

ÍNDIX

1.-Introducció.....	4
1.1.-Antecedents.....	4
1.2.-Objectius.....	4
1.3.-Abast i especificacions.....	4
2.-Anàlisi d'elements estructurals senzills.....	6
2.1.-Pilar encastat a la base i articulat a l'extrem, sotmès a una càrrega puntual a compressió.....	7
2.2.-Biga biarticulada amb càrrega puntual al centre.....	14
2.3.-Biga biarticulada dels dos extrems amb càrrega distribuïda.....	21
2.4.- Comparació dels resultats.....	28
3.-Anàlisi estructural de les corretges.....	29
3.1.-Jàssera amb una corretja com a element de travat.....	29
3.2.-Anàlisi d'un pòrtic d'una nau industrial sota la influència de corretges com a elements de travat.....	35
3.2.1.- Anàlisi d'un pilar en interacció amb la resta del pòrtic.....	37
3.2.2.-Anàlisi de la jássera	41
3.3-Comparació dels resultats.....	45
4.-Resum del pressupost.....	47
5.-Conclusions.....	48
6.-Relació de documents.....	49
7.-Bibliografia.....	50
8.-Glossari	51
9.-Agraïments.....	53
ANNEX A.- COMPROVACIÓ CÀRREGUES MÀXIMES DELS ELEMENTS SIMPLES.....	54
A.1.-Element Pilar amb càrrega puntual a compressió.....	54

A.1.1.-Càlcul a nivell de secció.....	55
A.1.1.1.-Classificació de la secció.....	55
A.1.1.2.-Resistència de la secció.....	55
A.1.2.-Càlcul a nivell de barra.....	56
A.1.2.1.-Resistència a compressió.....	56
A.1.2.2.-Càlcul resistència a compressió a vvinclament lateral.....	56
A.2.-Element biga biarticulada amb càrrega puntual al centre.....	57
A.2.1.-Càlcul a nivell de secció.....	58
A.2.1.1.-Classificació de la secció.....	58
A.2.1.2.-Resistència de la secció.....	58
A.2.2.-Càlcul a nivell de barra.....	59
A.2.2.1.-Càlcul del moment crític.....	59
A.2.2.2.-Càlcul del moment resistent a vinclament lateral.....	60
A.3.-Element biga biarticulada amb càrrega puntual al centre.....	61
A.3.1.-Càlcul a nivell de secció.....	61
A.3.1.1.-Classificació de la secció.....	61
A.3.1.2.-Resistència de la secció.....	62
A.3.2.-Càlcul a nivell de barra.....	63
A.3.2.1.-Càlcul del moment crític.....	63
A.3.2.2.-Càlcul del moment resistent a vinclament lateral.....	63
ANNEX B.-COMPROVACIÓ DE LES CÀRREGUES MÀXIMES DELS ELEMNTS DEL PÒRTIC.....	65
B.1.-Pilar	65
B.1.1.-Vinclament per flexió.....	68
B.1.2.-Vinclament lateral.....	70
B.1.3.-Comprovació de les barres considerant vinclament lateral.....	71
B.1.-Jàssera.....	72
B.1.1.-Vinclament per flexió.....	75

B.1.2.-Vinclament lateral.....	77
B.1.3.-Comprovació de les barres considerant vinclament lateral.....	78

1.- INTRODUCCIÓ.

1.1.- Antecedents.

L'acer és un dels materials més destacats dins l'àmbit estructural degut, en gran part, a la seva elevada capacitat tensional, tant en tracció com en compressió. Aquesta capacitat permet crear estructures lleugeres i cobrir grans llums i espais diàfans.

En pòrtics de nusos rígids d'una nau industrial és habitual l'ús de perfils oberts en doble T. Aquests perfils presenten una baixa rigidesa a torsió i flexió lateral, fet que els fa més propensos a patir inestabilitat quan es produeix compressió en una de les seves ales en flexió, fenomen que es coneix com a vinclament lateral. Per aquest motiu, el càlcul en efectes de 2n ordre adquireix una importància més rellevant a l'hora de dimensionar els elements estructurals.

Un altre punt important és que els elements estructurals estan units entre ells, no treballen de manera individual, fet que comporta un estudi més complex a l'hora de determinar les condicions de contorn de cada element.

2.- Objectius

L'objectiu de l'estudi consisteix en comparar els resultats, mitjançant el mètode convencional i per l'anàlisi d'elements finits, del comportament a flexió de la jàssera sota la influència del travat per part de les corretges, és a dir, considerant-les un element estabilitzador en la totalitat del pòrtic.

