

Resumen

En los siguientes anexos se ha tratado de ampliar información sobre el presente Proyecto Final de Carrera, con otros análisis realizados, descartados finalmente pero con interés si se desea profundizar en el tema, y con otros datos más técnicos sobre la simulación realizada.

En el Anexo A, se muestran una serie de propuestas estudiadas, en las que se han modificado en etapas sucesivas propiedades geométricas de la sección con el fin de aislar las más influyentes sobre el valor de carga de fallo a compresión del puntal. Se ha realizado un estudio partiendo del modelo original, y otro con una propuesta obtenida aumentando la cantidad de material empleado, de la cual se ha modificado en etapas sucesivas valores geométricos iguales a los realizados partiendo del otro modelo.

Por lo que se refiere al Anexo B, en este se ha realizado una comparación de valor de carga máxima resistido de todos los modelos estudiados en este proyecto, tanto los mostrados en la memoria como en el anexo anterior.

En el Anexo C, se muestran datos específicos de la simulación, como los comandos utilizados para generar las secciones, la influencia que tienen las imperfecciones iniciales introducidas y el tipo de elemento y mallado utilizado.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
A. OTROS MODELOS ESTUDIADOS	5
A.1. Modelo A-1	5
A.1.1. Características geométricas	5
A.1.2. Resultados simulación y FEM	6
A.1.3. Comparación diseño inicial	7
A.2. Modelo A-2	9
A.2.1. Características geométricas	9
A.2.2. Resultados simulación y FEM	10
A.2.3. Comparación diseño inicial	11
A.3. Modelo C	13
A.3.1. Características geométricas	13
A.3.2. Resultados simulación y FEM	14
A.3.3. Comparación diseño inicial	15
A.4. Modelo C-1	17
A.4.1. Características geométricas	17
A.4.2. Resultados simulación y FEM	18
A.4.3. Comparación diseño inicial	19
A.5. Modelo C-2	21
A.5.1. Características geométricas	21
A.5.2. Resultados simulación y FEM	22
A.5.3. Comparación diseño inicial	23
A.6. Conclusiones de los modelos realizados	25
B. COMPARACIÓN DE TODOS LOS DISEÑOS REALIZADOS	28
C. SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	30
C.1. Macro programa ANSYS v.10.0	30
C.2. Imperfecciones iniciales	46
C.3. Mallado de la pieza	48



A. Otros modelos estudiados

A.1. Modelo A-1

A.1.1. Características geométricas

Este modelo se ha obtenido a partir del modelo original, aumentando la separación de las alas del perfil, con la finalidad de aumentar la inercia de éste sobre el eje débil, Fig. A.1.

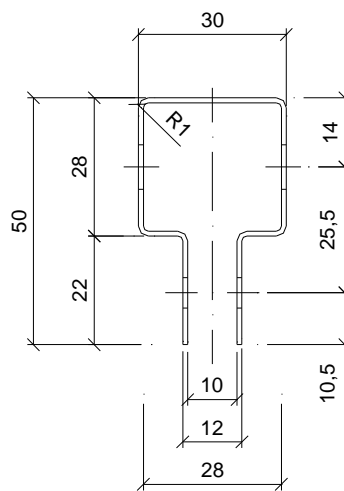


Fig. A.1 Geometría del modelo A-1

Área	142,135 mm ²
I_T	47,135 mm ⁴
I_W	1,86E+07 mm ⁶
I_z	34282 mm ⁴
I_y	16089 mm ⁴
i_z	15,53 mm
i_y	10,64 mm
y_o	45,111 mm
A_{eff}	102,34 mm ²

Tabla A.1 Propiedades de la sección del modelo A-1



A.1.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	26974,40
300	25688,00
400	24253,68
500	22593,22
600	20672,50
700	18546,58
800	16363,91
900	14292,89
1000	12443,12
1100	10850,63
1200	9504,50
1300	8374,14
1400	7424,96
1500	6625,07
1600	5947,41
1700	5369,75

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	27996,3
300	Local	27608
400	Distorsional	25937,8
500	Global	24584,3
700	Global	21240,8
900	Global	17045,9
1100	Global	12902,9
1300	Global	9842,58
1500	Global	7655,9
1700	Global	6111,76

Tabla A.2 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

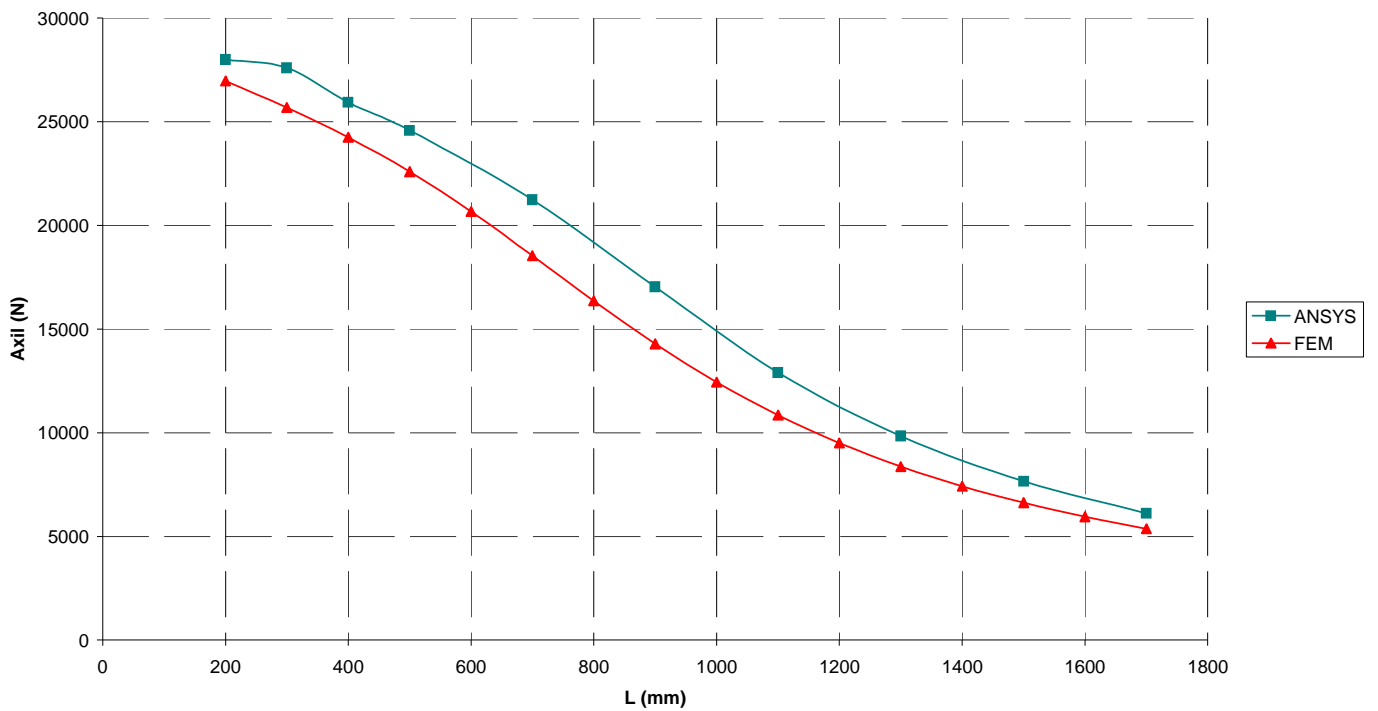


Fig. A.2 Gráfico comparativo de resultados por simulación y FEM



A.1.3. Comparación diseño inicial

Se observa en los gráficos que se comparan con el modelo original, como aumentar la inercia en el eje débil no mejora la carga máxima soportada por el perfil, debido a la gran disminución que sufre la constante de alabeo al abrir la sección (separar las alas).

Área	-4,05 %
I_T	-4,24 %
I_W	-31,11 %
I_z	-0,78 %
I_Y	6,27 %
A_{eff}	-6,64 %

Tabla A.3 Comparativa de propiedades con el modelo original

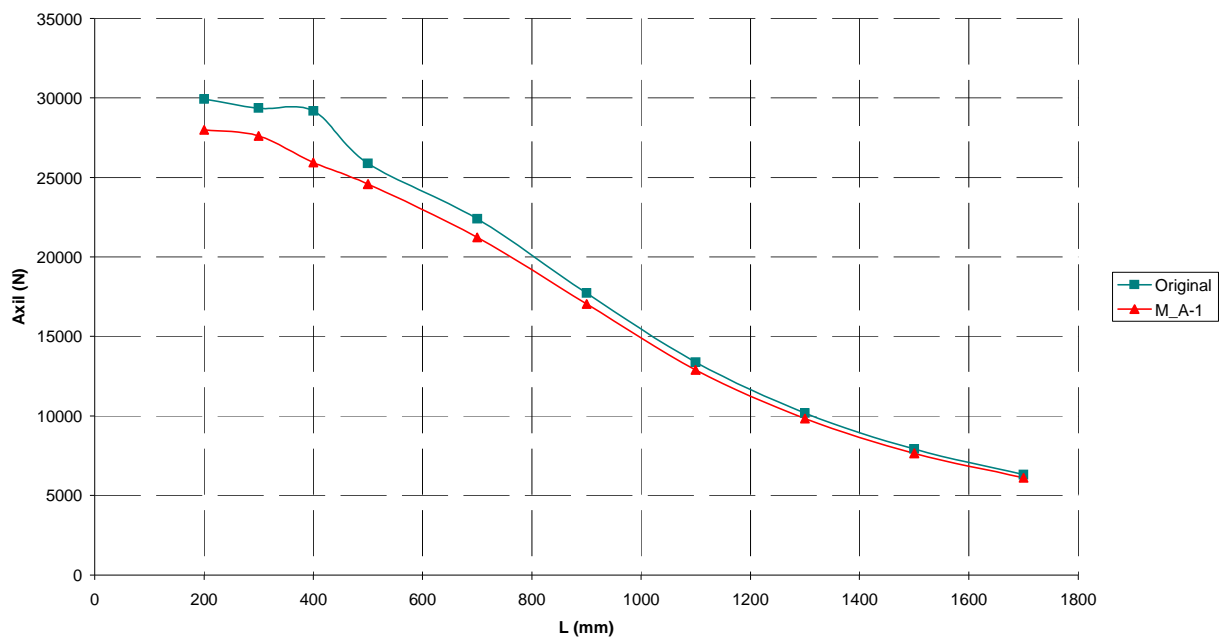


Fig. A.3 Gráfico comparativo resultados simulación



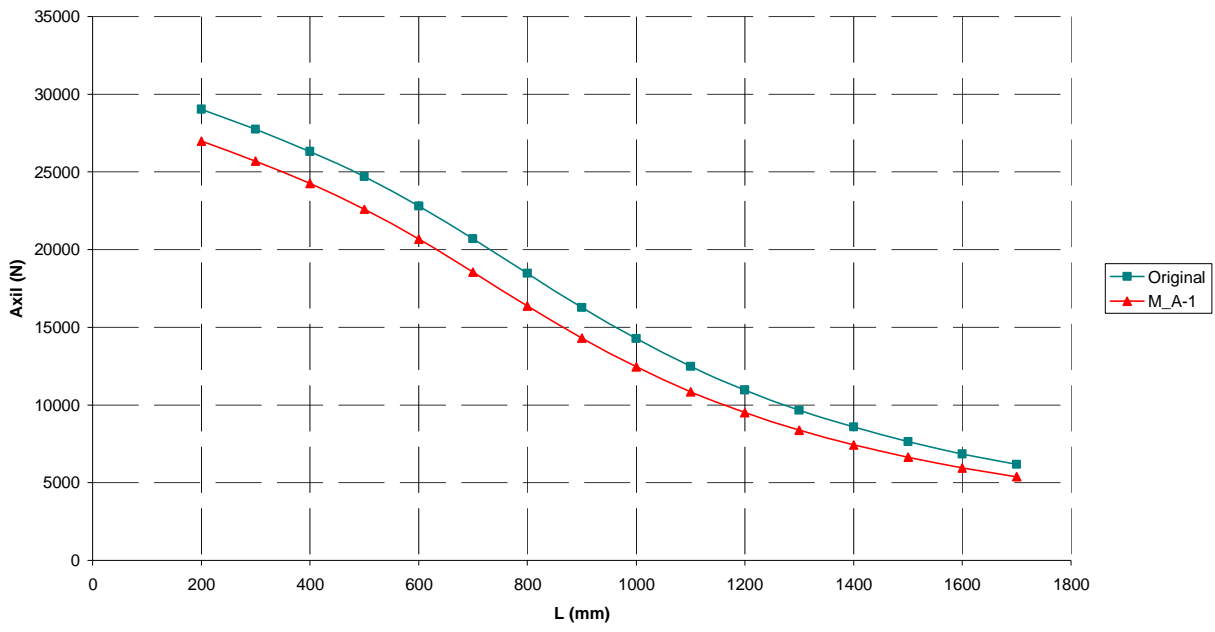


Fig. A.4 Gráfico comparativo resultados FEM



A.2. Modelo A-2

A.2.1. Características geométricas

Este modelo parte, como el anterior, del diseño original aumentando en 3 mm la altura de la caja.

