

ANEJO 1	DEMOSTRACIÓN ANALÍTICA DE LA FORMULA CARGA-DEFORMACIÓN PARA UNA PLACA A COMPRESIÓN.	2
ANEJO 2	IMÁGENES DE SOPORTE	6
2.1.	Análisis de placas sometidas a compresión	6
2.1.1.	Placa. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento	6
2.1.2.	Placa. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento	9
2.2.	Análisis de un perfil en C sometido a compresión y flexión	15
2.2.1.	Modos de pandeo. Compresión. Articulado	15
2.2.2.	Modos de pandeo. Compresión. Empotrado	16
2.2.3.	Perfil a Compresión. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento	18
2.2.4.	Perfil a Compresión. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento	20
2.2.5.	Perfil a flexión. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento	25
2.2.6.	Perfil a flexión. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento	26
2.3.	Análisis de una chapa trapezoidal	29
2.3.1.	Estudios de longitud reducida de una onda de chapa trapezoidal a flexión pura.	29
2.3.2.	Placa a flexión pura. Estudios de sensibilidad	31
2.3.3.	Placa a flexión bajo condiciones normalizadas de ensayo. Estudios de sensibilidad.	31
ANEJO 3	ESTUDIOS DE CONVERGENCIA PARA UN PERFIL A COMPRESIÓN CON PANDEO GLOBAL	33
ANEJO 4	ESTUDIO DE BLOQUEO POR CORTANTE EN ELEMENTOS SÓLIDO	42
ANEJO 5	ENSAYO Y CORRELACIÓN CON SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DE UNA CHAPA TRAPEZOIDAL DE ACERO CONFORMADO EN FRÍO SOMETIDA A FLEXIÓN.	46

Anejo 1 Demostración analítica de la formula carga-deformación para una placa a compresión.

En este apéndice se describe la demostración del primer caso de las formulas carga-desplazamiento hecha por M.C.M. Baker (*Yield line analysis of post-collapse behavior of thin-walled steel members*. Heron. Vol. 35. No. 3. 1990).

Se trata de una placa sometida a una carga puntual de compresión con los extremos cargados simplemente apoyados y los otros dos libres.


No.	Mechanism	Load – deflection relation
1		$P = \sigma_y b t \left[\sqrt{(2\delta/t)^2 + 1} - \frac{2\delta}{t} \right]$

Fig. 1.1 Placa apoyada a compresión no uniforme

La siguiente figura muestra los parámetros geométricos de la placa analizada.

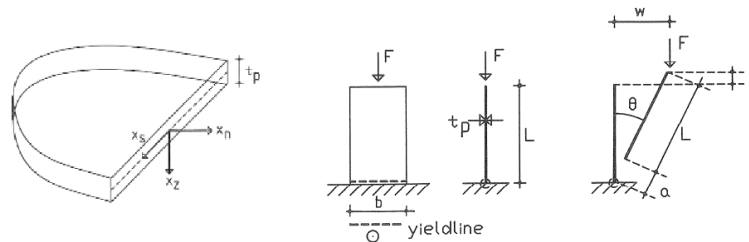


Fig. 1.2 Parámetros geométricos de la placa

La resolución del problema se hace siguiendo tres etapas:

- Planteamiento de las relaciones cinemáticas a partir del patrón de fallo definido a priori.
- Definición de la línea de fluencia donde se incluyen los esfuerzos sobre la línea de plastificación
- Aplicación del método energético para encontrar la relación fuerza desplazamiento.

A continuación se definen las relaciones cinemáticas.

$$\Delta\varphi = \theta \qquad \Delta\dot{\varphi} = \dot{\theta} \qquad (1.1)$$

$$\Delta u_n = a \quad \Delta \dot{u}_n = \dot{a} \quad (1.2)$$

$$\Delta U_s = 0 \quad \Delta \dot{U}_s = 0 \quad (1.3)$$

$$v = L - (L + a) \cdot \cos \theta \quad \dot{v} = (L + a) \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta} - \dot{a} \cdot \cos \theta \quad (1.4)$$

$$w = (L + a) \cdot \sin \theta \quad \dot{w} = (L + a) \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta} - \dot{a} \cdot \sin \theta \quad (1.5)$$

Tomando el criterio de Von Mises como criterio de plastificación, la superficie de fluencia, teniendo en cuenta que sobre la línea de plastificación solo hay esfuerzos normales y momento flector y que el cortante es nulo, se define como:

$$\psi = \frac{\Delta \phi}{|\Delta \phi|} \frac{m}{m_p} + \left(\frac{n}{n_p} \right)^2 - 1 = 0 \quad (1.6)$$

Normalizando obtenemos la relación entre $\dot{\theta}$ y \dot{a} :

$$\frac{\partial \psi}{\partial m} = \frac{\Delta \phi}{|\Delta \phi|} \frac{1}{m_p} \rightarrow \dot{\theta} \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 2 \cdot \left(\frac{n}{n_p} \right) \cdot \frac{1}{n_p} \rightarrow \dot{a} \quad (1.8)$$

$$\frac{\dot{a}}{\dot{\theta}} = \frac{2 \cdot \frac{n}{n_p} \cdot \frac{1}{n_p}}{\frac{\Delta \phi}{|\Delta \phi|} \frac{1}{m_p}} = 2 \cdot \frac{m_p}{n_p} \cdot \frac{n}{n_p} \cdot \frac{\Delta \phi}{|\Delta \phi|} \quad (1.9)$$

A continuación se aplica el principio de los trabajos virtuales, es decir se iguala el trabajo realizado por las fuerzas internas y externas.

$$U_{int} = U_{ext}$$

$$m \cdot b \cdot \dot{\theta} + n \cdot b \cdot \dot{a} = F_{ext} \cdot \dot{v}$$

$$m \cdot b \cdot \dot{\theta} + n \cdot b \cdot \dot{a} = F_{ext} \cdot (L + a) \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta} - F_{ext} \cdot \dot{a} \cdot \cos \theta \quad (1.10)$$

Siendo, $\alpha = \frac{n}{n_p}$, se obtiene:

$$\frac{F_{ext}}{b \cdot n_p} = \frac{(1 + \alpha^2)}{(L + a) \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta} \quad (1.11)$$

Considerando que, $(L + a) \approx L$, tenemos:

$$\frac{F_{ext}}{b \cdot n_p} = \frac{(1 + \alpha^2)}{L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta} \quad (1.12)$$

Si minimizamos la relación $\frac{F_{ext}}{b \cdot n_p}$ respecto a α :

$$\frac{d\left(\frac{F_{ext}}{b \cdot n_p}\right)}{d\alpha} = 0 \Rightarrow 2 \cdot \alpha \cdot \left[L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} - 2 \cdot \alpha \cdot \cos \theta \right] + (1 + \alpha^2) \cdot 2 \cdot \cos \theta = 0$$

$$2 \cdot \alpha \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} - 4 \cdot \alpha^2 \cdot \cos \theta + 2 \cdot \cos \theta + 2 \cdot \alpha^2 \cdot \cos \theta = 0 \quad (1.13)$$

Obtenemos una ecuación de segundo grado:

$$\alpha^2 \cdot \cos \theta - \alpha \cdot L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} - \cos \theta = 0 \quad (1.14)$$

Tomando,

$$A = \cos^2 \theta \quad B = L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} \quad (1.15)$$

La ecuación puede escribirse como:

$$\sqrt{A} \cdot \alpha^2 - B \cdot \alpha - \sqrt{A} = 0$$

$$\alpha = \frac{+B + \sqrt{B^2 + 4A}}{2 \cdot \sqrt{A}} \quad (1.16)$$

Por tanto,

$$\frac{F_{ext}}{b \cdot n_p} = \frac{-\alpha}{\sqrt{A}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A}}{2 \cdot A} \Rightarrow$$

$$F_{ext} = b \cdot n_p \cdot \left[\frac{-L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} + \sqrt{\left(L \cdot \sin \theta \cdot \frac{n_p}{m_p} \right)^2 + 4 \cdot \cos^2 \theta}}{2 \cdot \cos^2 \theta} \right] \quad (1.17)$$

Y finalmente si tomamos,

$$\cos^2 \theta \approx 1, \sin \theta = \frac{\delta}{L} \quad (1.18)$$

Y,

$$m_p = \frac{1}{4} b \cdot t^2 \sigma_y, n_p = b \cdot t \cdot \sigma_y \quad (1.19)$$

Obtenemos la ecuación del modo numero 1:

$$F_{ext} = P = \sigma_y \cdot b \cdot t \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{2 \cdot \delta}{t} \right)^2 + 1} - \frac{2 \cdot \delta}{t} \right] \quad (1.20)$$

Anejo 2 Imágenes de soporte

2.1. Análisis de placas sometidas a compresión

2.1.1. Placa. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento

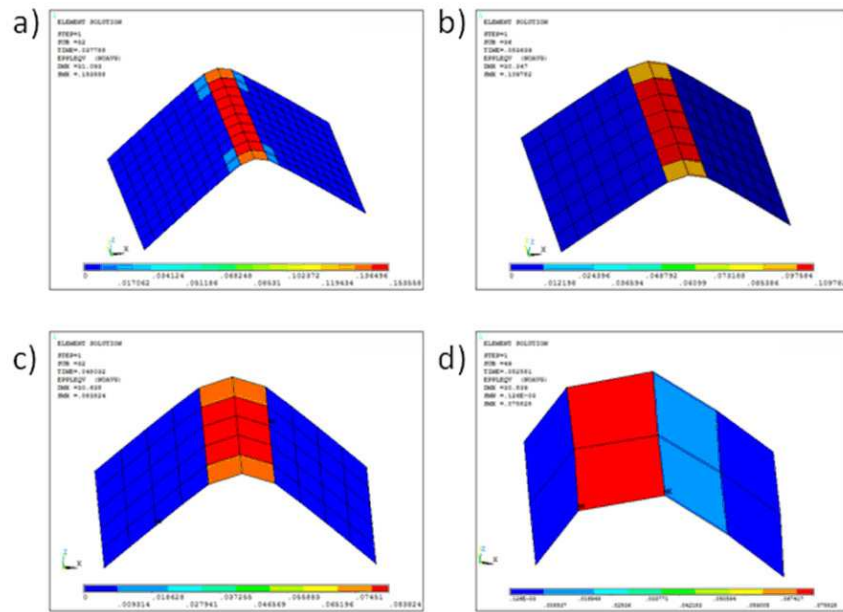


Fig. 2.1 Modo 1. a) 10, b)7, c)5, d)2

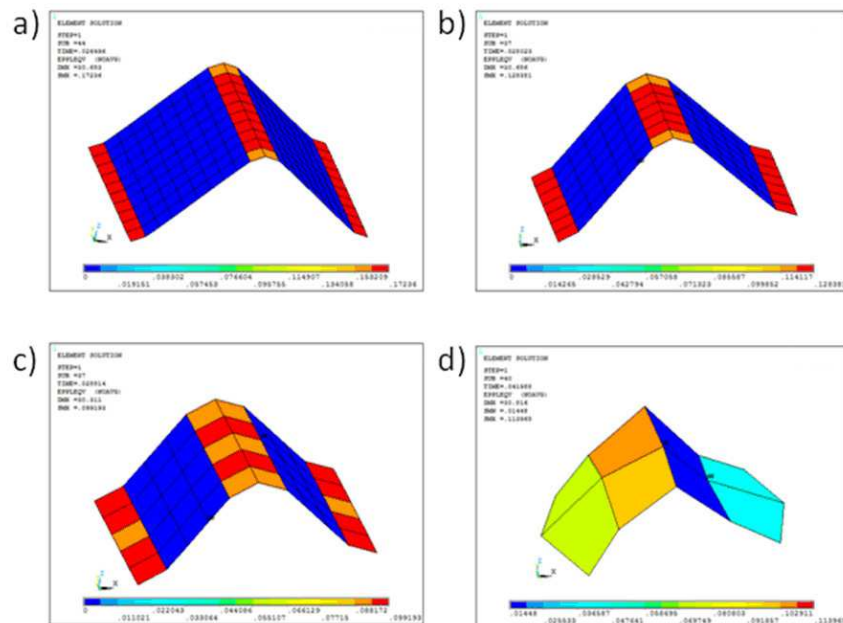


Fig. 2.2 Modo 2. a) 10, b)7, c)5, d)2

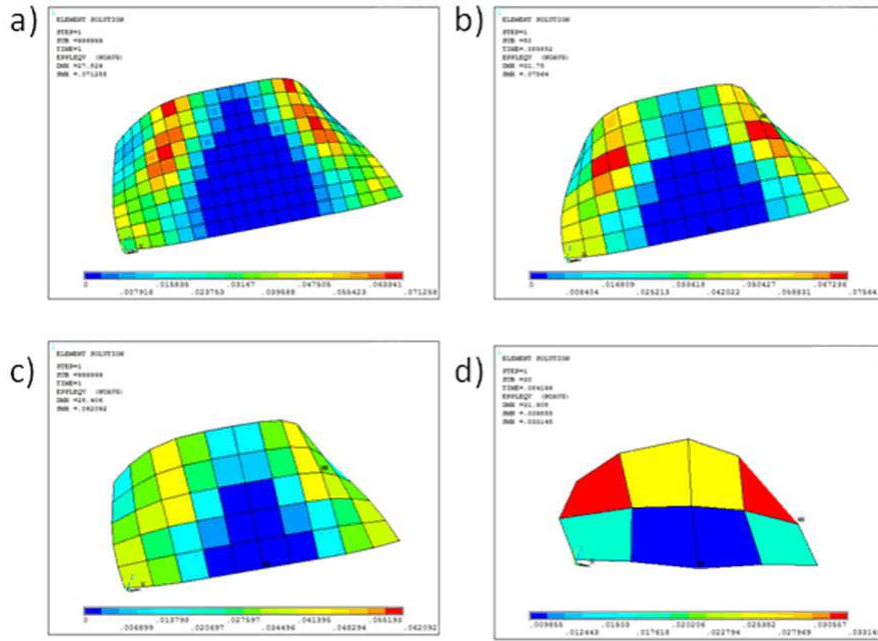


Fig. 2.5 Modo 7. a) 10, b)7, c)5, d)2

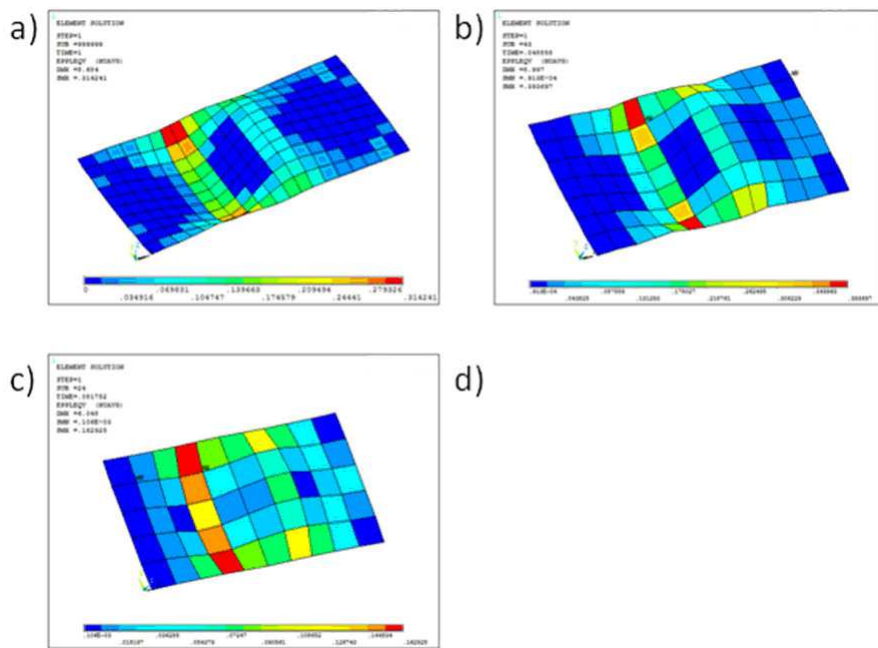


Fig. 2.6 Modo 8. a) 10, b)7, c)5

2.1.2. Placa. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento

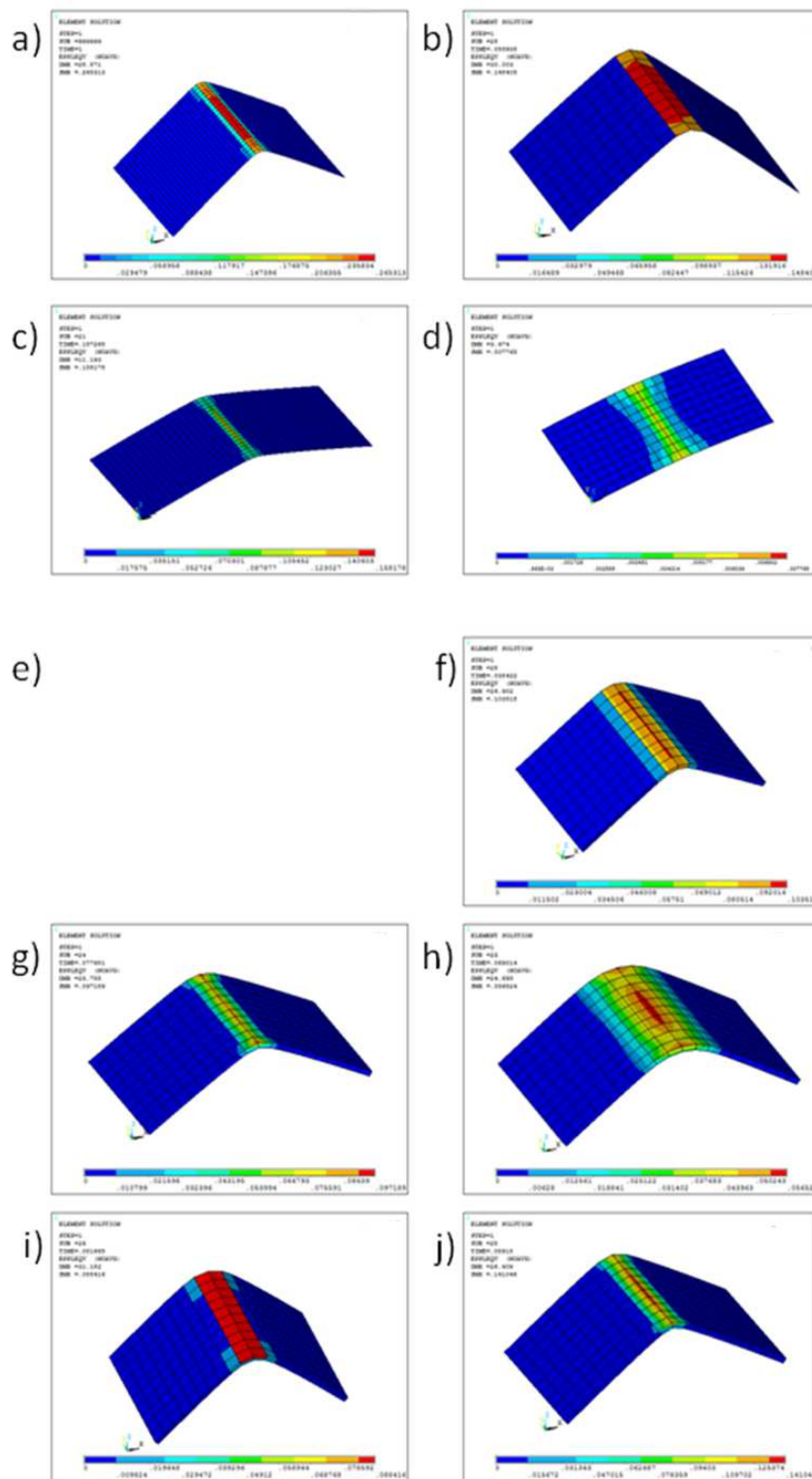


Fig. 2.7 Modo 1. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

Nota: aquellas imágenes que no se reproducen es debido a que la solución no ha convergido.

