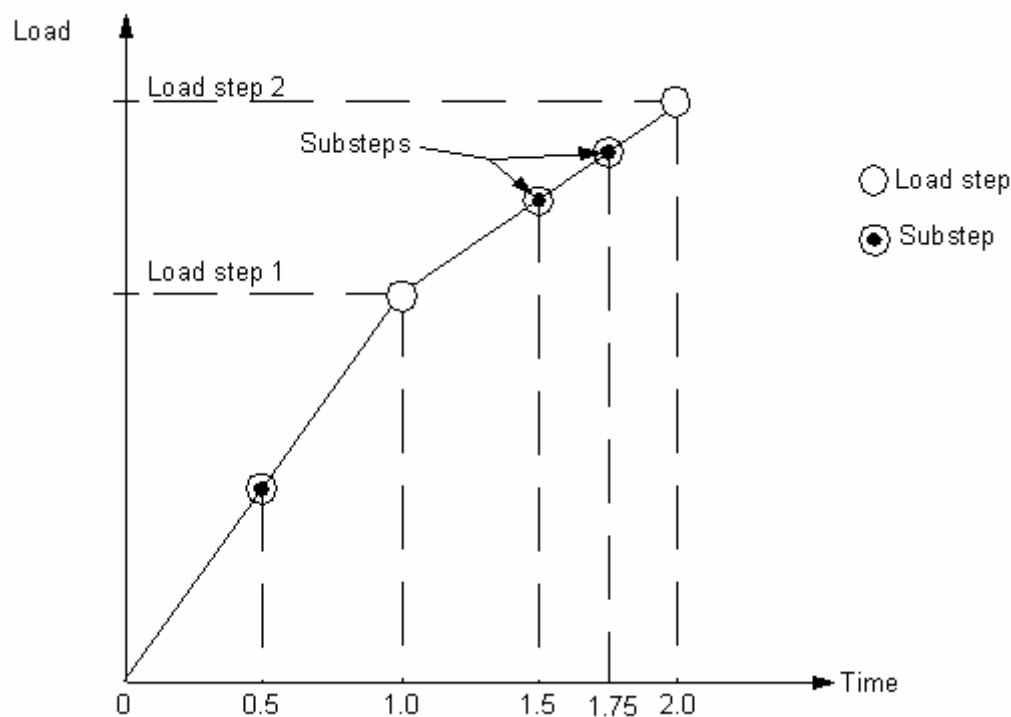


Figura 4.5 Gráfico explicativo análisis no lineal



El modo de fallo del análisis lineal, se utiliza aplicando sobre éste un factor definido por normativa y que da a la pieza una imperfección inicial, éste factor depende del tipo de fallo que se produzca, así si se observa un fallo local en el perfil se aplica el factor $b/200$ (b = ancho de la placa del perfil donde se produce la abolladura) [1], en cambio, si el fallo es de tipo global la imperfección máxima aplicada es de $L/1000$ (L = longitud del perfil) [2],[3].

El límite elástico del acero utilizado para este perfil es de $268,1 \text{ N/mm}^2$, Fig. 4.6, punto a partir del cual el módulo de elasticidad pasa a ser de 2100 N/mm^2 , para asimilar la curva de material a la realidad, por lo que en la simulación, debido a que para cada paso se recalcula tanto la nueva deformada del puntal, como las tensiones a que esta sometido cada elemento en que este está discretizado, en el momento que algún elemento llegue a la tensión de límite elástico, éste plastifica y pasa a aplicarse sobre él el nuevo módulo de elasticidad.

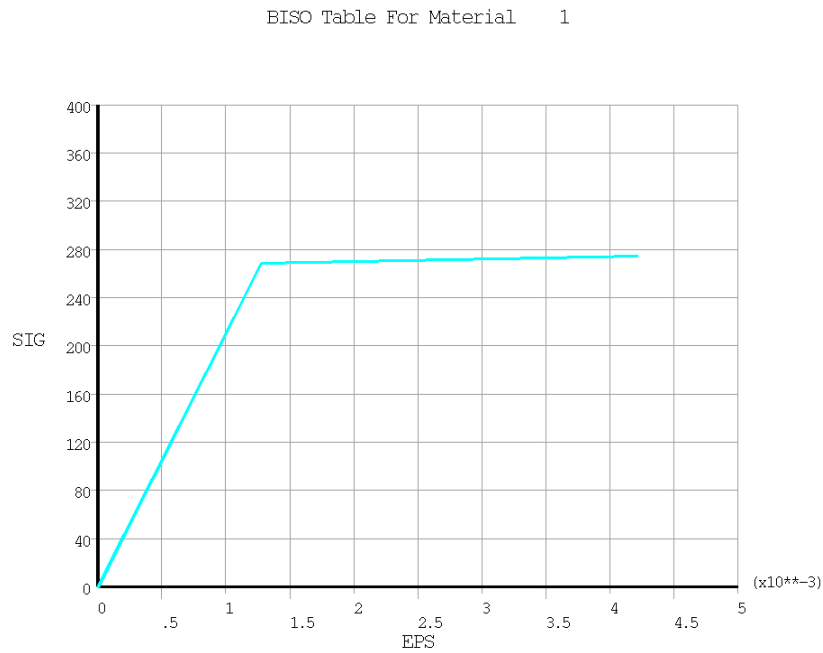


Figura 4.6 Gráfico tensión-deformación del acero utilizado



En la Tabla 4.3 se presentan los valores de carga máxima obtenidos en esta simulación:

L (mm)	N_{\max} (N)
200	29924,3
300	29347,6
400	29171,9
500	25889,2
700	22405
900	17716,3
1100	13392,3
1300	10184,4
1500	7918,4
1700	6316,28

Tabla 4.3 Tabla de resultados del análisis no lineal

En las tablas de resultados presentadas cabe destacar como la carga de fallo del perfil se mantiene constante en los modos de fallo locales, y comienza a disminuir cuando aparece el fallo global a flexo-torsión.

Por lo que se refiere al tipo de fallo local, en la Fig. 4.7, se muestra el gráfico de fuerza-desplazamiento aplicado, en la que se observa como varía la fuerza resultante a medida que se va aplicando más desplazamiento, la carga máxima resistida llega a un punto máximo, y cuando el perfil colapsa comienza a disminuir.

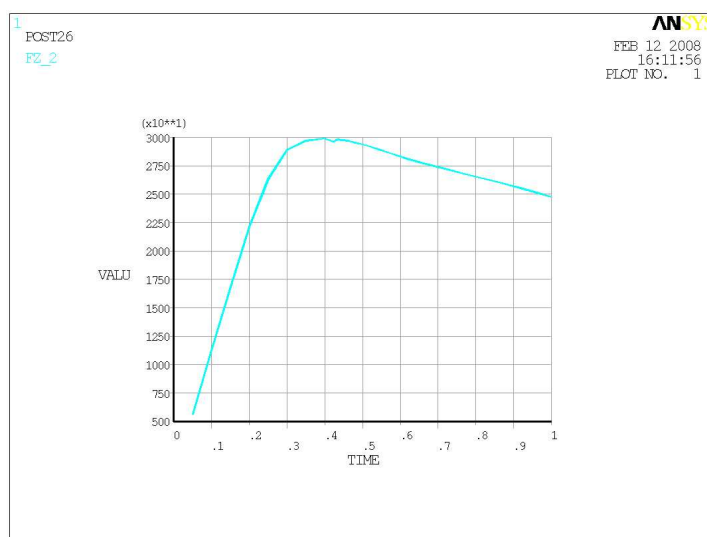


Figura 4.7 Gráfico fuerza-desplazamiento (L=200 mm)



En la Fig. 4.8, se muestra el fallo que sufre el puntal en la simulación, al haber partido de la deformada lineal, el perfil sufre la abolladura en ese lugar, el ala del perfil. Como se puede ver en el ensayo experimental Fig. 4.9, el fallo para esta longitud coincide con el fallo por simulación.

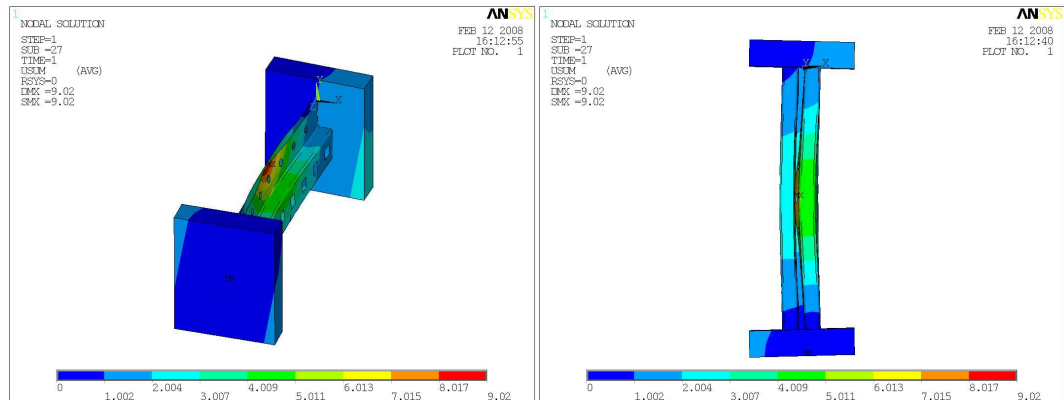


Figura 4.8 Resultado análisis no lineal (L=200 mm)



Figura 4.9 Ensayo experimental (L=200 mm)



El fallo global por flexo-torsión, Fig. 4.10, que se produce en longitudes superiores a 400 mm, para este perfil, se puede observar en la Fig. 4.11, como ya se había comentado, el perfil rota y flexa sobre el eje débil, este tipo de fallo coincide como el anterior, con el fallo que sufre el perfil en los ensayos experimentales, Fig.4.12.

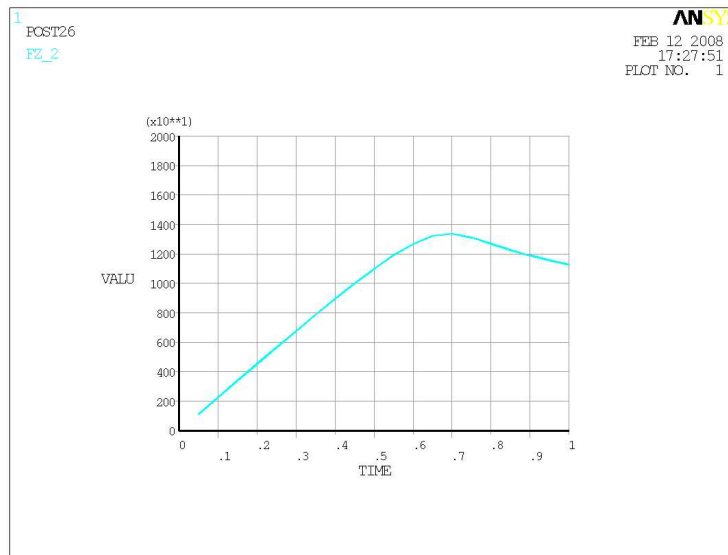


Figura 4.10 Gráfico fuerza-desplazamiento (L=1100 mm)

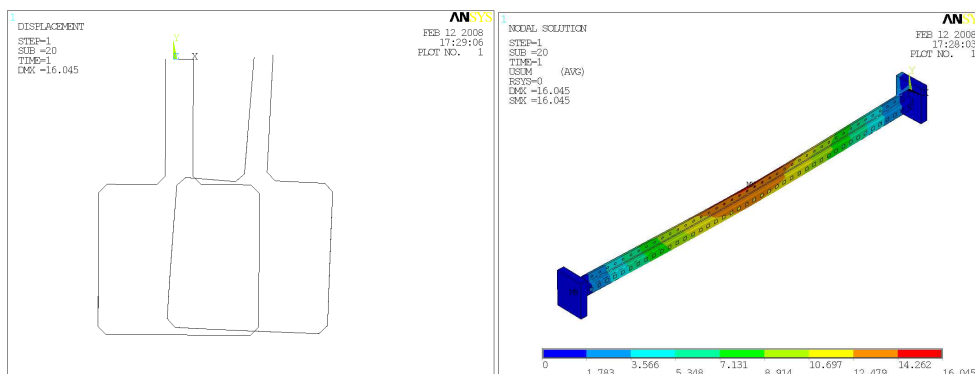


Figura 4.11 Resultado análisis no lineal (L=1100 mm)





Figura 4.12 Ensayo experimental (L=1100 mm)



4.3. Normativa FEM 10.2.02 “The design of static steel pallet tracking”

La FEM (Fédération Européenne de la Manutention) [4], propone una serie de fórmulas con las que obtener una carga de diseño para estos perfiles utilizados en estanterías, estas fórmulas dependen en su mayoría de factores geométricos del perfil y están dadas por el Eurocódigo-3. La carga de diseño que se obtiene con las fórmulas que se presentan a continuación, es una carga máxima del perfil cuando su fallo se produce únicamente por flexo-torsión, en caso de no ser así esta carga de diseño es comparable a la realidad.

Carga crítica a flexo torsión:

$$N_{cr,FT} = \frac{1}{2\beta} \left[N_{cr,y} + N_{cr,T} - \sqrt{(N_{cr,y} + N_{cr,T})^2 - 4\beta N_{cr,y} N_{cr,T}} \right] \quad (\text{Ec. 4.1})$$

En esta ecuación se utiliza la carga crítica a torsión, la FEM también da una expresión para esta carga y un factor β que se definen a continuación; por lo que se refiere a la variable $N_{cr,y}$ se define como el valor de la carga crítica de Euler:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left[GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_{eT}^2} \right] \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$



El valor obtenido de $N_{cr,FT}$ se introduce en el siguiente cálculo de λ como N_{cr} :

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$\phi = 0.5[1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (\text{Ec. 4.6})$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{pero } \chi \leq 1 \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Finalmente introduciendo el valor de χ en la siguiente ecuación, se obtiene la carga de diseño, aplicando un coeficiente de seguridad $\gamma_M=1$.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_M} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

En esta última ecuación aparece el límite elástico del material, que es de 268,6 N/mm² para todos los perfiles, y A_{eff} (área eficaz de la sección), que según la FEM, se tendría que calcular dividiendo el valor de carga máxima resistida en un ensayo experimental del puntal a una longitud corta ($L=200$ mm) entre el límite elástico del material, pero en este caso debido a que no se pueden obtener ensayos experimentales de las mejoras que se propondrán, se ha optado por utilizar el valor de carga máxima obtenido en el ensayo no lineal de la simulación para todos los perfiles, valor que se aproxima al experimental.