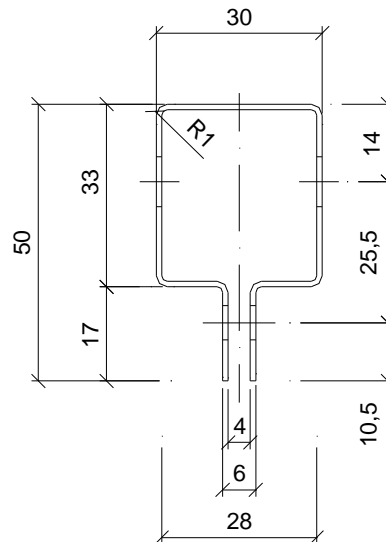


Fig. A.5 Geometría del modelo A-2

Área	148,135 mm ²
I_T	42,21 mm ⁴
I_W	3,09E+07 mm ⁶
I_Z	36414 mm ⁴
I_Y	17180 mm ⁴
i_Z	15,68 mm
i_Y	10,77 mm
y_o	44,63 mm
A_{eff}	111,10 mm ²

Tabla A.4 de propiedades de la sección del modelo A-2



A.2.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}$ (N)
200	29524,02
300	28272,04
400	26906,99
500	25358,01
600	23576,14
700	21565,17
800	19407,37
900	17242,96
1000	15206,39
1100	13379,07
1200	11786,91
1300	10420,78
1400	9255,83
1500	8263,19
1600	7415,37
1700	6688,32

L (mm)	Tipo	N_{MAX} (N)
200	Local	30349,9
300	Local	29794
400	Dist.	28728,2
500	Global	27782,1
700	Global	24136,3
900	Global	19840,2
1100	Global	15177,6
1300	Global	11572,8
1500	Global	9037,2
1700	Global	7203,63

Tabla A.5 de resultados FEM (izq.) simulación (der.)

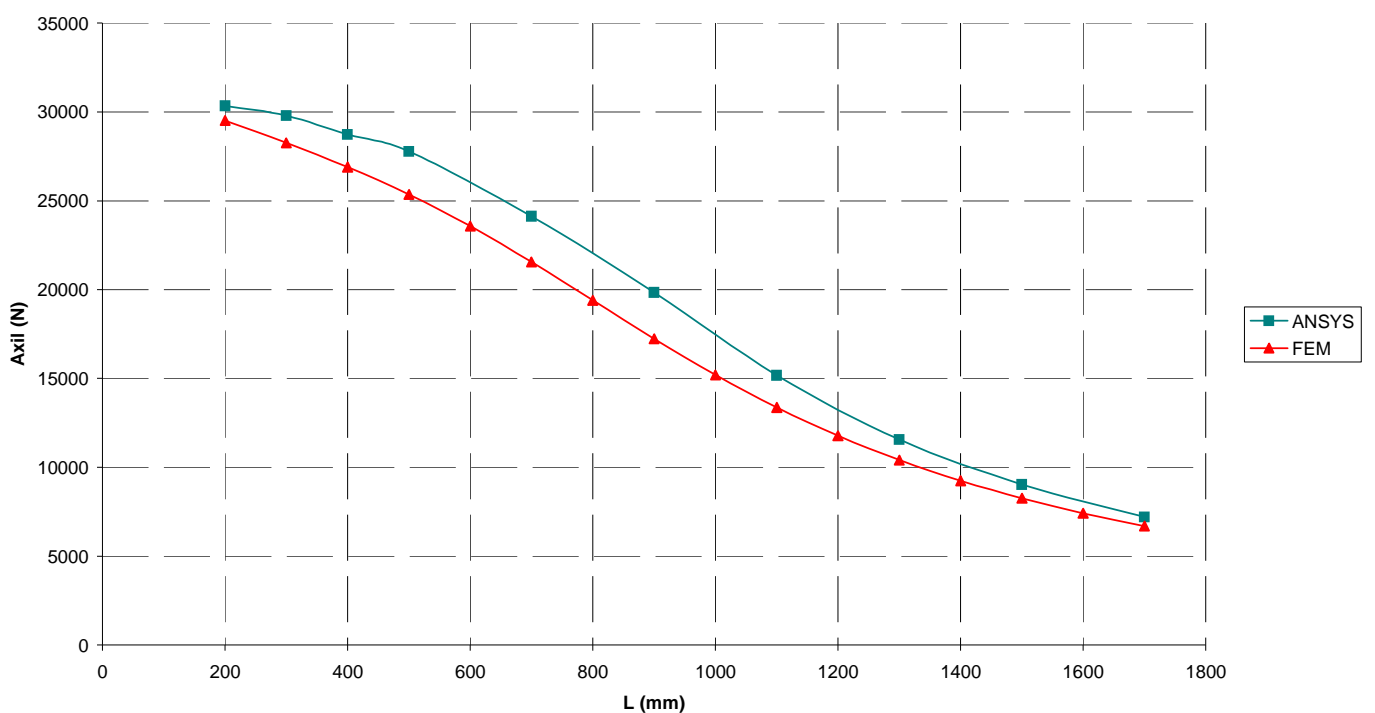


Fig. A.6 Gráfico comparativo de resultados por simulación y FEM



A.2.3. Comparación diseño inicial

Este modelo muestra unos resultados mejores al modelo original y por supuesto al modelo A-1, como se observa en la comparación de las características geométricas los únicos valores que aumentan significativamente son la constante de alabeo y la inercia en el eje y.

Área	0 %
I_T	-0,02 %
I_W	14,44 %
I_Z	5,39 %
I_Y	13,47 %
A_{eff}	1,35 %

Tabla A.6 Comparativa de propiedades con el modelo original

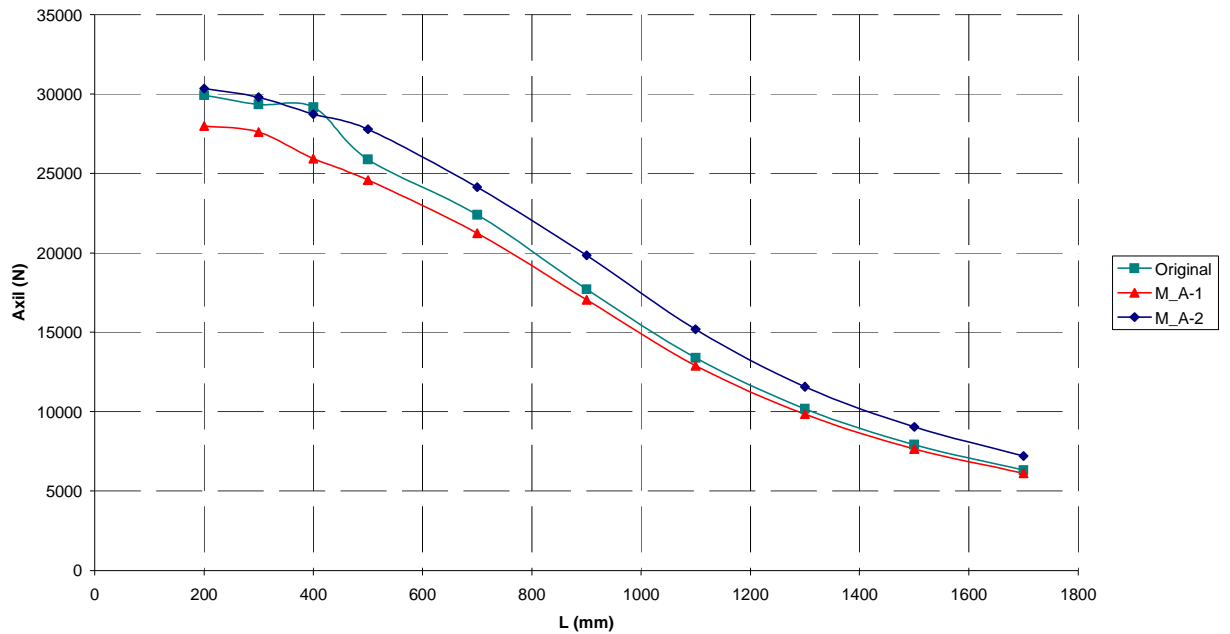


Fig. A.7 Gráfico comparativo resultados simulación



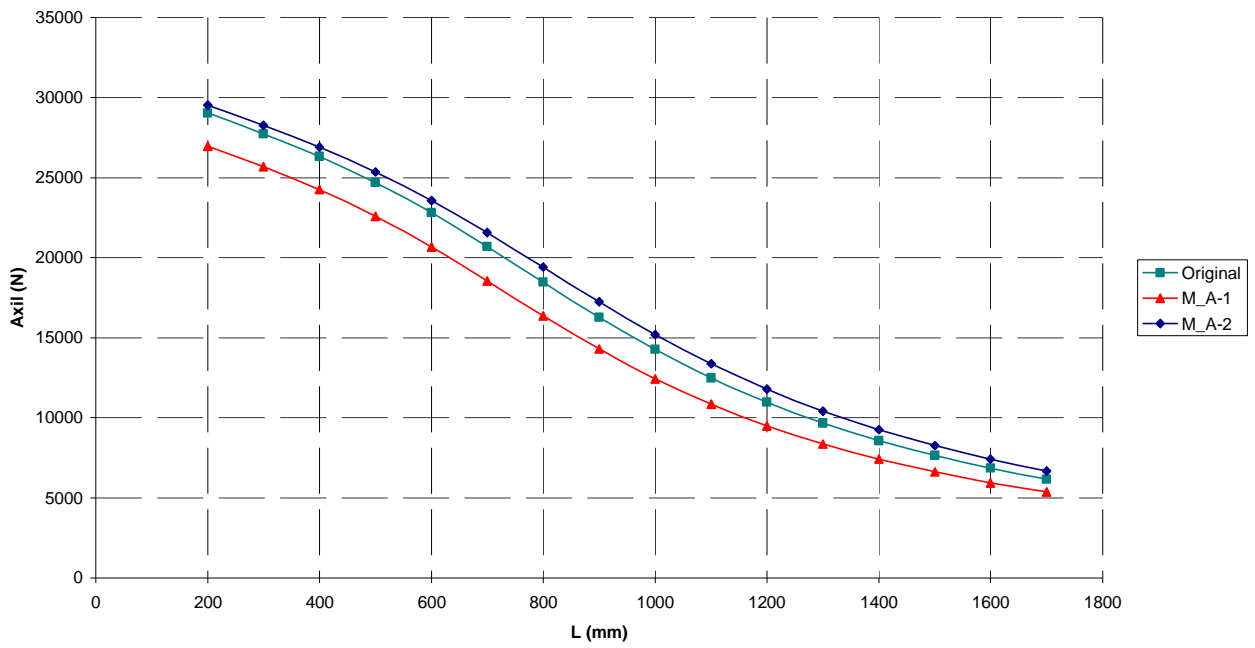


Fig. A.8 Gráfico comparativo resultados FEM



A.3. Modelo C

A.3.1. Características geométricas

Esta propuesta se basa en añadir en las alas del modelo original unas pequeñas aletas, con la finalidad de aumentar la inercia en el eje débil.

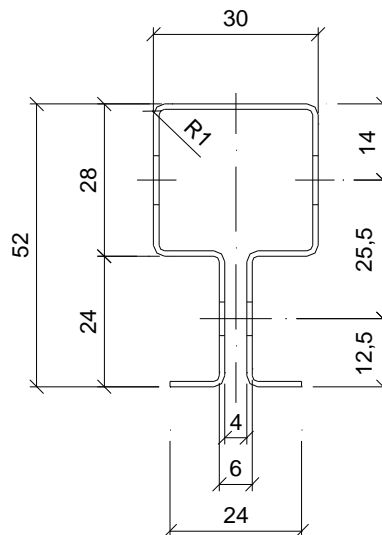


Fig. A.9 Geometría del modelo C

Área	168,847 mm ²
I_T	56,134 mm ⁴
I_W	3,11E+07 mm ⁶
I_Z	51390 mm ⁴
I_Y	16293 mm ⁴
i_Z	17,45 mm
i_Y	9,82 mm
y_o	48,76 mm
A_{eff}	135,08 mm ²

Tabla A.7 Propiedades de la sección del modelo C



A.3.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}(N)$
200	35424,01
300	33609,74
400	31554,28
500	29142,90
600	26349,64
700	23309,23
800	20282,58
900	17506,44
1000	15096,86
1100	13066,16
1200	11375,42
1300	9970,87
1400	8800,61
1500	7820,13
1600	6993,16
1700	6290,77

L (mm)	Tipo	$N_{MAX}(N)$
200	Local	36290,5
300	Local	35548,2
400	Global	33722
500	Global	31217
700	Global	25476,5
900	Global	19016,9
1100	Global	13997,6
1300	Global	10538,8
1500	Global	8189,03
1700	Global	6522,22