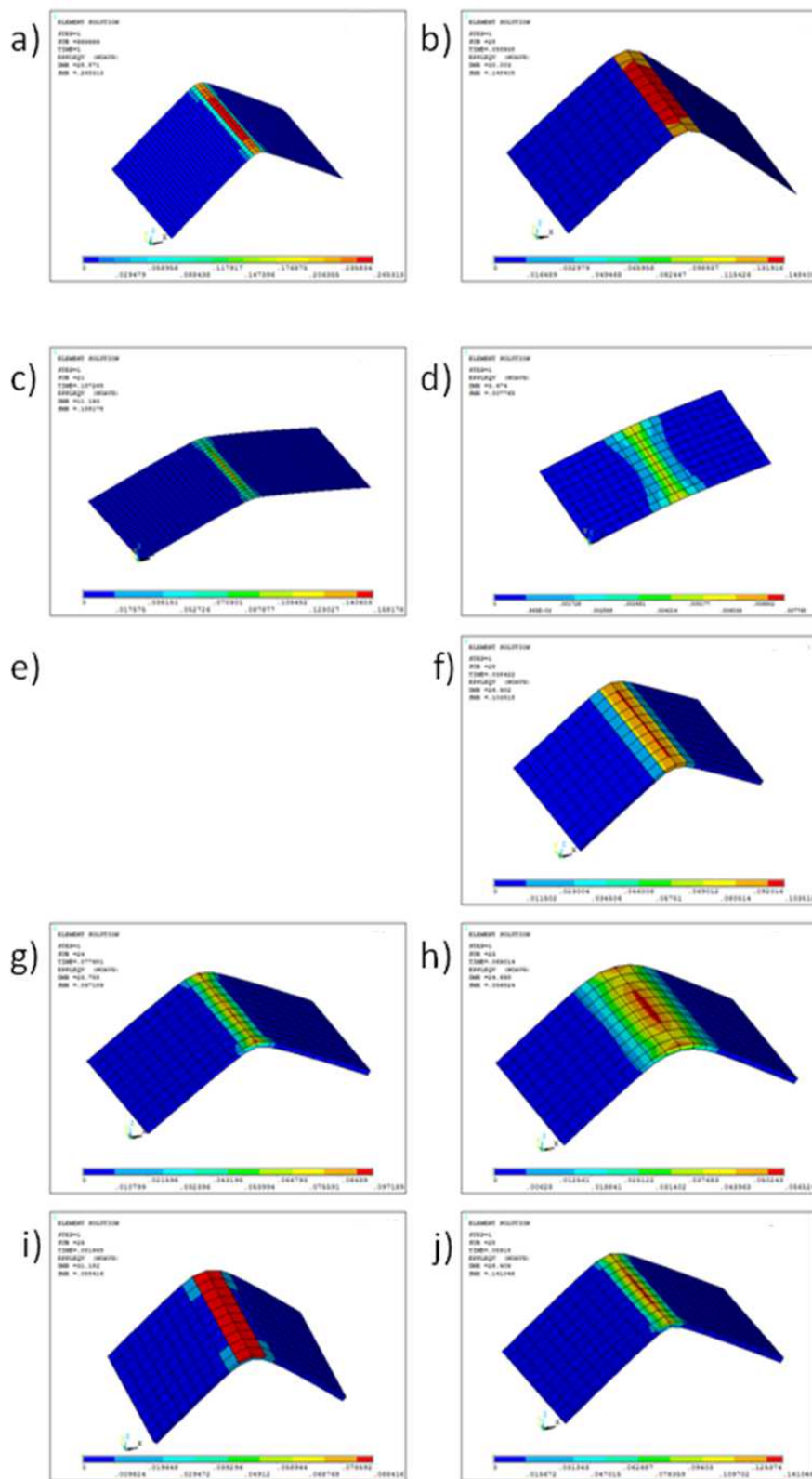


Fig. 2.8 Modo 2. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

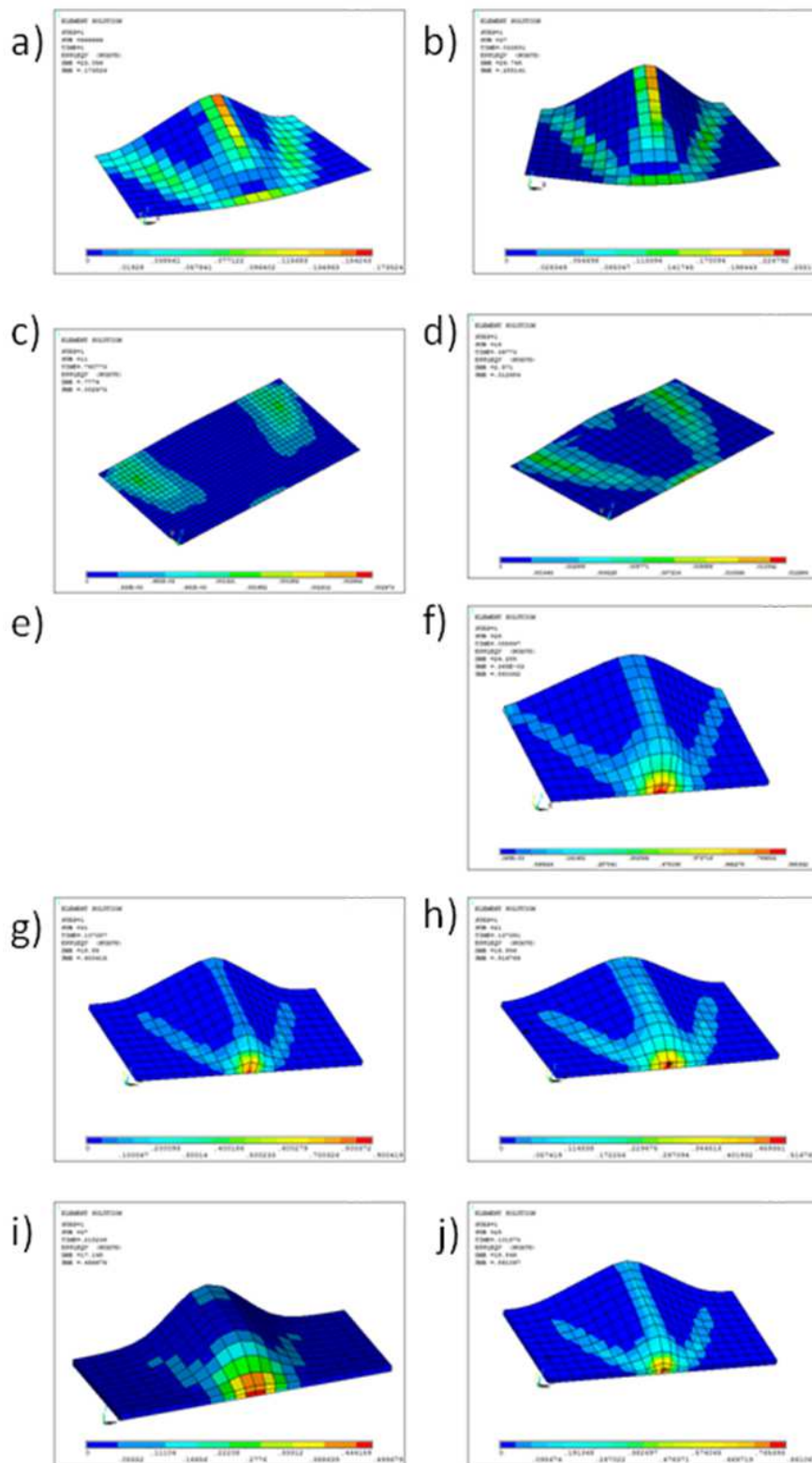


Fig. 2.9 Modo 3. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

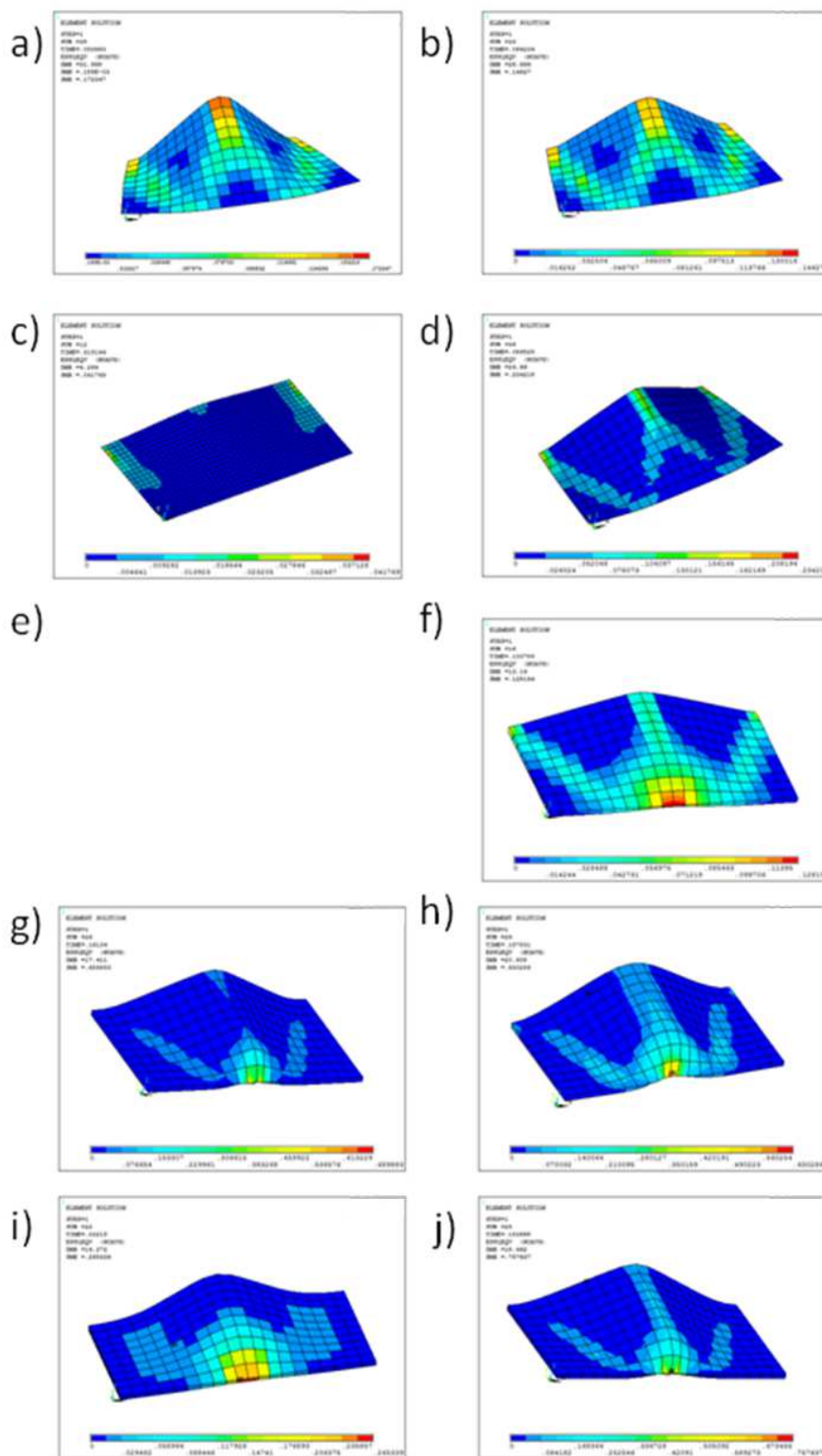


Fig. 2.10 Modo 6. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

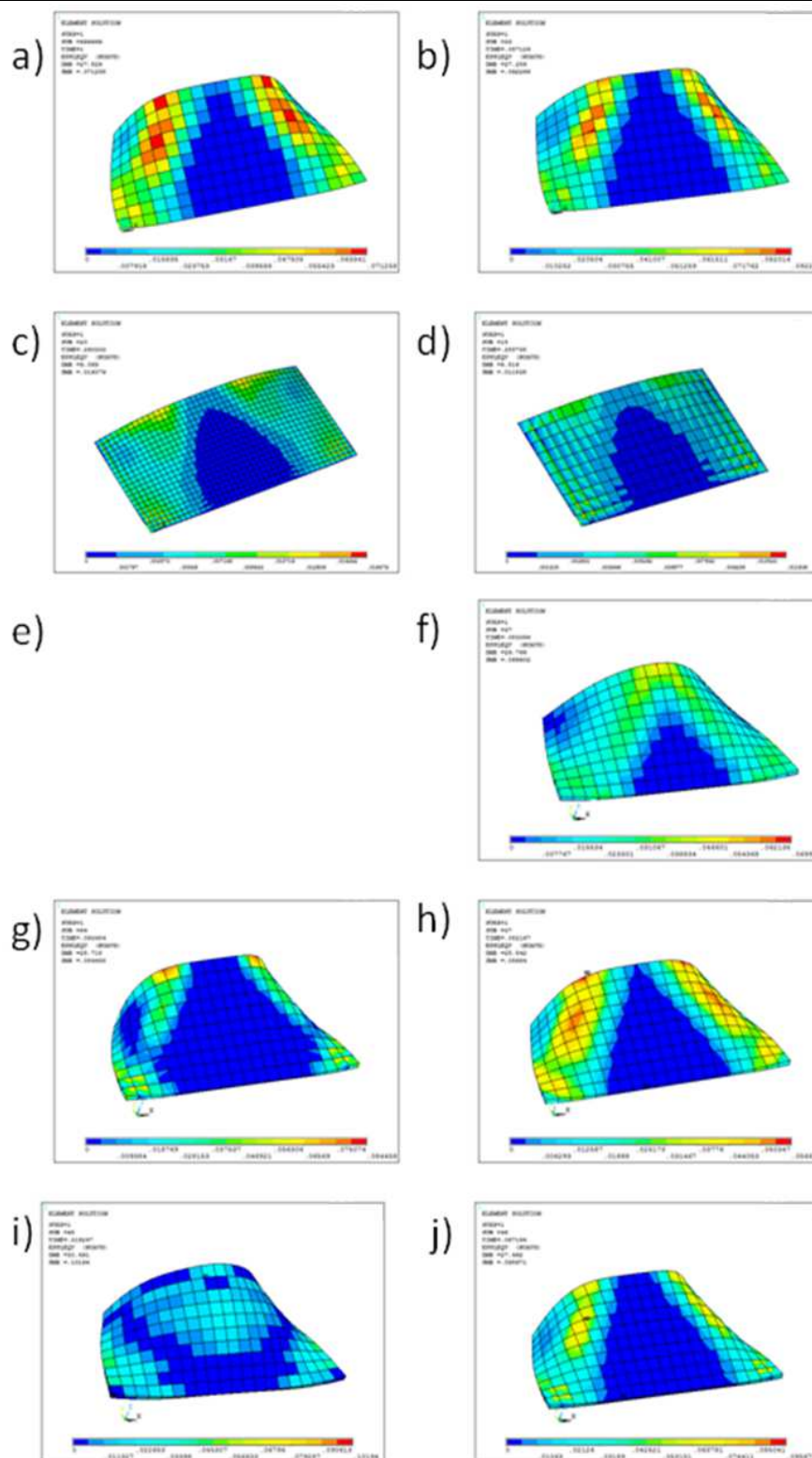


Fig. 2.11 Modo 7. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

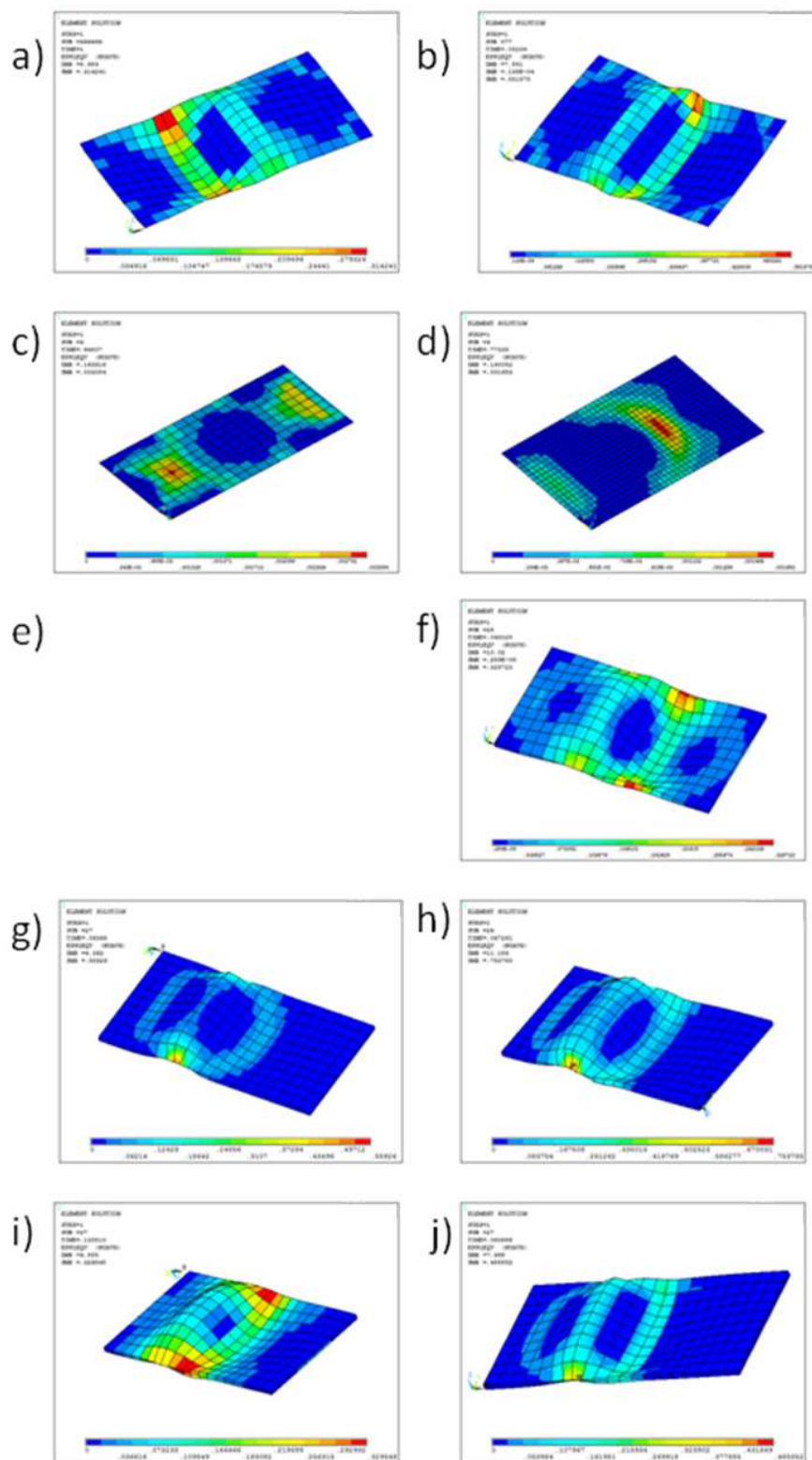
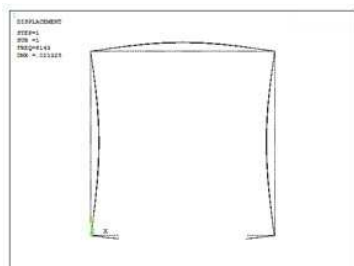