Utilizando estas fórmulas con las características geométricas del diseño inicial, se obtienen los siguientes valores de la carga de diseño para las diferentes longitudes de este perfil Tabla 4.4:

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	29035,24
300	27743,04
400	26320,85
500	24692,28
600	22810,97
700	20698,91
800	18468,19
900	16279,37
1000	14264,70
1100	12489,67
1200	10964,14
1300	9668,12
1400	8570,84
1500	7640,72
1600	6849,35
1700	6172,70

Tabla 4.4 Resultados FEM del modelo original



4.4. Comparación de resultados y conclusiones

Como ya se ha comentado anteriormente, las fórmulas propuestas por la FEM, son las utilizadas debido a un fallo del diseño por flexo-torsión, a ello se debe que en los tres primeros valores halla diferencias importantes entre los gráficos de simulación y normativa, Fig. 4.13, ya que en estos valores, el fallo real del perfil es un tipo de fallo local como se observa en la simulación y por tanto la formulación utilizada no es válida para estos casos. A parte de estos tres primeros valores, el resto se aproximan, viendo como en todo momento se encuentra el valor máximo de carga resistida obtenido por la simulación por encima del valor de la normativa la cual es más conservadora.

A su vez se observa como los resultados experimentales siguen la misma tendencia que los dos métodos utilizados aunque quedando siempre por encima de ellos, una causa de este hecho podría recaer en la imperfección introducida en el perfil para la simulación, y que tiende hacia el modo fallo que se producirá en el perfil, hecho que en la realidad, en un ensayo experimental no tiene porqué suceder y que puede afectar a que este valor experimental sea algo superior al de la simulación.

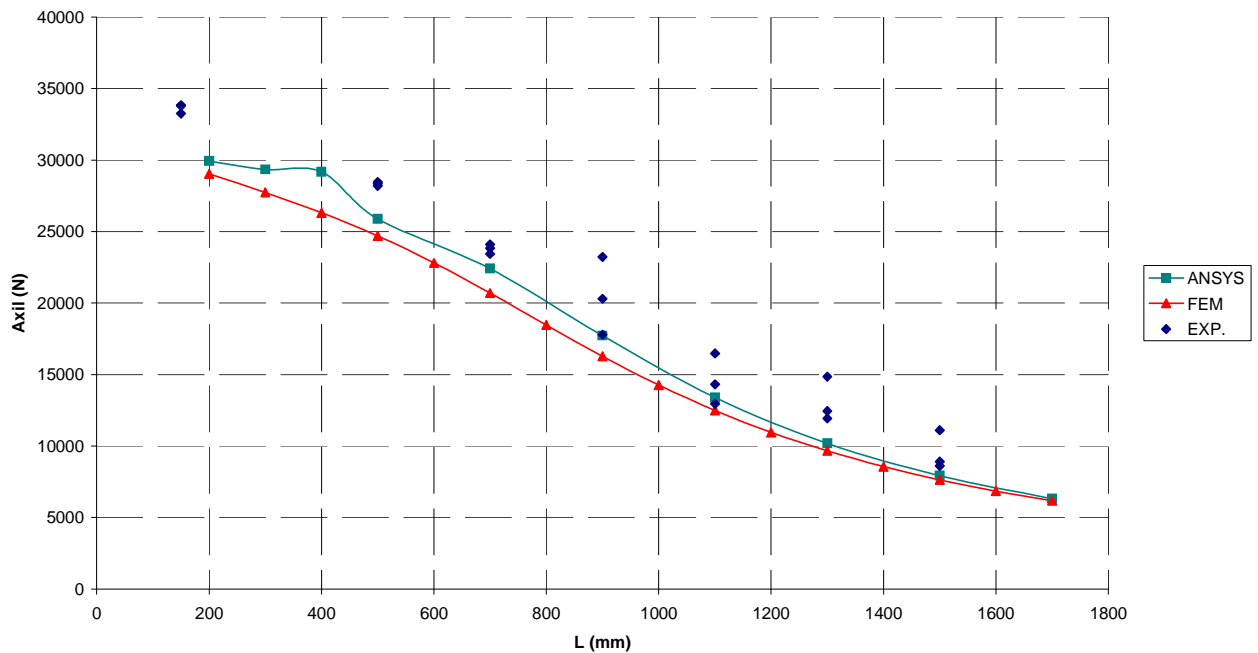


Figura 4.13 Gráfico comparativo de resultados por simulación, FEM y experimental





5. Estudio de mejoras del rendimiento del perfil utilizando conjuntamente los dos métodos anteriores

Observando los resultados obtenidos anteriormente con el diseño inicial, no tanto valores de carga máxima resistida sino más su tipo de fallo, flexo-torsión, se proponen una serie de cambios en el perfil que deben aumentar significativamente su resistencia.

Los cambios a proponer sobre la sección, parten del modelo mejorado, obtenido aumentando el desarrollo de la plancha, aunque teniendo siempre presente que el objetivo es respecto al modelo original.

Al deberse su fallo a la flexo-torsión, los cambios que se realizan están orientados hacia ese fallo y esa longitud, sin ser tan importante lo que ocurra a otras longitudes, aunque también se observará.

Para todas las mejoras propuestas se ha seguido el mismo procedimiento que en el del diseño inicial, es decir, se ha realizado una simulación numérica con ensayo lineal y no lineal, creando una macro para cada modelo, y también se ha comprobado mediante la formulación propuesta por la FEM. Para todos los modelos el límite elástico de acero utilizado y el espesor real de la chapa de la sección puntal se ha considerado el mismo con el fin de que estos valores no influyan en la optimización de la geometría de la sección.



5.1. Modelo B

Este modelo es la segunda sección, modificación de la original realizada con el fin de aumentar considerablemente la carga resistida a compresión, se trata de añadir al diseño inicial un rigidizador al final de sus alas.

5.1.1. Características geométricas

Se añade un rigidizador al final de las alas del diseño inicial, lo que provoca que este diseño tenga mayor inercia en ambos ejes y una mayor constante de alabeo, además claro está de aumentar el área de la sección. Fig. 5.1 y Tabla 5.1.

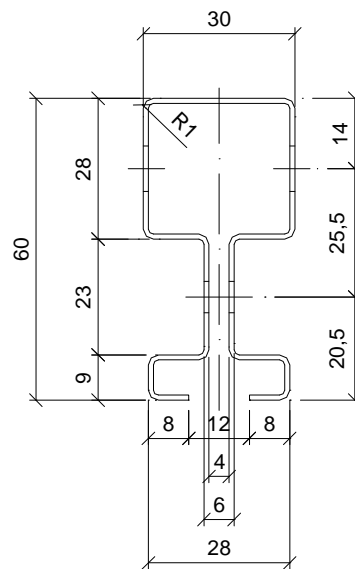


Figura 5.1 Geometría del modelo B

Área	200,27 mm ²
I_T	66,641 mm ⁴
I_w	3,31E+07 mm ⁶
I_z	79368 mm ⁴
I_y	20717 mm ⁴
i_z	19,91 mm
i_y	10,17 mm
y_o	55,019 mm
A_{eff}	160,22 mm ²

Tabla 5.1. Propiedades de la sección del modelo B



5.1.2. Resultados simulación y FEM

Como se observa en las Tabla 5.2 y Fig. 5.2, los valores de carga máxima alcanzada calculados por simulación y por normativa siguen la misma tendencia que en el modelo original, los resultados de la normativa resultan más conservadores que la simulación, y ambas siguen la misma tendencia que los resultados experimentales.

Por lo que se refiere al tipo de fallo que sufre el puntal, éste coincide con el fallo que se observa en el ensayo experimental, tanto para longitudes cortas donde el tipo de fallo es local, como para longitudes largas donde el fallo que se produce es el global de flexo-torsión. Fig 5.3, 5.4 y 5.5.

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	41749,93
300	39422,13
400	36737,76
500	33554,24
600	29895,88
700	26033,56
800	22347,33
900	19095,91
1000	16356,09
1100	14094,08
1200	12236,98
1300	10709,11
1400	9444,79
1500	8390,79
1600	7505,12
1700	6754,99

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	42984,6
300	Local	42712,8
400	Global	41142
500	Global	38546
700	Global	31362,7
900	Global	23097,8
1100	Global	16574,5
1300	Global	12387,3
1500	Global	9533,72
1700	Global	7575,54

Tabla 5.2. Resultados FEM (izq.) simulación (der.)



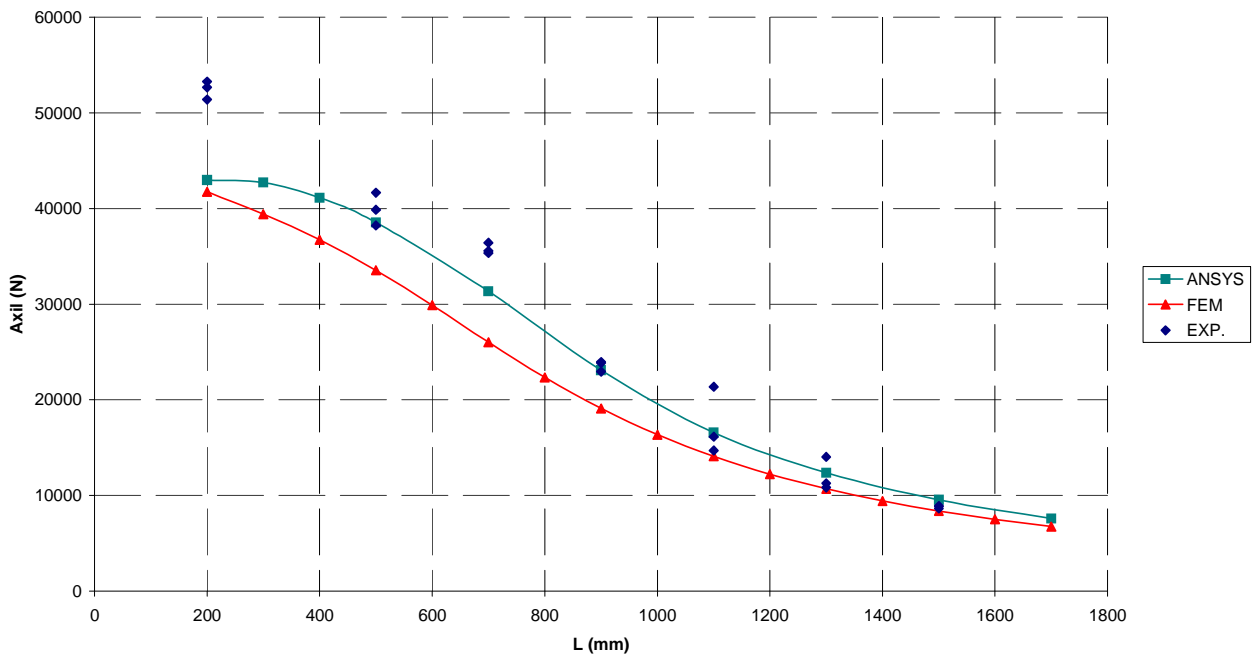


Figura 5.2 Gráfico comparativo de resultados por simulación, FEM y experimental





Figura 5.3 Ensayo experimental (L=1500 mm)

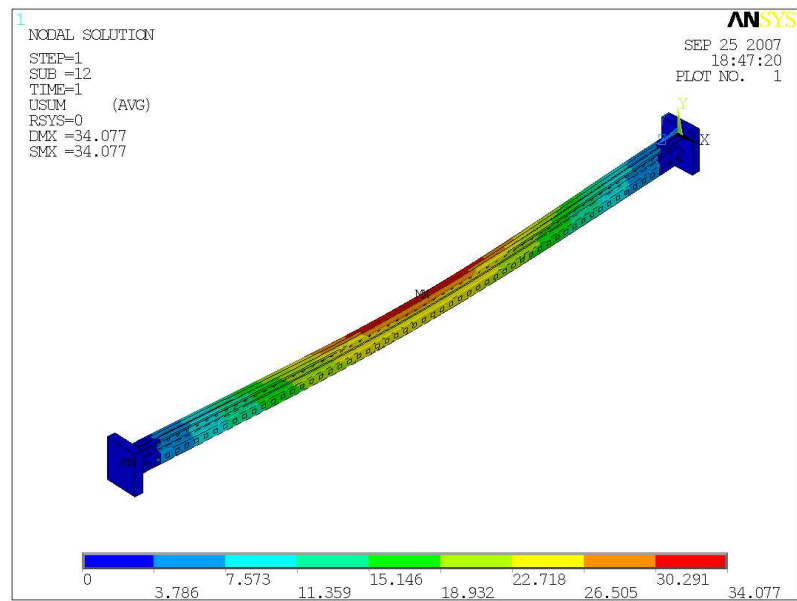


Figura 5.4 Resultado simulación (L=1500 mm)



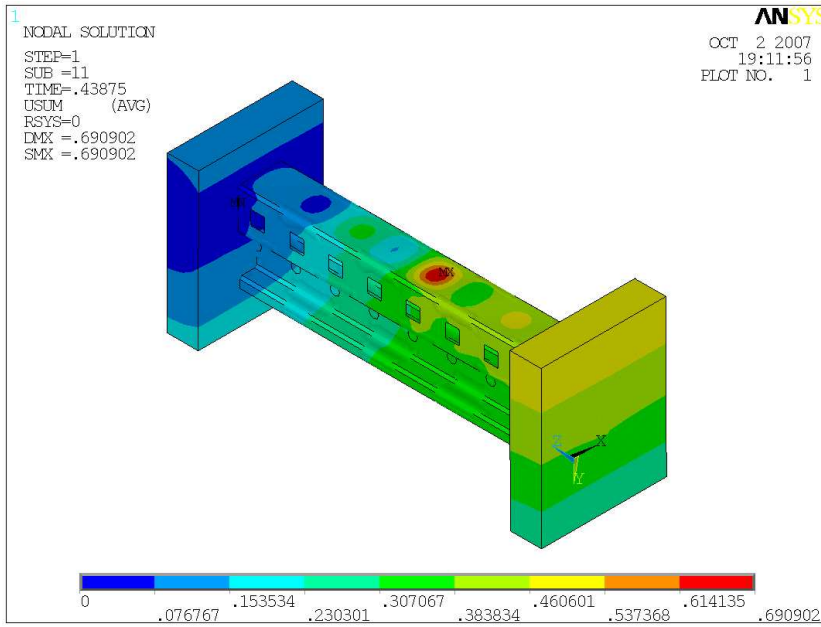


Figura 5.5 Resultado simulación (Izq..) y ensayo experimental (Der.) ambos L=200 mm



5.1.3. Comparación con el diseño inicial

Como se puede observar en los gráficos Fig. 5.6, 5.7 y 5.8, este modelo mejora al diseño inicial, pero no lo suficiente, o como se podría esperar por su aumento de área de la sección; se puede observar que para longitudes cortas, de hasta unos 700 mm, la carga máxima resistida por este modelo aumenta considerablemente pero a partir de esa longitud el comportamiento del puntal se aproxima al original por lo que no cumple el objetivo propuesto. Cabe destacar la similitud de los resultados obtenidos por los dos métodos utilizados con los ensayos experimentales realizados en laboratorio.