3.- Abast i especificacions

Primerament, es comparen els resultats dels càlculs obtinguts pel mètode convencional i per elements finits de tres elements senzills. Aquest primer pas ens servirà per adquirir coneixement i verificar el procediment per càlcul d'elements finits amb el software d'estructures SAP2000.

Seguidament, ja amb l'intenció de comprovar anàlisis amb elements estructurals més complexes, s'ha fet un muntatge d'una jàssera amb una corretja per tal d'obtenir una idea del comportament d'aquest conjunt, dins unes condicions de contorn aproximades al comportament en consonància amb els elements del conjunt del pòrtic.

Finalment, s'ha creat un pòrtic amb elements finits i amb vuit corretges unides a les jàsseres. Els límits de càrrega obtinguts d'aquest pòrtic s'han comparat amb els càlculs analítics extrets d'un pòrtic exactament igual però sense tenir en compte les corretges com a element de travat. Paral·lelament també s'ha comparat els límits de càrrega obtinguts del pòrtic sense corretges amb els corresponents càlculs analítics amb l'objectiu de determinar la credibilitat dels resultats obtinguts dels anàlisis d'elements finits del pòrtic amb corretges.

2.- ANÀLISI D'ELEMENTS ESTRUCTURALS SENZILLS

L'objectiu d'aquest apartat és analitzar i valorar l'efecte del vinclament lateral de tres elements estructurals senzills sotmesos a diferents condicions de contorn. La finalitat d'aquest, consisteix en obtenir la corba del comportament no lineal dels perfils sota una càrrega que es va incrementant fins el col·lapse de l'element.

Per dur a terme l'objectiu d'aquest apartat s'ha utilitzat un anàlisi per elements finits dels elements biga, amb una càrrega aplicada a l'element i una càrrega lateral equivalent a la imperfecció de la barra.

Els resultats obtinguts mitjançant la interpretació de les gràfiques es compararan amb els resultats calculats a l'Annex A adquirits seguint el codi tècnic CTE-DB-SE-A. Així, es podrà determinar un patró d'interpretació dels resultats de les gràfiques per a poder realitzar anàlisis d'estructures més complexes que no tenen una definició clara de les condicions de contorn al codi tècnic.

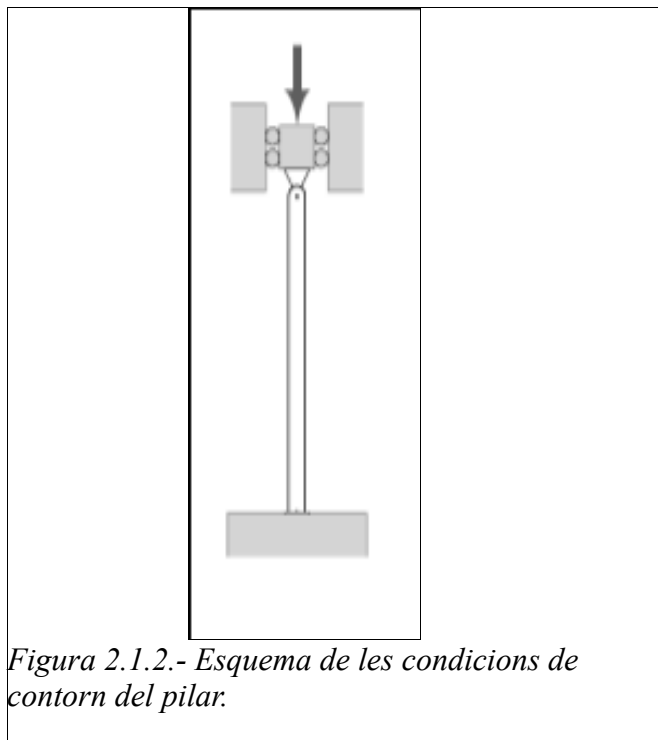


Figura 2.1.2.- Esquema de les condicions de contorn del pilar.

2.1.-Pilar encastat a la base i articulat a l'extrem, sotmès a una càrrega puntual a compressió.

Aquest primer apartat té com a finalitat estudiar la inestabilitat en un pilar encastat a la base i articulat a l'extrem. Es considerarà com a càrrega de vinclament la intersecció entre les tangents a la zona elàstica i la zona elastoplàstica, amb un increment de la càrrega pràcticament nul amb el desplaçament incremental.