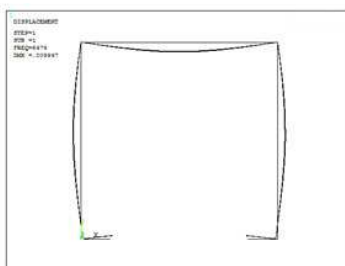
Fig. 2.12 Modo 8. a) 181r, b)181f, c)93_2, d)93_1, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

2.2. Análisis de un perfil en C sometido a compresión y flexión

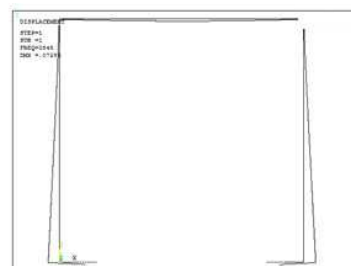
2.2.1. Modos de pandeo. Compresión. Articulado



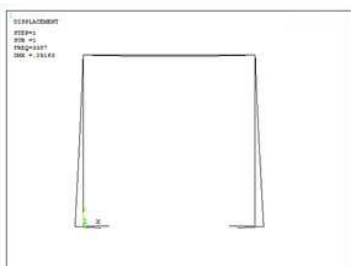
L=100



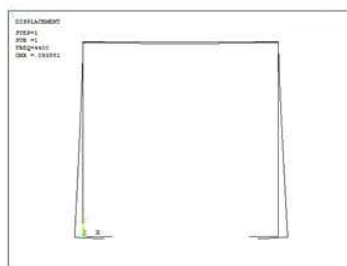
L=250



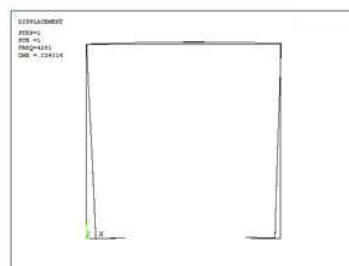
L=500



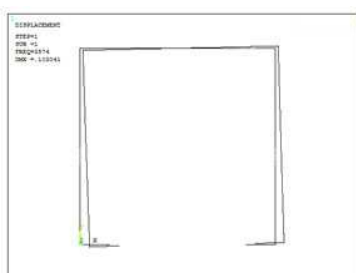
L=750



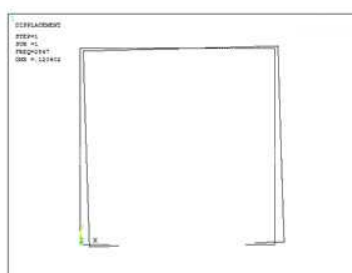
L=1000



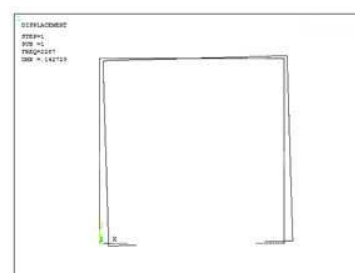
L=1250



L=1500



L=1750



L=2000

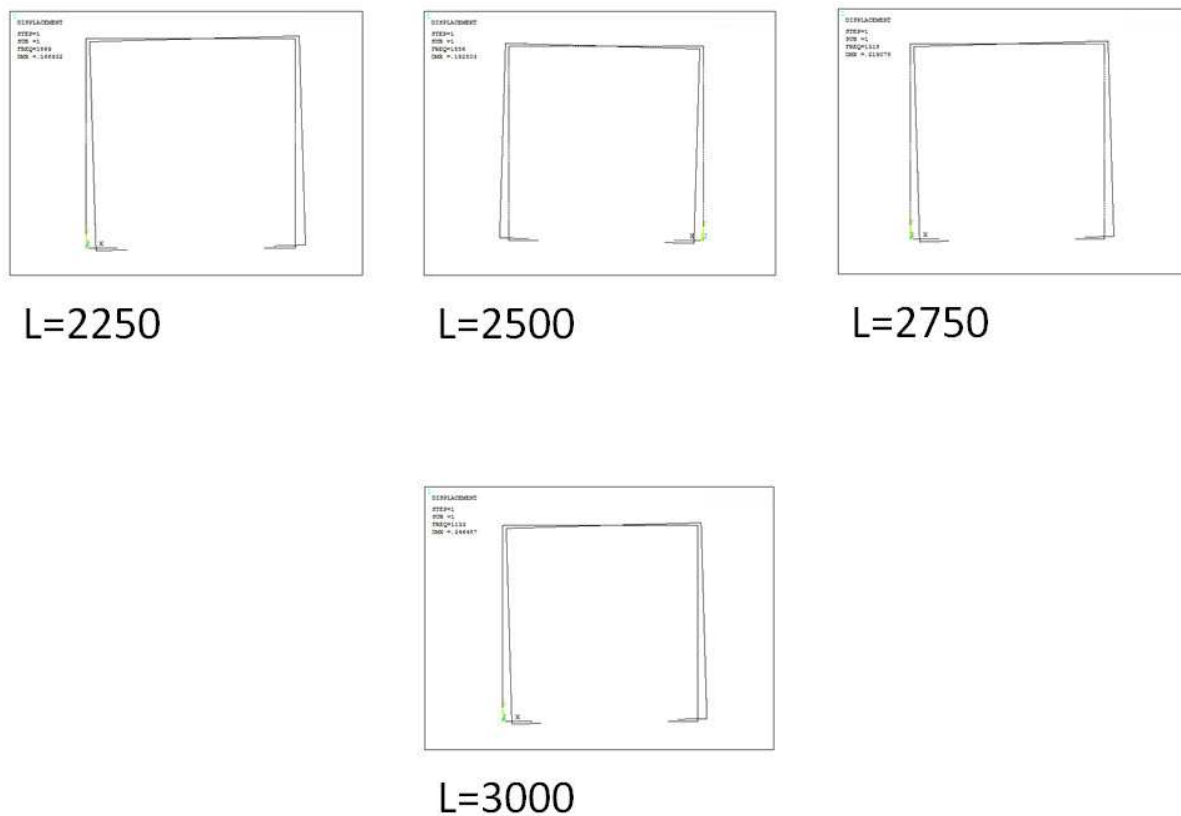
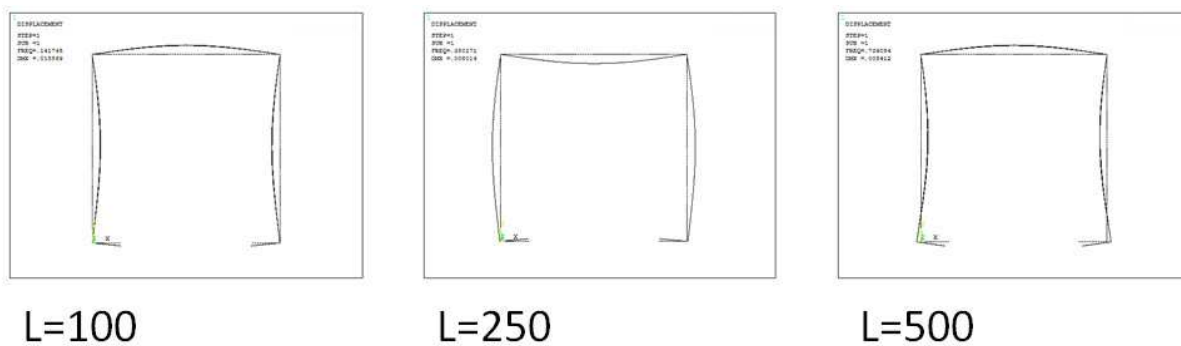
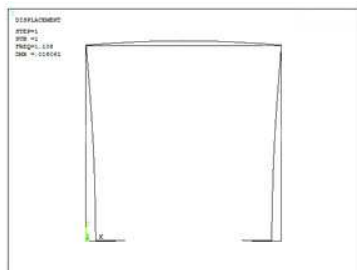


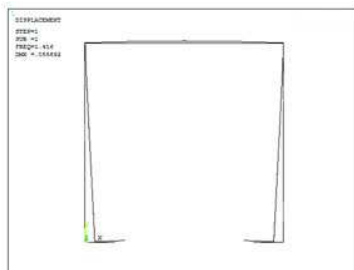
Fig. 2.13 Modos de pandeo: Compresión. Articulado

2.2.2. Modos de pandeo. Compresión. Empotrado

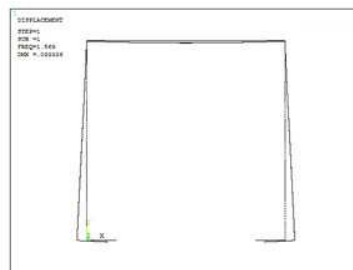




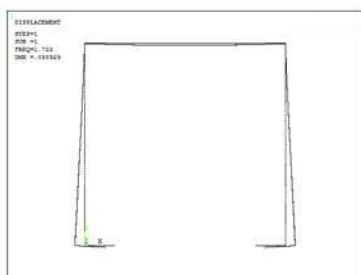
L=750



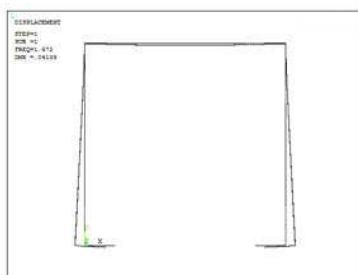
L=1000



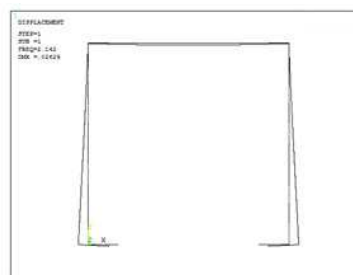
L=1250



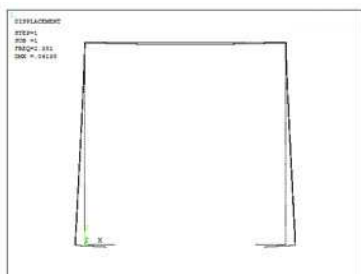
L=1500



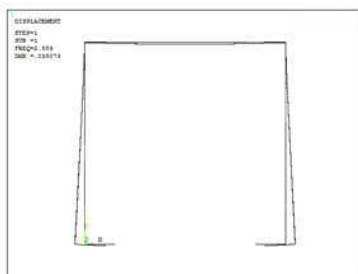
L=1750



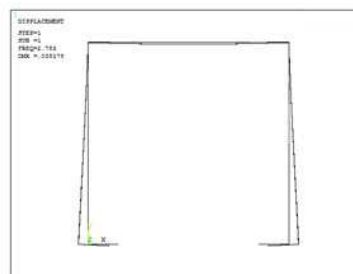
L=2000



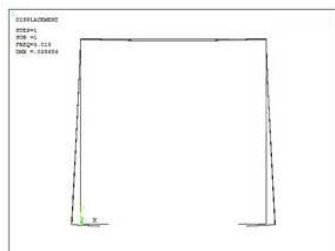
L=2250



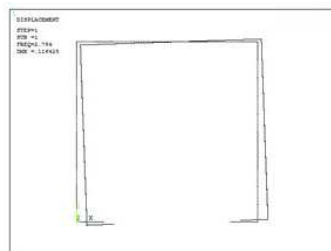
L=2500



L=2750



L=3000



L=3500

Fig. 2.14 Modos de pandeo: Compresión. Empotrado

2.2.3. Perfil a Compresión. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento

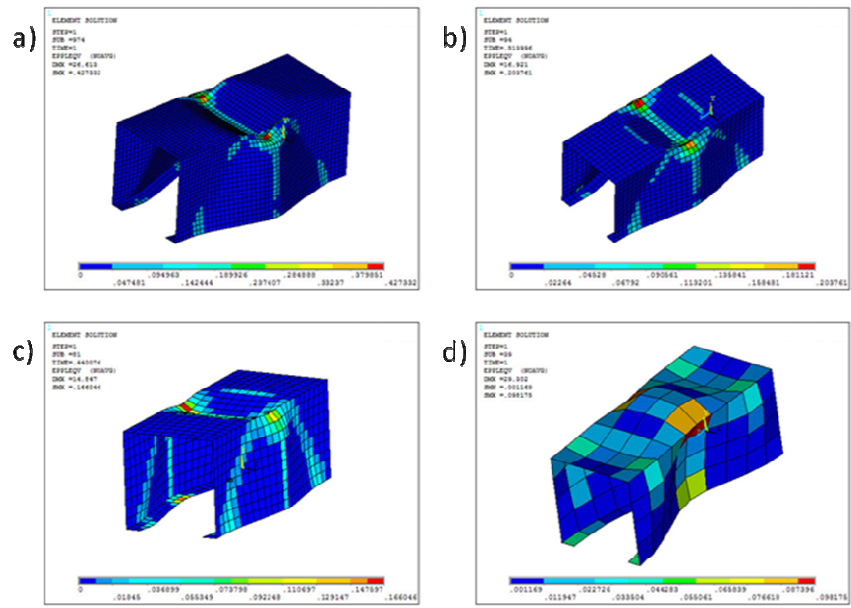


Fig. 2.15 L=250mm, Modo local. a)20, b)14, c)10, d)4

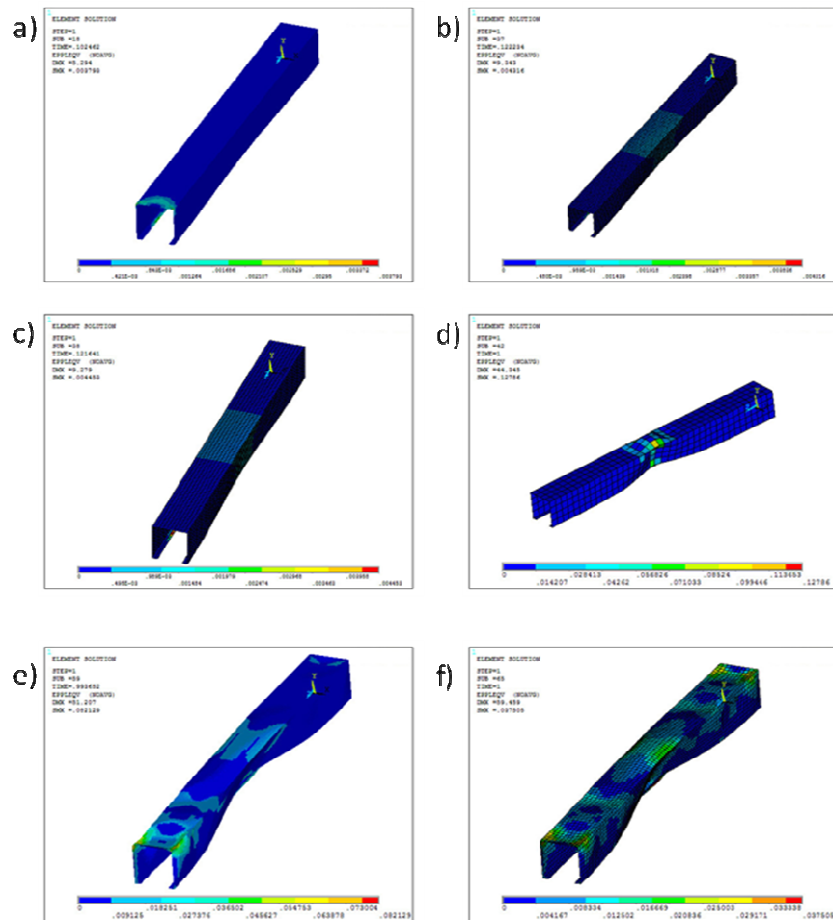


Fig. 2.16 L=1000mm, Modo distorsional. a)20, b)14, c)10, d)4, e)20, F(limite convergencia)=0.1, f)10, F=0.1

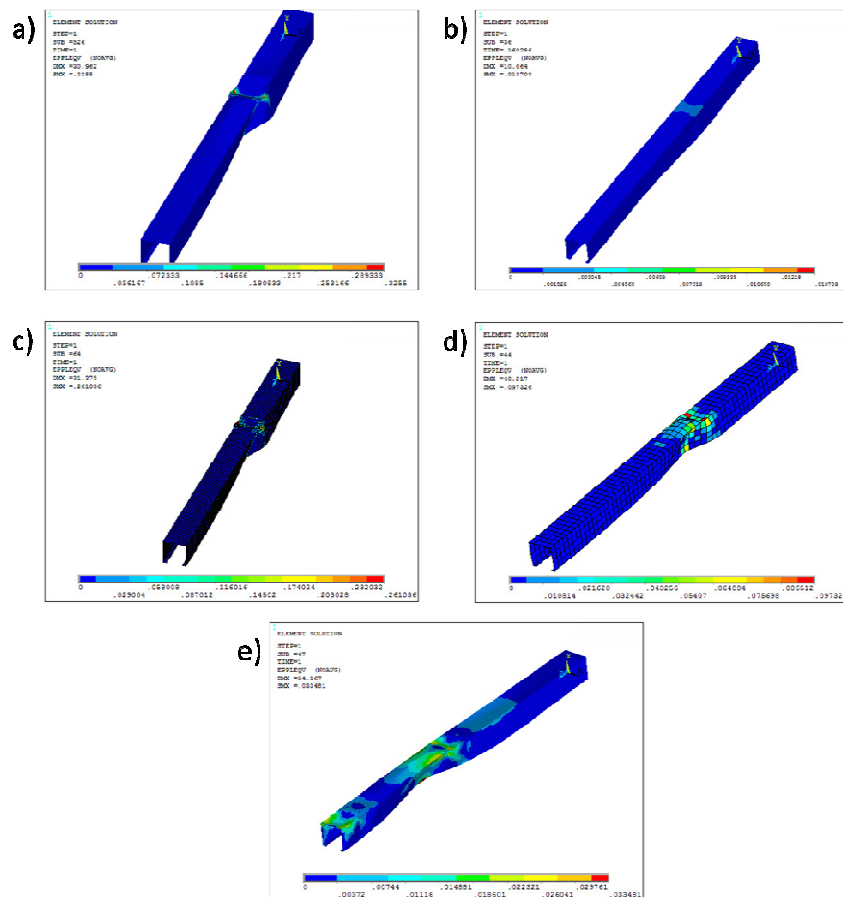
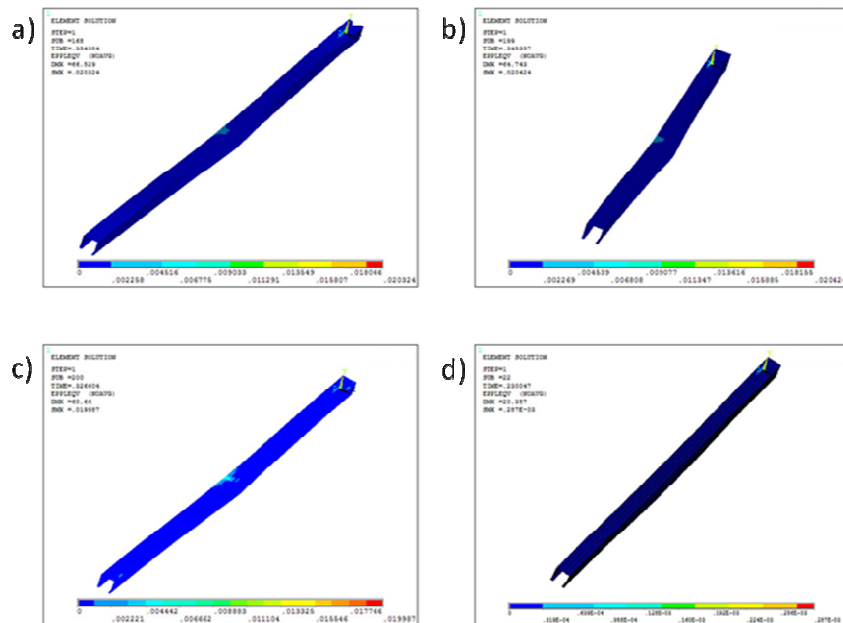