La Tabla 5.3 muestra los incrementos en sus características geométricas del modelo propuesto con el modelo original, se puede observar como han aumentado todos los valores geométricos mostrados, especialmente el valor de la inercia en el eje z, debido al aumento de la altura en ese eje por la introducción del rigidizador. Sin embargo todos estos aumentos no se han visto reflejados en los resultados para longitudes iguales y superiores a 1100 mm.

:

Área	35,19 %
I_T	35,39 %
I_W	22,6 %
i_z	129,71 %
i_y	36,84 %
A_{eff}	46,16 %

Tabla 5.3 Comparativa de propiedades con el modelo original



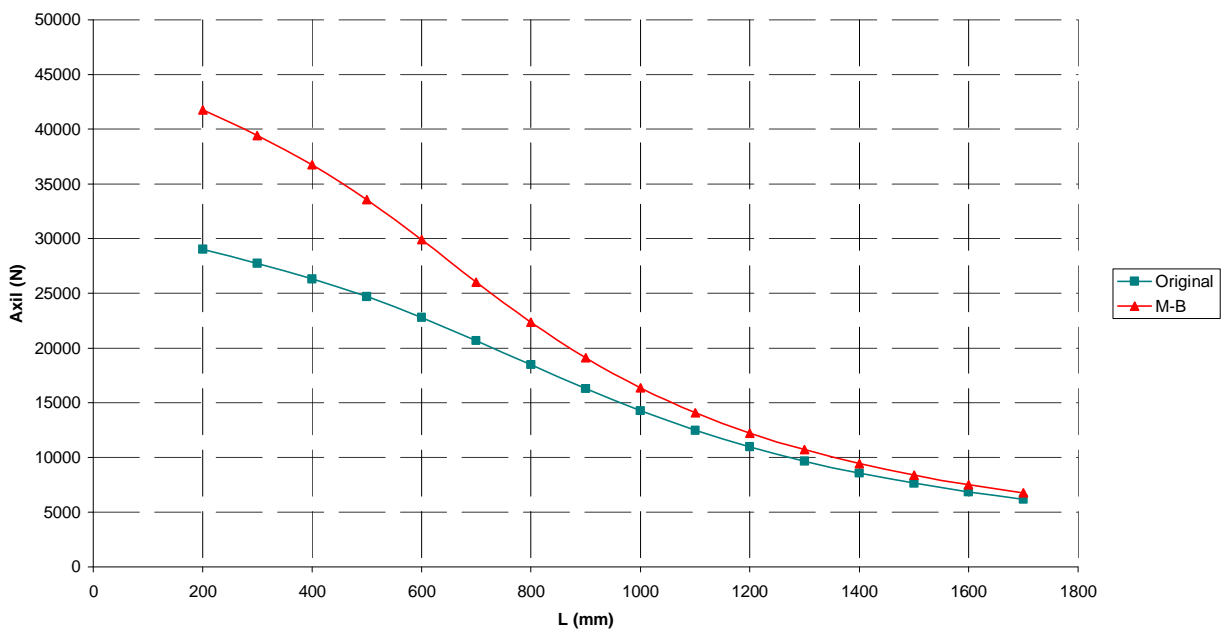


Figura 5.6 Gráfico comparativo resultados FEM

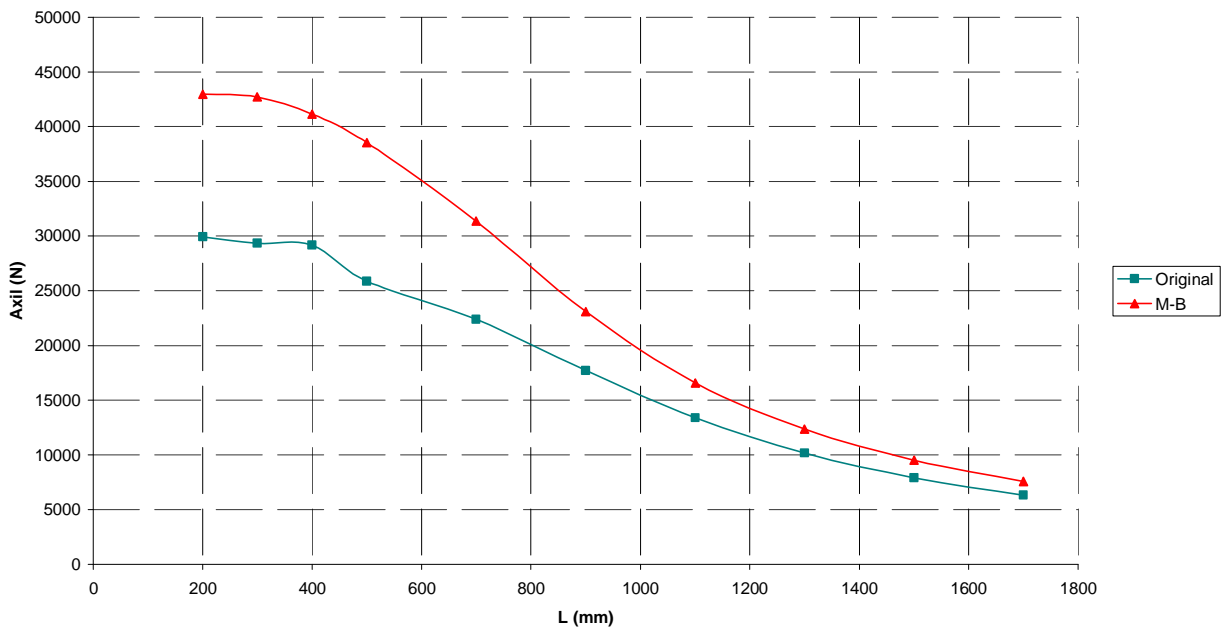


Figura 5.7 Gráfico comparativo resultados simulación



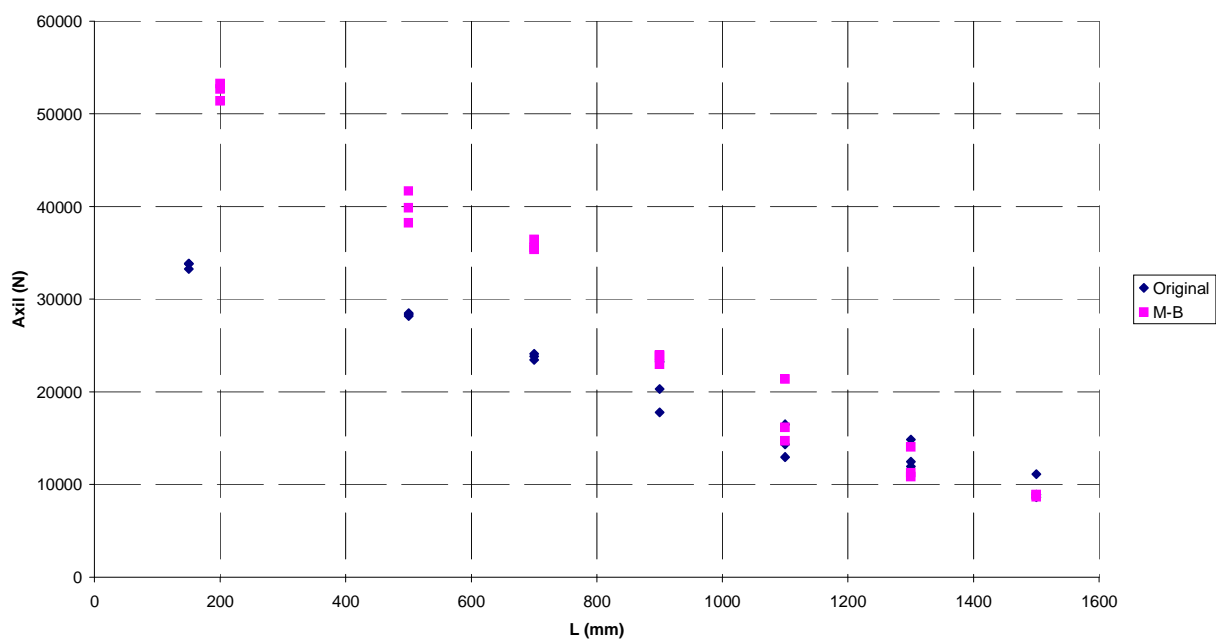


Figura 5.8 Gráfico comparativo resultados experimentales



5.2. Modelo B-1

5.2.1. Características geométricas

En este modelo se ha tratado de aumentar, con respecto al modelo anterior, los valores de características geométricas, como la inercia en el eje débil y la constante de alabeo; variables que se consideran muy influyentes sobre la carga máxima alcanzada por el puntal cuando se produce fallo por flexo-torsión. Para ello se ha ensanchado la caja y el rigidizador 3 mm, manteniendo el resto de la geometría como en el modelo B, Fig. 5.9.

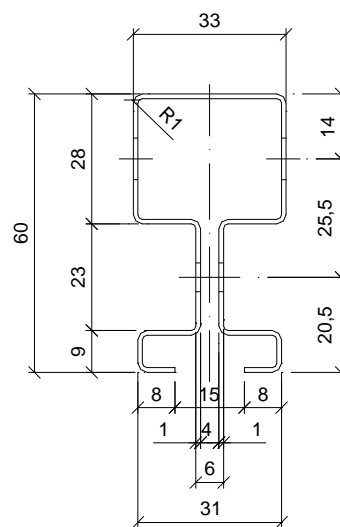


Figura 5.9 Geometría modelo B-1

Área	212,27 mm ²
I _T	70,647 mm ⁴
I _w	4,31E+07 mm ⁶
I _z	86008 mm ⁴
I _y	26258 mm ⁴
i _z	20,13 mm
i _y	11,12 mm
y _o	55,286 mm
A _{eff}	176,18 mm ²

Tabla 5.4 Propiedades de la sección del modelo B-1



5.2.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	46259,07
300	43928,56
400	41298,01
500	38220,89
600	34656,02
700	30758,38
800	26849,18
900	23235,55
1000	20079,19
1100	17406,97
1200	15175,03
1300	13316,80
1400	11766,10
1500	10465,44
1600	9367,53
1700	8434,43

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	47561,7
300	Local	47194,8
400	Global	43959,9
500	Global	43044,1
700	Global	37316
900	Global	27759,4
1100	Global	20488,7
1300	Global	15410,5
1500	Global	11913,7
1700	Global	9468,5

Tabla 5.5 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

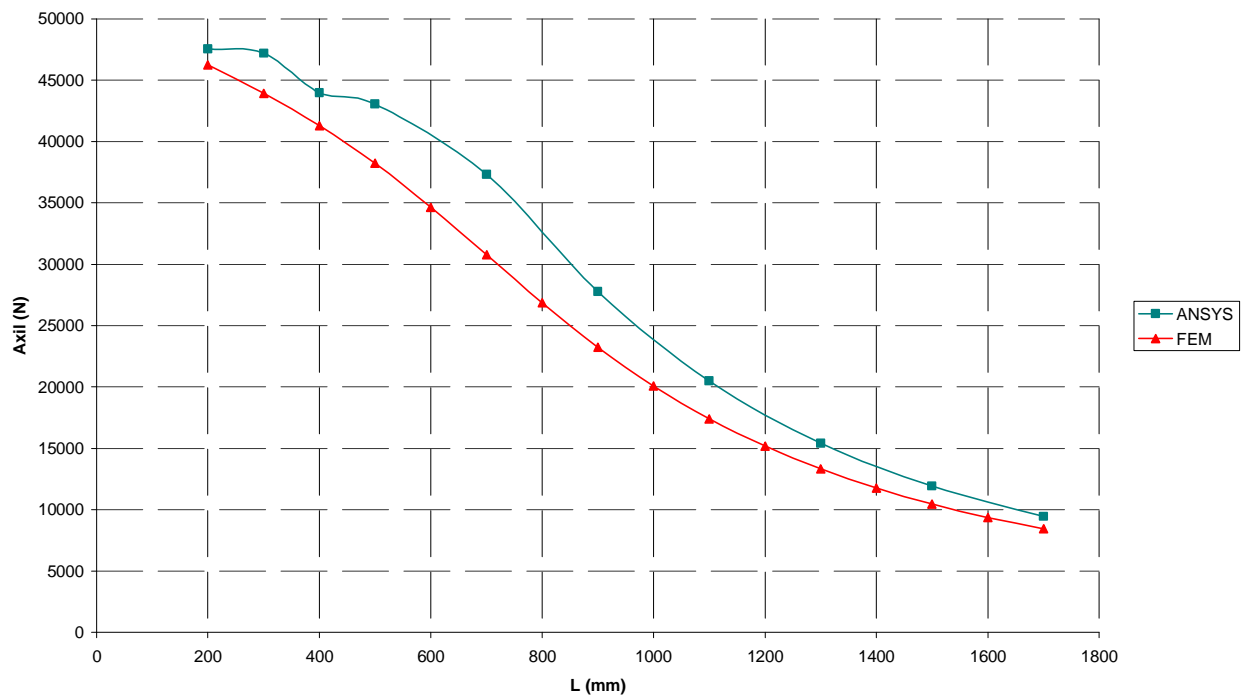


Figura 5.10 Gráfico comparativo de resultados por simulación y FEM



5.2.3. Comparación diseño inicial

La comparación con los modelos anteriores Fig. 5.11 y 5.12, tanto por simulación como por la normativa de la FEM, muestran la misma conclusión: el aumento de la carga máxima soportada en todas las longitudes, y en gran medida en longitudes superiores a los 1100 mm, por lo que se concluye que los cambios realizados son determinantes para nuestro objetivo.

En la Tabla 5.6, se muestra el incremento de las principales constantes geométricas de la sección con respecto al modelo B y al modelo original, se observa como el ensanchamiento de la caja ha provocado el aumento significativo de la constante de alabeo y de la inercia en el eje y.

Área	6 %
I_T	6,01 %
I_W	30,21 %
I_Z	8,37 %
I_Y	26,75 %
A_{eff}	9,96 %

Área	43,29 %
I_T	43,53 %
I_W	59,63 %
I_Z	148,93 %
I_Y	73,43 %
A_{eff}	60,72 %

Tabla 5.6 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo B (izq.)