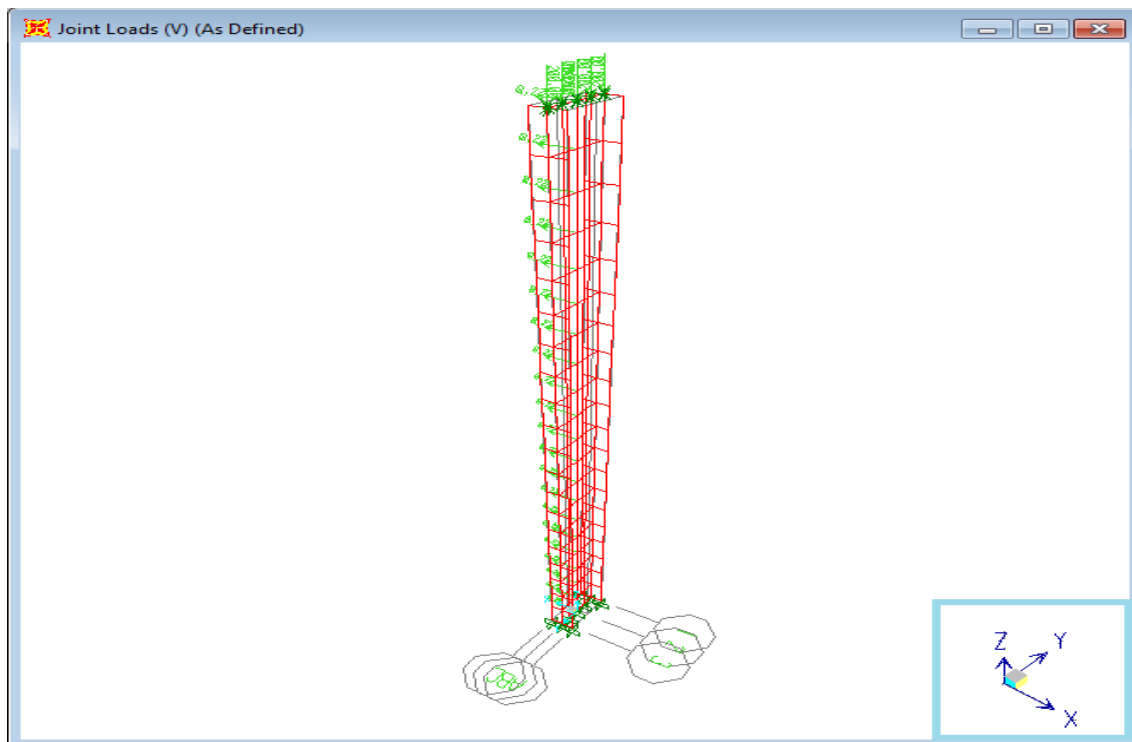


Figura 2.1.1.-Malla element pilar.

El pilar analitzat té l'extrem inferior encastat amb tots els graus de llibertat, tant els translacionals com els de gir, restringits en la direcció de tots tres eixos. En canvi, a l'extrem superior, només s'ha restringit el desplaçament en X i en Y, deixant lliures la resta de graus de llibertat.

En aquest extrem, el superior, s'ha aplicat una càrrega unitària vertical a compressió en direcció l'eix Z i, consegüentment, considerant la imperfecció de la barra per a poder fer el càlcul a 2n ordre, s'ha aplicat una càrrega distribuïda q' a l'eix longitudinal del pilar que passa pel centre de l'ànima, en direcció a l'eix X.

El valor de la càrrega q' s'ha definit mitjançant el valor obtingut de la imperfecció (especificat a l'article 5.4.1. del codi CTE-DB-SE-A) i segons les característiques geomètriques del perfil de la

barra.

Per a poder determinar el valor màxim de la càrrega que pot resistir el pilar a nivell de 2n ordre, s'ha aplicat una càrrega unitària amb el valor de 1 KN a l'extrem superior, i per considerar la imperfecció de la barra s'ha aplicat la càrrega distribuïda q' proporcional a la càrrega que s'aplica a compressió.

El valor de q' , s'ha trobat mitjançant les següents fórmules:

$$M = (q' x l^2) / 8$$

$$M_{max} = N d x e$$

$$M_{max} = M$$

$$q' = (8 x N x e) / L^2$$

$$q' = 8 N / m$$

$N_d = 1$ KN (càrrega de disseny)

$L = 5000$ mm

$e/L = 1/200$ (coeficient determinat pel grau d'imperfecció)

M (Moment màxim que genera la càrrega distribuïda equivalent)

M_{max} (Moment màxim que genera el producte de la càrrega axial a compressió amb la fletxa de la barra definida per la imperfecció).

El moment màxim que pot crear la càrrega axial degut a la deformació inicial de la barra s'igualava a la càrrega equivalent lateral que s'aplica a l'element. Consegüentment només queda una variable a l'equació, i aïllant-la s'ha obtingut el valor q' .