Fig. 2.17 L=1500mm, Modo distorsional. a)20, b)14, c)10, d)4, e)14, F=0.1



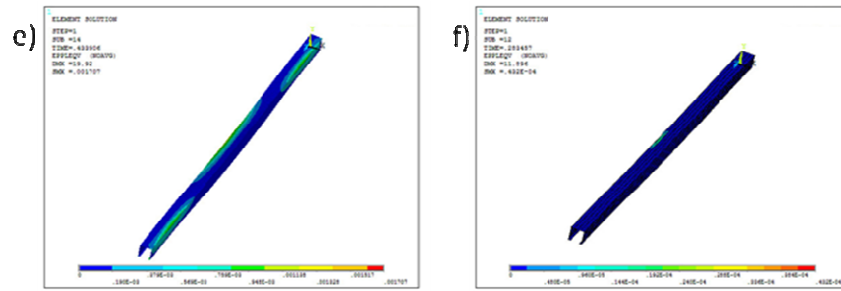
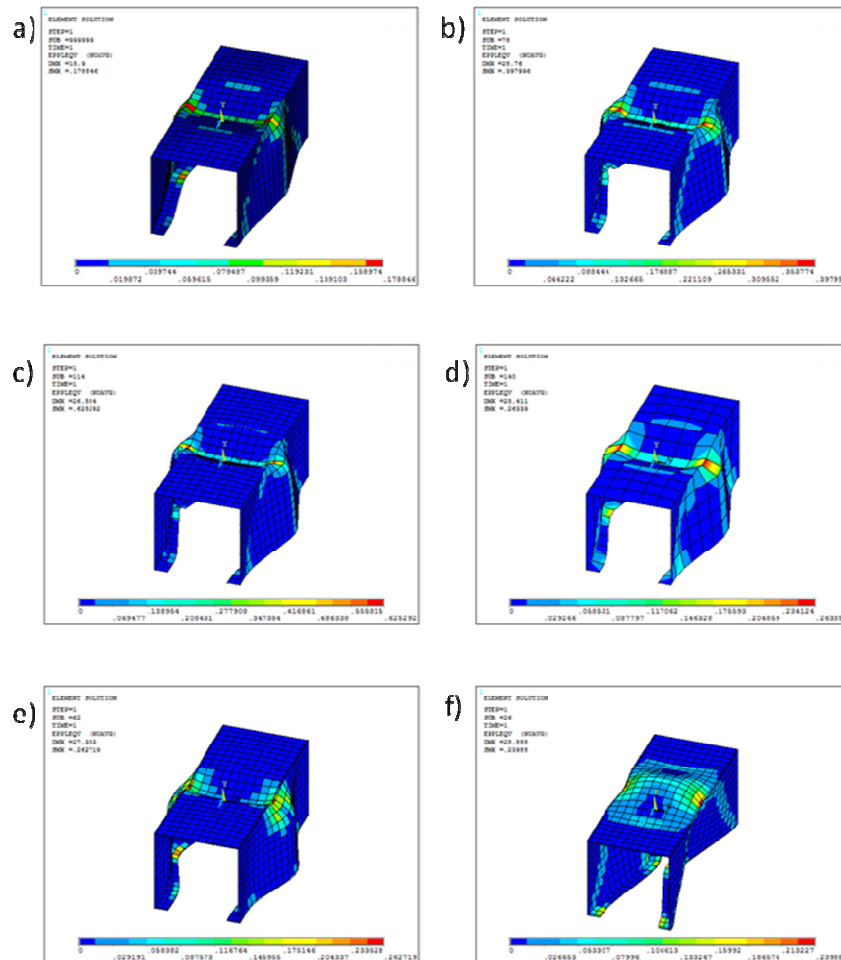


Fig. 2.18 L=3500mm, Modo global. a)20, b)14, c)10, d)4, e)20, F=0.1, f)20,F=0.1

2.2.4. Perfil a Compresión. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento

Utilizando como imperfección el primer modo:



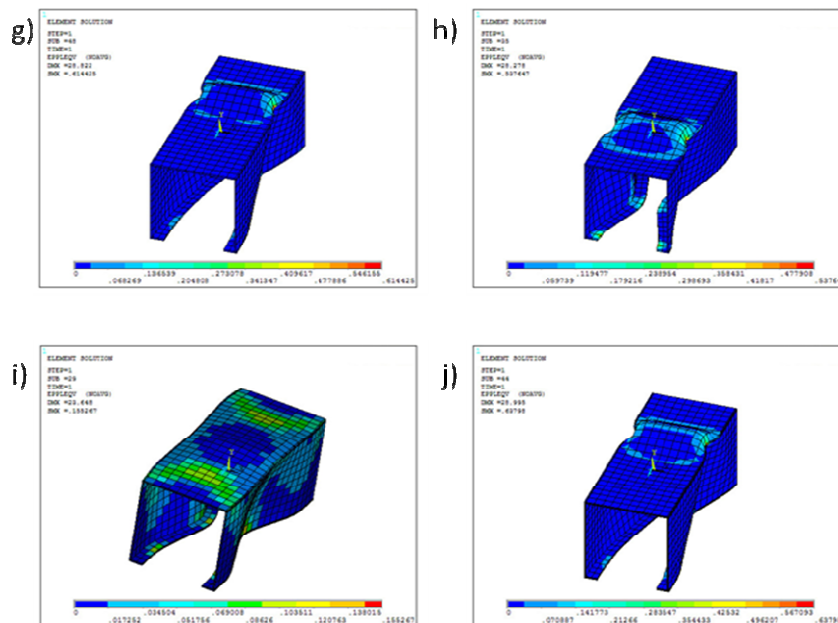
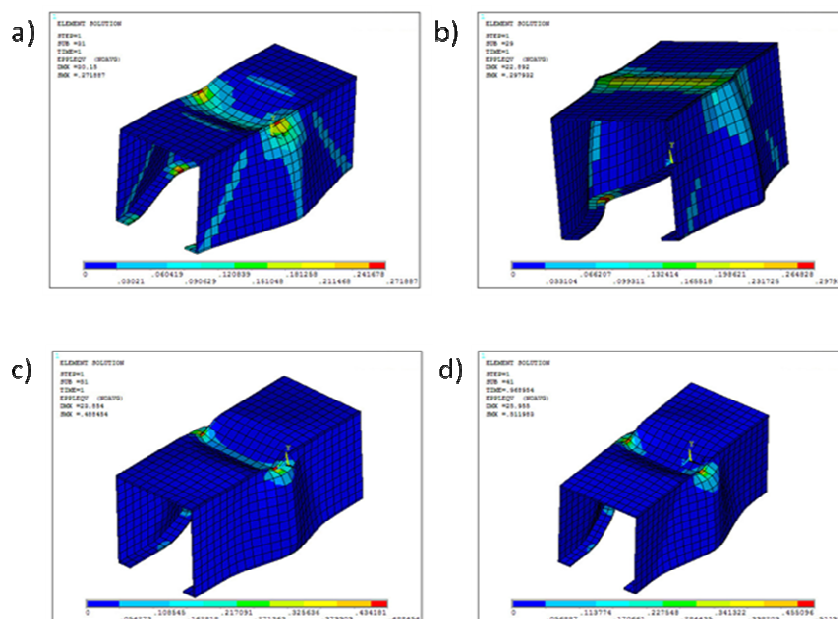


Fig. 2.19 L=250mm, Modo local. a)181r, b)181f, c)93_T10, d)93_T20, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

Utilizando como imperfección el modo que lleva una rotula equivalente:



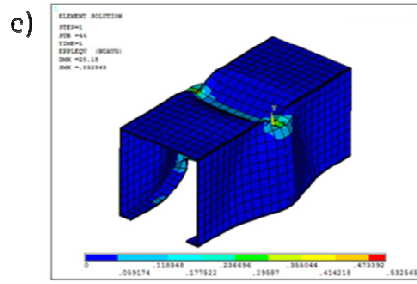
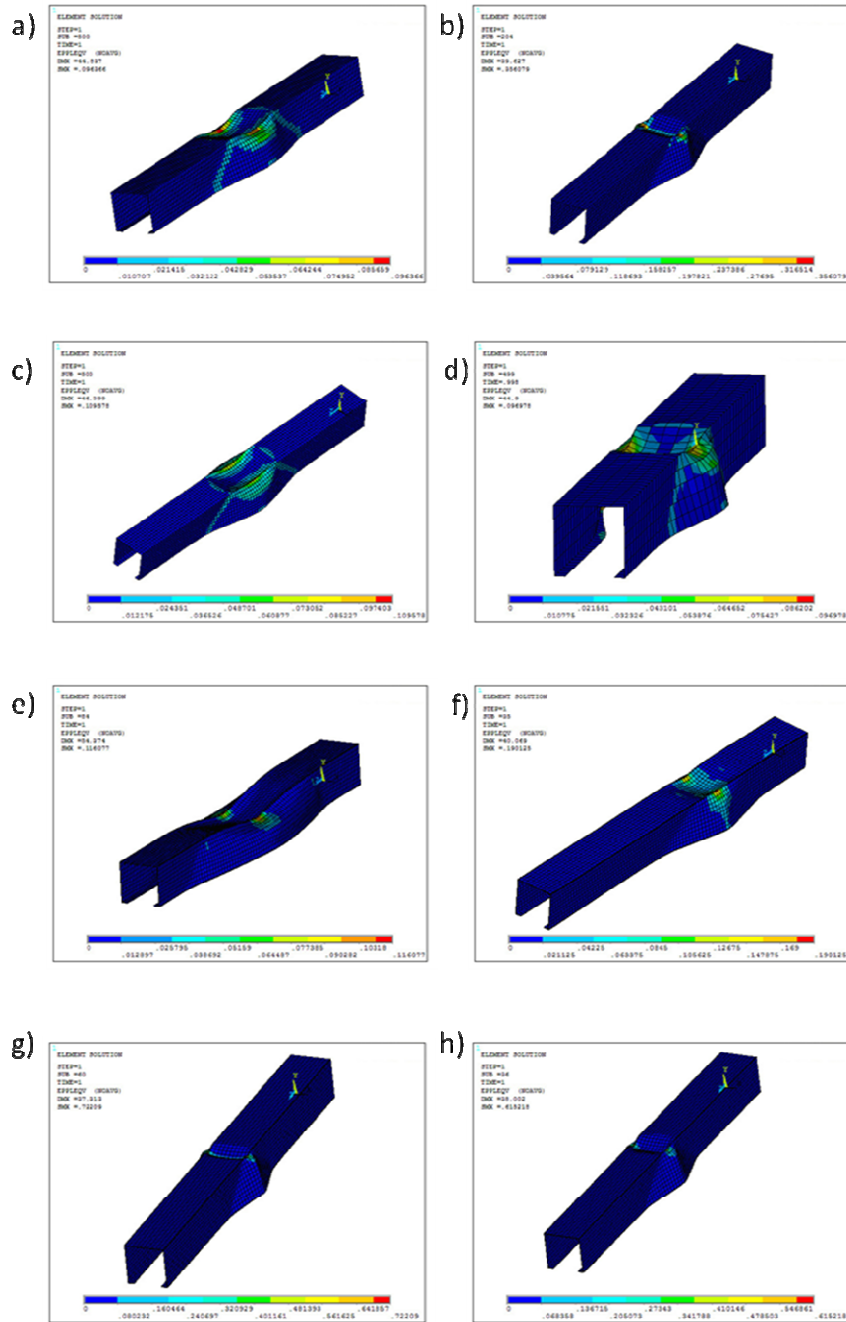


Fig. 2.20 L=250mm, Modo local. a)185f, b)185_2e, c)186r, d)186f, e)186r_2e



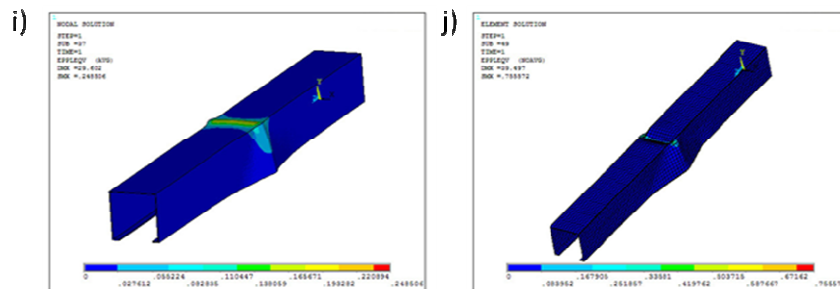
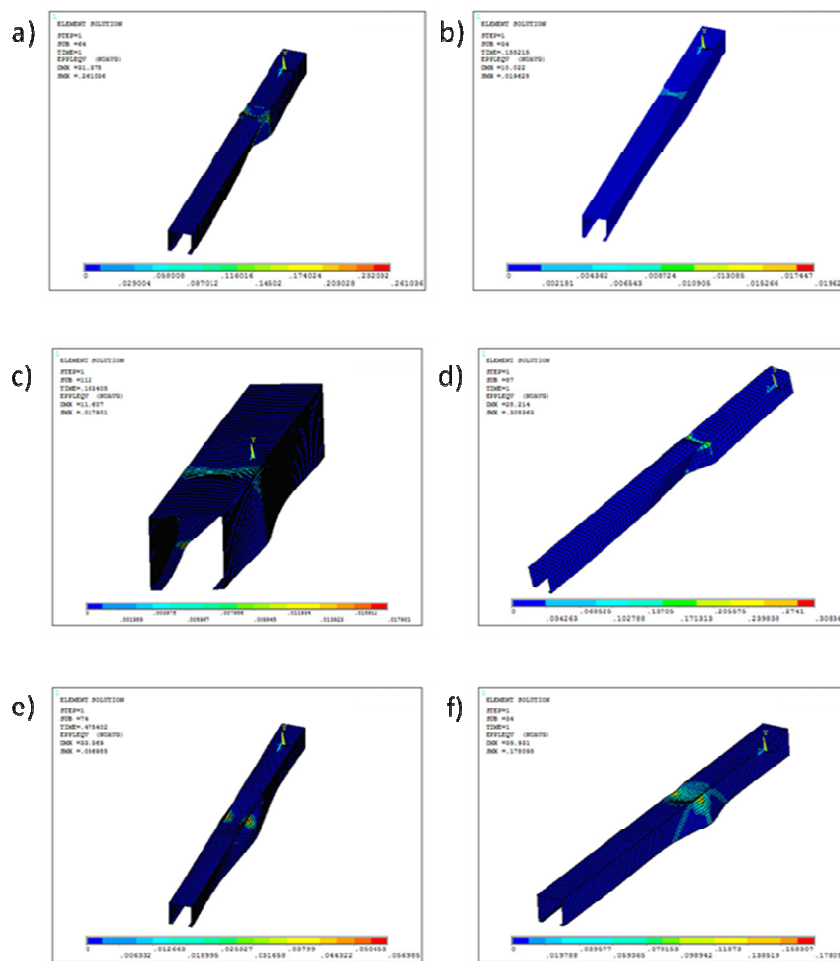


Fig. 2.21 L=1000mm, Modo distorsional. a)181r, b)181f, c)93_T10, d)93_T20, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e



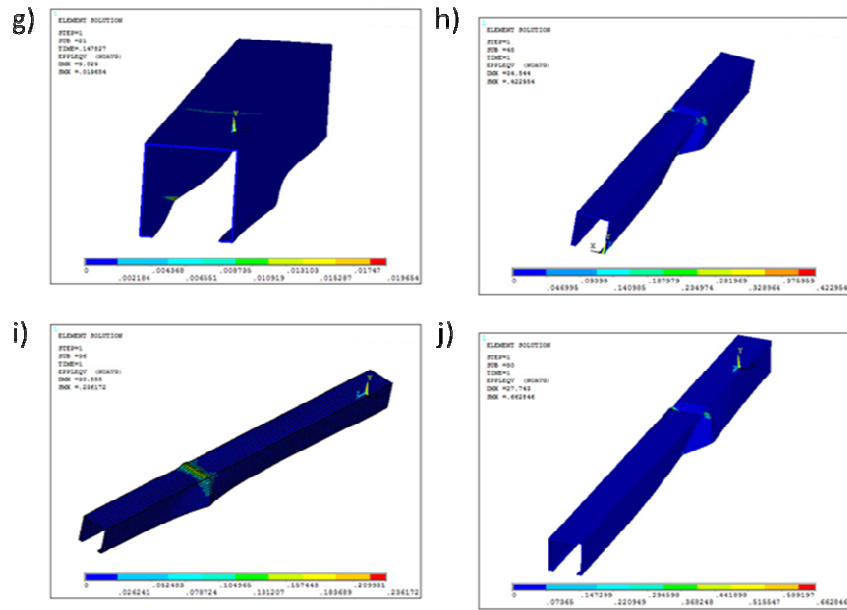
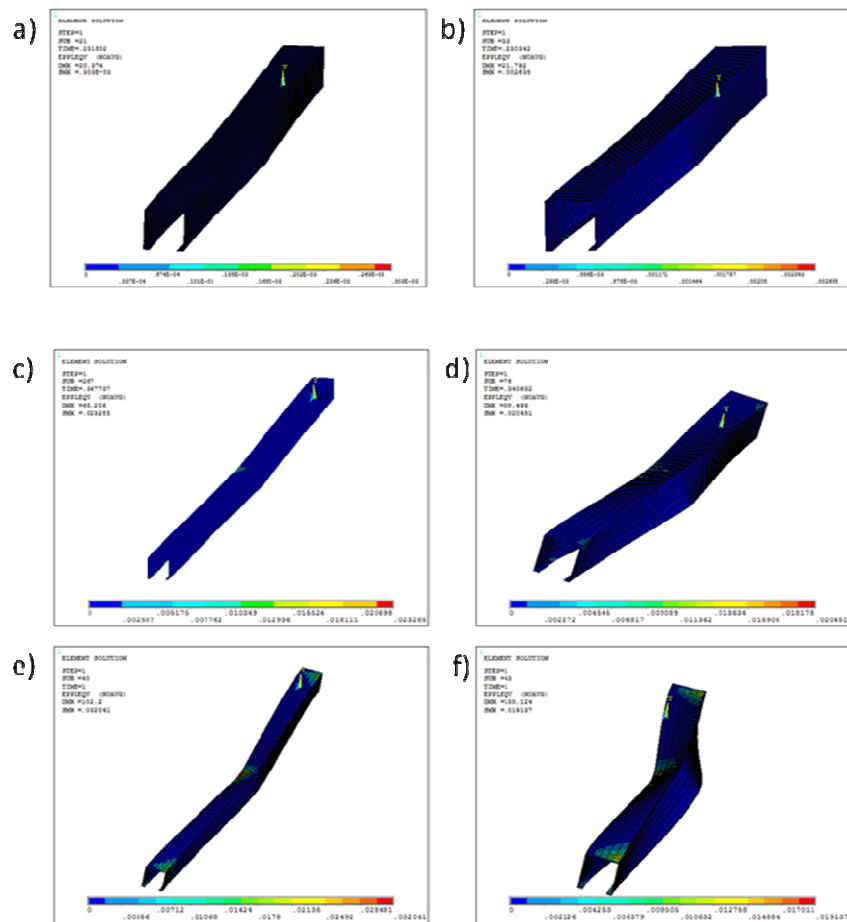