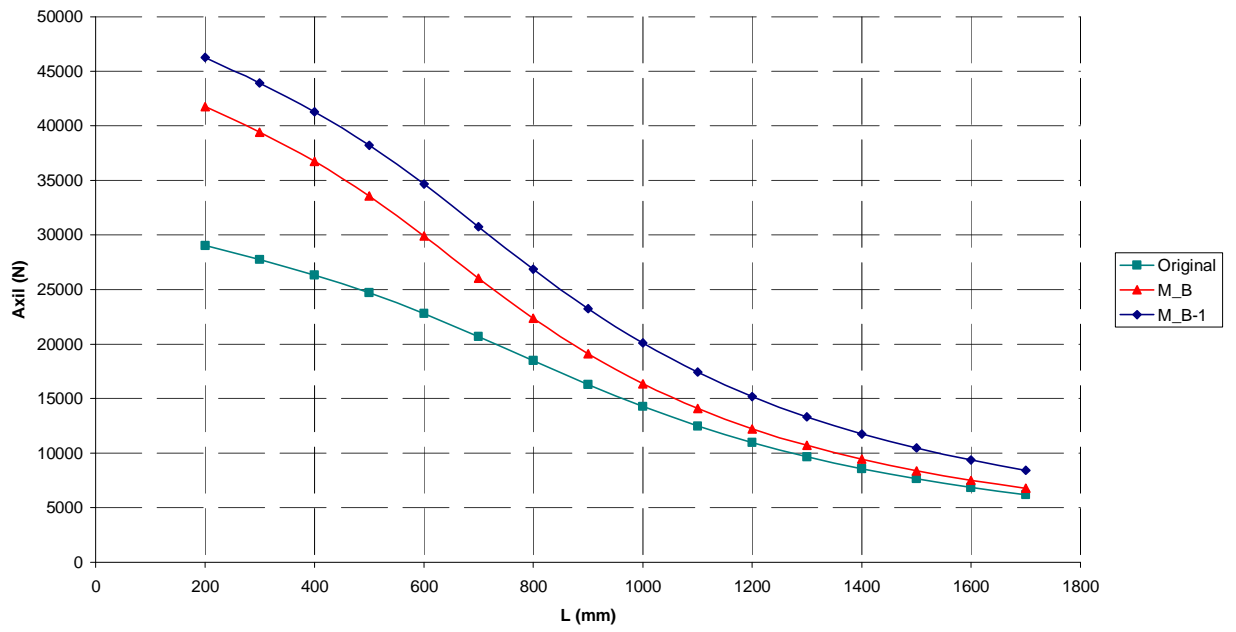


Figura 5.11 Gráfico comparativo resultados FEM

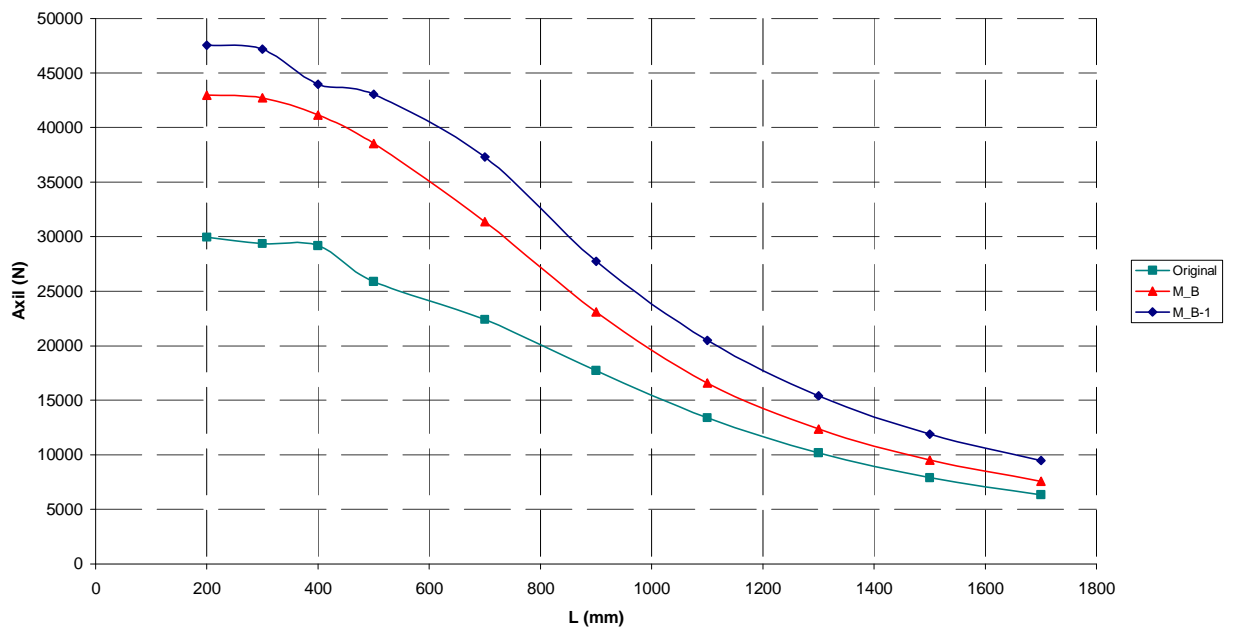


Figura 5.12 Gráfico comparativo resultados simulación



5.3. Modelo B-2

5.3.1. Características geométricas

Para la realización de este modelo se ha partido del modelo B, alargando la caja 3 mm y manteniendo el resto de la sección igual, por lo que la distancia de los agujeros inferiores a la parte superior de la caja se ha reducido, pero continúa entrando en los límites establecidos.

Al realizarse este alargamiento de la caja, se ha aumentado la inercia en el eje débil y la constante de alabeo respecto al modelo inicial y al modelo B, aunque en menor medida que con la variación realizada en el modelo B-1.

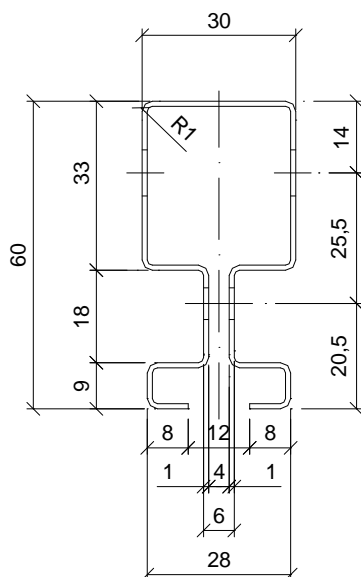


Figura 5.13 Geometría del modelo B-2

Área	200,27 mm ²
I _T	66,641 mm ⁴
I _w	3,99E+07 mm ⁶
I _z	79363 mm ⁴
I _y	22757 mm ⁴
i _z	19,91 mm
i _y	10,66 mm
y _o	59,086 mm
A _{eff}	176,18 mm ²

Tabla 5.7 Propiedades de la sección del modelo B-2



5.3.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	43891,92
300	41483,94
400	38715,96
500	35438,30
600	31662,61
700	27649,84
800	23788,17
900	20357,43
1000	17451,46
1100	15043,84
1200	13062,58
1300	11430,00
1400	10077,57
1500	8949,28
1600	8000,69
1700	7196,99

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	45083,1
300	Local	44694,6
400	Global	41838,1
500	Global	39574,8
700	Global	32510,4
900	Global	24291,3
1100	Global	17700,7
1300	Global	13240,8
1500	Global	10302,2
1700	Global	8150,43

Tabla 5.8 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

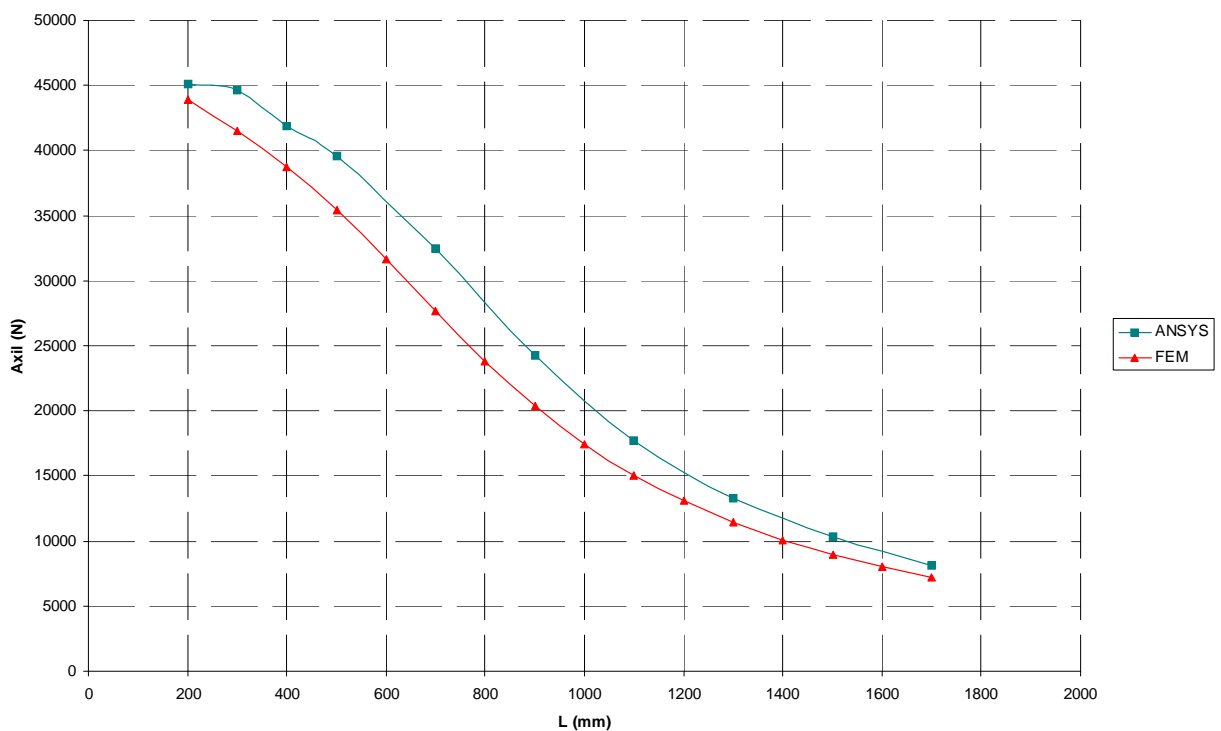


Figura 5.14 Gráfico comparativo de resultados por FEM y simulación



5.3.3. Comparación diseño inicial

Del modelo estudiado sólo varían significativamente respecto al modelo B, la constante de alabeo y la inercia en el eje y, Tabla 5.9, aunque estas lo hacen en menor medida que en el modelo anterior, puede ser la causa de que el modelo B-2 tenga su carga máxima resistida entre el modelo B y el B-1, Fig. 5.15 y 5.16.

Área	0 %
I_T	0 %
I_W	20,54 %
I_Z	-0,01 %
I_Y	9,85 %
A_{eff}	9,96 %

Área	35,19 %
I_T	35,39 %
I_W	47,78 %
I_Z	129,7 %
I_Y	50,31 %
A_{eff}	60,72 %

Tabla 5.9 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo B (izq.)

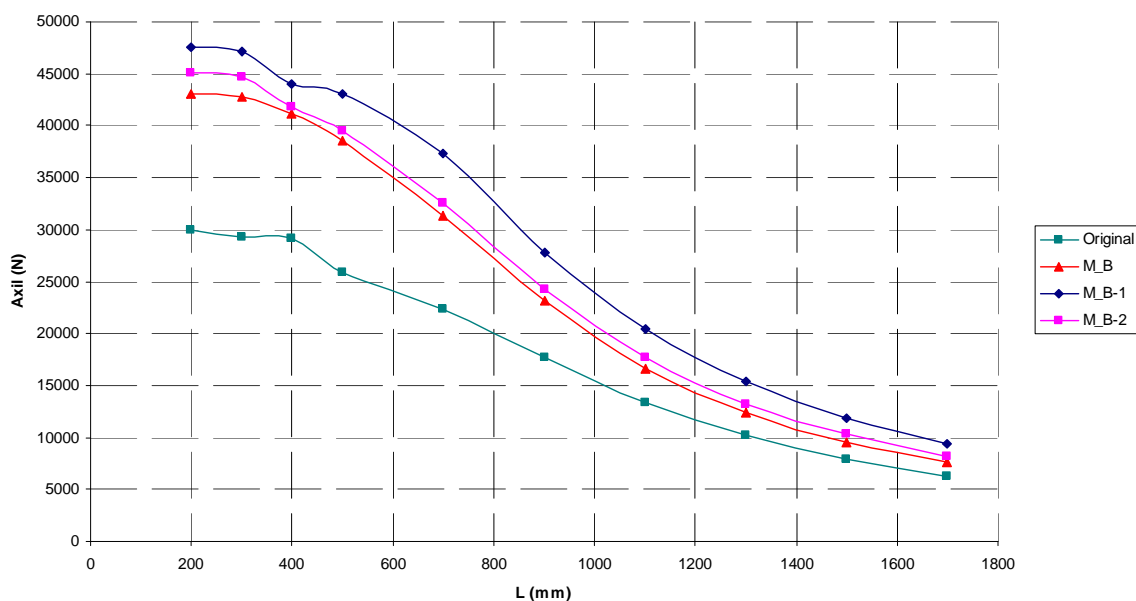


Figura 5.15 Gráfico comparativo resultados simulación



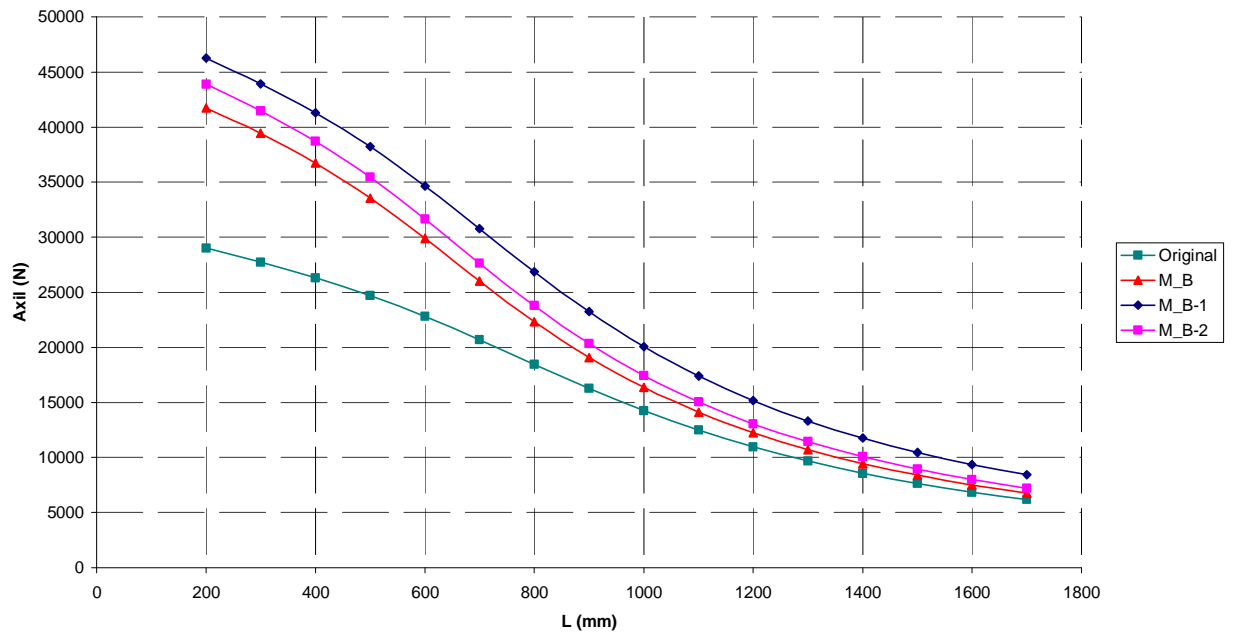


Figura 5.16 Gráfico comparativo resultados FEM



5.4. Modelo B-3

5.4.1. Características geométricas

En este modelo se quiere observar la influencia de la inercia sobre el eje fuerte en la carga máxima resistida por el perfil, para ello se ha partido del modelo B, disminuyendo la altura de 60 a 55 mm manteniendo el resto de la sección igual; de esta manera se reduce en gran medida la inercia en el eje fuerte y el área de la sección, aunque también disminuye pero de menor modo la inercia en el eje débil y la constante de alabeo.