El valor q' que s'ha aplicat, considerant una càrrega N de 1 KN, és de 8 N/m.

Tal i com es veu a la fórmula per obtenir q' , q' depèn de N , amb la qual cosa quan es fa l'anàlisi per obtenir la resistència límit del pilar, q' incrementa proporcionalment amb el valor N .

Amb la intenció de contenir totes les dades necessàries per a poder dur a terme l'anàlisi mitjançant el software de SAP2000, s'ha creat la taula 2.2.1. on s'hi esmenta de forma detallada el

tipus d'anàlisi que s'ha dut a terme, amb les condicions de contorn de l'element i les propietats, tant geomètriques com mecàniques, del pilar.

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperficcions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE400	
	superior	inferior	Longitud= 5000 mm	$W_{pl,y}=1,307 \times 10^6 \text{ mm}^3$
ux	Restringit	Restringit	$I_y=2,3130 \times 10^8 \text{ mm}^4$	$W_{pl,z}=2,29 \times 10^5 \text{ mm}^3$
uy	Restringit	Restringit	$A= 8,45 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$I_t=5,108 \times 10^5 \text{ mm}^4$
uz	No restringit	Restringit	$h=400 \text{ mm}$	$I_w=4,9 \times 10^{11} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	Restringit	$b=180 \text{ mm}$	$I_x=1,32 \times 10^7 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	Restringit	$e=8,6 \text{ mm}$	$I_y=2,3130 \times 10^8 \text{ mm}^4$
θ_z	No restringit	Restringit	$e_1=13,5 \text{ mm}$	
Dades del material				
$E=210000 \text{ MPa}$		$f_y=275 \text{ MPa}$		$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 2.1.1.-Propietats de l'element analitzat.

Amb l'objectiu de determinar la càrrega màxima admissible del pilar s'ha representat amb el programa de càlcul d'elements finits les següents gràfiques:

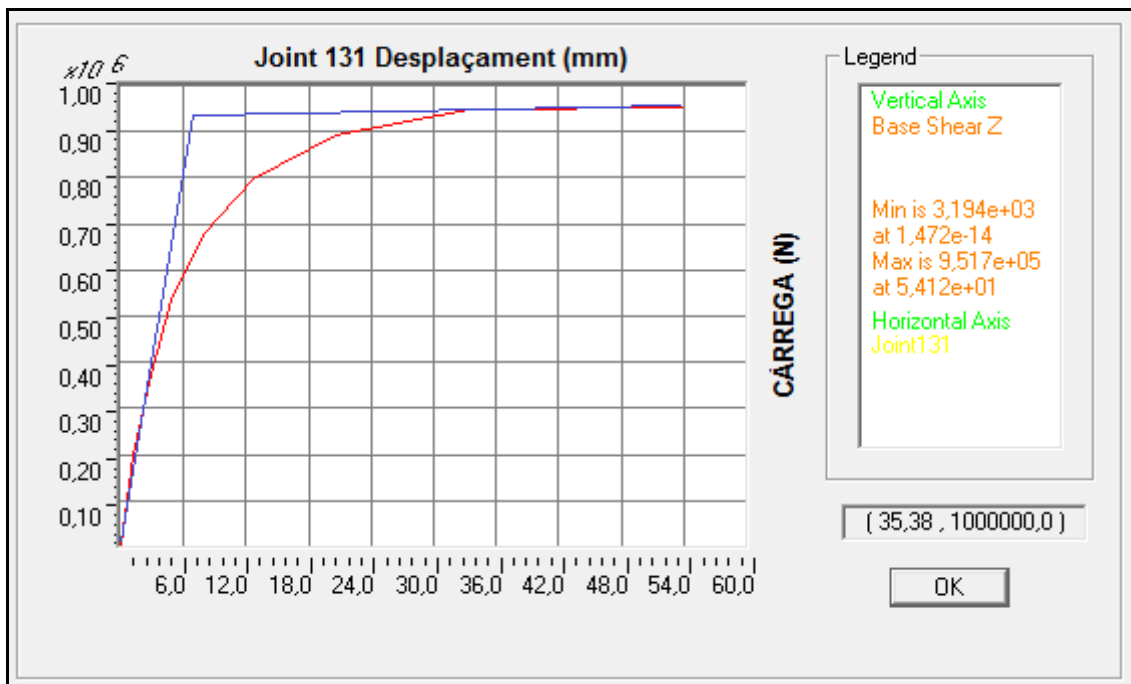


Figura 2.1.3.-Gràfica desplaçament-Càrrega

La gràfica de la figura 2.1.3. mostra el desplaçament del node 131 del pilar en l'eix X en funció de la càrrega axial a compressió aplicada en direcció a l'eix Z.