Fig. 2.22 L=1500mm, Modo distorsional. a)181r, b)181f, c)93_T10, d)93_T20, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e



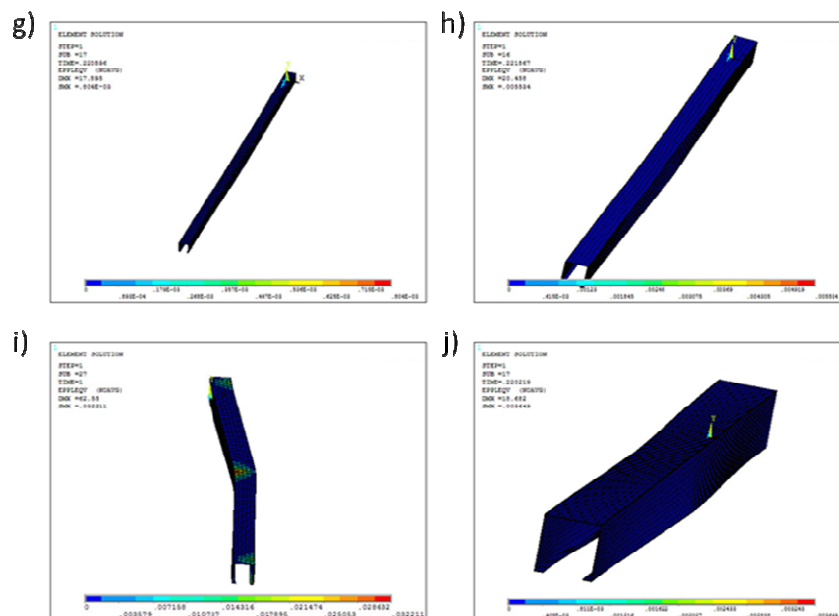


Fig. 2.23 L=3500mm, Modo global. a)181r, b)181f, c)93_T10, d)93_T20, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

2.2.5. Perfil a flexión. Estudios de sensibilidad I. Tamaño de elemento.

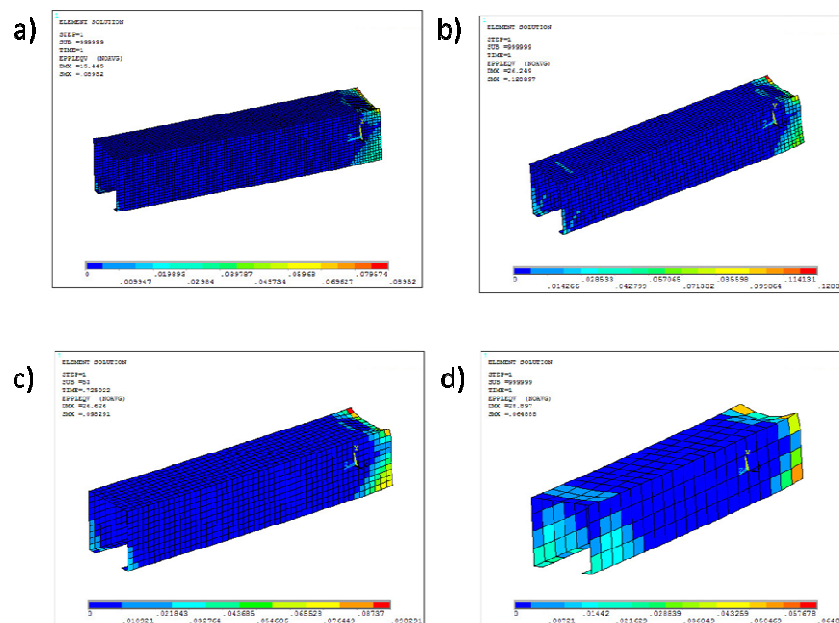


Fig. 2.24 L=1000mm, Modo local. a)20, b)14, c)10, d)4

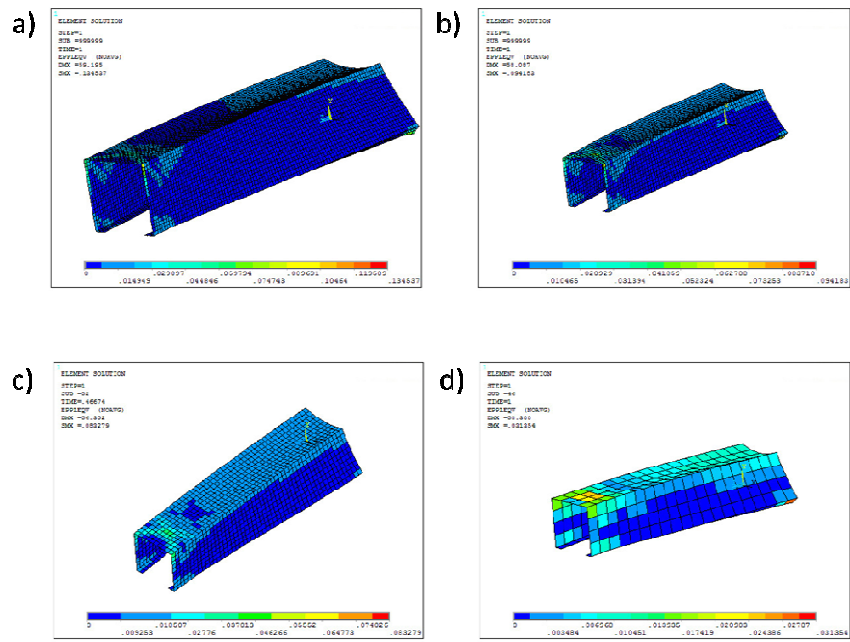
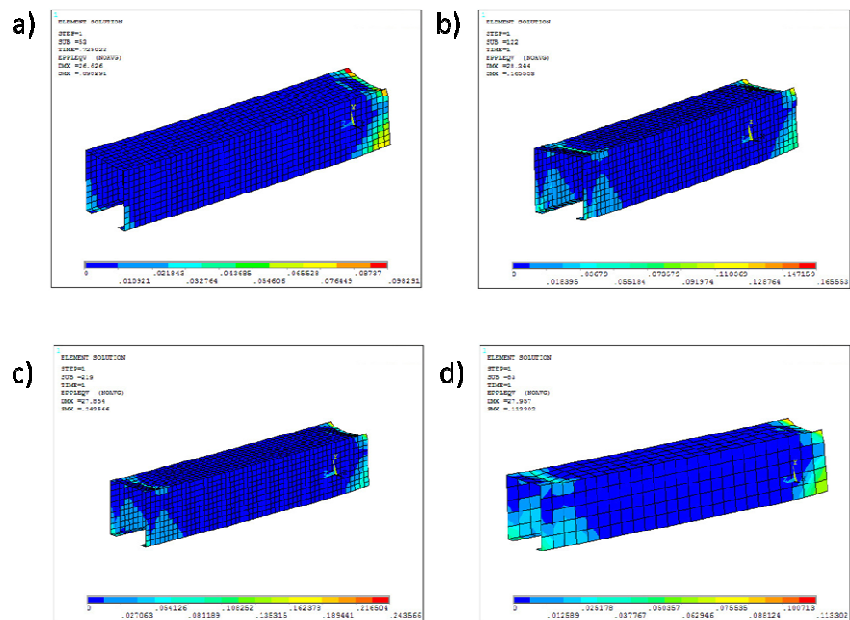


Fig. 2.25 L=1000mm, Modo distorsional. a)20, b)14, c)10, d)4

2.2.6. Perfil a flexión. Estudios de sensibilidad II. Tipo de elemento.



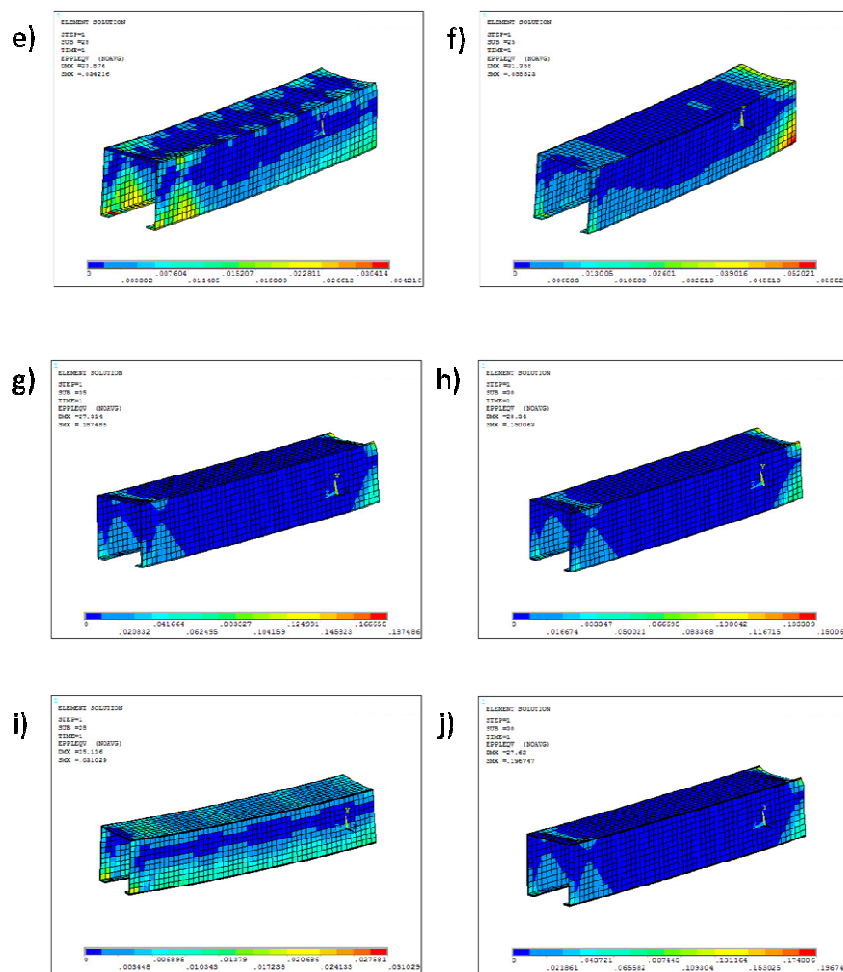
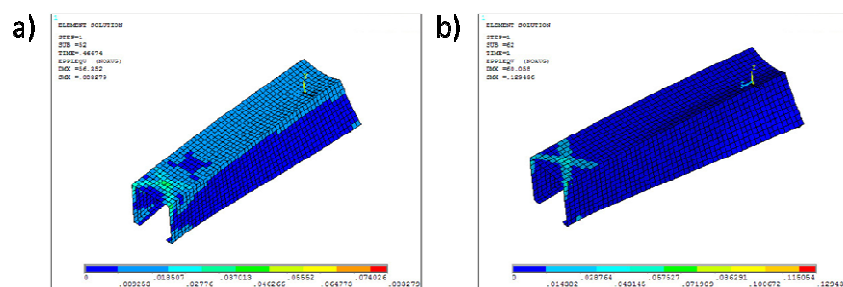


Fig. 2.26 L=1000mm, Modo local. a)181r, b)181f, c)9310, d)9320, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e



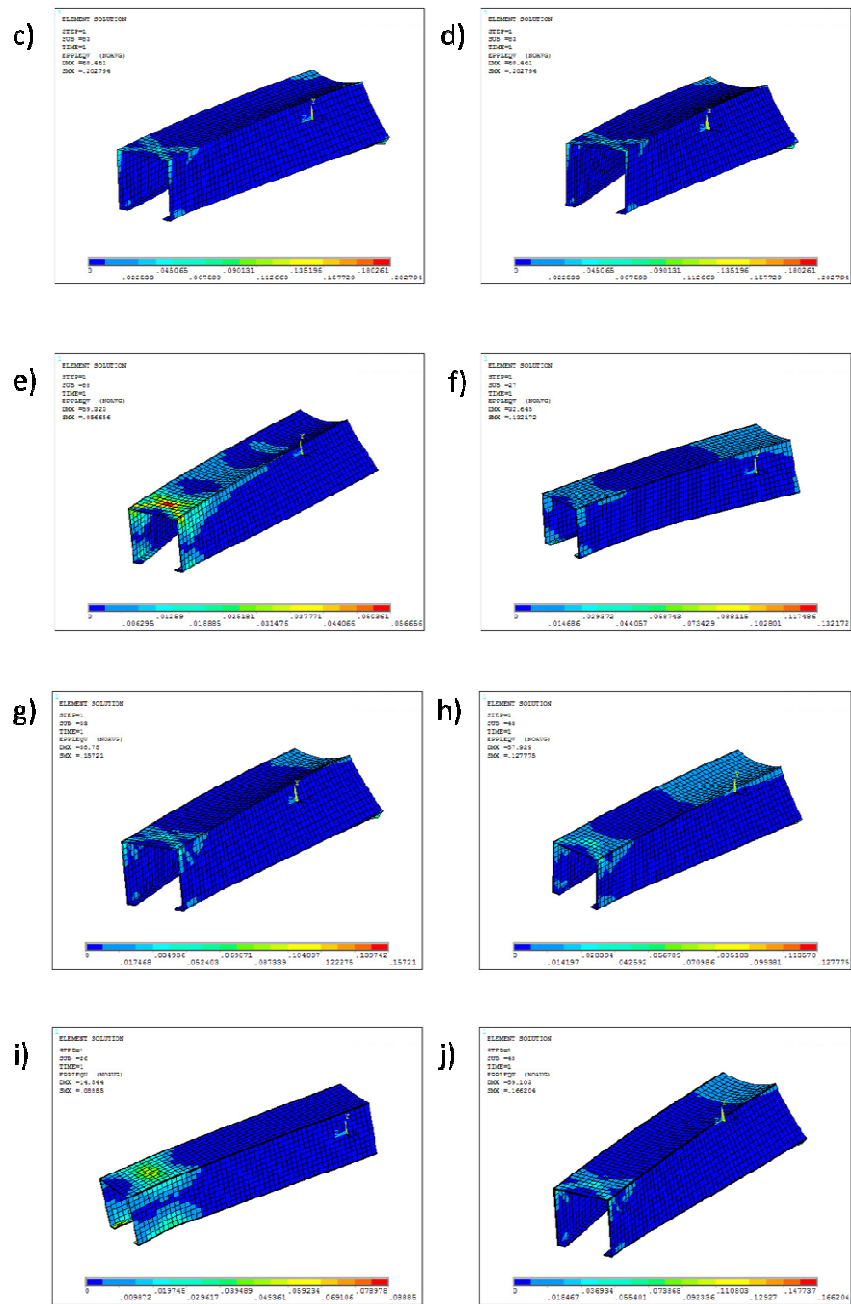


Fig. 2.27 L=1500mm, Modo distorsional a)181r, b)181f, c)9310, d)9320, e)185r, f)185f, g)186r, h)186f, i)185r_2e, j)186_2e

2.3. Análisis de una chapa trapezoidal

2.3.1. Estudios de longitud reducida de una onda de chapa trapezoidal a flexión pura.

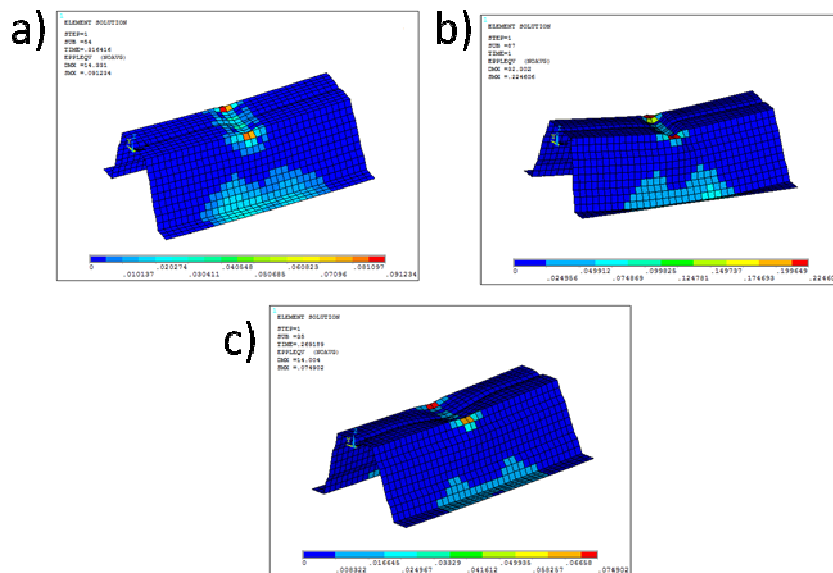


Fig. 2.28 $L=500\text{mm}$, a) $i=0.5\text{mm}$, b) $i=2.0\text{mm}$, c) $i=5.0\text{mm}$

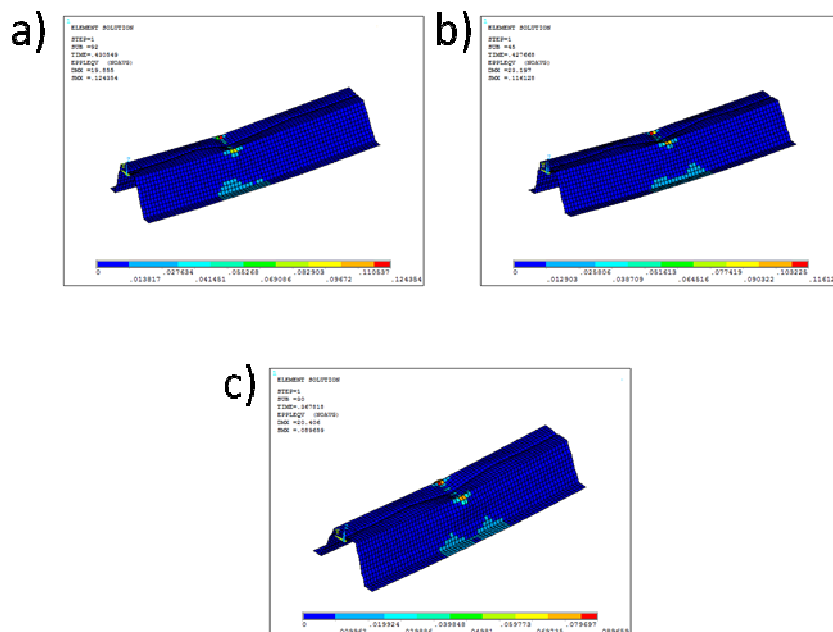


Fig. 2.29 $L=1000\text{mm}$, a) $i=0.5\text{mm}$, b) $i=2.0\text{mm}$, c) $i=5.0\text{mm}$