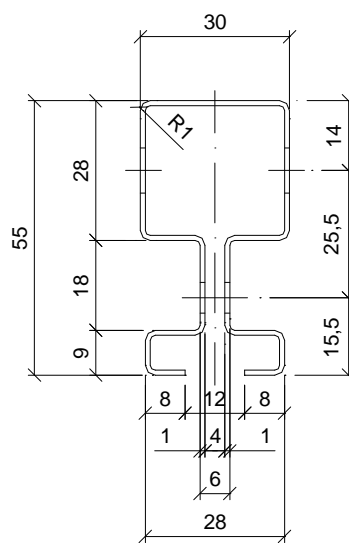


Figura 5.17 Geometría modelo B-3

Área	190,27 mm ²
I _T	63,307 mm ⁴
I _w	2,82E+07 mm ⁶
I _Z	63444 mm ⁴
I _Y	20654 mm ⁴
i _Z	18,26 mm
i _Y	10,42 mm
y _o	52,607 mm
A _{eff}	154,12 mm ²

Tabla 5.10 Propiedades de la sección del modelo B-3



5.4.2. Resultados simulación y FEM

L(mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	40164,19
300	37927,64
400	35349,93
500	32294,71
600	28785,00
700	25079,22
800	21540,79
900	18418,01
1000	15785,33
1100	13610,95
1200	11825,28
1300	10355,85
1400	9139,65
1500	8125,59
1600	7273,33
1700	6551,38

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	41414,6
300	Local	41118,5
400	Global	38292,2
500	Global	37076,9
700	Global	30485,8
900	Global	22267,6
1100	Global	16109,8
1300	Global	12093
1500	Global	9335,71
1700	Global	7413,93

Tabla 5.11 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

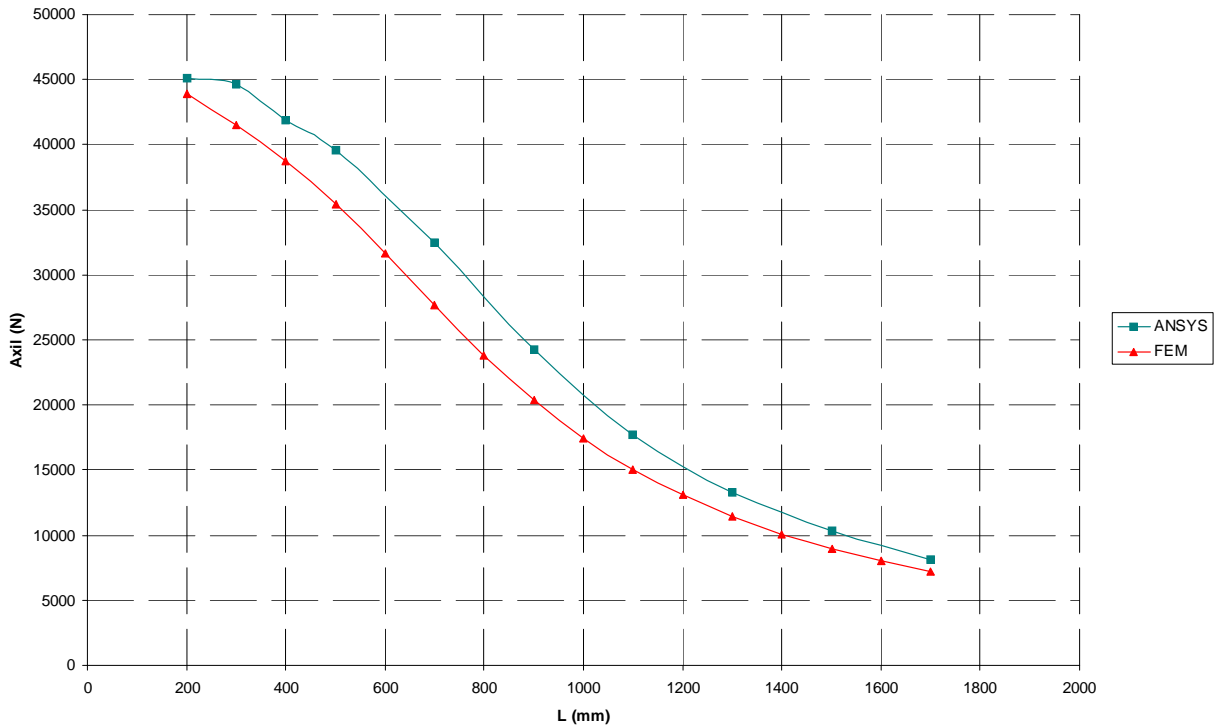


Figura 5.18 Gráfico comparativo de resultados por FEM y simulación



5.4.3. Comparación diseño inicial

Con los resultados obtenidos en este modelo, Fig. 5.19 y 5.20, podemos llegar a la conclusión de que el valor de la inercia en el eje z, no influye o por lo menos no en gran medida sobre la carga máxima soportada por el perfil, en el gráfico se observa que es algo menor que la obtenida con el modelo B, pero esto puede ser debido a la leve disminución sufrida por la constante de alabeo.

Área	-5 %
I_T	-5 %
I_W	-14,8 %
I_z	-20,06 %
I_Y	-0,3 %
A_{eff}	-3,8 %

Área	28,44 %
I_T	28,61 %
I_W	4,44 %
I_z	83,62 %
I_Y	36,42 %
A_{eff}	40,59 %

Tabla 5.12 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo B (izq.)

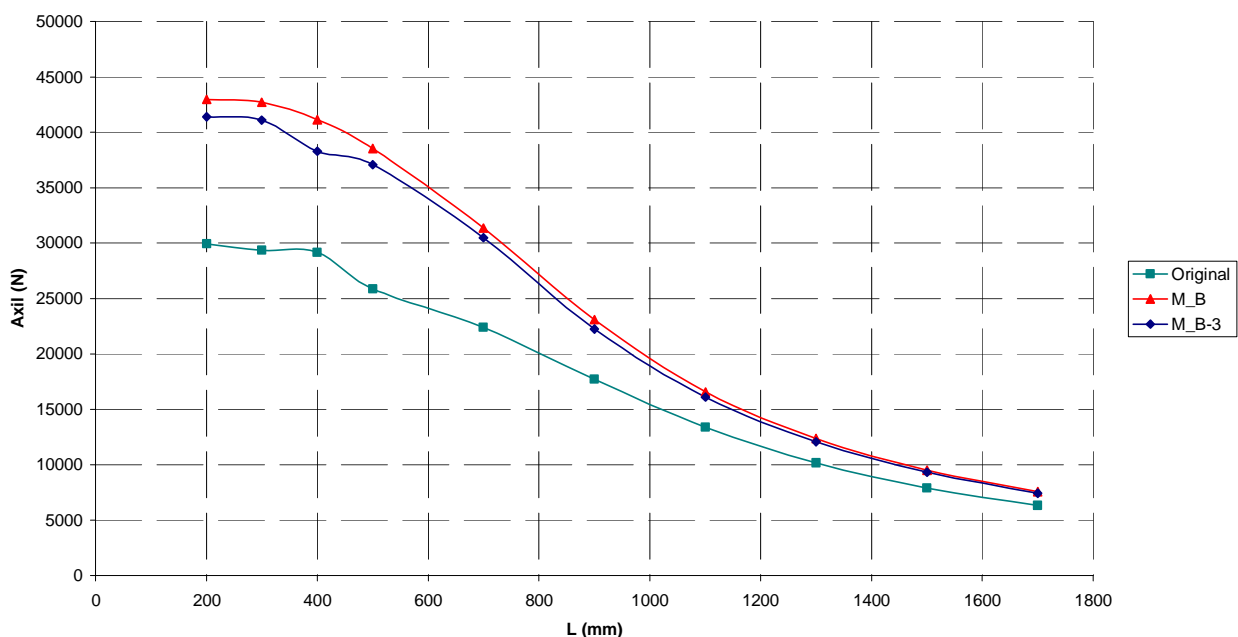


Figura 5.19 Gráfico comparativo de resultados simulación



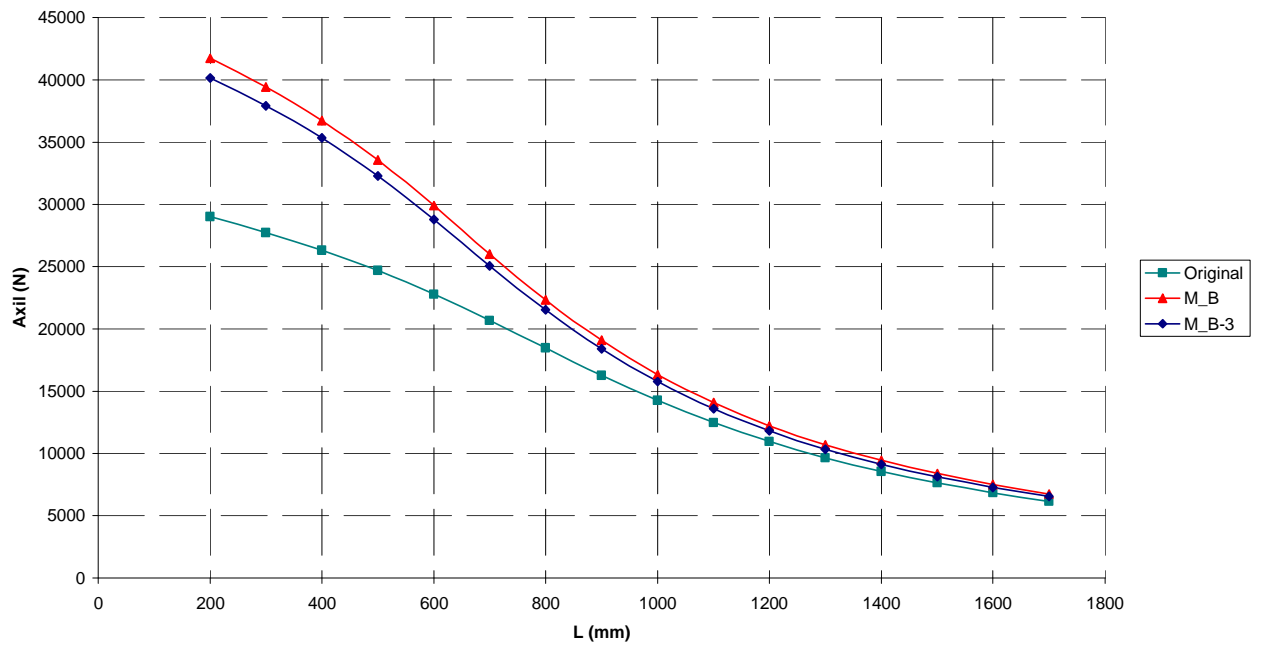


Figura 5.20 Gráfico comparativo de resultados FEM



5.5. Conclusiones de los modelos realizados

En este apartado se va a estudiar la repercusión de las variables geométricas por separado sobre los modelos propuestos anteriormente, con el fin de aislar las variables que más afecten a la carga máxima soportada por cada modelo.

En el gráfico de la Fig. 5.21, se observa la carga máxima soportada en función del área de la sección de cada modelo; la tendencia del axil máximo alcanzado por el perfil es aumentar en función del área, pero esto no parece del todo cierto ya que para grandes aumentos de área el valor de axil crece levemente e incluso se observan dos valores con la misma área que tienen diferentes valores de carga máxima, lo que hace pensar que el área no es un factor determinante sobre la carga máxima a esas longitudes.