Per a mesurar la deformació del pilar s'ha seleccionat un node de la malla que pertany a la secció del perfil que pateix més deformació. Aquesta secció es considera que està situada a una distància $0,7 \cdot L$ respecte l'extrem encastat, considerant L com la longitud total del pilar.

Per a dur a terme l'anàlisi, primerament, s'ha sotmès l'element a una càrrega axial a compressió a l'extrem articulat, juntament amb una càrrega distribuïda equivalent a la imperfecció de la biga aplicada longitudinalment en direcció l'eix X.

S'ha utilitzat un anàlisi no lineal per desplaçament controlat amb efecte P-delta. Aquest mètode consisteix en determinar el desplaçament del node que controlem. És a dir, s'ha imposat un desplaçament que ha permès la convergència de l'anàlisi encara que pugui disminuir la càrrega resistent. Aquest mètode, com un anàlisi de 2n ordre, proporciona una càrrega d'inestabilitat.

A la figura 2.1.3. es pot observar com el model comença a comportar-se de forma no lineal quan la càrrega aplicada a compressió pren un valor de 400 KN. Dels 400 KN als 960 KN la no-linealitat del material es va accentuant progressivament fins arribar als 960 KN, punt del límit elàstic del material.

Per tal d'obtenir un valor de força axial límit a compressió s'ha traçat dues rectes tangents a la corba de vinclament i s'ha considerat 940 KN com a càrrega límit.

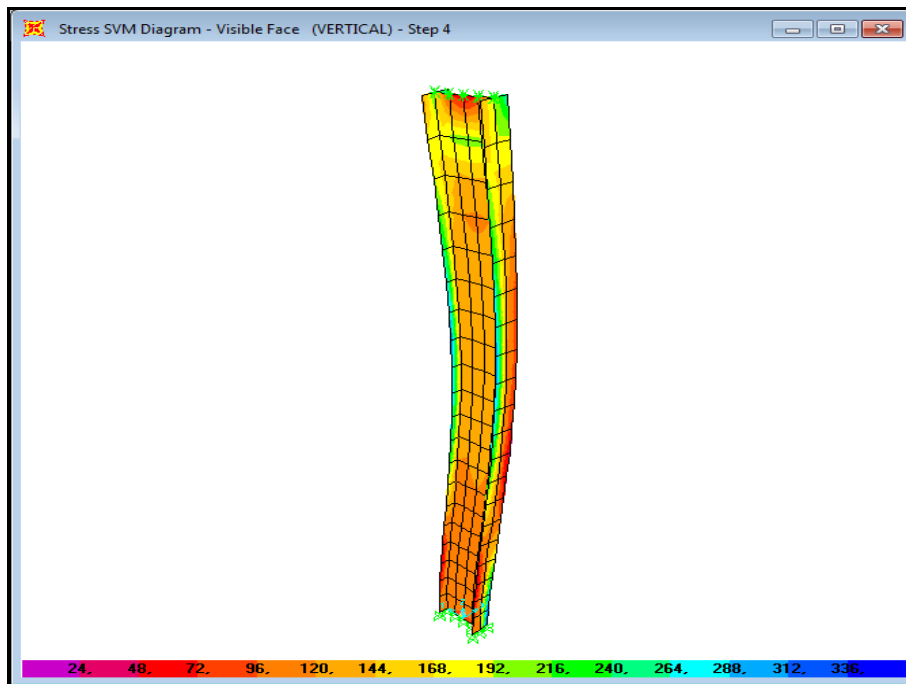


Figura 2.1.4.-Estat tensional de la malla sota la càrrega límit.

En l'anàlisi de l'element a nivell tensional es distingeix en claredat que els elements més sotmesos són els que es troben a la zona comprimida de les ales de la biga a l'alçada de $0,7 \cdot L$.