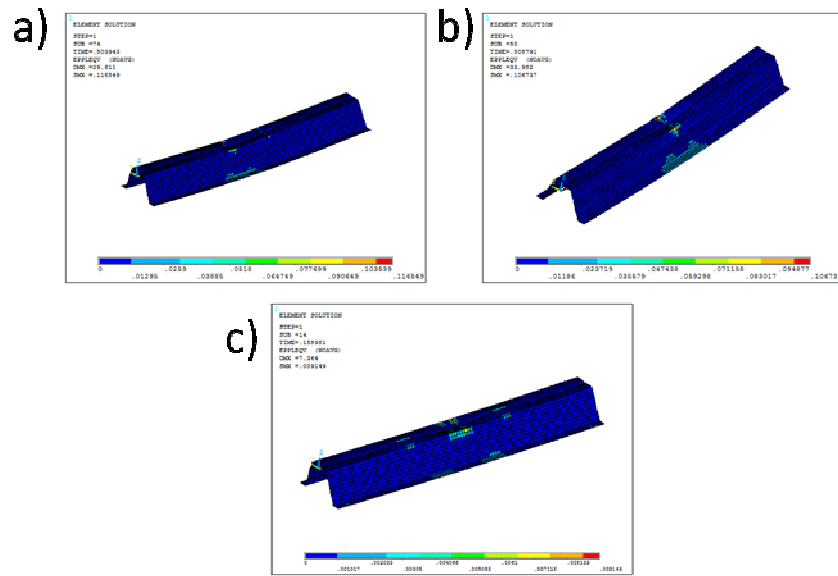


Fig. 2.30 $L=1500\text{mm}$, a) $i=0.5\text{mm}$, b) $i=2.0\text{mm}$, c) $i=5.0\text{mm}$

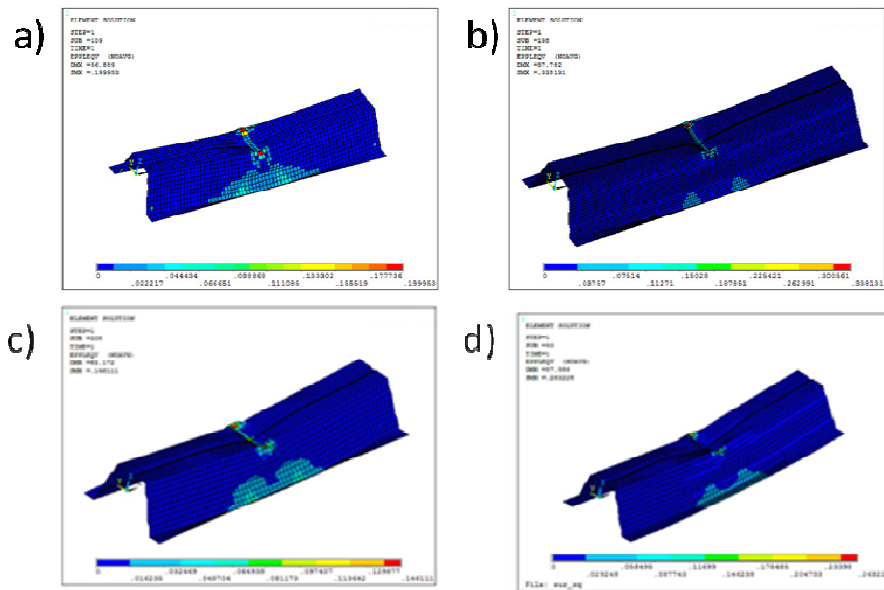


Fig. 2.31 a)181r, b)T05, c)9310, d)186r

2.3.2. Placa a flexión pura. Estudios de sensibilidad.

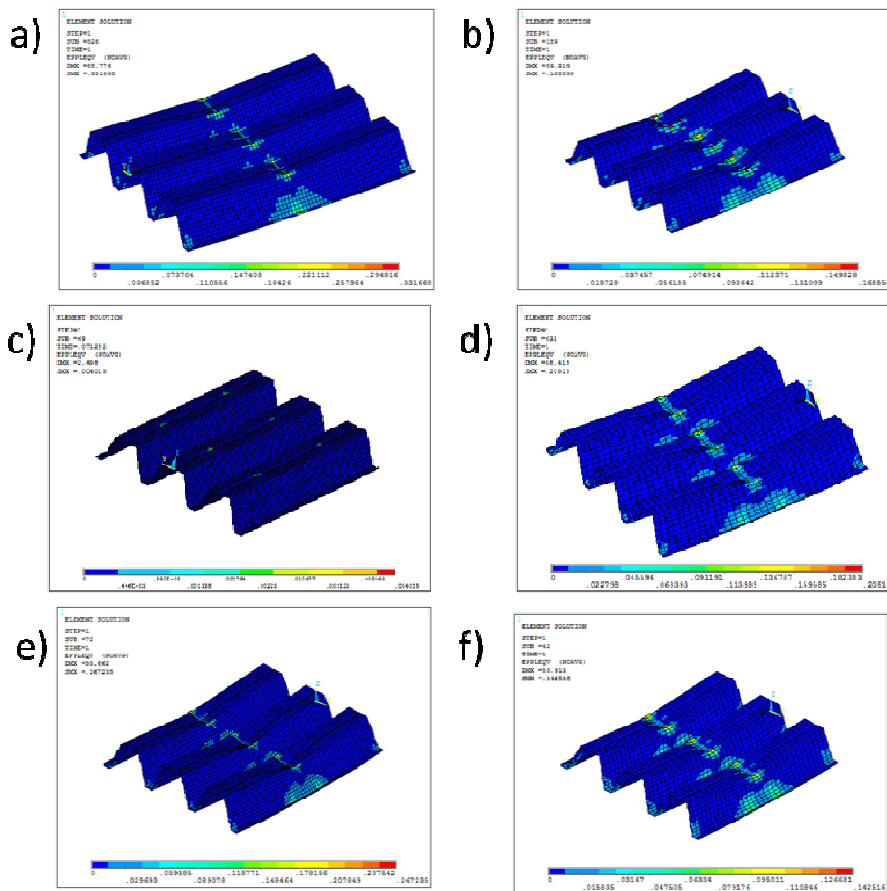
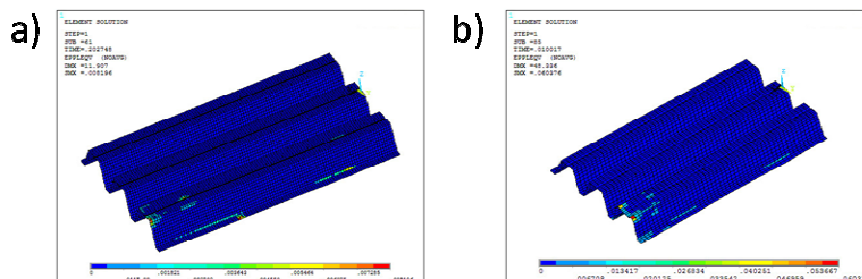
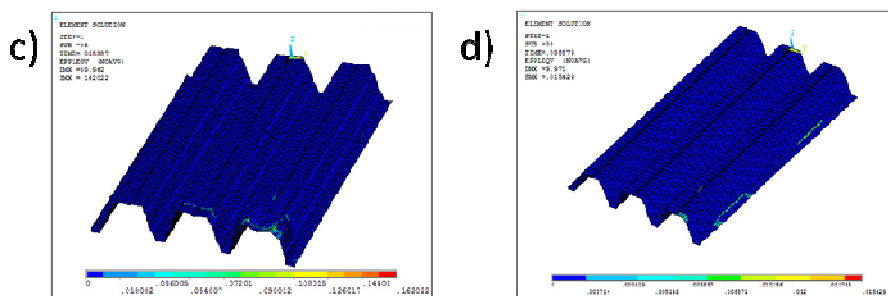


Fig. 2.32 a)f_18lr, b)g_18lr, c)f_9310, d)g_9310, e)f_186r, f)g_186r

2.3.3. Placa a flexión bajo condiciones normalizadas de ensayo. Estudios de sensibilidad.





Anejo 3 Estudios de convergencia para un perfil a compresión con pandeo global

Se han realizado diferentes modelizaciones para el tipo de elemento 186R con el fin de estudiar sus problemas de convergencia. Los parámetros de análisis son los descritos en el correspondiente apartado de la memoria.

Modelo V0

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

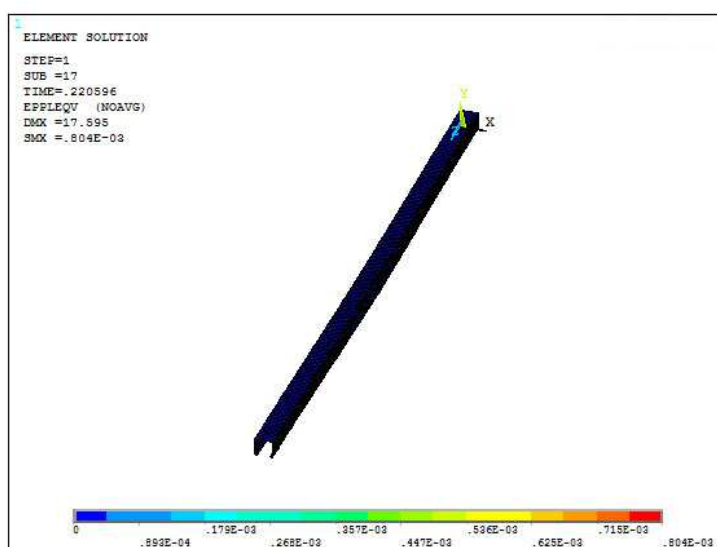


Fig. 3.1 Resultado análisis no lineal. Modelo V0

Modelo V1

Tamaño de elemento: 10 elementos por lado.

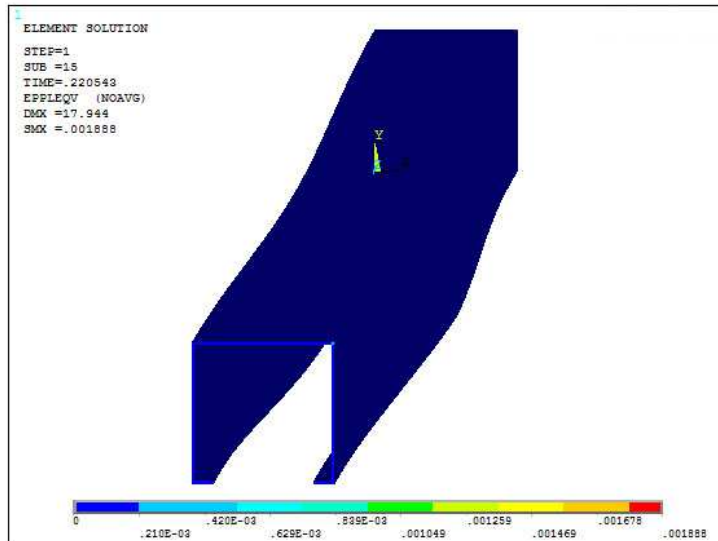


Fig. 3.2 Resultado análisis no lineal. Modelo V1

Modelo V2

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Numero de steps fijo a 1000 en lugar del automático. Se ha realizado el análisis hasta un punto en el que no había problemas de convergencia reiniciándolo luego con la función 'restart' con los substeps controlados.

Convergencia de fuerzas a 0.1 en lugar del valor de defecto 0.001.

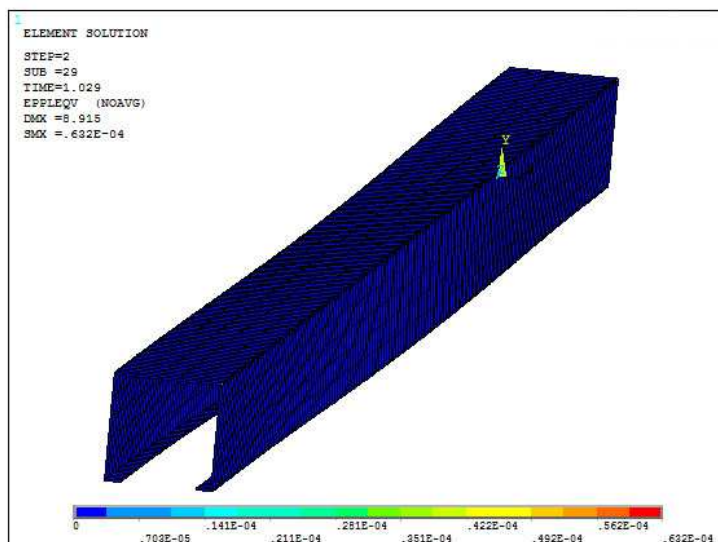


Fig. 3.3 Resultado análisis no lineal. Modelo V2

Modelo V3

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Se definen los elementos vértice como lineales. Se hace porque al ser muy pequeños respecto al resto, se quiere comprobar si son la causa de los problemas de convergencia.

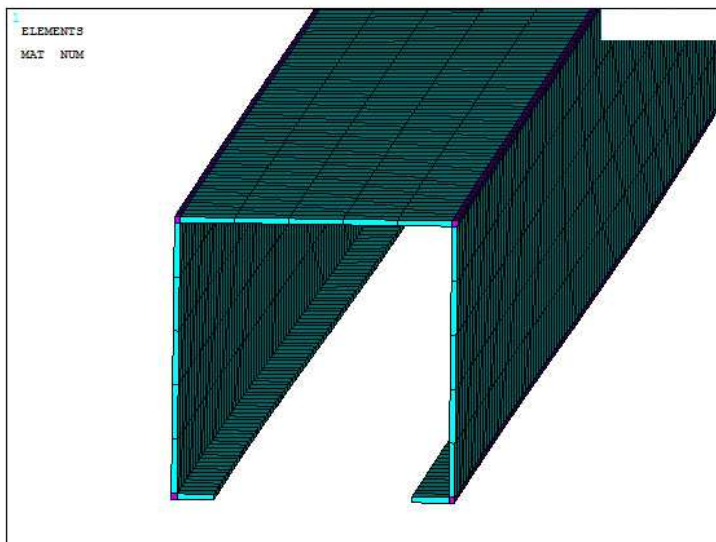


Fig. 3.4 Modelo FEM. Modelo V3

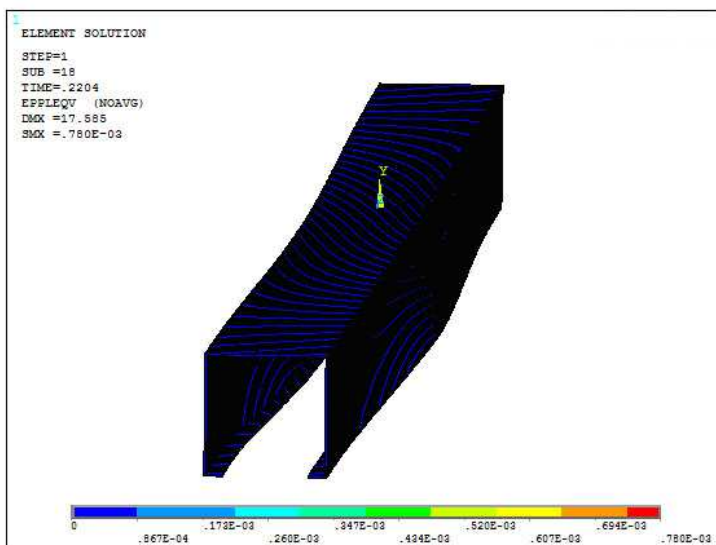


Fig. 3.5 Resultado análisis no lineal. Modelo V3

Modelo V4

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Se definen además de los elementos vértice, los elementos de los rigidizadores como lineales con el mismo objetivo de aislar los problemas de convergencia.

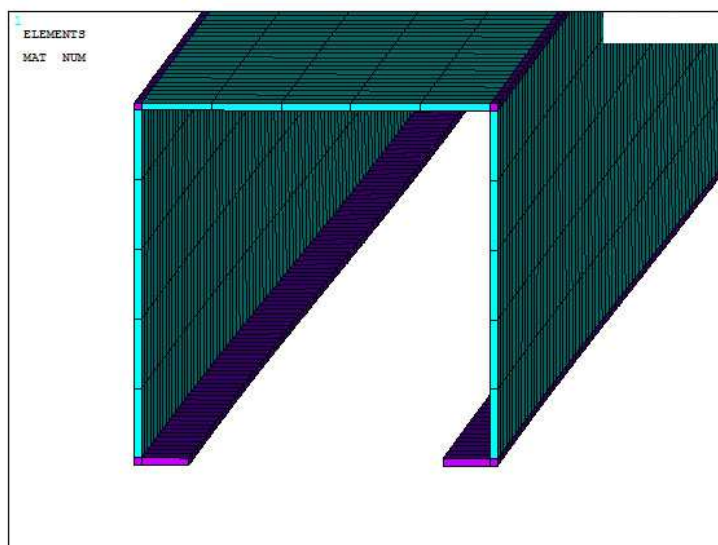


Fig. 3.6 Modelo FEM. Modelo V4

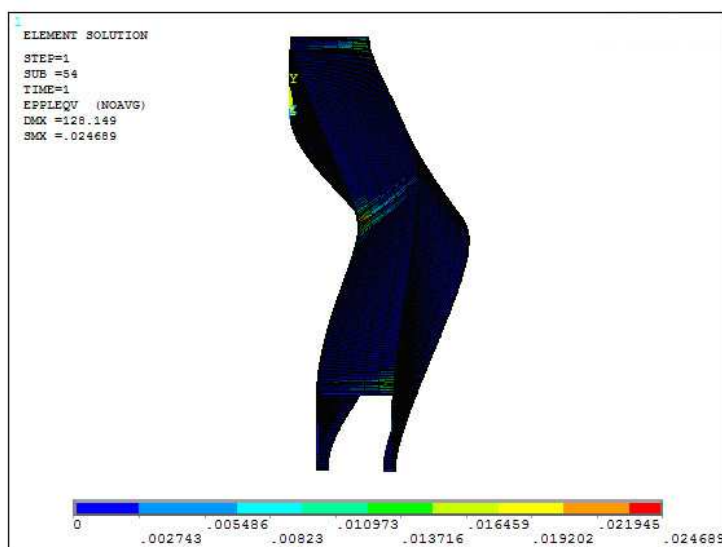


Fig. 3.7 Resultado análisis no lineal. Modelo V4

Modelo V5

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Se definen como elementos lineales los elementos vértice inferior y los elementos del rigidizador

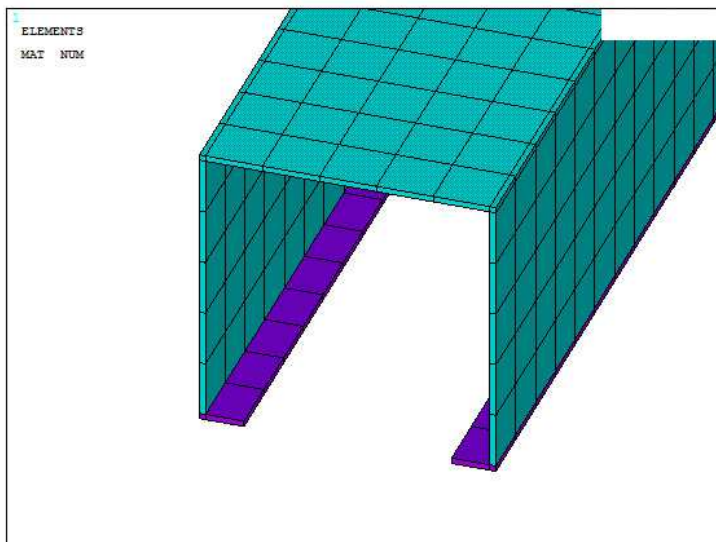


Fig. 3.8 Modelo FEM. Modelo V5

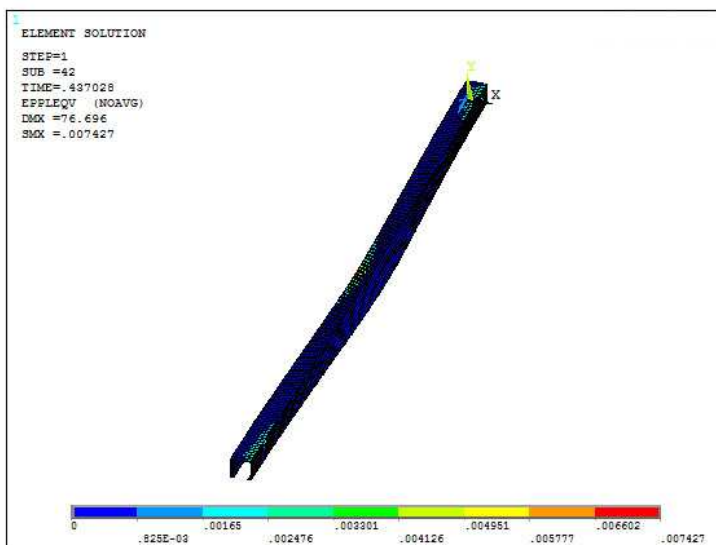


Fig. 3.9 Resultado análisis no lineal. Modelo V5

Modelo V6

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Con elementos no-lineales en todo el perfil se refina la malla en la zona de los rigidizadores para comprobar si se pueden eliminar de esta forma los problemas de convergencia en lugar de con elementos lineales.