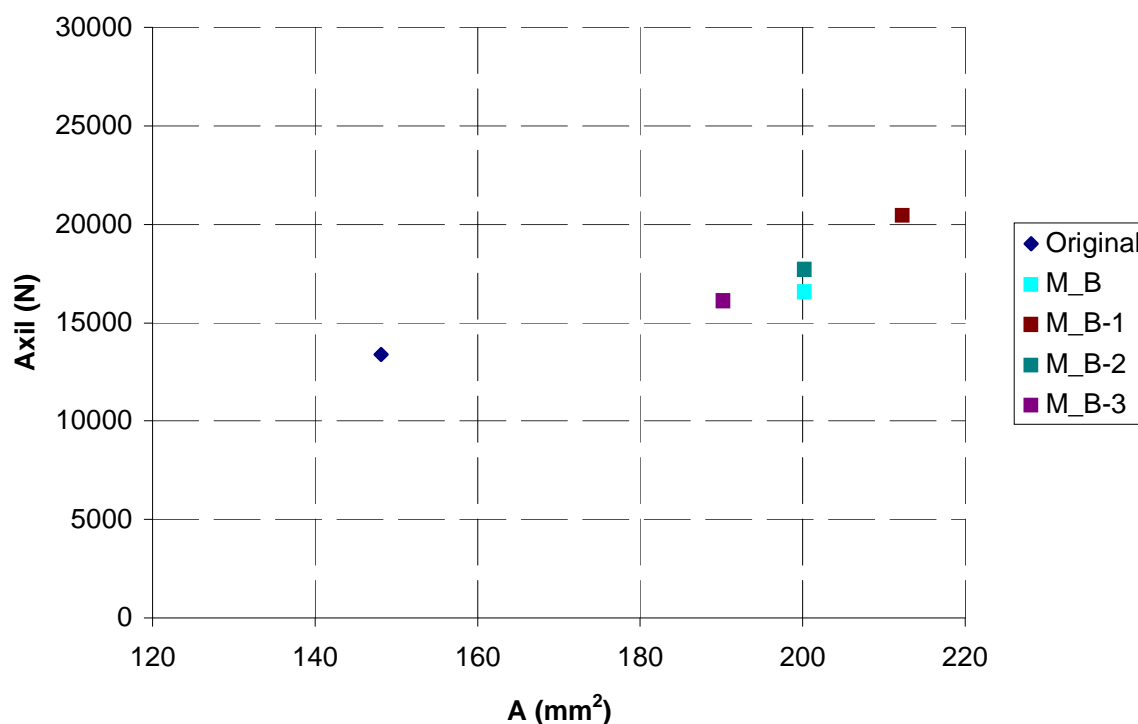


Figura 5.21 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de área de sección



En la Fig. 5.22, se muestra un gráfico del valor de la carga de fallo sobre la constante de alabeo de cada sección; este factor se muestra muy influyente sobre la carga, ya que a medida que aumenta también lo hace ésta, exceptuando el salto entre el modelo original y el modelo B-3, que son secciones con grandes cambios de geometría entre ellas.

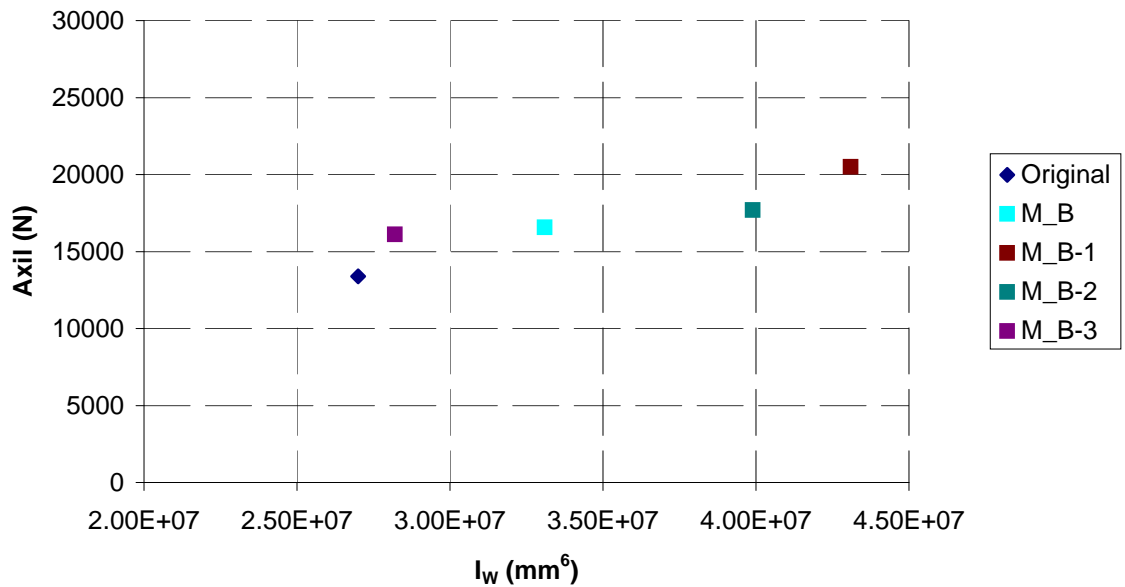


Figura 5.22 Gráfico resultado simulación $L=1100$ mm en función de la constante de alabeo de la sección



La Fig. 5.23, sitúa el valor de la carga máxima resistida en función de la inercia en el eje débil de la sección, se puede ver claramente como la variación de este valor de inercia influye de manera determinante sobre el axil, que crece proporcionalmente al aumentar ésta.

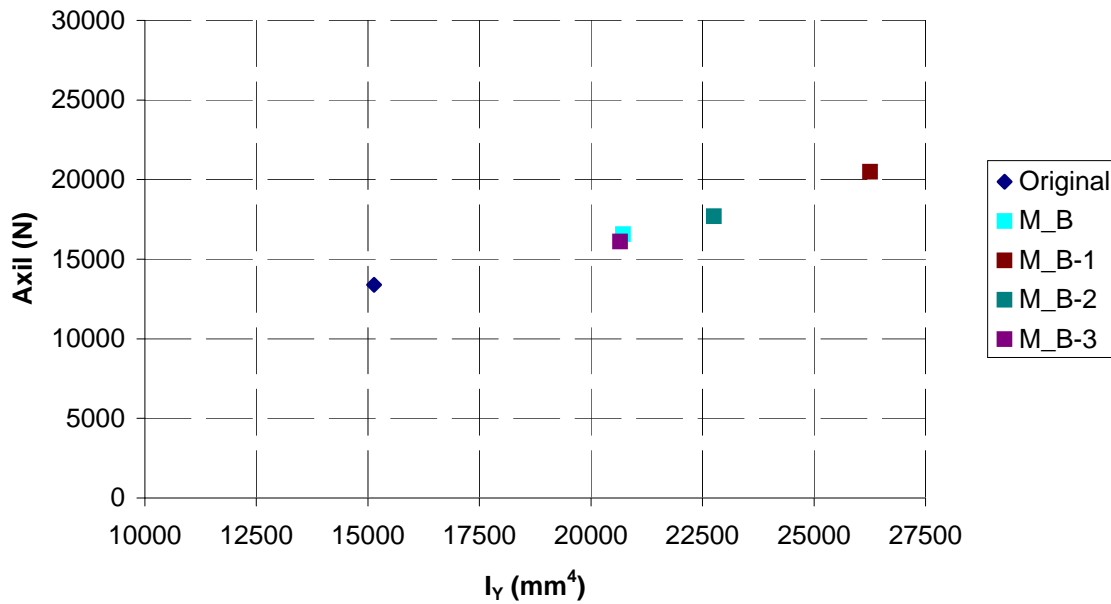


Figura 5.23 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia sobre el eje y de la sección



En la Fig. 5.24, se observa el gráfico del axil en función de la inercia sobre el eje fuerte de la sección, es un gráfico similar al primero mostrado que estaba en función del área; por lo que se llega a la misma conclusión, la inercia sobre el eje fuerte no es un factor determinante sobre el valor de la carga máxima resistido, al observarse dos valores con el mismo valor de inercia y diferente carga.

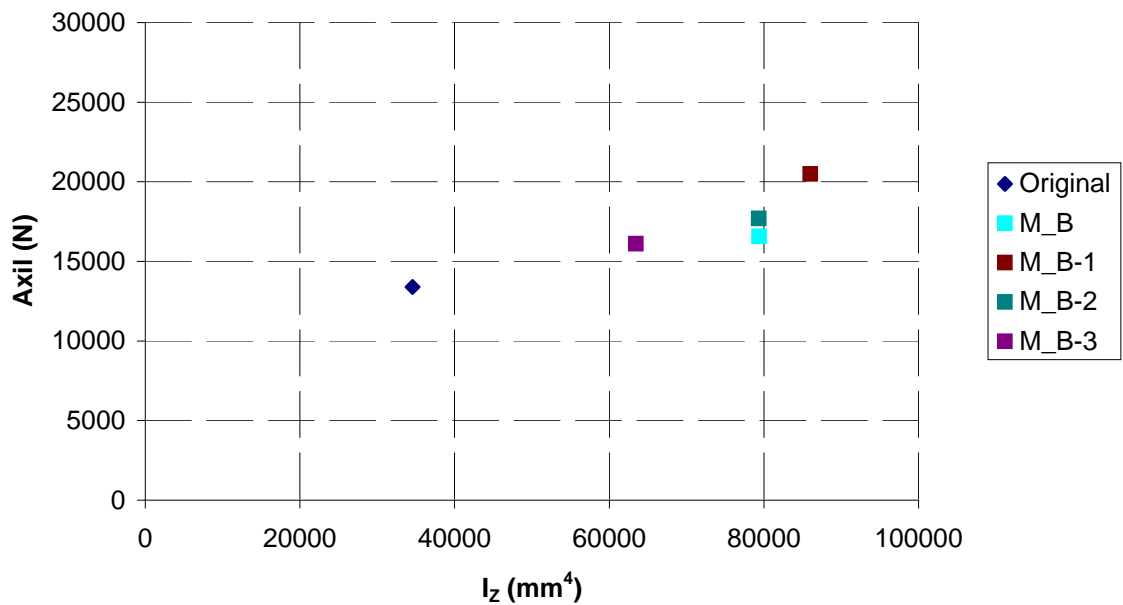


Figura 5.24 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia sobre el eje z de la sección



Por último en la Fig. 5.25, se muestra el gráfico de carga máxima alcanzada en función de la inercia a torsión de la sección de cada modelo, se observa como sucede la Fig. 5.33 y 5.36 como para dos valores con la misma inercia se obtienen diferentes valores de carga, lo que lleva a la conclusión de que la inercia a torsión no es una variable que influya claramente sobre la resistencia del puntal a compresión.

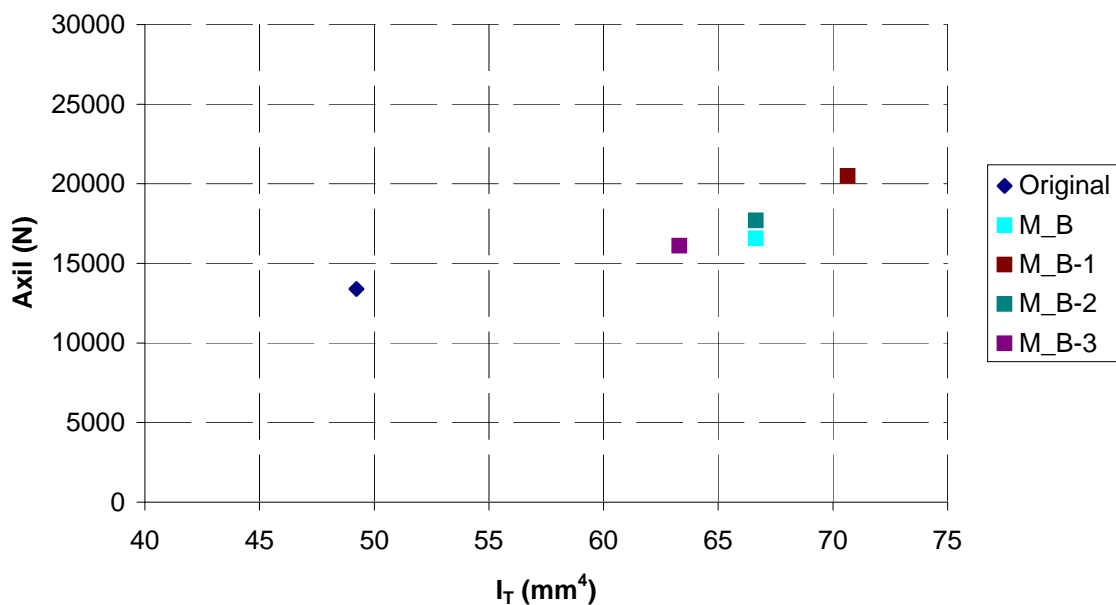


Figura 5.25 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia a torsión de la sección

Observando estos gráficos, se llega a la conclusión de trabajar sobre las dos variables que se han creído determinantes sobre el valor de la carga máxima resistida por el perfil, la constante de alabeo y la inercia sobre el eje y, hay que destacar que estas dos constantes están relacionadas entre ellas, el valor de una afecta a la otra, por lo que se actuará conjuntamente sobre ellas, cambiando la geometría de la caja de la sección, alargándola y ensanchándola.



6. Propuesta de fabricación del prototipo del nuevo diseño

6.1. Características geométricas

Para la obtención de este diseño se han utilizado los resultados de los puntos anteriores:

- Altura del perfil=55 mm: debido a lo observado en el apartado 5.4, como reduciendo su altura afectaba levemente al valor de la carga de fallo, esta aplicación ayuda para ahorrar área de acero sin perder resistencia.
- Ancho de la caja=35 mm: es el punto que más ha influido en la resistencia del perfil por lo que es el que mayor incremento ha sufrido.
- Altura de la caja=33 mm.