Tabla A.8 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

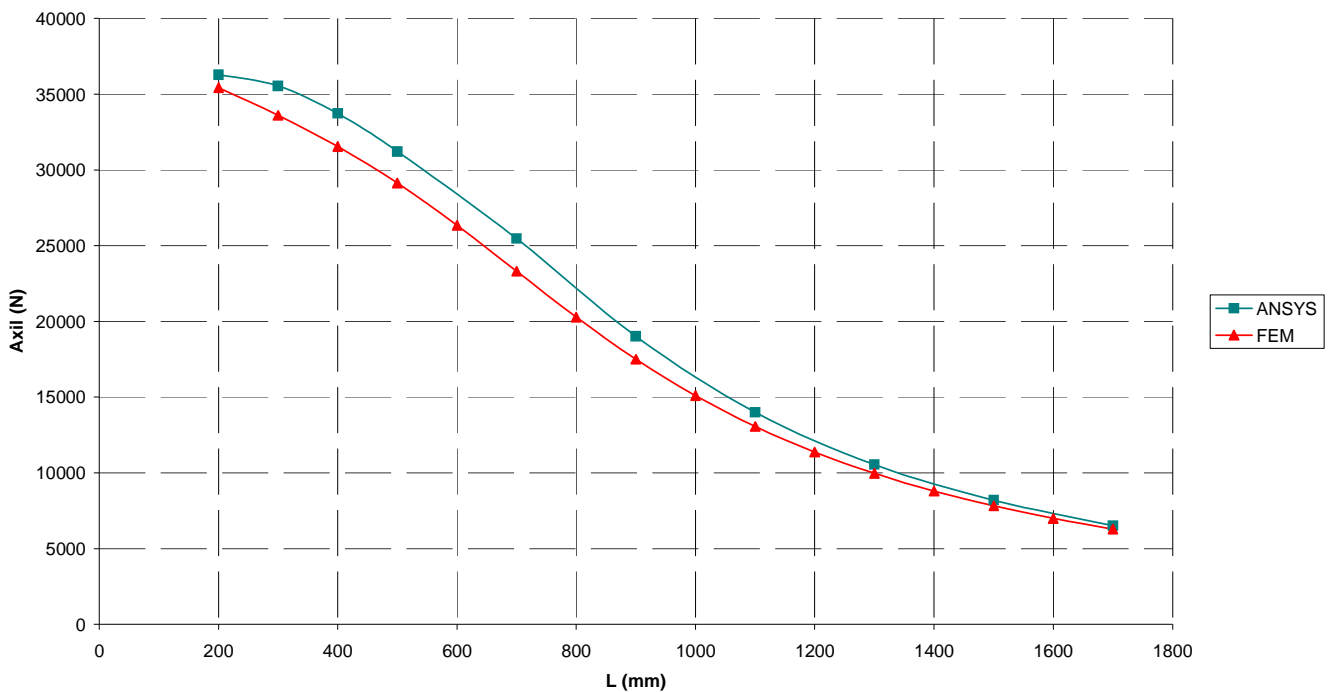


Fig. A.10 Gráfico comparativo de resultados por simulación y FEM



A.3.3 Comparación diseño inicial

Este modelo cambia de gran manera la geometría con respecto al original, y lo hace de forma que aumentan todas las variables geométricas mostradas, en especial la inercia sobre el eje fuerte al añadirle unas pequeñas aletas al final de sus alas; sin embargo este aumento de todos los valores no se muestra en los resultados, que para distancias cortas sí que son más elevados, pero a medida que se aumenta la longitud, las cargas máximas de este modelo y del original, tienden a converger.

Área	13,98 %
I_T	14,04 %
I_W	15,18 %
I_z	48,74 %
I_Y	7,62 %
A_{eff}	23,22 %

Tabla A.9 Comparativa de propiedades con el modelo original

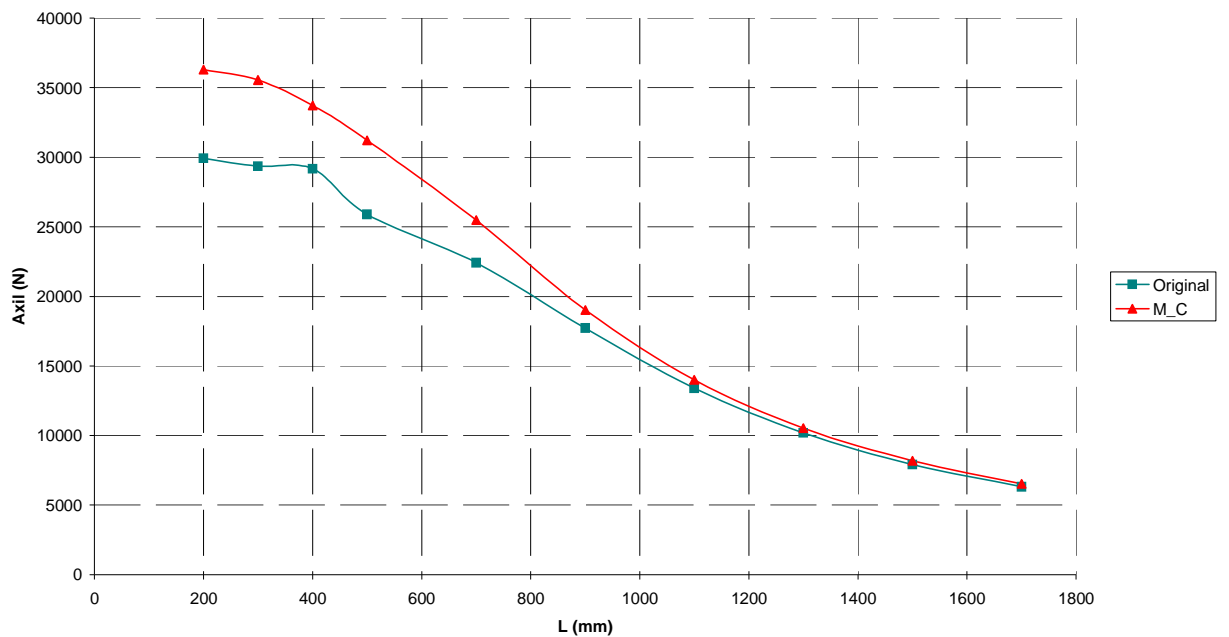


Fig. A.11 Gráfico comparativo resultados simulación



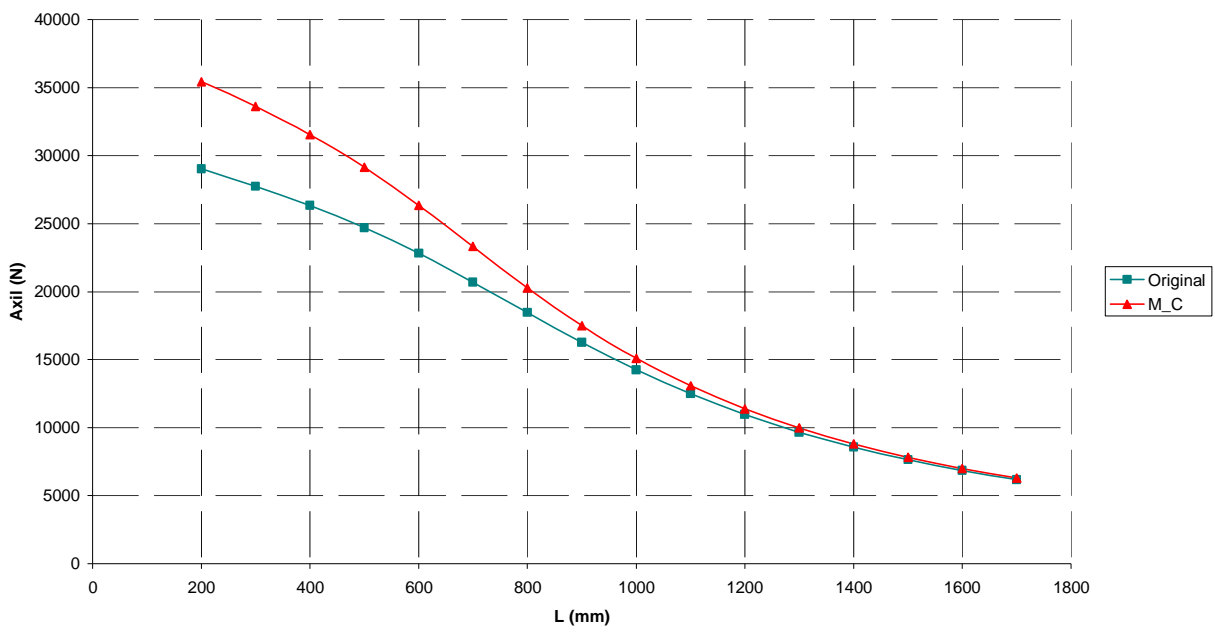


Fig. A.12 Gráfico comparativo resultados FEM



A.4. Modelo C-1

A.4.1. Características geométricas

Para la obtención de esta mejora, se parte del modelo C, aumentando la separación de las alas 6 mm.

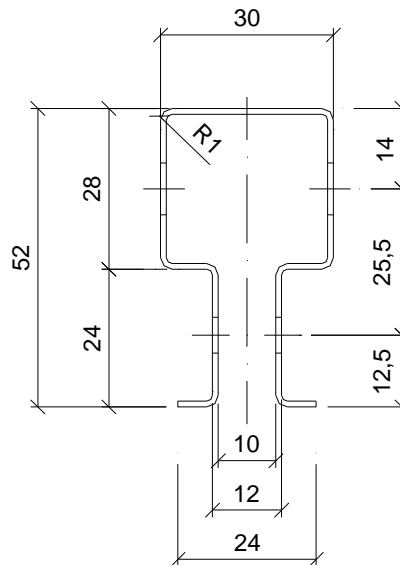


Fig. A.13 Geometría modelo C-1

Área	156,847 mm ²
I_T	52,149 mm ⁴
I_W	2,13E+07 mm ⁶
I_Z	46823 mm ⁴
I_Y	17184 mm ⁴
i_Z	17,28 mm
i_Y	10,47 mm
y_o	50,657 mm
A_{eff}	120,77 mm ²

Tabla A.10 Propiedades de la sección del modelo C-1



A.4.2. Resultados simulación y FEM

L (mm)	$N_{b,Rd}(N)$
200	31554,11
300	29855,68
400	27912,88
500	25620,89
600	22979,48
700	20155,81
800	17414,19
900	14957,54
1000	12862,74
1100	11118,91
1200	9679,06
1300	8489,72
1400	7502,66
1500	6677,99
1600	5983,82
1700	5395,06

L (mm)	Tipo	$N_{MAX}(N)$
200	Local	32447,9
300	Dist.	29465
400	Global	29513,7
500	Global	27223,5
700	Global	23422,5
900	Global	17490,7
1100	Global	12933
1300	Global	9933,12
1500	Global	7717,79
1700	Global	6154,08

Tabla A.11 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

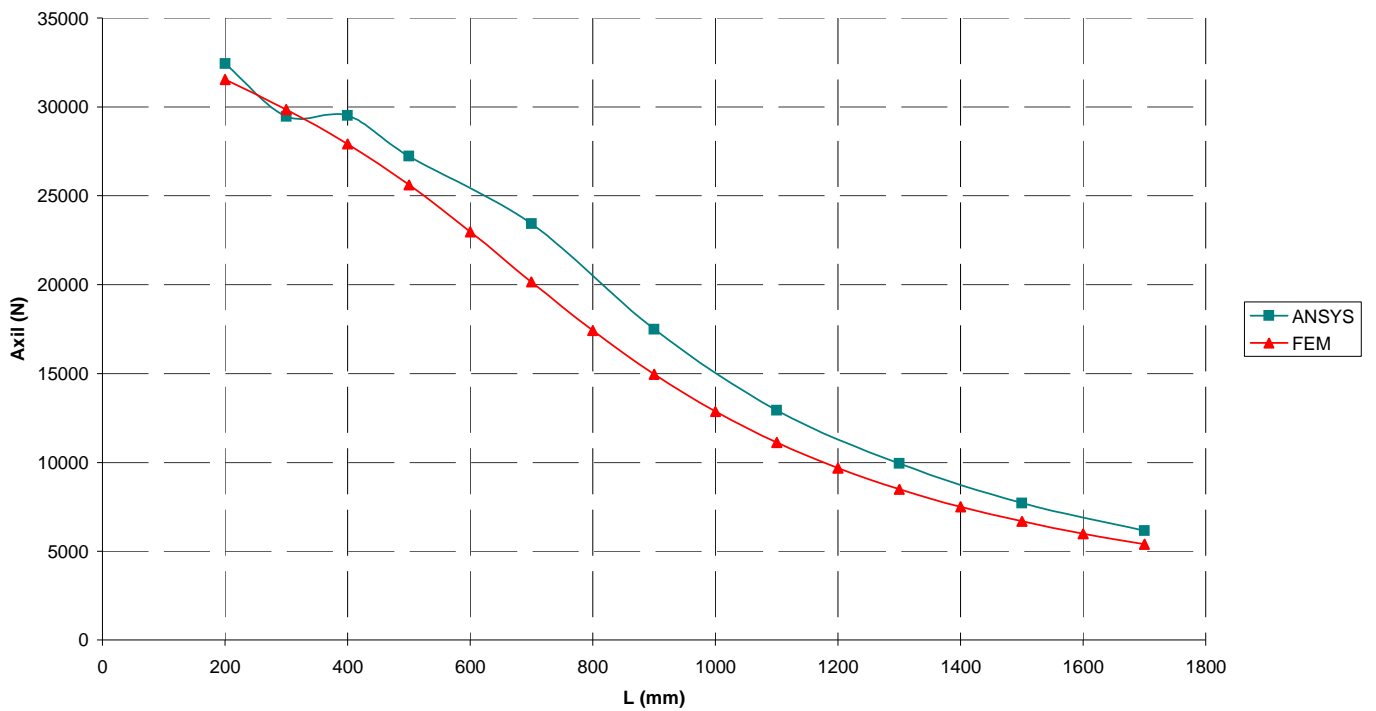


Fig. A.14 Gráfico comparativo de resultados por simulación y FEM



A.4.3. Comparación diseño inicial

Como se observa en la Tabla A.12, todas las características de este modelo, a excepción de la inercia en el eje y, disminuyen en relación al modelo C y los resultados lo muestran por debajo de éste, sin embargo, en comparación con el modelo original aumentan todos los valores menos la constante de alabeo, y para longitudes cortas si que es más elevada la respuesta de este modelo, pero a medida que se aumenta la longitud esta carga máxima va disminuyendo en relación al modelo original hasta que pasa a situarse por debajo de ésta.