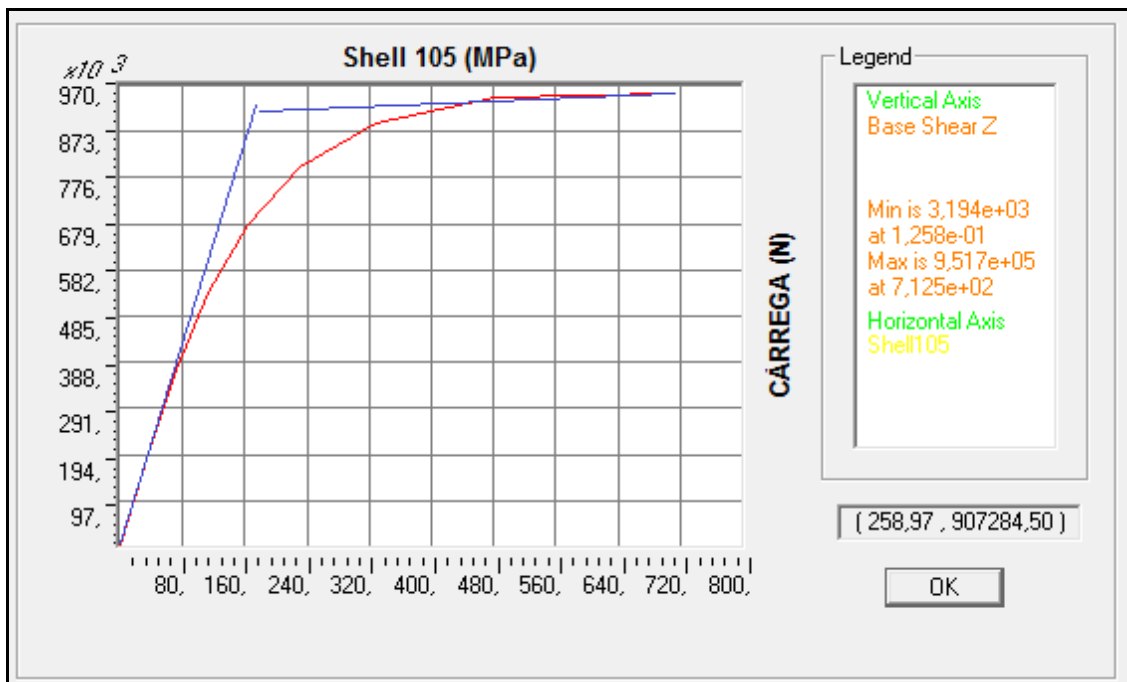


Figura 2.1.5.-Gràfica de la tensió de Von Mises en funció de la càrrega axial aplicada a l'element.

La gràfica de la figura 2.1.5. correspon a la representació gràfica de la tensió de Von Mises de l'element més sol·licitat del model en funció de la càrrega axial aplicada a l'extrem articulat.

Com es pot veure a la gràfica, tenint en compte el valor de 940 KN que hem obtingut a la figura 2.1.5., la tensió de Von Mises de l'element més sol·licitat és de 400 MPa. Aquesta dada és poc fiable ja que no s'ha tingut en compte la no-linealitat del material. Tot i així, la diferència amb la càrrega quan comença a plastificar no és molt significativa.