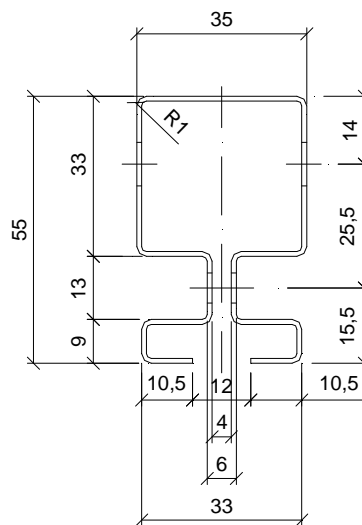


Figura 6.1 Geometría modelo propuesto



Área	210,27 mm ²
I _T	69,98 mm ⁴
I _w	5,33E+07 mm ⁶
I _z	72975 mm ⁴
I _y	33184 mm ⁴
i _z	18,63 mm
i _y	12,56 mm
y _o	59,865 mm
A _{eff}	178,73 mm ²

Tabla 6.1 Propiedades de la sección del modelo propuesto

6.2. Resultados simulación y FEM

L	N _{b,Rd} (N)
200	47213,80
300	45029,75
400	42607,53
500	39814,54
600	36581,35
700	32974,65
800	29220,88
900	25605,05
1000	22333,62
1100	19490,20
1200	17070,67
1300	15029,76
1400	13310,73
1500	11859,13
1600	10627,68
1700	9577,13

L (mm)	Tipo	N _{MAX} (N)
200	Local	47924,3
300	Local	47317,7
400	Local	46970
500	Global	42612
700	Global	37358,8
900	Global	31477,20
1100	Global	24106,70
1300	Global	18575,90
1500	Global	14478,8
1700	Global	11584,8

Tabla 6.2 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)



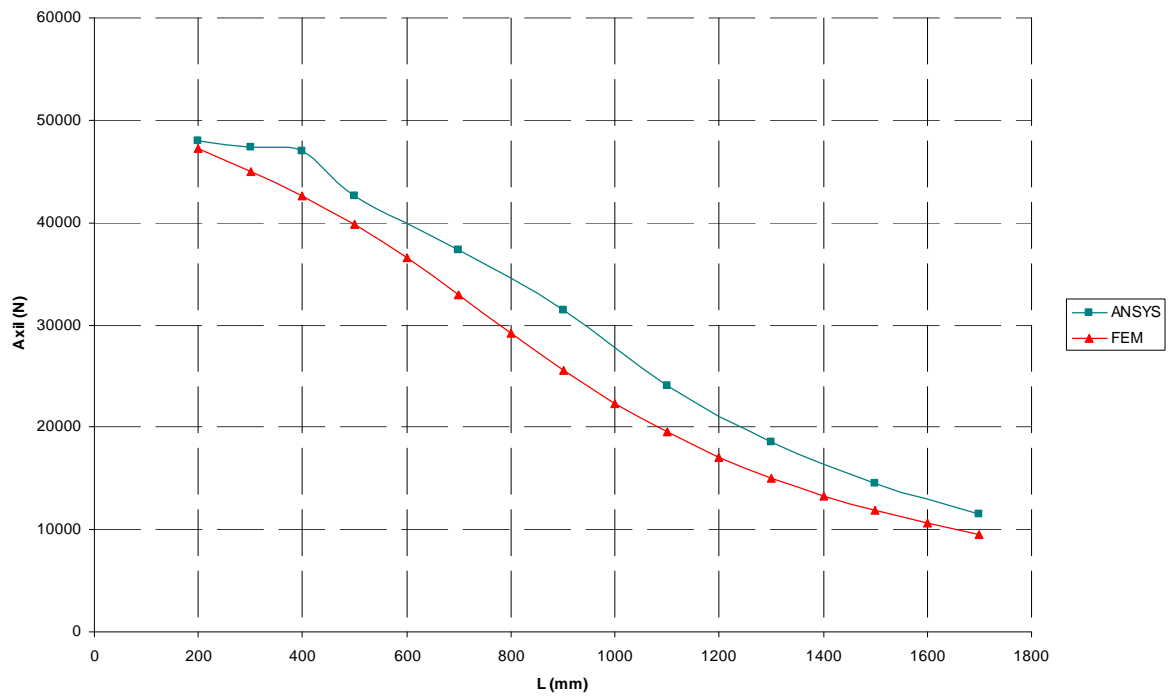


Figura 6.2 Gráfico comparativo de resultados por FEM y simulación



6.3. Comparación diseño inicial

Los resultados mostrados en las Tablas 6.3 y 6.4 y Fig. 6.3 y 6.4, cumplen con el objetivo marcado inicialmente de acercarse al doble de carga del modelo original para longitudes de entre 1100 y 1300 mm, se observa como partiendo del modelo B, se han modificado de manera destacada, las variables que se han considerado por el estudio determinantes sobre la carga máxima resistida por el perfil para este tipo de fallo, disminuyendo la inercia en el eje z, demostrado anteriormente que su influencia sobre el resultado era casi nula, de esta forma se ha podido compensar el exceso de área utilizado para reforzar las dos constantes más influyentes, la constante de alabeo y la inercia sobre el eje y.

Modelo	N_{MAX} ANSYS (N)		$N_{b,Rd}$ FEM (N)	
	L=1100 mm	L=1300 mm	L=1100 mm	L=1300 mm
Original	13392,30	10184,40	12489,67	9668,12
B	16574,50	12387,30	14094,08	10709,11
Propuesta	24106,70	18575,90	19490,20	15029,76
$\Delta\%$ (Orig vs Prop)	180,00	182,39	156,05	155,46

Tabla 6.3 Comparativa de resultados

Área	4,99 %
I_T	5,01 %
I_W	61,03 %
I_z	-8,05 %
I_y	60,18 %
A_{eff}	11,56 %

Área	41,94 %
I_T	42,17 %
I_W	97,41 %
I_z	111,21 %
I_y	119,18 %
A_{eff}	63,05 %

Tabla 6.4 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo B (izq.)



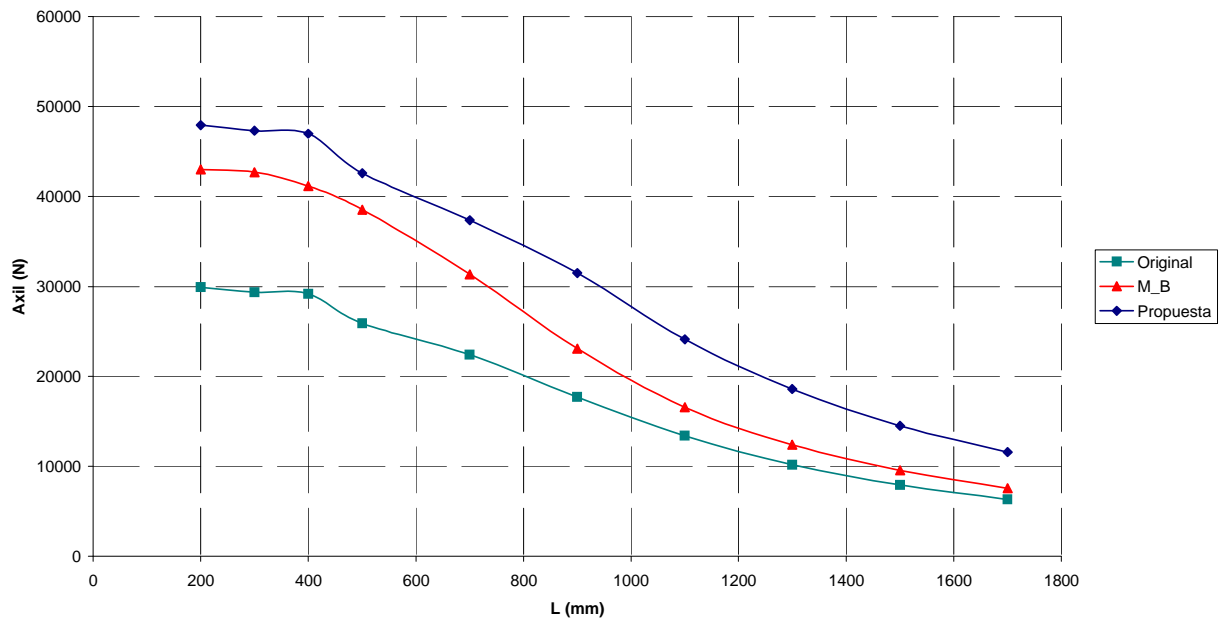


Figura 6.3 Gráfico comparativo de resultados por simulación

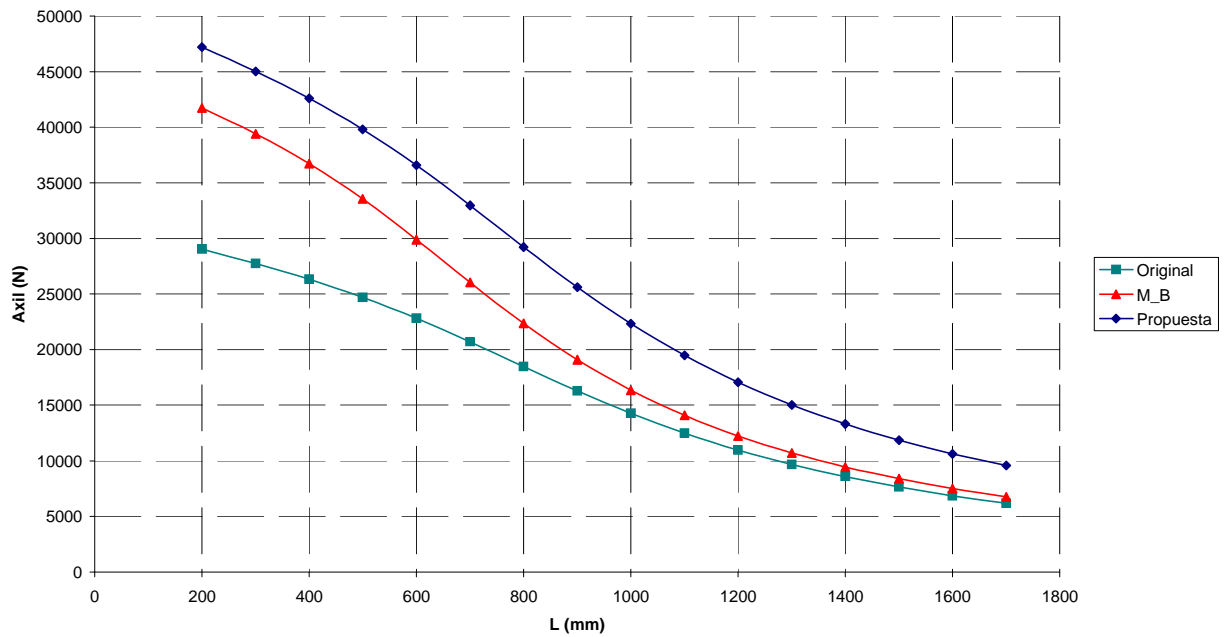


Figura 6.4 Gráfico comparativo de resultados FEM





7. Comparativa de variables geométricas de todos los modelos realizados

En este apartado se va a comparar las propiedades geométricas de todos los modelos realizados en función de la carga de fallo a compresión de cada uno de ellos. Tiene como finalidad la de confirmar que las conclusiones a las que se han llegado con los modelos modificados se corroboran en la propuesta.

En primer lugar, se va a estudiar cómo ha influido el área de la sección, Fig. 7.1. En apartados anteriores se llegó a la conclusión de que el valor del área de la sección no era influyente sobre la carga máxima resistida debido a encontrar dos modelos con la misma área y diferente valor de carga; al estudiar la propuesta realizada se confirma esta conclusión, ya que se ha conseguido reducir el área del perfil con respecto al modelo B-1, y sin embargo el modelo propuesto aumenta su valor de carga máxima resistida a compresión. Por lo que la conclusión final es que el área de la sección para este tipo de fallo de flexo-torsión y para longitudes tan elevadas como esta ($L=1100$ mm), no es influyente sobre el valor de carga máxima resistido a compresión.

Se encuentra el mismo caso para la variable geométrica de la inercia a torsión, Fig. 7.2. El gráfico observado es prácticamente idéntico en forma al de la Fig. 7.1, por lo que se descarta la influencia de la inercia a torsión de la sección para este caso.

Por lo que se refiere a la inercia sobre el eje z, Fig. 7.3, el gráfico observado aún es más clarificador, en apartados anteriores también se llegó a la conclusión de que su influencia era despreciable, y observando el gráfico con la incorporación del modelo de la propuesta se pone de manifiesto esta conclusión, ya que este último modelo tiene menor inercia sobre el eje fuerte que los modelos B, B-1 y B-2, y sin embargo su valor de carga máxima resistida queda muy por encima de ellos tres.

Por último las dos variables consideradas más influyentes, y sobre las que se ha actuado en este último modelo, mantienen la conclusión tomada, su influencia sobre la carga máxima resistida a compresión para estas longitudes es muy elevada y el nuevo prototipo lo confirma, Fig. 7.4 y 7.5.

Por lo tanto, las conclusiones a las que se ha llegado en el apartado 5.5, quedan totalmente corroboradas por la nueva sección propuesta.



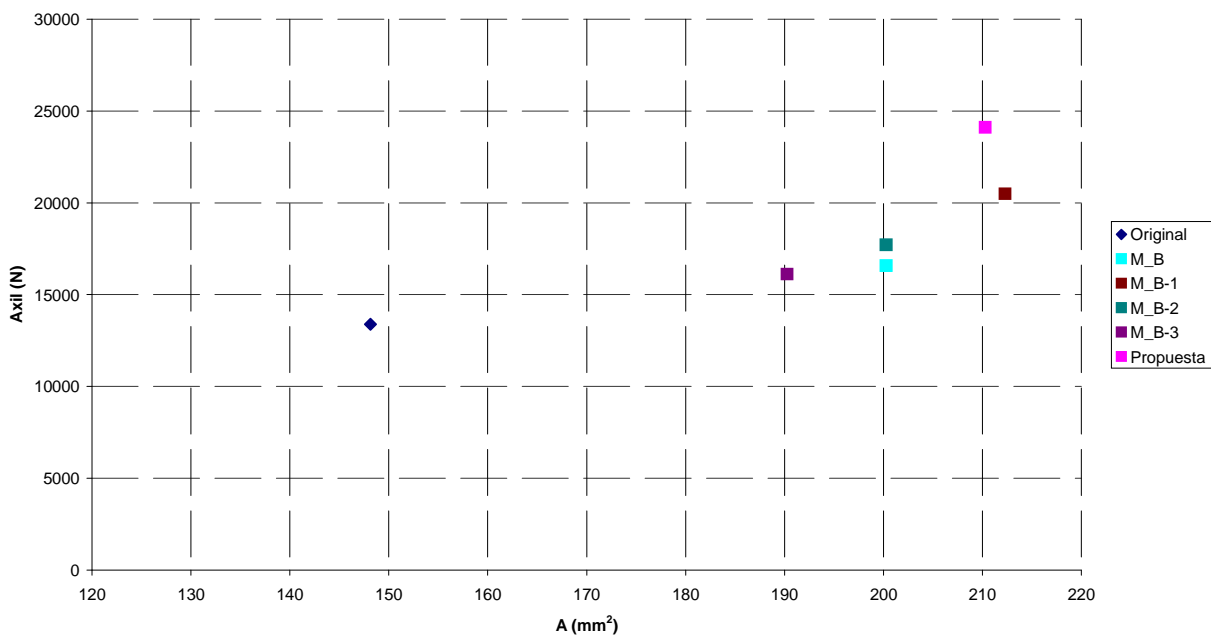


Figura 7.1 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de área de sección