Área	-7,11 %
I_T	-7,10 %
I_W	-31,51 %
I_Z	-8,89 %
I_Y	5,47 %
A_{eff}	-10,59 %

Área	5,88 %
I_T	5,95 %
I_W	-21,11 %
I_Z	35,52 %
I_Y	13,5 %
A_{eff}	10,17 %

Tabla A.12 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo C (izq.)

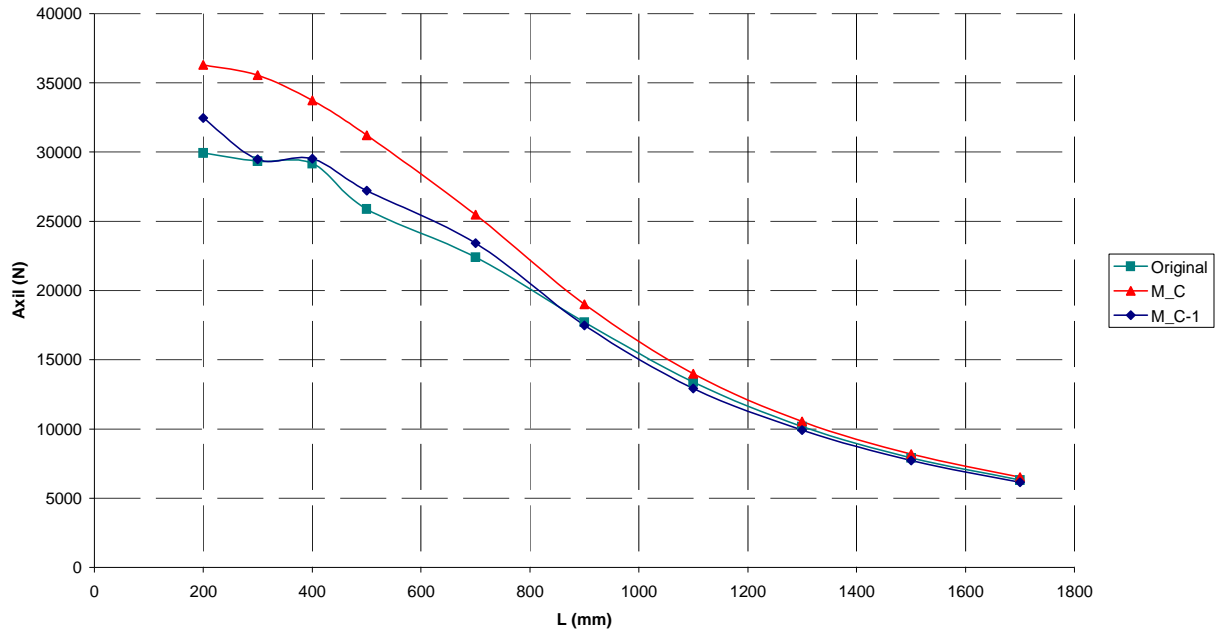


Fig. A.15 Gráfico comparativo resultados simulación



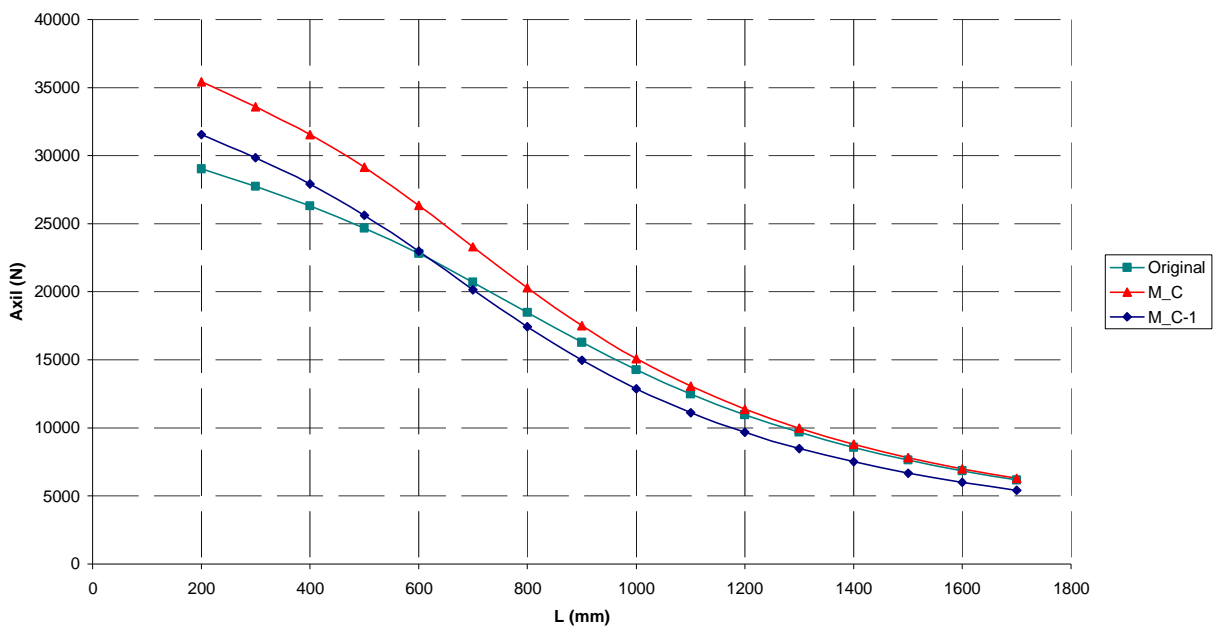


Fig. A.16 Gráfico comparativo resultados FEM



A.5. Modelo C-2

A.5.1. Características geométricas

Este modelo se ha obtenido partiendo del modelo C, y alargando la caja 3 mm, manteniendo el resto de la sección igual.

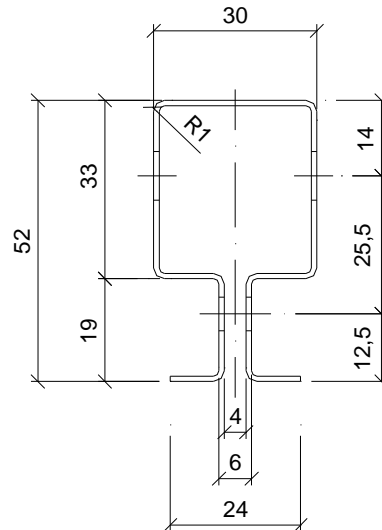


Fig. A.17 Geometría del modelo C-2

Área	168,847 mm ²
I_T	56,127 mm ⁴
I_W	3,71E+07 mm ⁶
I_Z	52461 mm ⁴
I_Y	18333 mm ⁴
i_Z	17,63 mm
i_Y	10,42 mm
y_o	51,521 mm
A_{eff}	136,77 mm ²

Tabla A.13 Propiedades de la sección del modelo C-2



A.5.2. Resultados simulación y FEM

L(mm)	$N_{b,Rd}(N)$
200	36014,34
300	34271,54
400	32320,23
500	30051,59
600	27420,83
700	24512,39
800	21540,70
900	18739,47
1000	16253,04
1100	14123,16
1200	12329,59
1300	10827,79
1400	9569,47
1500	8510,94
1600	7615,48
1700	6853,17

L (mm)	Tipo	$N_{MAX} (N)$
200	Local	36517,80
300	Local	36331,20
400	Global	33315,9
500	Global	32417,2
700	Global	27682,1
900	Global	21192,8
1100	Global	15677,3
1300	Global	11917,8
1500	Global	9239,94
1700	Global	7363,21

Tabla A.14 Resultados FEM (izq.) simulación (der.)

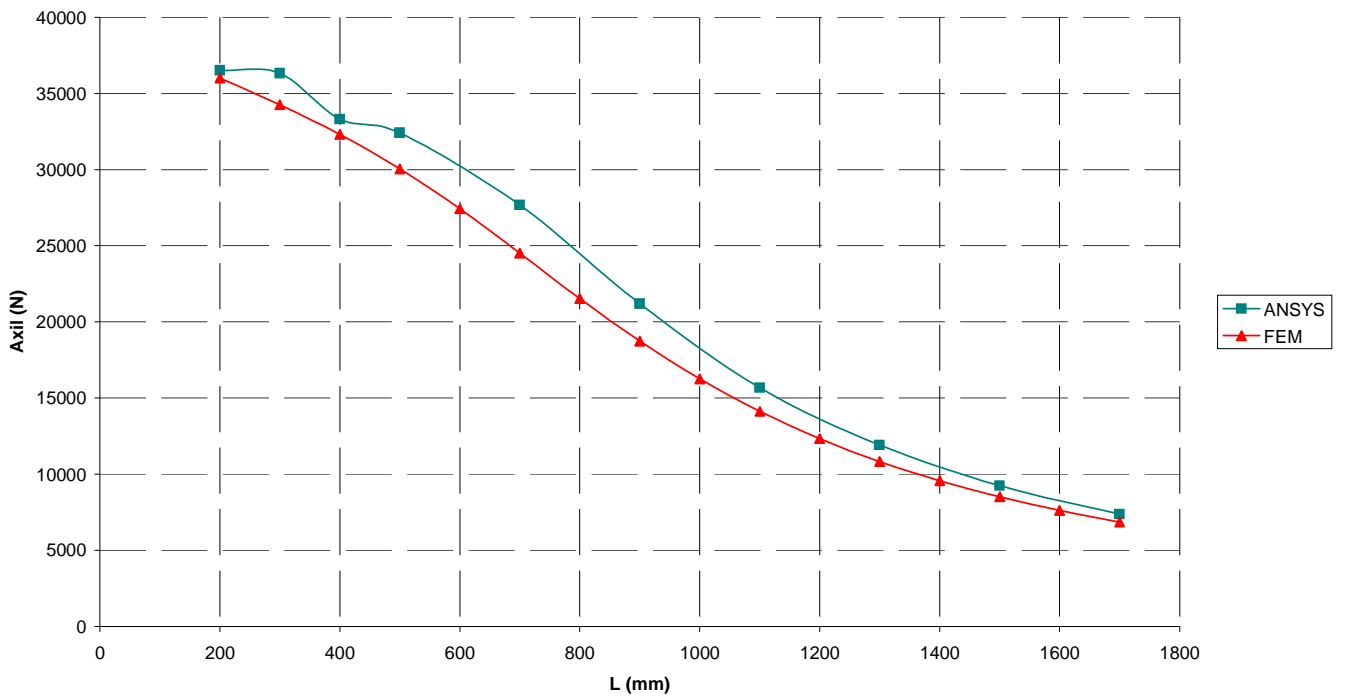


Fig. A.18 Gráfico comparativo de resultados por FEM y simulación



A.5.3. Comparación diseño inicial

Este modelo tiene casi las mismas propiedades geométricas que modelo C, pero se ha aumentado la constante de alabeo y la inercia sobre el eje y, por lo que tiene una aumento parecido sobre el modelo original, únicamente que aumentado en mayor medida estas dos variables. Los resultados observados sitúan este modelo por encima del modelo original y de los modelos C y C-1 como se observa en los gráficos Fig. A.19 y A.20.

Área	0 %
I_T	-0,01 %
I_W	19,29 %
I_z	2,08 %
I_y	12,52 %
A_{eff}	1,25 %

Área	13,98 %
I_T	14,03 %
I_W	37,41 %
I_z	51,84 %
I_y	21,09 %
A_{eff}	24,76 %

Tabla A.15 Comparativa de propiedades con el modelo original (der.) y modelo C (izq.)