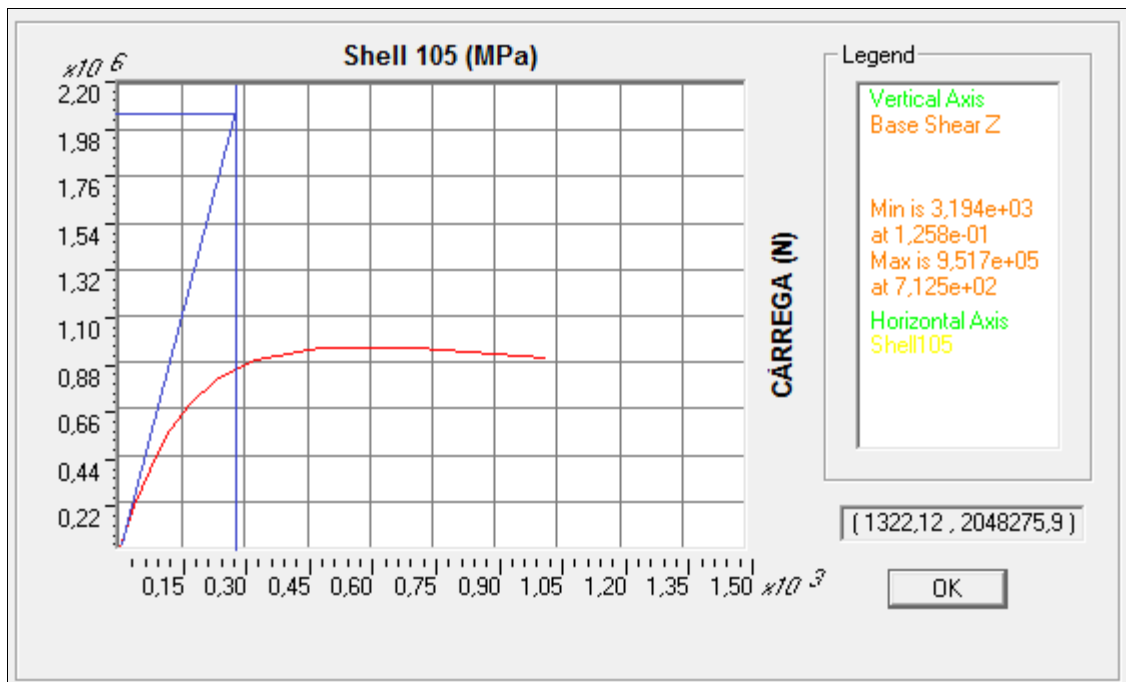


Figura 2.1.6.- Gràfica Tensió Von Misses- Càrrega aplicada

La figura 2.1.6., representa la tensió de Von Mises (abscisses) en front a la força de compressió (ordenades). Com es pot veure a la gràfica s'ha prolongat la recta del comportament elàstic i lineal (zona inicial de la corba on els efectes de segon ordre no son significatius) fins a creuar-se amb la vertical corresponent a la tensió de límit de fluència del material. Es pot comprovar que la càrrega obtinguda és aproximadament igual al producte de la secció transversal i la tensió de límit elàstic, cosa previsible en comportament lineal i elàstic. Alhora, la corba visualitza clarament la pèrdua de capacitat de la columna degut als efectes de segon ordre, podent apreciar que la resistència ha disminuït més del doble.

Finalment, la taula 2.1.2. compara els resultats obtinguts mitjançant el càlcul segons el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) i els resultats obtinguts a través de la interpretació de les gràfiques proporcionades mitjançant el programa d'elements finits.

	MÈTODE CONVENCIONAL(CTE-DB-SE-A)	MÈTODE ELEMENTS FINITS (interpretació gràfiques)	% Diferencial
	Límit inestabilitat per pandeig	Límit inestabilitat per pandeig	
Càrrega (KN)	1283	940	36,00%

Taula 2.1.2.-Taula comparativa dels resultats mitjançant el càlcul pel mètode convencional i la interpretació de la gràfica.

2.2.-Biga biarticulada amb càrrega puntual al centre.

En aquest apartat s'ha tractat una biga doblement recolzada sotmesa a una càrrega puntual aplicada al seu centre. A la Figura 2.3. es pot observar un esquema de les condicions de contorn de l'element analitzat.

El desenvolupament d'aquest anàlisi consistirà en una biga d'una longitud de 5 metres, amb els dos extrems restringits segons les condicions de contorn corresponents a una articulació que proporciona llibertat de gir en tots els tres eixos. Però, en quant a les restriccions translacionals, s'ha restringit el desplaçament en direcció a l'eix Z i en direcció a l'eix Y.

El perfil de la barra correspon a un IPE400. Més endavant, a la taula 2.2.1., s'especifiquen les propietats geomètriques i materials de la biga.

$L = 5000 \text{ mm}$

$F =$ Força aplicada al centre de la biga.

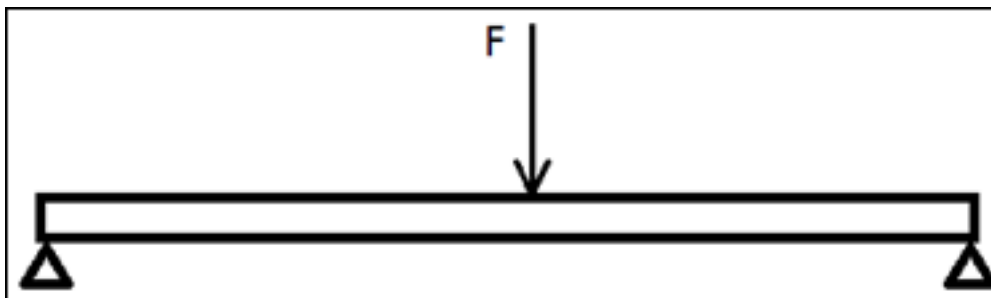


Figura 2.2.-Esquema de les condicions de contorn.

L'objectiu principal és esbrinar quina càrrega F màxima pot suportar la biga considerant les condicions de contorn de la figura 2.2.

El fet de tenir unes condicions de contorn juntament amb una càrrega concreta i clarament definida, proporciona un tipus d'anàlisi molt acurat a l'hora d'avaluar analíticament. És a dir, les diferents constants i variables que depenen de la interpretació de l'element quan està sotmès a càrregues i el fet de tenir unes condicions de contorn concretes permetrà obtenir uns resultats molt precisos.