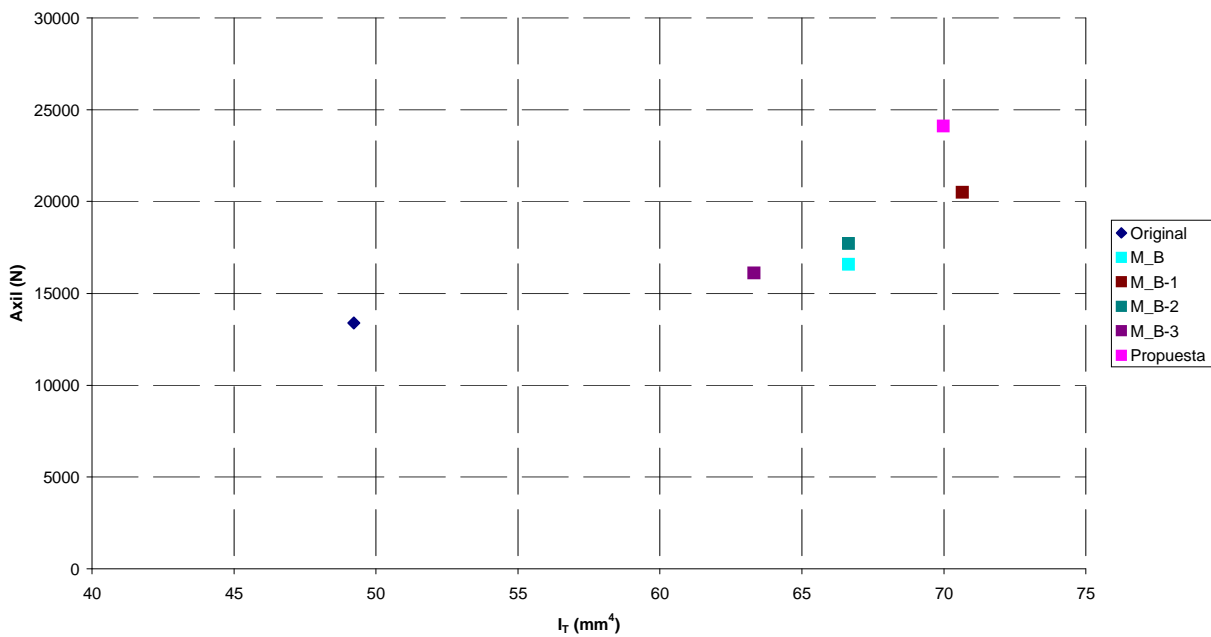


Figura 7.2 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en de la inercia a torsión de la sección



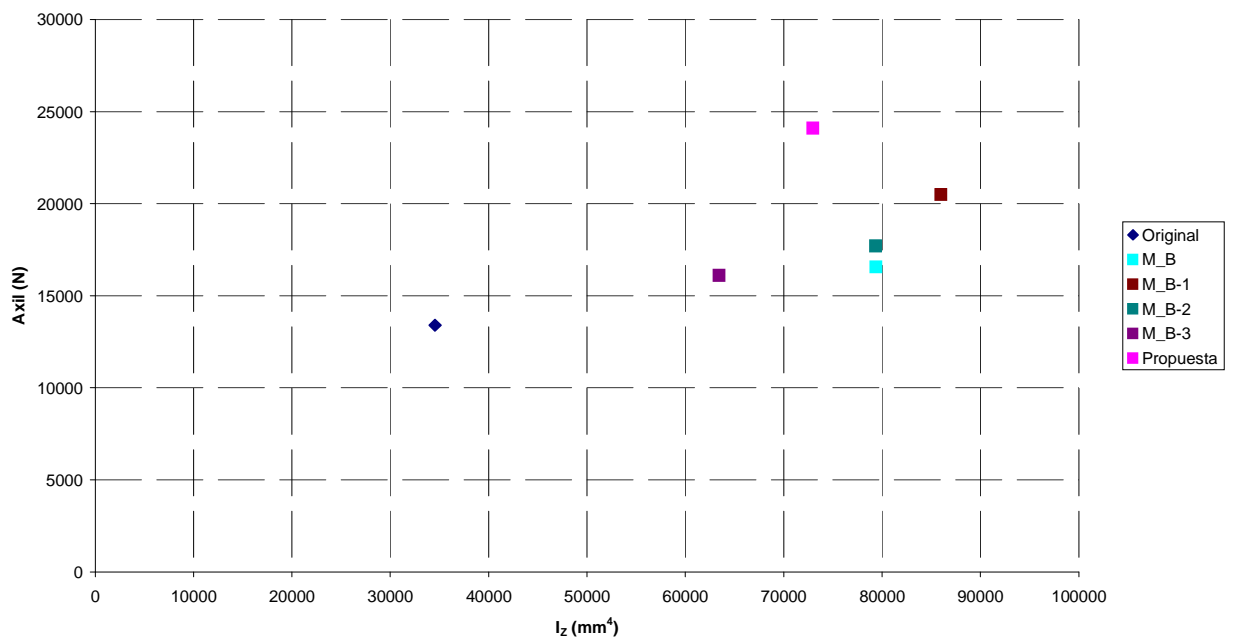


Figura 7.3 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia sobre el eje z de la sección

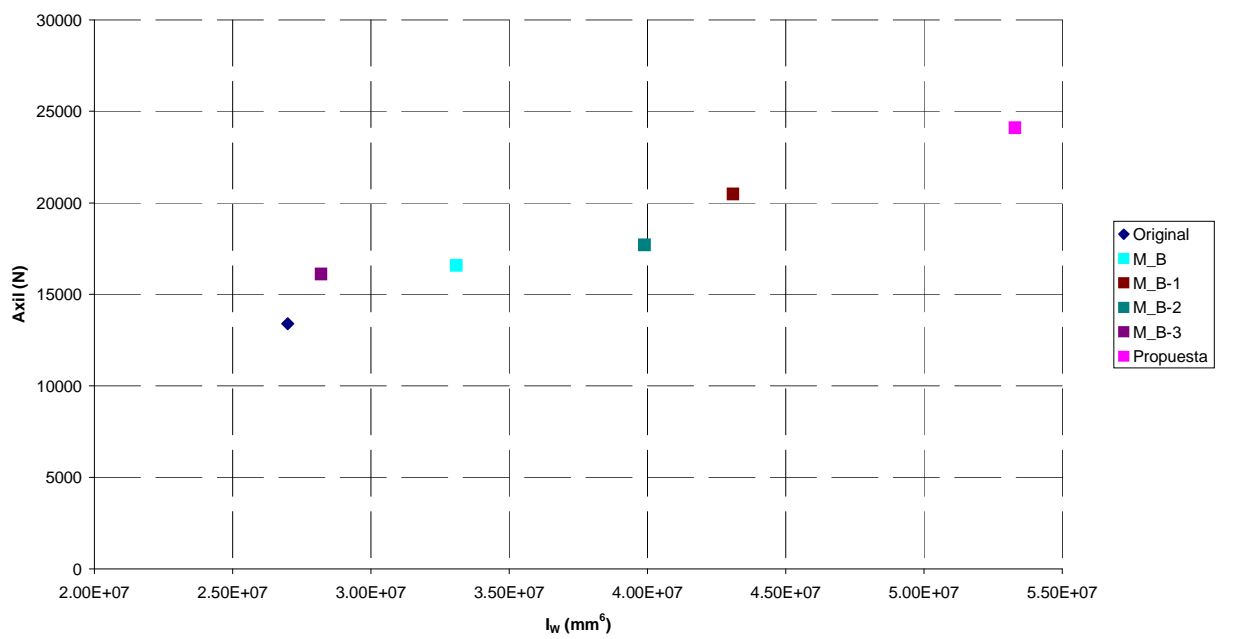


Figura 7.4 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la constante de alabeo de la sección



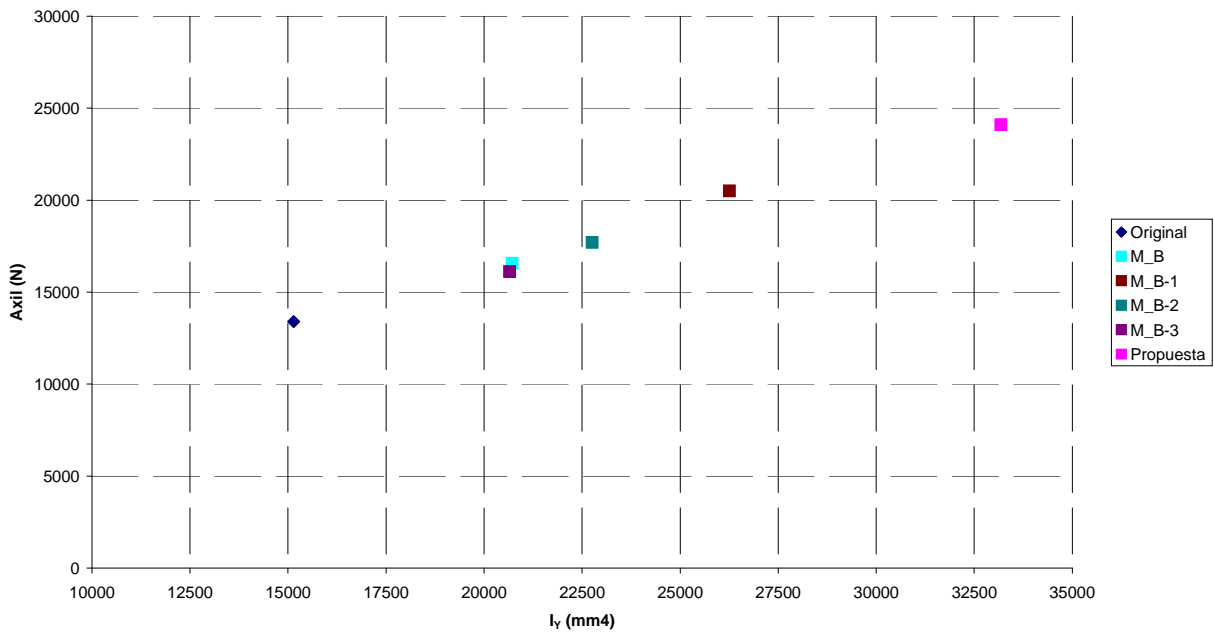


Figura 7.5 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia sobre el eje y de la sección







8. Impacto ambiental

El presente Proyecto Final de Carrera está dedicado al análisis de puntales de estanterías metálicas con objeto de optimizar la sección de un perfil concreto desde el punto de vista resistente a compresión.

El análisis comentado tiene como principal ventaja de carácter medioambiental el hecho de optimizar una sección para lograr su máximo rendimiento de carga, objetivo principal, pero tratando de no aumentar en exceso la cantidad de material utilizado, ya que aparte del coste económico que esto supone, se ayuda a no explotar en exceso este material y a optimizar los residuos que puede comportar el acero, tanto en su fabricación propiamente dicha como en la del puntal estudiado, por lo que se llega a aumentar la capacidad de carga de la estantería minimizando su impacto ambiental.





9. Presupuesto

La simulación del presupuesto se realiza, teniendo en cuenta que debe trabajar una persona realizando las correspondientes simulaciones con el software necesario, y que los ensayos experimentales utilizados se encargan a un laboratorio especializado. Los precios que se han adoptado son orientativos y con impuestos incluidos.

Licencia Ansys Academic Teaching Mechanical. 5 tareas simultáneas	$2.495\text{€} / 5 = \mathbf{499\text{€}}$
Ensayos experimentales	$43 \text{ ensayos} \times 60 \text{ €/ensayo} = \mathbf{2.580\text{€}}$ Diseño y construcción de placas de ensayo = 900 €
Trabajo de simulación	$600 \text{ horas} \times 13 \text{ €/hora} = \mathbf{7800\text{€}}$
TOTAL	11.779 €



Conclusiones

En el presente Proyecto Final de Carrera, se ha optimizado la sección de un puntal de estructura metálica desde el punto de vista resistente a compresión para longitudes cercanas a 1100mm.

Se han utilizado para ello dos métodos, la simulación por elementos finitos, con un ensayo lineal y otro no lineal, y la normativa de la FEM. Estos dos métodos se han comparado con ensayos experimentales realizados en laboratorio. Como resultado se ha obtenido la misma tendencia por los tres análisis, aunque siempre en el siguiente orden: como valor de carga máxima alcanzada más elevada el análisis experimental, le sigue el análisis por elementos finitos y por último la formulación de la normativa; por consiguiente, al ser estos dos últimos más conservadores que el experimental, parece razonable suponer que el nuevo prototipo cumplirá las expectativas de mejora considerable de capacidad resistente.

En las simulaciones realizadas se ha observado que para las longitudes cercanas a 1100mm, el tipo de fallo es de flexo-torsión, tipo de fallo que coincide con el obtenido en los análisis experimentales. Con el objeto de optimizar la sección para este tipo de fallo, se han modificado variables geométricas, una por separado en cada fase. Obteniendo como resultado la clara influencia de dos de ellas: la constante de alabeo y la inercia sobre el eje débil. También se ha concluido la falta de influencia de otras variables, como la inercia sobre el eje fuerte.

La propuesta de diseño del nuevo prototipo, se ha obtenido incrementando el valor de los dos parámetros que provocan el aumento en la carga de fallo, y disminuyendo el parámetro que ha demostrado no influir con el fin de minimizar el área de la sección.

Finalmente, se concluye del presente Proyecto Final de Carrera, que se ha conseguido el objetivo del proyecto en todo su alcance, proponiendo una nueva sección que aumenta el valor de carga máxima resistida a compresión hacia valores cercanos al doble del diseño original a la vez que se ha minimizado el área y, por tanto, la cantidad de material utilizado.



Agradecimientos

A:

Maria Rosa Somalo por su ayuda con todo lo necesitado sobre ensayos experimentales.

Miquel Ferrer y Miquel Casafont por su ayuda con la simulación numérica por elementos finitos con el programa ANSYS v.10.0.

Francesc Roure, por su ayuda resolviendo cualquier tipo de duda sobre el proyecto.

M^a Magdalena Pastor, directora del proyecto, por haber dedicado tanto tiempo y esfuerzo.

En general a todo el departamento de Elasticidad y Resistencia de Materiales y a amigos y familiares que me han apoyado durante todo el proceso de realización del Proyecto.



Bibliografía

9.1. Referencias bibliográficas

Libros y normativas:

- [1] B.W. SCHAFER Y T.PEKÖZ, *Computational modelling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses*.
- [2] K.J.R. RASMUSSEN Y J.RONDAL, *Column curves for stainless steel alloys*, Journal of Constructional Steel Research 54 (2000) 89-107
- [3] J.M. DAVIES, P.LEACH Y A.TAYLOR, *The design of Perforated Cold-Formed Steel Sections Subject to Axial Load and Bending*, Thin-Walled Structures, Vol. 29, Nos 1-4, 141-157, 1997
- [4] Normativa FEM 10.2.02 “The design of static steel pallet tracking”, 3-21 a 3-32

Catálogos:

- [5] Mecalux. Picking M3

Programas informáticos:

- [6] ANSYS v.10.0
- [7] Hojas de cálculo Excel. Versión Office

9.2. Bibliografía complementaria

Eurocódigo 3 – Design of steel structures – Part 1-3