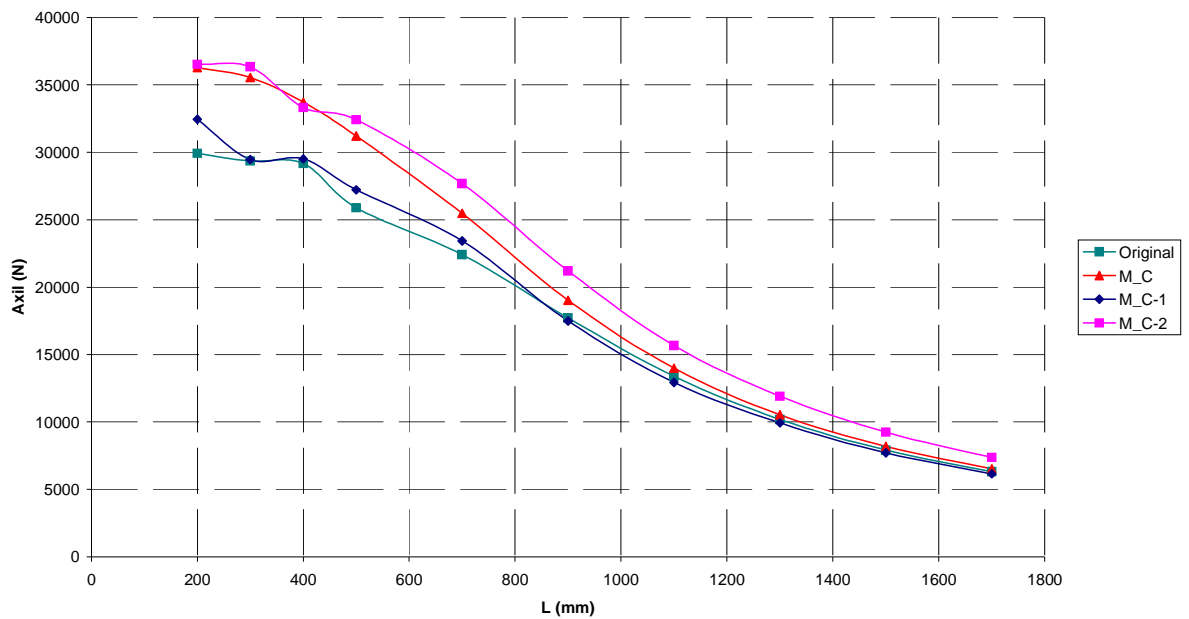


Figura A.19 Gráfico comparativo resultados simulación



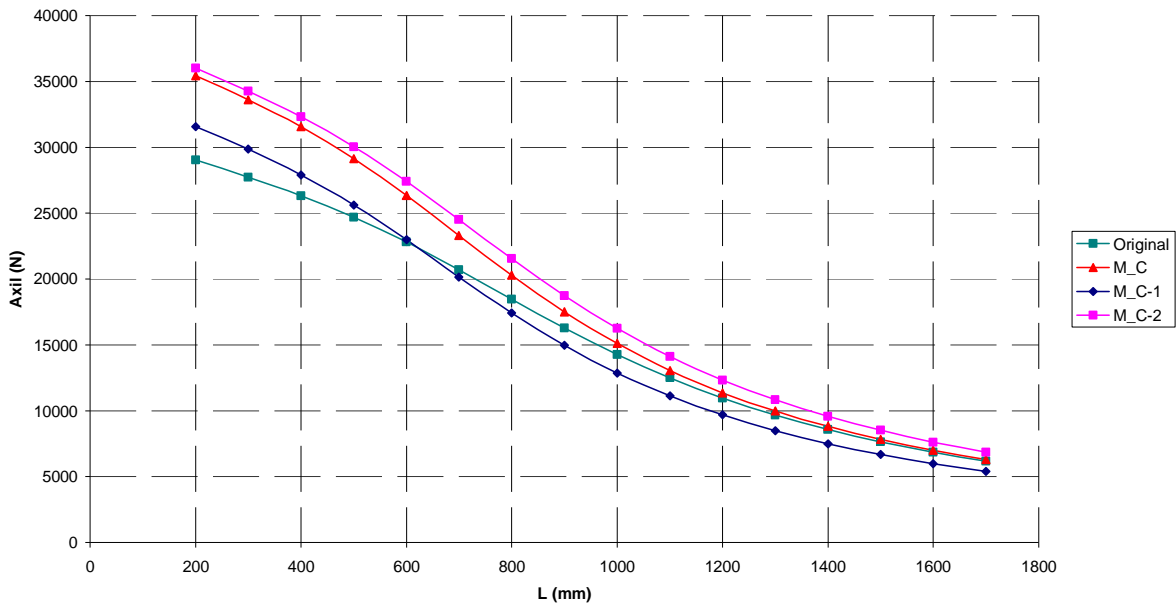


Figura A.20 Gráfico comparativo resultados FEM



A.6. Conclusiones de los modelos realizados

Para poder establecer conclusiones de los siguientes gráficos mostrados de valores geométricos de las secciones en función del valor de carga máxima resistido, se deben observar las variaciones en los gráficos de los modelos A y original, y de los modelos C, por separado, ya que es entre ellos donde sólo se ha ido modificando una propiedad geométrica, es decir, la comparación entre un modelo A y otro C, tiene varios cambios geométricos entre ellas que pueden distorsionar la conclusión.

En la Fig. A.21, se muestra el gráfico de carga máxima de fallo en función del área, como ya se concluye en la memoria, el valor de carga máxima alcanzada no parece depender de esta variable, ya que para valores con misma área, se encuentran diferentes valores de carga.

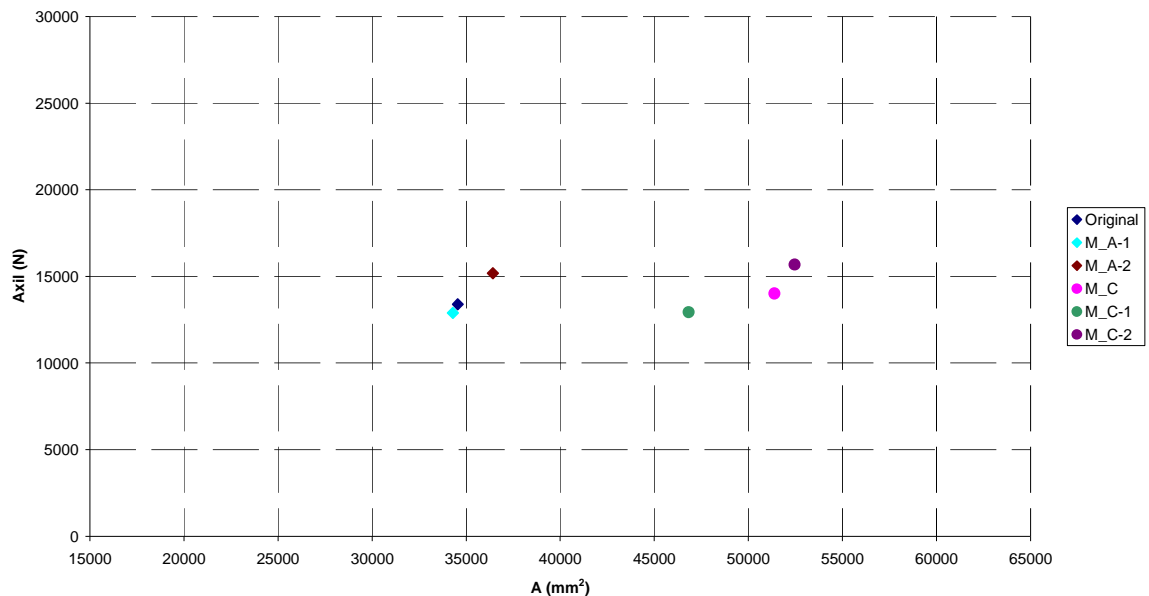


Fig. A.21 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de área de sección



En las Fig. A.22 y A.23, se muestran los gráficos de valores de carga en función de la constante de alabeo y de la inercia sobre el eje y. Estos dos gráficos deberían observarse conjuntamente; la constante de alabeo se muestra como un valor muy influyente sobre la carga máxima alcanzada por el puntal, al igual que la inercia sobre el eje y, pero cuando este último valor aumenta de manera que se separan las alas de la sección, la carga resistida disminuye, ya que lo hace en gran medida la constante de alabeo, por lo que se concluye que la inercia sobre el eje y, hace aumentar la carga resistida, siempre y cuando se aumente esta inercia sin abrir el perfil, es decir, sin disminuir la constante de alabeo.

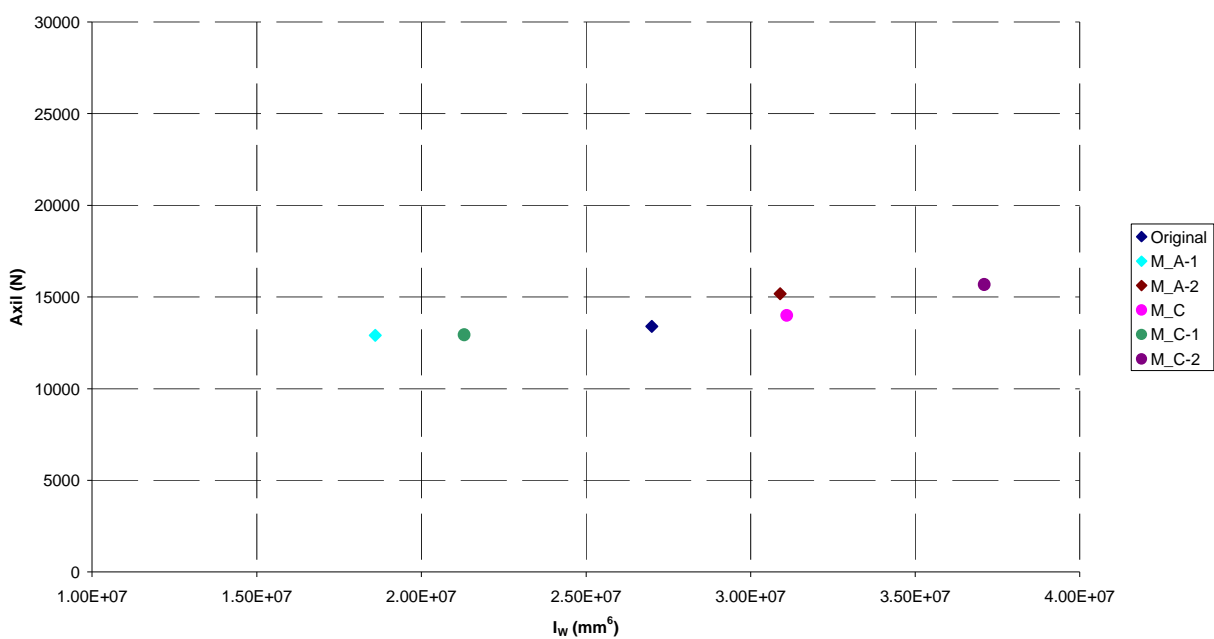


Fig. A.22 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la constante de alabeo de la sección



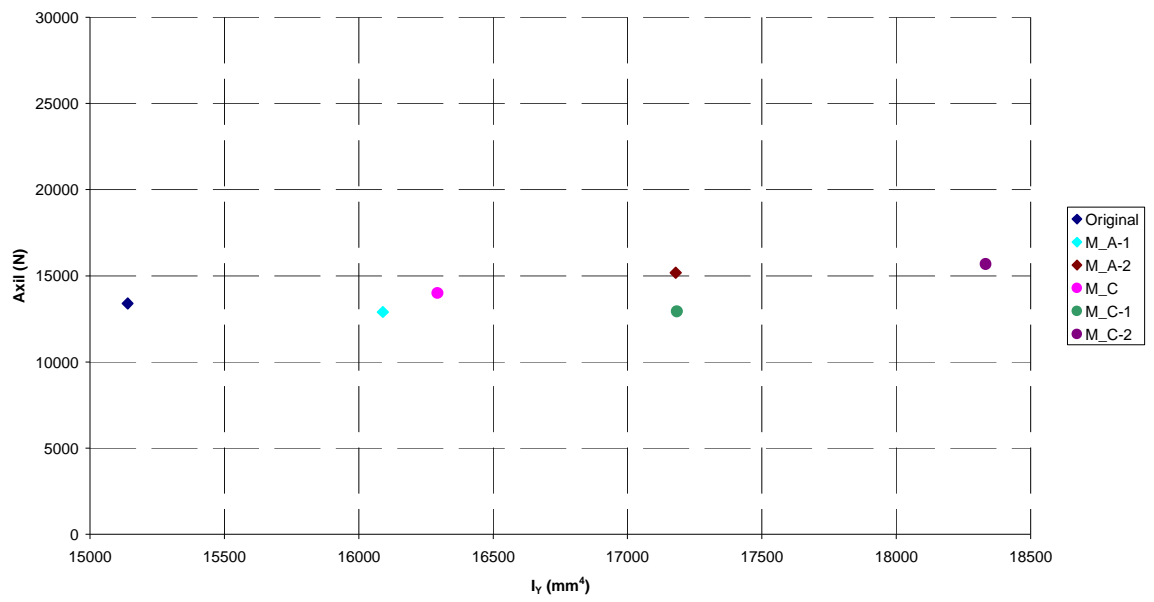


Fig. A.23 Gráfico resultado simulación L=1100 mm en función de la inercia sobre el eje y de la sección



B. Comparación de todos los diseños realizados

En este capítulo se va a hacer una comparación de todos los modelos diseñados, incluidos los mostrados en el anexo A, Fig. B.1 y B.2.

Para los tres tipos de sección de partida que se ha estudiado, original, B y C, se han seguido los mismos cambios, es decir en cada fase sólo se ha variado una variable geométrica, y éstas han sido las mismas para los tres modelos, exceptuando el modelo B, ya que para éste se han propuesto más cambios.

Como se observa en los gráficos mostrados a continuación, los modelos que se han expuesto en la memoria son los que se encuentran con valor de carga máxima resistida por encima del resto, destacando el gran aumento del valor de carga de la propuesta realizada.

Por otra parte, los modelos A y B, tienen resultados muy parecidos, cabe destacar de ellos, el hecho de que abrir la sección, es decir, aumentar la separación de las alas, disminuye el valor de carga máxima pese a aumentar la inercia en el eje débil; debido a la gran disminución sufrida por la constante de alabeo.