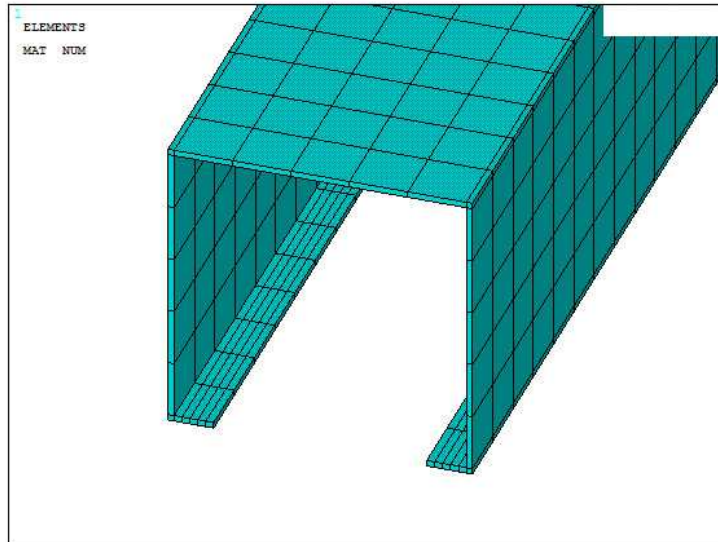


Fig. 3.10 Modelo FEM. Modelo V6

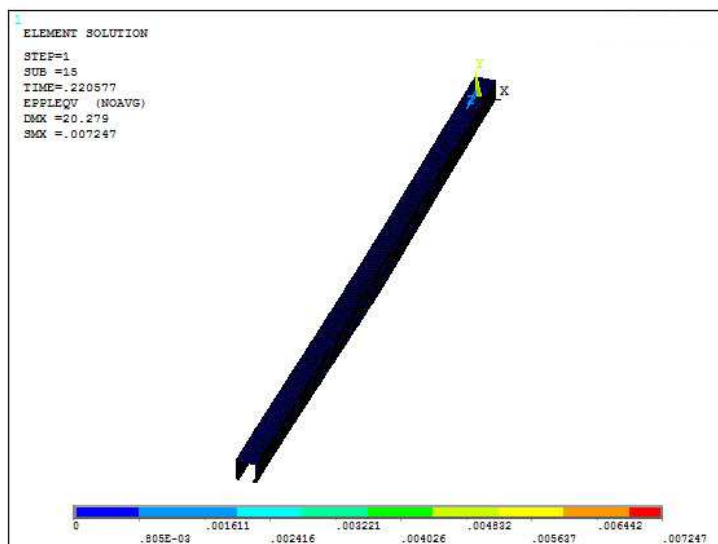


Fig. 3.11 Resultado análisis no lineal. Modelo V6

Modelo V7

Tamaño de elemento: 5 elementos por lado.

Con cargas aplicadas en forma de fuerzas en lugar de con desplazamientos forzados.

Se sustituye el desplazamiento forzado por fuerzas y por un acoplamiento en los desplazamientos en la dirección longitudinal.

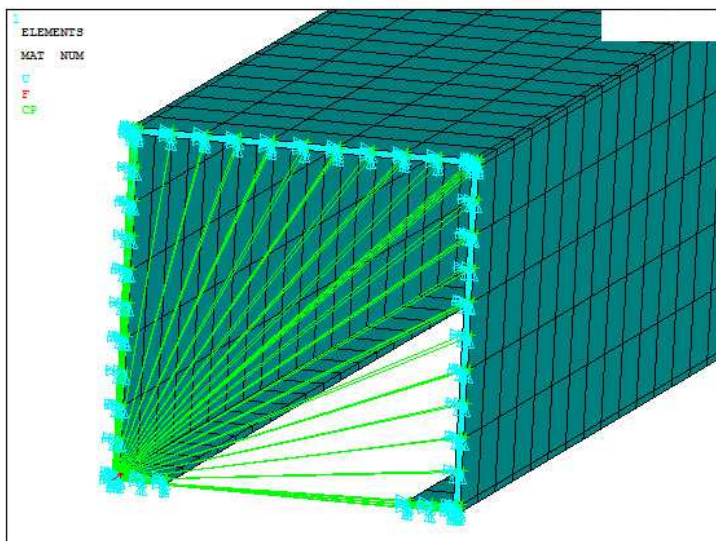


Fig. 3.12 Modelo FEM. Modelo V7

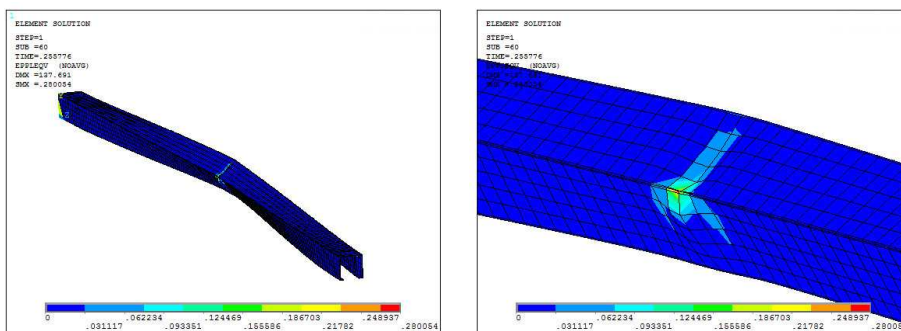


Fig. 3.13 Resultado análisis no lineal. Modelo V7

Resumen y conclusiones

Pto. Limite (N)	
v0	80010.8
V1	79930.1
V2	75286.1
v3	79943.7
v4	84502.2
v5	84266.8
v6	79959.1
v7	79901.8

CPU T								
	v0	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7
1	220	1425	222	141	143	142	363	-
1.5	257	1645	300	156	158	157	421	102
2	505	2638	389	353	221	219	681	278
10	924	-	-	-	2958	-	-	6424
Max.T	924	5102	606	906	2958	2472	1620	6500
Max.D	2.21	2.21	2.03	2.2	10	4.37	2.21	10.57

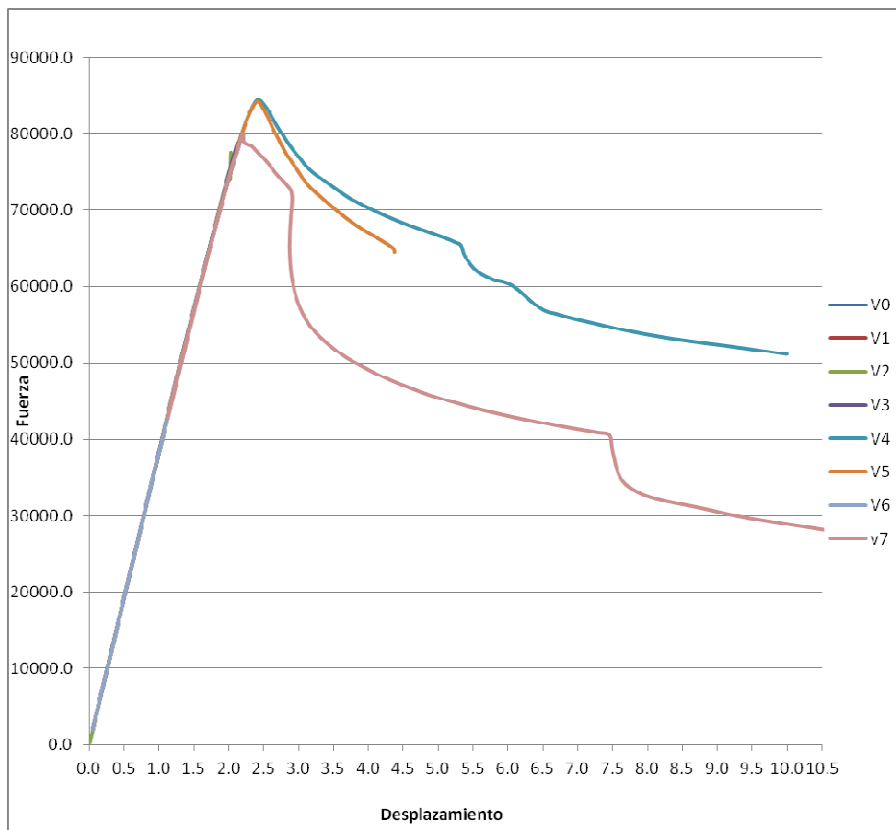


Fig. 3.14 Resumen de resultados

Se comprueba que los problemas de convergencia se producen, en las simulaciones con desplazamiento forzado, debido a la plastificación en los elementos de los rigidizadores. Estos problemas no se pueden resolver ni con los parámetros de convergencia ni de tamaño de los steps así como tampoco con un remallado local.

Con la solución de utilizar los elementos lineales se puede comprobar la evolución de la rotula plástica pero no, evidentemente, el valor de resistencia del perfil ya que como se ve este aumenta.

En la simulación con fuerzas no aparecen problemas de convergencia y se comprueba el valor del punto límite. Como se ve el valor obtenido en los otros casos era muy parecido salvo en la simulación v2 por tener el criterio de convergencia muy amplio (con lo que se obtiene un valor menor) y en las v4 y v5 en las que los elementos lineales de los rigidizadores hacen aumentar el valor del punto límite.

Anejo 4 Estudio de bloqueo por cortante en elementos sólido

Como se ha visto a lo largo del proyecto, en diversas ocasiones, los elementos sólidos lineales pueden presentar problemas debido al bloqueo por cortante.

Tanto el software utilizado en este proyecto como la mayoría de los software comerciales habituales presentan mejoras en dichos elementos para solucionar estos problemas. En nuestro caso los elementos utilizados tanto con integración reducida como completa prevén estos problemas y añaden características para evitarlo. De hecho la propia integración reducida es en sí misma una solución a dicho bloqueo aunque en su solución es también parte de su problema, ya que en ocasiones el evitar la excesiva rigidez debida al bloqueo lleva a tener demasiada flexibilidad.

A pesar de dichas características el software utilizado incorpora la posibilidad de otro tipo de integración específica, 'Enhanced Strain' ES, que intenta mejorar la respuesta de estos elementos.

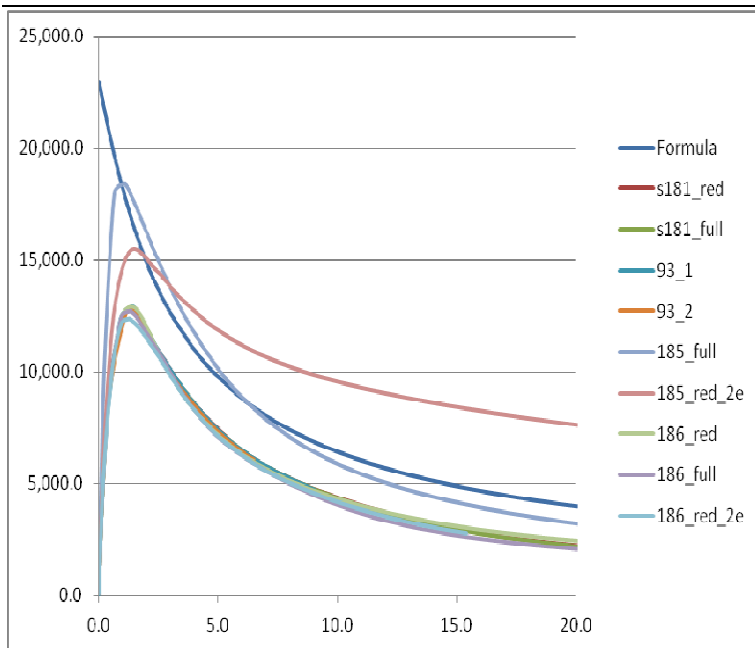
Se han realizado estudios para una serie de casos con el objetivo de tener una muestra representativa de las respuestas que ofrece la opción ES, tanto para comprobar su eficiencia como para justificar que los problemas aparecidos durante el proyecto para estos elementos son en efecto debidos al problema del bloqueo por cortante.

Los estudios se han realizado para el modo 7 de los estudios de placa, y para un caso de compresión y otro de flexión de perfiles.

Se han comparado los resultados con ES con un y con dos elementos con espesor con los otros resultados obtenidos para el sólido lineal y se comparan todos con los resultados obtenidos con los sólidos parabólicos con integración reducida.

Análisis de una placa sometida a compresión. Modo 7

Los resultados obtenidos en los estudios de sensibilidad para dicho modo son los siguientes:

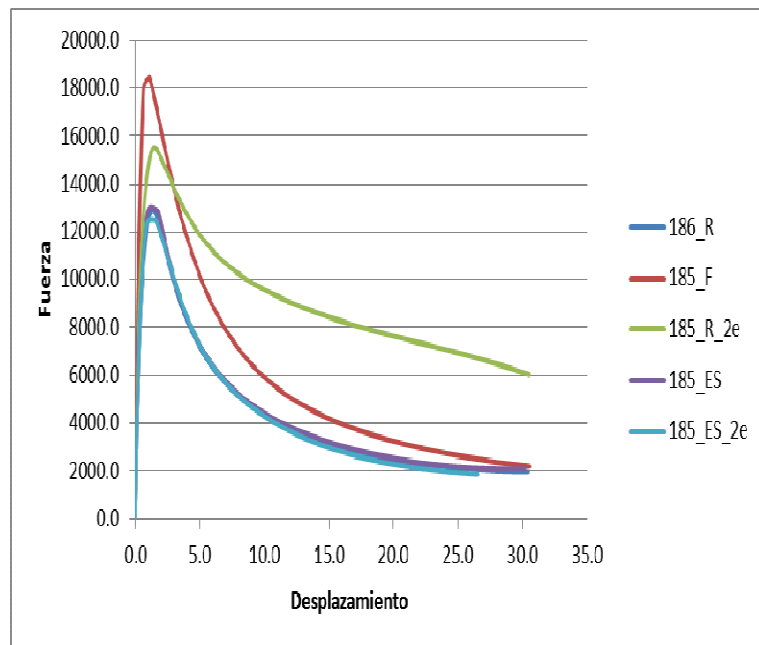


	F(N)	%
181 Red	12804.0	0
181 Full	12743.9	0
93_1	12928.3	1
93_2	12768.8	0
185 Full	18454.5	44
185 Red_2e	15461.5	21
186 red	12900.4	1
186 Full	12714.9	1
186 Red_2e	12371.8	3

Fig. 4.1 Modo 7 – Tipo de elemento

No hay resultados para el sólido lineal con integración reducida (185 red) debido a que la solución no converge.

Con la opción ES se obtiene:

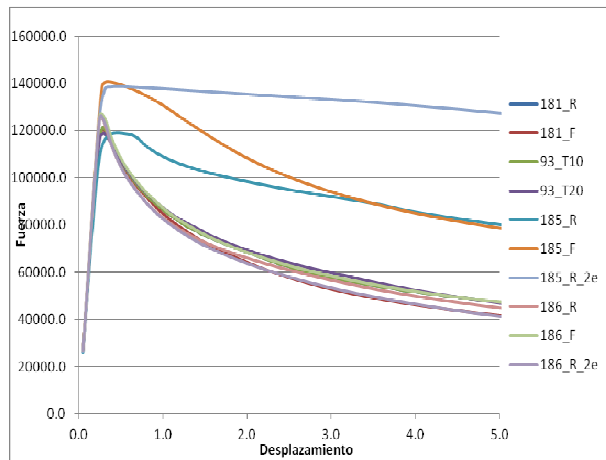


	F (N)	%
186_R	12900.4	-
185_R	-	-
185_F	18454.5	43
185_R_2e	15461.5	20
185_ES	12872.4	0
185_ES_2e	12485.3	3

Fig. 4.2 Modo 7 – Opción ES

Perfil a compresión. L=250 Modo local

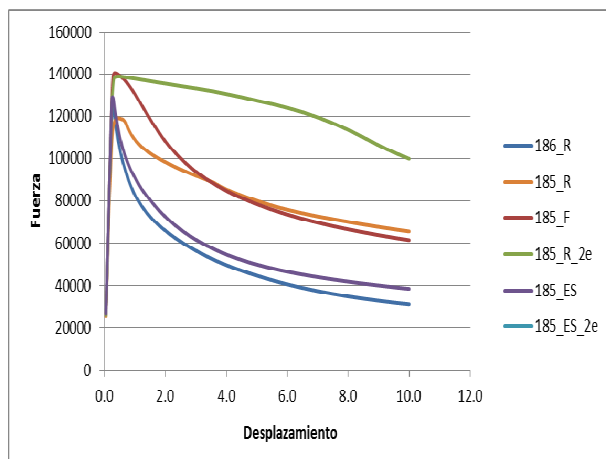
Los resultados obtenidos en los estudios de sensibilidad para dicho son los siguientes:



F(N)		%
181_R	121100	-
181_F	120191	1
93_T10	121100	0
93_T20	118866	2
185_R	119163	2
185_F	140468	16
185_R_2e	138802	15
186_R	126221	4
186_F	126712	5
186_R_2e	125797	4

Fig. 4.3 Perfil a compresión. L=250 Modo local

Con la opción ES se obtiene:



F (N)		%
186_R	126221.0	-
185_R	119163.0	6
185_F	140468.0	11
185_R_2e	138802.0	10
185_ES	129002.0	2
185_ES_2e	128805.0	2

Fig. 4.4 Perfil a compresión. L=250 Modo local. Opción ES

Perfil a flexión. L=1000 Modo distorsional

Los resultados obtenidos en los estudios de sensibilidad para dicho son los siguientes:

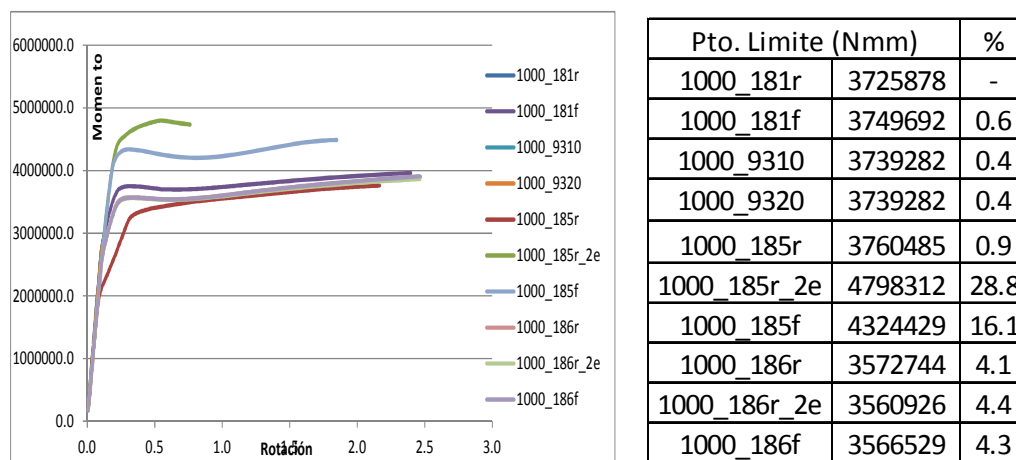


Fig. 4.5 Perfil a flexión. L=1000 Modo distorsional

Con la opción ES se obtiene:

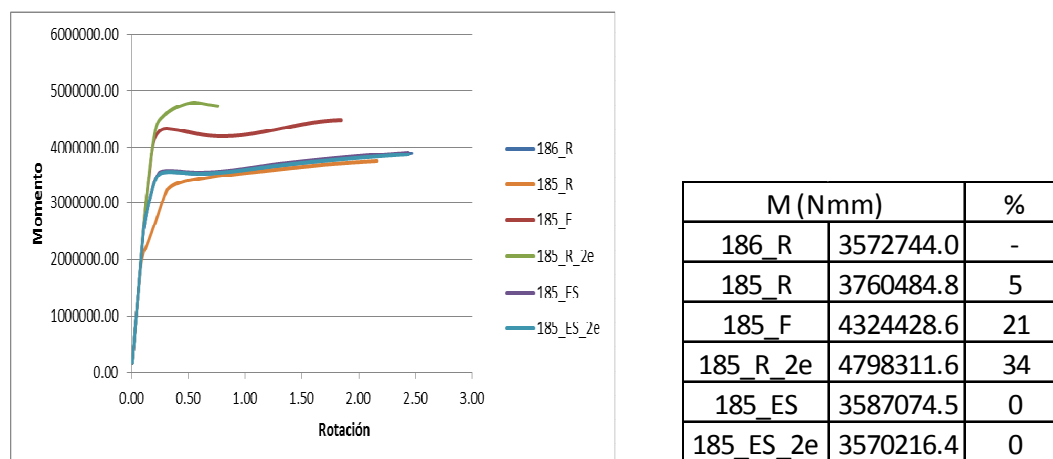


Fig. 4.6 Perfil a flexión. L=1000 Modo distorsional Opción ES

En todos los casos se obtienen resultados muy cercanos a la obtenida con los sólidos parabólicos y en ningún caso han aparecido problemas de convergencia. Por tanto:

- Para sólidos lineales y para este tipo de casuísticas es imprescindible y muy adecuado la utilización de la opción Enhanced Strain.
- Los problemas aparecidos durante el proyecto con los sólidos lineales se atribuyen por tanto a problemas de bloqueo por cortante.

Anejo 5 Ensayo y correlación con simulación mediante elementos finitos de una chapa trapezoidal de acero conformado en frio sometida a flexión.

En el presente apéndice se presenta el informe sobre el ensayo experimental y su correlación con un modelo de elementos finitos realizado en el “Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria” de la ETSEIB-UPC para una chapa trapezoidal de acero conformado sometida a flexión.

Además se comentan los resultados obtenidos en relación a los del presente proyecto.

Title:

Bending test on a trapezoidal sheet

M. Casafont, E. Llorens, F. Marimon, M. Ferrer

Cold-formed steel sheeting

Single span test (Figure 1).

Boundary conditions: Simply supported. See end supports in figures. 3 and 4.

Loading: Four points bending test.

Experimental testing



Figure 1: Test arrangement.

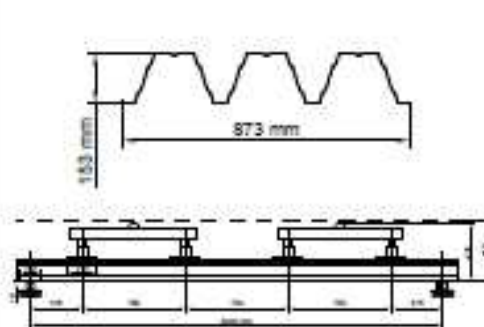


Figure 2: Layout of the cross-section and test arrangement.



Figure 3: Detail of the end support 1



Figure 4: Detail of the end support 2

Registered data:

- Load applied.
- Displacement at midspan. See location of displacement transducers in Figure 9.
- Longitudinal deformation at midspan of the central rib (only in one of the tests).

Results of the tensile coupon tests

No.	Tests	b (mm)	t (mm)	Lo (mm)	Lf (mm)	L (%)	Fu (N)	Fy (N)	ϵ_c (N/mm ²)	ϵ_f (N/mm ²)
1	ECCB	20,42	0,79	80	105	31,26	6304,63	5253,11	380,82	326,84
2	sheets	20,60	0,79	80	105	31,26	6382,20	5330,68	382,17	327,68
3	Zn specimen	20,40	0,79	80	105	30,83	6330,49	5322,06	382,81	330,23

Measured thickness of the sheet: 0.79 mm.
Yield stress: 327.81 MPa.

Experimental failure mode



Figure 5: Failure.

Figure 6: Failure mode of specimen 1.

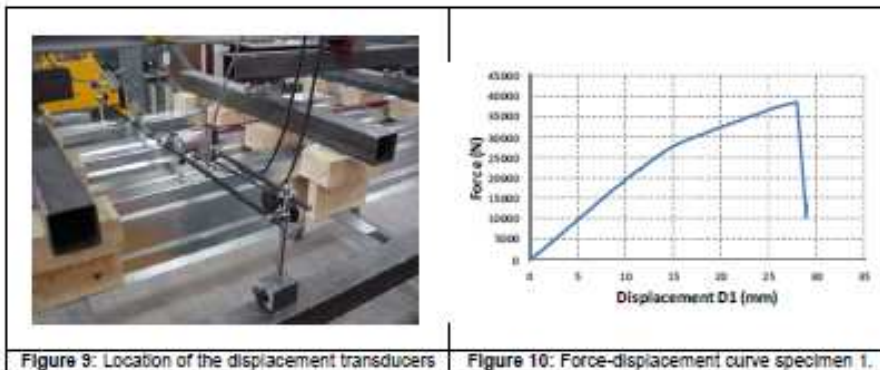
Figure 7: Failure mode of specimen 2

Figure 8: Failure mode of specimen 3.

Test results

Ultimate load:

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Mean
Ultimate load (N)	38478	37438	37897	37938



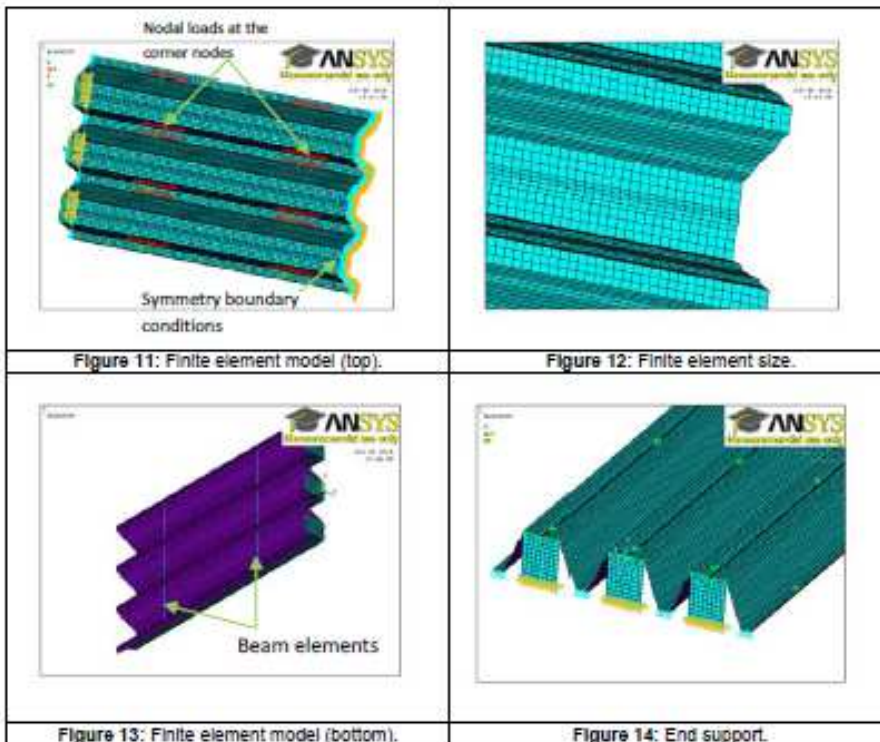
Finite element model

Material properties:

f_y is experimentally determined.
Elastic-plastic bilinear (E and E/100).
Von Mises yield criterion.
isotropic hardening.

Loading and boundary conditions:

Simple support at one end (Figure 14).
Symmetry boundary conditions at the other end. One half of the specimen is modelled (Figure 11).



Finite element model

Software: Ansys 13.0 Academic
Element type: Shell181 (4-node finite strain shell) and Beam 188 (2-node beam element).
Meshing: upper flange: 10 elements; web: 15 elements; lower web: 3 elements (Figure 12)
Linear (eigenbuckling) analysis -first stage-
Nonlinear analysis -second stage-

- **Imperfection:** (see Figure 16)
 Shape: fist local buckling mode at midspan (3rd buckling mode, Figure 15).
 Size: $e_0=0$
 $e_0=b/200$
 $e_0=b/150$
- **Residual stresses:** not modelled
- **Solution scheme:** static solution. Geometric and material non linear analysis. Arc-length technique (Force convergence criteria).

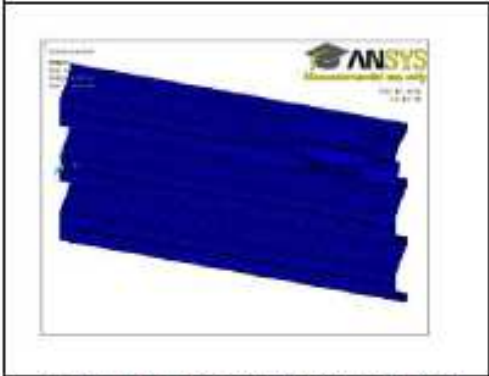


Figure 15: Initial Imperfection (1st local buckling mode)

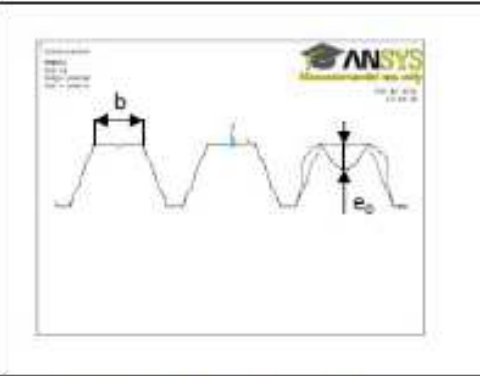


Figure 16: Magnitude of the imperfection.

Finite element results

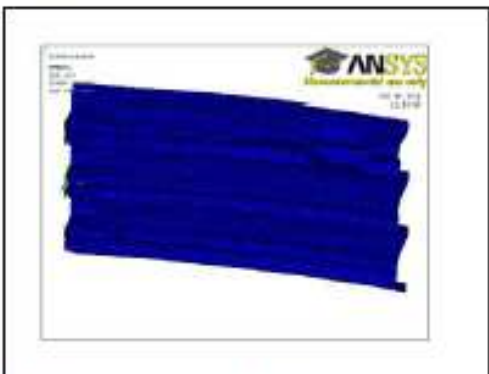


Figure 17: Local buckling failure mode (scaled).

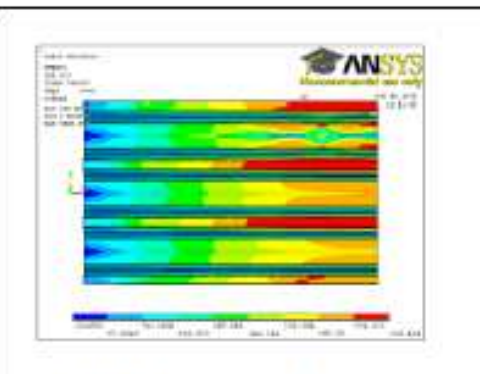


Figure 18: Von Misses equivalent stress.

Predicted ultimate load:

Geometric imperfection (e_0)	0	$b/200$	$b/150$
FEM predicted ultimate load (N)	45860	39730	35050
FEM predicted/experimental	1.21	1.05	0.92

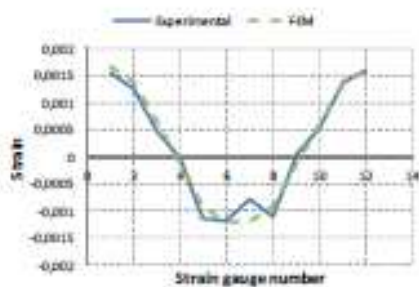


Figure 19: Experimental strain vs FEM strain (37000 N).

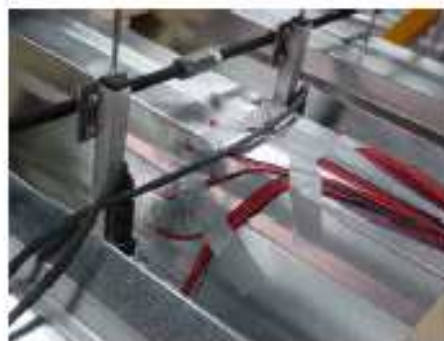


Figure 20: Location of strain gauges

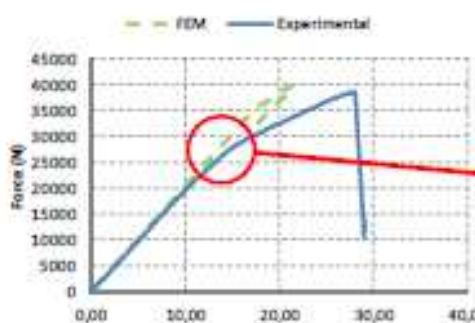


Figure 21: Force - displacement curve.



Figure 22: Local failure at the supports.

Aknowledgments:

The authors are grateful for the support of METALPERFIL,SA that provided the specimens for the experimental tests.

Barcelona 25-06-2012

Ensayo

- El ensayo consiste, tal como se muestra en las figuras 1 y 2, en la flexión de la chapa mediante aplicación de desplazamientos en cuatro zonas de manera que se obtiene una flexión constante en el centro de ella. Las condiciones de contorno son de apoyo simple: figuras 3 y 4.
- Como primer paso se realiza la de caracterización de material a través de un ensayo de tracción en el que se obtiene un límite elástico de 327.81MPa para un espesor de 0.79mm
- Se muestran los resultados para tres especímenes, figuras 5 a 8. En el primer y tercer caso se obtienen rotulas en la zona central, la de flexión constante, y dentro de ella en la zona más cercana a la aplicación de carga. En el segundo caso se obtiene la rotula en la parte central de la chapa. El valor medio de la carga limite es de 37938N.

Modelo de elementos finitos

- Se utiliza el limite elástico obtenido experimentalmente, con un comportamiento bilineal de manera que pasado dicho limite el modulo de Young pasa a ser $E/100$. Se utiliza el criterio de plastificación de Von Mises con endurecimiento isotrópico.
- Las condiciones de contorno, simplemente apoyado, y los detalles de la malla, , elementos Shell181, se definen en las figuras 11 a la 14. Se utilizan elementos Beam188 para simular la ligadura transversal en las zonas de aplicación de carga.
- Se realiza un análisis de modos de pandeo y se utiliza los resultados como imperfecciones iniciales en el análisis no lineal posterior: Se realizan tres análisis no lineales para tres valores de amplitud de imperfección, 0, $b/200$ y $b/150$. Se aplican las cargas mediante fuerzas y se utiliza la técnica de solución del Arc-length para obtener información más allá del punto límite.
- Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 15 a la 18.

Los puntos límite obtenidos, para cada uno de los tres análisis, presentan una desviación máxima del 21% para la imperfección nula y un mínimo del 5% para $b/200$.

La correlación de desplazamientos obtenida es muy próxima, figuras 19 y 20, excepto para la galga central.

En cuanto a la curva carga-desplazamiento se obtiene una diferencia destacable, figuras 21. Se comprueba que en el modelo físico real ensayado además de la rotula central se produce otra en el extremo de la chapa, figura 22, lo cual no afecta a la resistencia ultima pero sí que produce un cambio importante en la rigidez. Tal como muestran las graficas, el modelo FEM

mantiene dicha rigidez prácticamente constante (debido a que no se incluye el efecto de dicha rotula) mientras que en el modelo real esta disminuye claramente.

Conclusiones

El modelo FEM utilizado se puede decir que tanto en lo referente a carga última, a desplazamientos y a relación carga como-desplazamiento obtiene muy buenos resultados, por lo que se considera adecuada dicha modelización.

Se comprueba que el valor de la imperfección inicial tiene una gran importancia en cuanto al valor del punto límite.

La modelización se ha realizado utilizando como imperfección un modo de pandeo que corresponde a una deformación en una de las ondas de la chapa. En la realidad se observan divergencias importantes ya que en ella se produce un acoplamiento de modos. Por un lado la rotula central no se produce solo en una onda y por otro se produce también una rotula en la zona de apoyo. En el primer caso no afecta al comportamiento pre-colapso, ya que se entiende que primero se forma una evoluciona y la misma deformación provoca la otra, mientras que en el caso de la rotula en el extremo si produce un cambio antes del colapso, como se ha dicho hace variar la rigidez real de la chapa aunque no afecta a su capacidad final.

Estas divergencias podrían ser simuladas con un estudio más detallado en el que se incluyeran acoplamientos de modos en la simulación. Este análisis excede el planteamiento del presente estudio y se consideran, para él, las diferencias justificadas pero no suficientemente relevantes.

En cuanto a la relación con los estudios realizados en el grueso del proyecto, el ensayo y su simulación vienen a confirmar, por lo bueno de las correlaciones, los resultados allí obtenidos.

Cabe resaltar las diferencias en unos y otros modelos FEM, como justificación de las diferencias cuantitativas:

- El material utilizado en la correlación presenta un límite elástico de 327.81 y un modulo tangente de $E/100$ mientras que en el resto de cálculos se ha utilizado 230 MPa y $E/10000$.
- La modelización de la unión transversal en las zonas de aplicación de cargas se ha realizado mediante elementos Beam188 en la correlación y mediante la ligadura de desplazamientos en los cálculos.
- En los cálculos se han utilizado zonas con un material totalmente elástico para evitar problemas locales de plastificación.

- La aplicación de la carga en la correlación se ha realizado sobre los nodos vértice mientras que en el resto de cálculos se ha aplicado en todo el valle.