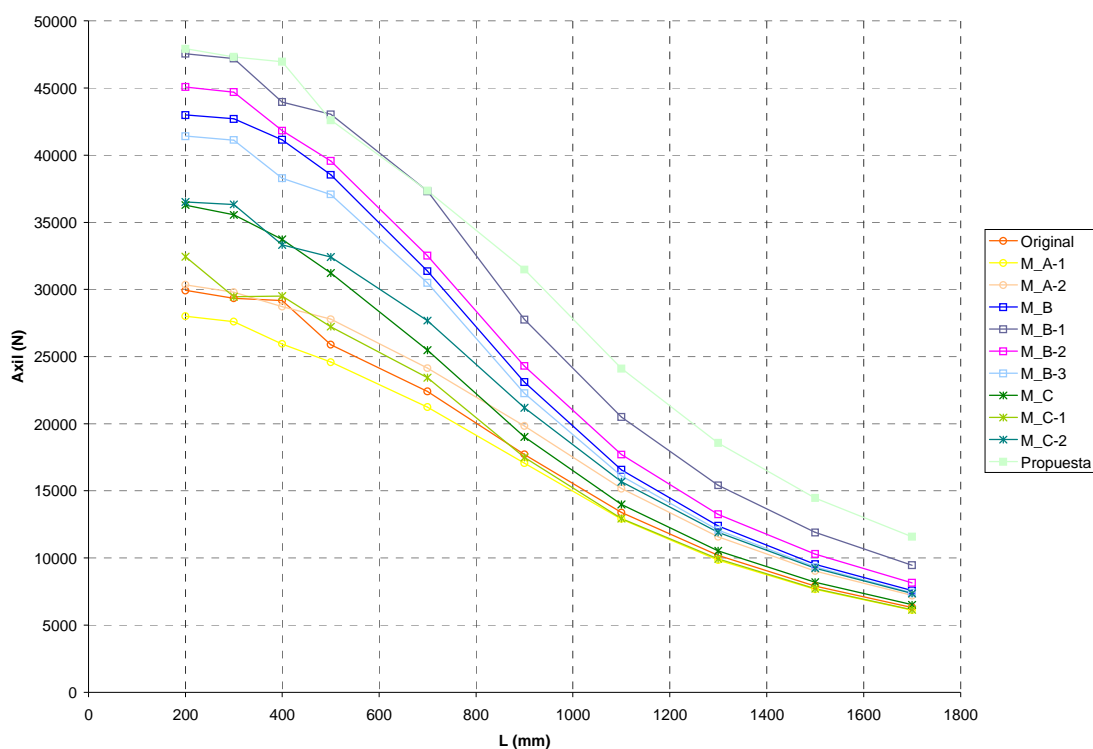


Fig. B.1 Gráfico comparativo de resultados por simulación de todos los modelos



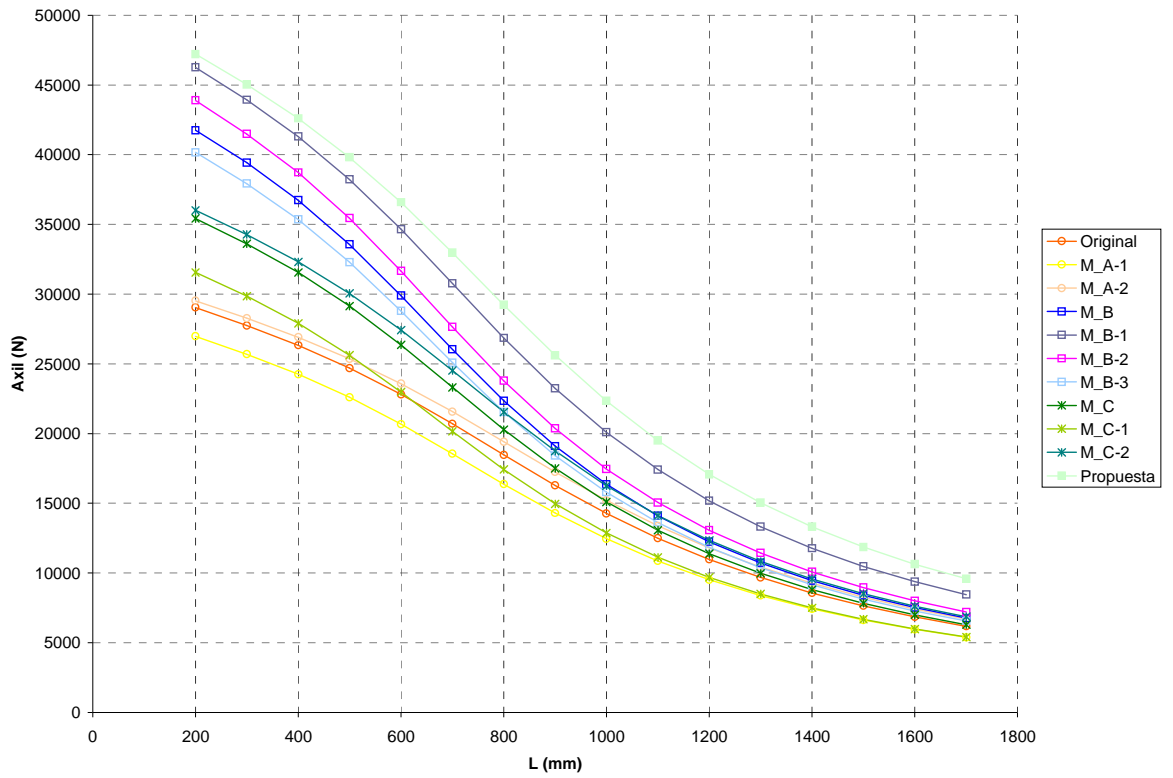


Fig. B.2 Gráfico comparativo de resultados por FEM de todos los modelos



C. Simulación por elementos finitos

C.1. Macro programa ANSYS v.10.0

Estudio del modelo según “Simulación numérica por elementos finitos” utilizando el programa ANSYS 10.0.

Para modelizar este puntal se ha creado una *macro*, es decir una serie de archivos que generan automáticamente el modelo, esta macro se ejecuta con el nombre de “npun”, que incluye los siguientes archivos:

finish

/clear

geoi.txt

for.txt

genp.txt

malp.txt

gnp1.txt

gnp2.txt

mapl.txt

cone.txt

enl.txt



geoi.txt

Definición de los keypoints de la mitad de la pieza:

```

/prep7,
k,1,-2.5,0
k,2,-2.5,-21
k,3,-4,-22.5
k,4,-13,-22.5
k,5,-14.5,-24
k,6,-14.5,-48
k,7,-13,-49.5
k,8,0,-49.5

```

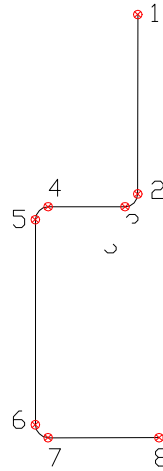


Fig. C.1 Puntos principales de la sección

Definición de los centros de las curvaturas de la sección:

```

k,9,-4,-21
k,10,-13,-24
k,11,-13,-48

```

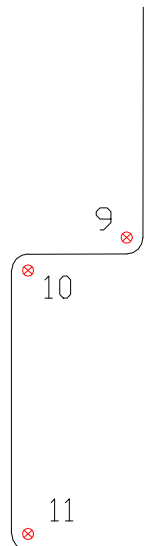


Fig. C.2 Centros de los arcos de la sección



Líneas entre keypoints, las *larc* se definen con el punto inicial y final, el centro de curvatura y el radio

l,1,2

larc,3,2,9,1.5

l,3,4

larc,4,5,10,1.5

l,5,6

larc,7,6,11,1.5

l,7,8

Definición de 2 keypoints cualquiera para crear una recta en el eje z de 50mm

k,50,0,-60,0

k,51,0,-60,50

l,50,51

Extrusión de las líneas creadas a lo largo del eje z

adrag,1,2,3,4,5,6,8

adrag,7,,,,,8

ldele,8

kdele,50,51

aplot

finish

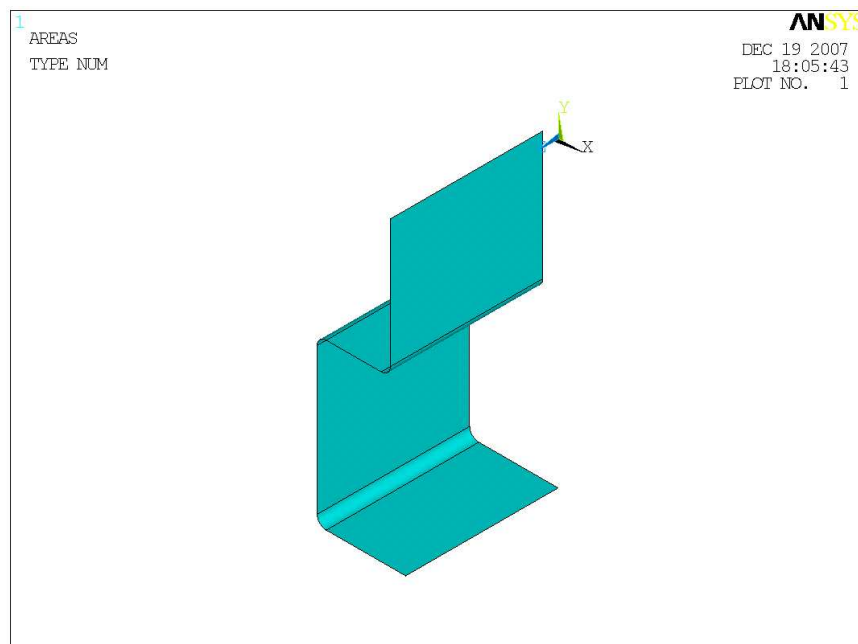


Fig. C.3 Áreas de la mitad de la sección



for.txt

Definición de los keypoints que forman el agujero cuadrado, incluyendo los centros de los radios

```
/prep7,  
numcmp,all  
*get,nk,kp,,num,max  
kset,none  
local,50,0,-14.5,-36,12.5  
k,nk+1,, -4,-4.5  
k,nk+2,, -4.5,-4  
k,nk+3,, -4,-4  
ksymm,z,all  
ksymm,y,all  
lset,none  
larc,nk+1,nk+2,nk+3,0.5  
l,nk+2,nk+5  
larc,nk+5,nk+4,nk+6,0.5  
l,nk+4,nk+10  
larc,nk+10,nk+11,nk+12,0.5  
l,nk+11,nk+8  
larc,nk+8,nk+7,nk+9,0.5  
l,nk+7,nk+1
```

Formación del área del agujero que se resta al área de la pieza

```
al,all  
kset,all  
lset,all  
*get,na,area,,num,max  
asba,na-3,na
```

Definición de los keypoints del otro agujero



```
numcmp,all
```

```
csys,0
```

```
*get,nk,kp,,num,max
```

```
k,nk+1,-2.5,-7.4,0
```

```
k,nk+2,-2.5,-13.6,0
```

```
k,nk+3,-2.5,-10.5,3.1
```

```
k,nk+4,-2.5,-10.5,0
```

```
l,nk+1,nk+2
```

```
larc,nk+1,nk+3,nk+4,3.1
```

```
larc,nk+3,nk+2,nk+4,3.1
```

Crear el área

```
*get,nl,line,,num,max
```

```
al,nl,nl-1,nl-2
```

```
local,50,0,0,0,12.5
```

```
*get,na,area,,num,max
```

```
arsym,z,na
```

```
asba,1,na
```

```
asba,na+2,na+1
```

Simetria de todas las áreas de la pieza

```
arsym,x,all
```

```
aplot
```

```
finish
```

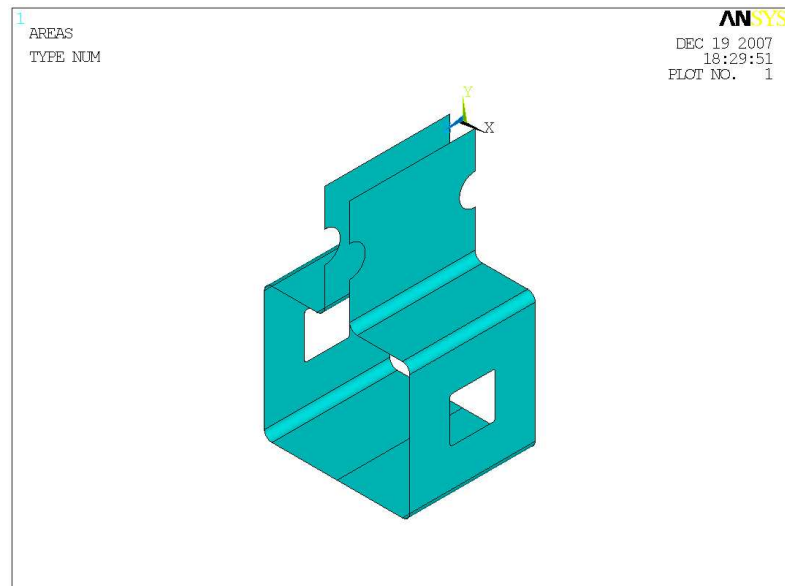


Fig. C.4 Sección completa de 25mm



genp.txt

Genera la longitud del puntal

```
*ask,lo,longitud,250
nd=lo/50
/prep7,
agen,nd,1,38,1,0,0,50
nummrg,all
numcmp,all
aplot
finish
```

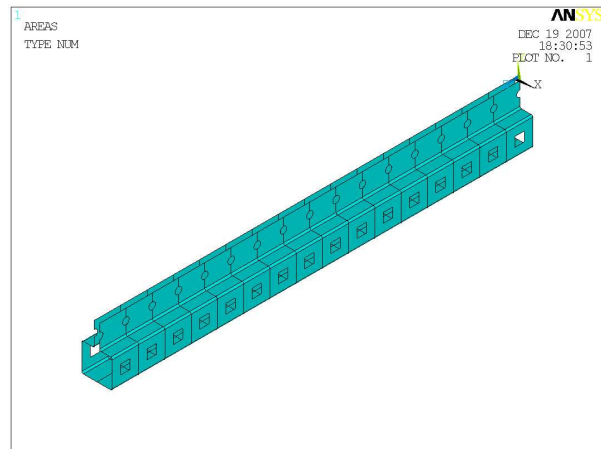


Fig. C.5 Generación del puntal

malp.txt

Malla el puntal

```
/prep7,
et,1,63
et,2,45
r,1,1
mp,ex,1,2.1e5
mp,nuxy,1,0.3
type,1
eshape,0
*ask,le,longitud element,4
esize,le
amesh,all
eplot
```

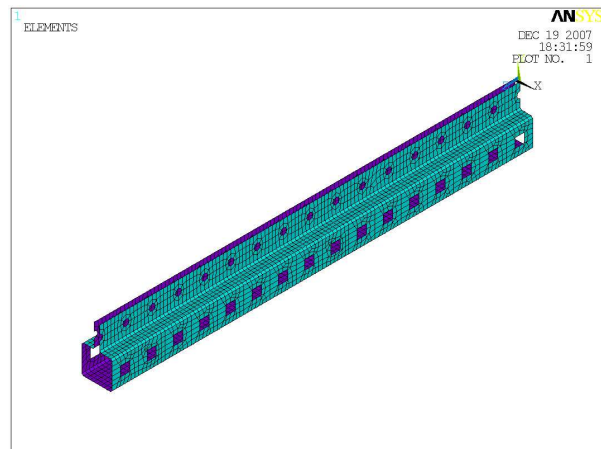


Fig. C.6 Mallado del puntal



gnp1.txt

Crea la placa del extremo de la pieza

```
*ask,prof1,punto de aplicación de la carga, 19
```

Resta el punto de aplicación a la distancia entre el punto superior e inferior de la sección del puntal. (Esto se debe a que esta macro genera la sección girada respecto de donde se mide el punto de aplicación de la carga).

```
prof=50-prof1
```

Guarda en una matriz los nodos del extremo del puntal

```
/prep7,
```

```
*get,nn,node,,num,max
```

```
nselect,s,loc,z,0
```

```
*dim,nox,,1000
```

```
*dim,noy,,1000
```

```
j=0
```

```
*do,i,1,nn,1
```

```
*get,sel,node,i,nselect
```

```
*if,sel,eq,1,then
```

```
j=j+1
```

```
*get,nx,node,i,loc,x
```

```
*get,ny,node,i,loc,y
```

```
nox(j)=nx
```

```
noy(j)=ny
```

```
*endif
```

```
*enddo
```

```
nno=j
```



Define el punto superior e inferior de la placa, así como el punto medio (de aplicación de la carga), teniendo en cuenta el espesor.

```
esup=50-prof
```

```
einf=esup-100
```

```
fapl=esup-500
```

Genera la placa y crea los nodos guardados en la matriz anterior sobre el área de la placa

```
*get,nk,kp,,num,max
```

```
k,nk+1,-40,einf
```

```
k,nk+2,40,einf
```

```
k,nk+3,40,esup
```

```
k,nk+4,-40,esup
```

```
a,nk+1,nk+2,nk+3,nk+4
```

```
*get,na,area,,num,max
```

```
k,nk+5,-40,einf,-20
```

```
k,nk+6,40,einf,-20
```

```
k,nk+7,40,esup,-20
```

```
k,nk+8,-40,esup,-20
```

```
a,nk+5,nk+6,nk+7,nk+8
```

```
hptcreate,area,na+1,nk+9,coor,0,fapl,-20
```

```
*do,i,1,3
```

```
a,nk+i,nk+i+4,nk+i+4+1,nk+i+1
```

```
*enddo
```

```
a,nk+4,nk+4+4,nk+1+4,nk+1
```

```
va,na,na+1,na+2,na+3,na+4,na+5
```

```
*get,nk,kp,,num,max
```

```
*do,i,1,nno,1
```

```
hptcreate,area,na,nk+i,coor,nox(i),noy(i)
```

```
*enddo
```

```
aplot
```

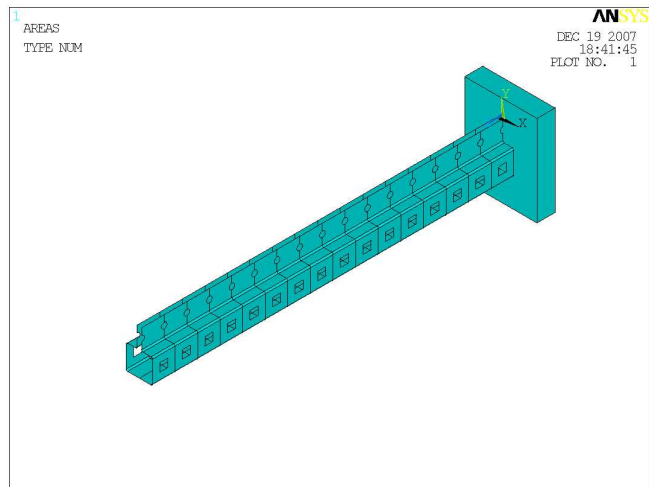


Fig. C.7 Generación de una placa extrema



gnp2.txt

Genera la otra placa siguiendo los mismos pasos

```
/prep7,  
local,100,0,0,0,0,lo  
nset,s,loc,z,0  
*dim,nfx,,1000  
*dim,nfy,,1000  
j=0  
*do,i,1,nn,1  
*get,sel,node,i,nset  
*if,sel,eq,1,then  
j=j+1  
*get,nx,node,i,loc,x  
*get,ny,node,i,loc,y  
nfx(j)=nx  
nfy(j)=ny  
*endif  
*enddo  
nnf=j  
*get,nk,kp,,num,max  
k,nk+1,-40,einf,0  
k,nk+2,40,einf,0  
k,nk+3,40,esup,0  
k,nk+4,-40,esup,0  
a,nk+1,nk+2,nk+3,nk+4  
*get,na,area,,num,max  
k,nk+5,-40,einf,0+20  
k,nk+6,40,einf,0+20  
k,nk+7,40,esup,0+20
```



```

k,nk+8,-40,esup,0+20
a,nk+5,nk+6,nk+7,nk+8
hptcreate,area,na+1,nk+9,coor,0,fapl,0+20
*do,i,1,3
a,nk+i,nk+i+4,nk+i+4+1,nk+i+1
*enddo
a,nk+4,nk+4+4,nk+1+4,nk+1
va,na,na+1,na+2,na+3,na+4,na+5
*get,nk,kp,,num,max
*do,i,1,nnf,1
hptcreate,area,na,nk+i,coor,nfx(i),nfy(i),0
*enddo
csys,0
aplot

```

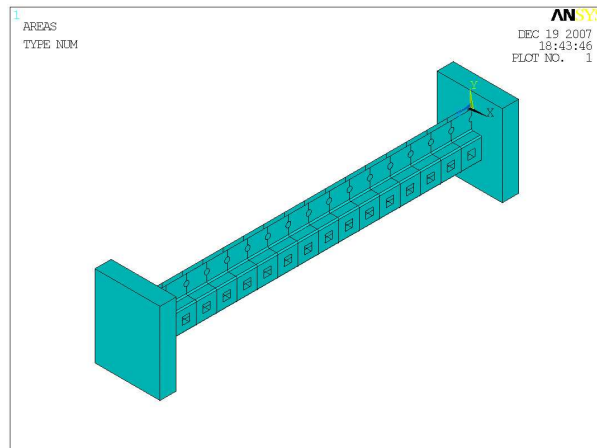


Fig. C.8 Generación de la segunda placa extrema



mapl.txt

Malla las placas

type,2

eshape,1

lesize,all,10

vmesh,all

eplot

finish

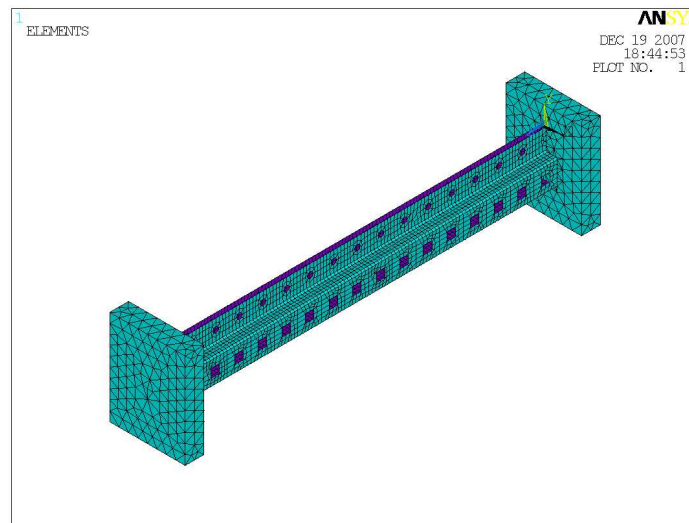


Fig. C.9 Mallado de las placas

cone.txt

Conecta las placas con el puntal

/solu,

Selección de todos los nodos que en $z=0$

nselect,s,loc,z,0

Todos los nodos que sean coincidentes tendrán el mismo desplazamiento en x,y,z

cpintf,ux

cpintf,uy

cpintf,uz

nselect,s,loc,z,lo

cpintf,ux

cpintf,uy

cpintf,uz

nselect,all

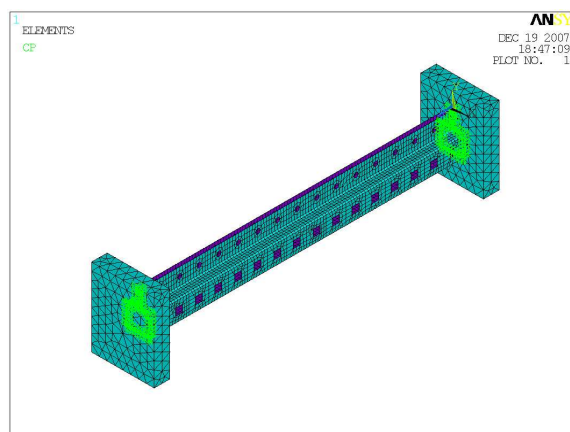


Fig. C.10 Conexión del puntal a las placas



enl.txt

Crea las condiciones de contorno de las placas, desplazamientos, giros i fuerza aplicada.

```
/solu,  
extr=lo+20  
nset,s,loc,x,0  
nset,r,loc,y,fapl  
nset,r,loc,z,-20  
d,all,ux,,,,,uy,  
f,all,fz,1  
nset,all  
nset,s,loc,x,0  
nset,r,loc,y,fapl  
nset,r,loc,z,extr  
d,all,ux,,,,,uy,uz,  
nset,all  
nset,s,loc,x,0  
nset,r,loc,y,esup  
nset,r,loc,z,-20  
d,all,ux  
nset,all  
nset,s,loc,x,0  
nset,r,loc,y,einf  
nset,r,loc,z,-20  
d,all,ux  
nset,all  
nset,s,loc,x,0  
nset,r,loc,y,esup  
nset,r,loc,z,extr  
d,all,ux
```



```
nselect,all  
nselect,s,loc,x,0  
nselect,r,loc,y,einf  
nselect,r,loc,z,extr  
d,all,ux  
nselect,all  
epplot
```

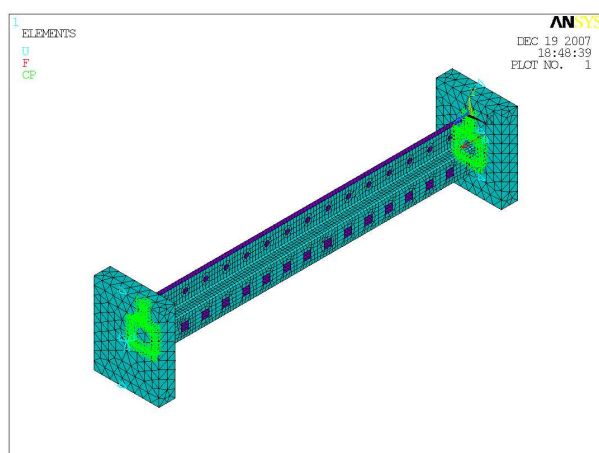


Fig. C.11 Condiciones de enlace exterior de las placas



cl

Hace el cálculo lineal

/solu

antype,static

pstress,on

solve

fini

/solu

antype,buckle,

A continuación se definen el número de modos a extraer

bucopt,subs,10

subopt

!eqslv,jcgout

solve

finish



clnl

Prepara el cálculo no lineal

fini

/solu,

nset,s,loc,x,0

nset,r,loc,y,fapl

nset,r,loc,z,-30

**get,nfapl,node,,num,max*

nset,all

/prep7,

**ask,f,factor,*

upgeom,f,1,1,file,rst

tb,biso,1,1

tbtemp,0

**ask,fy,Tensio de limit elastic,394.9*

tldata,1,fy,2100

fdele,all,all

**ask,di,Desplacament imposat,1*

d,nfapl,uz,di

fini

/solu

antype,static,new

nlgeom,on

nropt,full

neqit,50

autots,on



A continuación se definen el número de pasos, el primero es un número por defecto, y después el número máximo y mínimo de pasos que deseamos en el cálculo.

nsubst,20,100,20

outres,all,all



C.2. Imperfecciones iniciales

En el ensayo por simulación, en concreto en el ensayo no lineal, es de gran importancia la imperfección introducida al puntal. Esta imperfección, no sólo se utiliza por las desviaciones geométricas que pueda tener el perfil en la realidad, sino que también tiene en cuenta la acumulación de tensiones residuales que puede tener el puntal debido a su fabricación.

En los gráficos, C.12 y C.13, se pueden observar los valores de carga máxima para dos tipos de imperfección introducida; para longitudes cortas donde se producen tipos de fallo local, se ha introducido siempre la misma imperfección, en cambio para el tipo de fallo global, en este caso la flexo-torsión, se ha probado con dos tipos de imperfección, L/1000 y L/200, (L: longitud del puntal). Se observa pues la gran influencia que tiene este valor de imperfección, y como utilizar la imperfección L/1000, para este tipo de fallo parece las más adecuada ya que es la que más se acerca al resultado experimental.

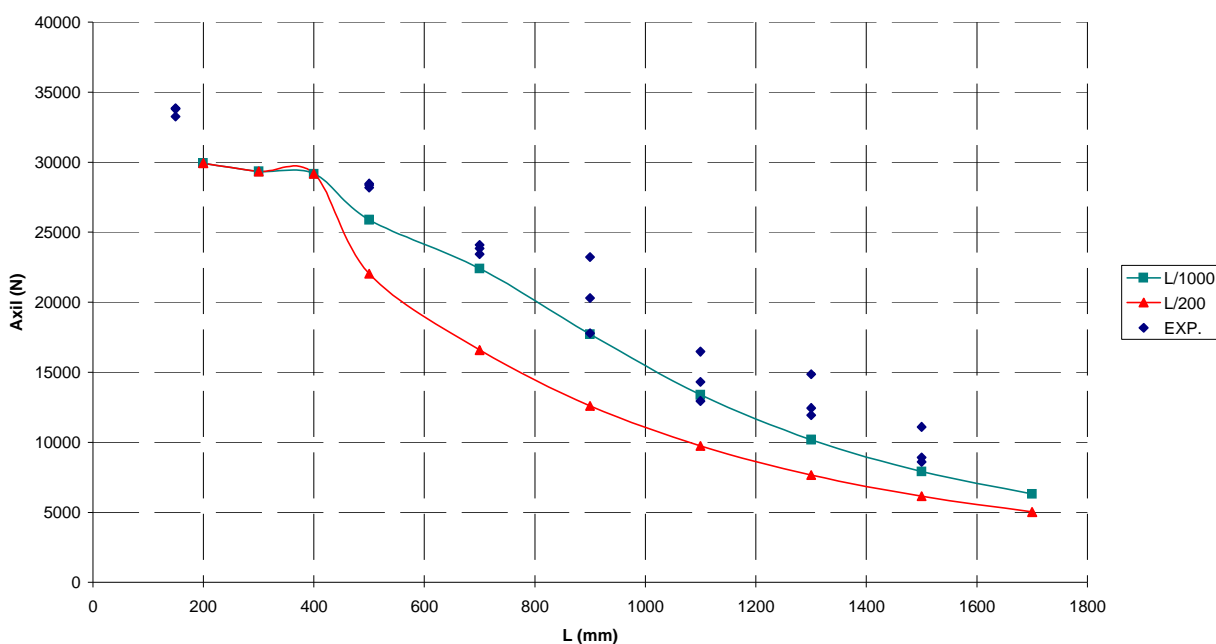


Fig. C.12 Comparación resultados simulación para diferentes imperfecciones con experimentales (modelo original)



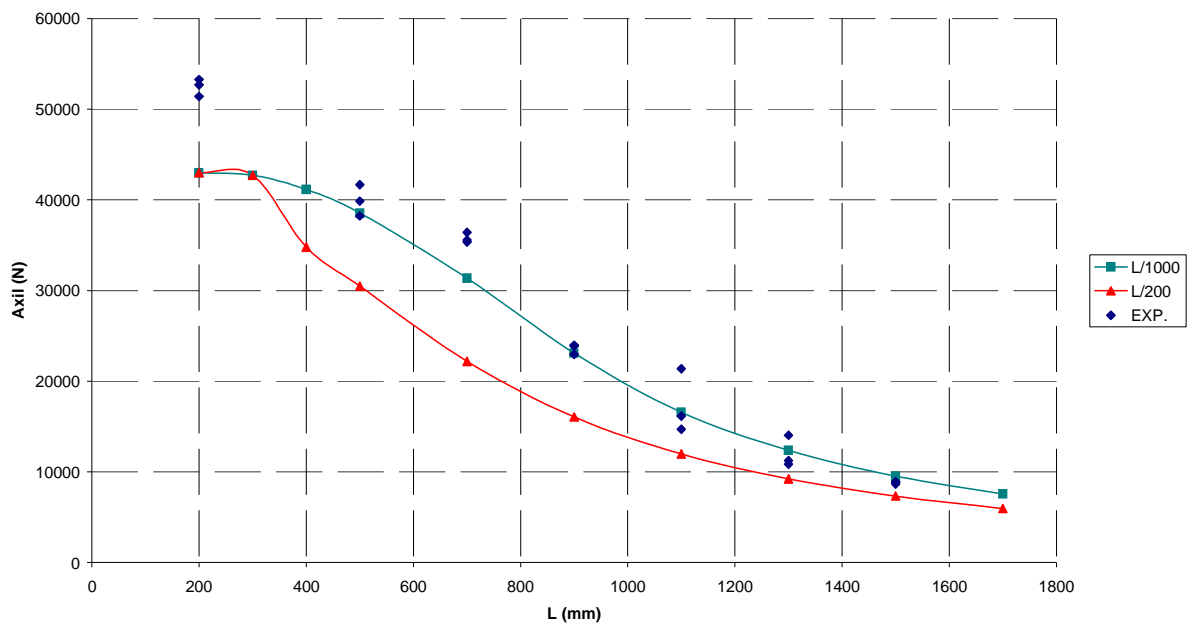


Fig. C.13 Comparación resultados simulación para diferentes imperfecciones con experimentales (modelo B)



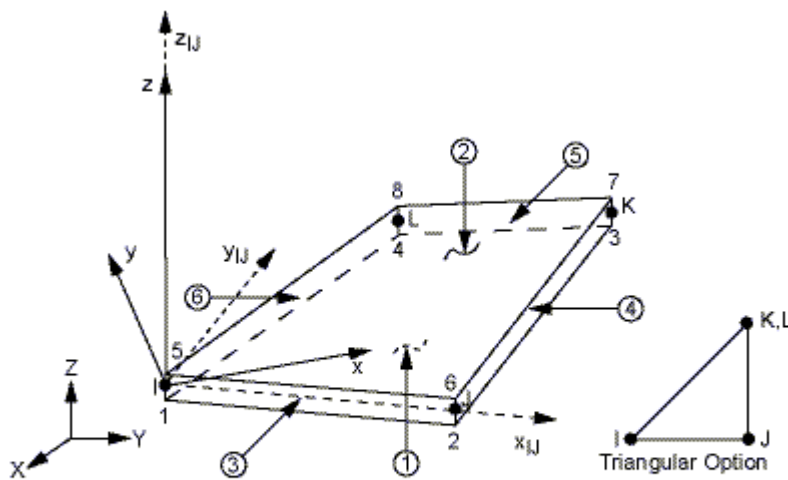
C.3. Mallado de la pieza

El mallado del puntal se ha realizado con un elemento placa de cuatro nodos, al cual se le ha asignado el espesor de la chapa, en este caso de 1mm; la sección está modelizada en su plano medio ya que este espesor de 1mm, se aplica a ambo lados del elemento.

Por lo que se refiere a las placas colocadas en los extremos del puntal, se han mallado con un elemento de volumen.

Se han utilizado dos tipos de elemento para el mallado del puntal en función del ensayo que se quiere realizar:

- Ensayo lineal: para este ensayo se ha utilizado el elemento *shell 63*, este elemento puede tener en cuenta no linealidades geométricas en caso de que esta opción sea activada, aunque para este ensayo no se activa, y no tiene en cuenta no linealidades materiales; es un tipo de elemento que resulta aconsejado para este tipo de ensayos.



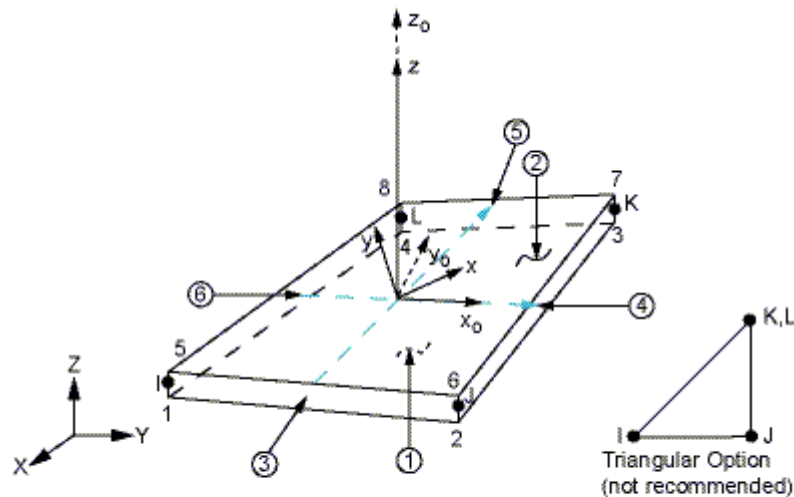
x_{IJ} = Element x-axis if ESYS is not supplied.

x = Element x-axis if ESYS is supplied.

Fig. C.14 Geometría elemento shell 63



- Ensayo no lineal: se ha utilizado el elemento *shell 181*, ya que este elemento acepta no linealidades tanto geométricas como materiales, y por lo tanto se adecua al tipo de ensayo que se quiere realizar. Debido a la formulación utilizada y a la práctica con este elemento, no se recomienda su uso para ensayos lineales ya que aunque no se activen las no linealidades los resultados tanto de modos de fallo como de carga crítica difieren de los obtenidos con el elemento *shell 63*.



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.

x = Element x-axis if ESYS is provided.

Fig. C.15 Geometría elemento shell 181



Para el mallado de las placas de los extremos, se ha utilizado en ambos casos un elemento de volumen, *solid 45*, este elemento no admite no linealidades, por lo que no le afectan las deformaciones ni el límite elástico introducido del material, y su única función consiste en transmitir el esfuerzo repartido al puntal y fijar las condiciones de contorno.

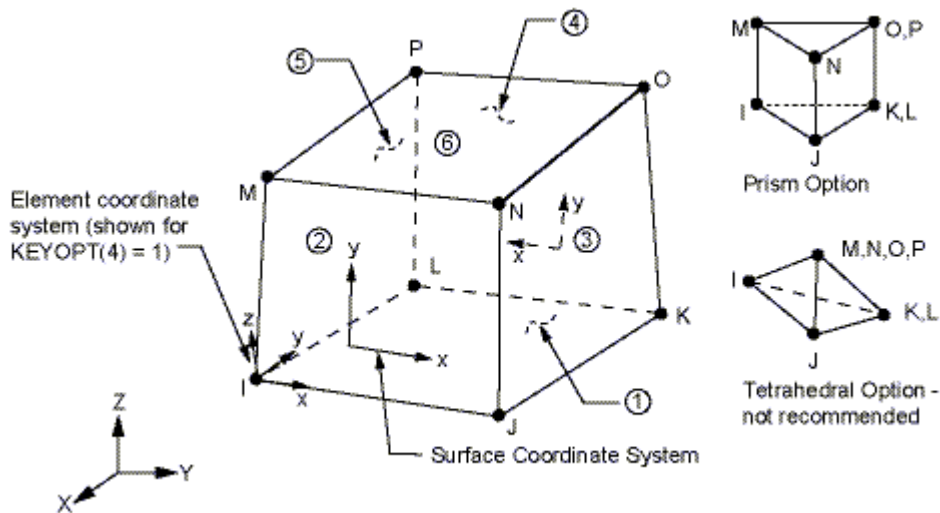


Fig. C.16 Geometría elemento solid 45

El tamaño medio utilizado para los dos elementos del puntal ha sido de 4 mm, debido a los pequeños agujeros del puntal, se ha escogido un tamaño tan reducido para que el mallado se realice sin problemas en estos puntos críticos y no deforme la sección de la realidad. En cambio en las placas el tamaño medio utilizado es de 10 mm.

Debido al hecho de haber de cambiar de elemento para realizar los dos ensayos, con el objetivo de poder aplicar la imperfección requerida al ensayo no lineal, se debe guardar el resultado lineal, volver a mallar la pieza con el elemento *shell 181*, que es igual en número de nodos, y por tanto realiza el mismo mallado que el elemento utilizado para el ensayo lineal, y aplicar sobre el nuevo mallado la geometría del resultado lineal, multiplicada por el factor correspondiente.

Por último hay que destacar también por lo que se refiere al mallado del puntal, el uso para determinados ensayos de elementos de contacto en las alas debido a que para algunos tipos de fallo éstas se tocaban.