Per a dur a terme l'anàlisi de 2n ordre que es busca, s'aplicarà una força puntual en direcció a l'eix Z, que provoca un moment flector. Conseqüentment, l'ala superior de la biga queda en estat de

compressió, fet que provoca la inestabilitat lateral.

Per aconseguir que la barra pateixi l'estat d'imperfeció s'ha aplicat una càrrega equivalent i incremental, juntament amb la força F aplicada.

El valor de la càrrega equivalent a la imperfeció ve determinat per la normativa (CT_DB_SE_A).

$$M = (P \times L) / 4$$

$$N = (0,85 \times M) / h$$

$$q' = (8 \times N \times e) / L^2$$

P= 1 KN.

H= 400 mm (alçada del perfil de la biga)

L= 5000 mm (longitud de la biga)

e/L= 1/200 (valor d'imperfeció determinat per la normativa)

El resultat de q' dona una càrrega distribuïda en direcció a l'eix Y i aplicada al centre de l'ànima del perfil de :

q'= 5,3 N/m

El sistema de càrrega del cas ha consistit en fer una combinació de les dues forces, amb el valor calculat proporcionalment, d'una respecte l'altra, de manera que hem pogut mantenir la proporcionalitat que ens determina la norma entre els dos valors i l'increment constant.

Amb aquesta combinació de càrregues i el tipus d'anàlisi que s'ha dut a terme, un anàlisi no lineal amb efecte P-delta, s'ha pogut obtenir les gràfiques que es mostraran a continuació.

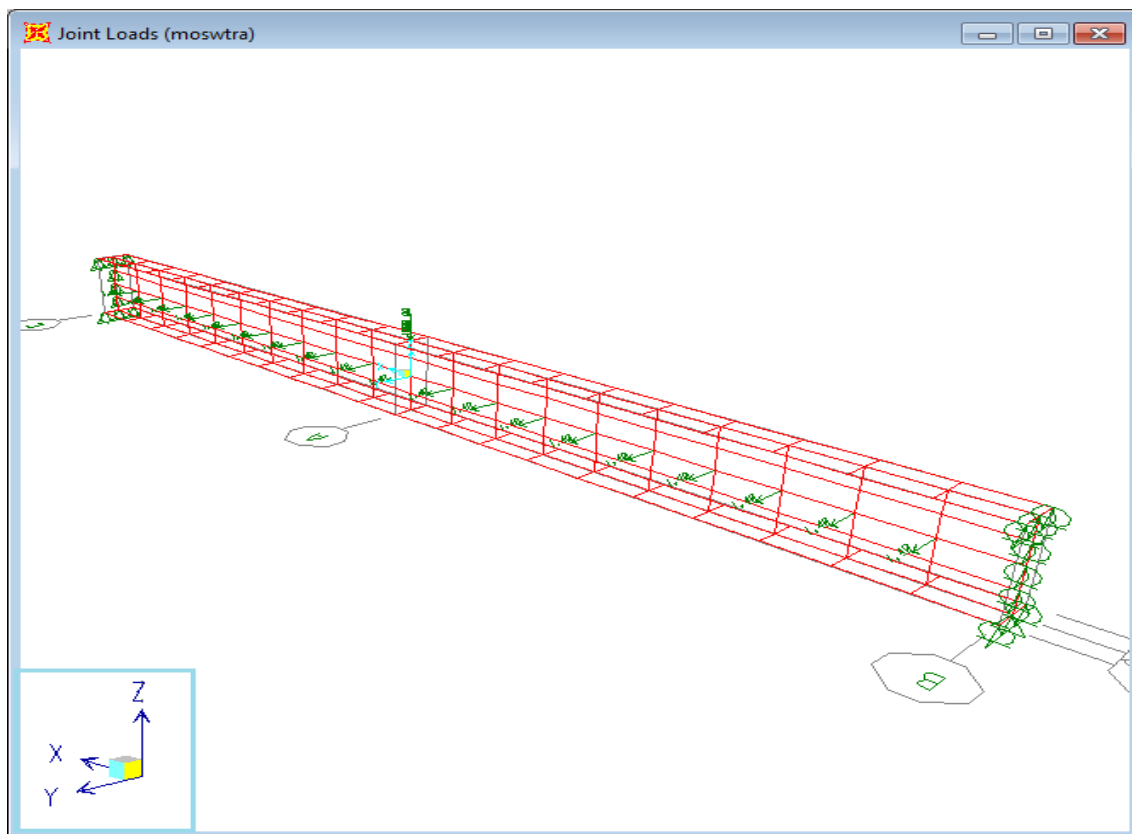


Figura 2.2.1.-Malla de l'element biga IPE400.

Tal com es pot veure a l'imatge de la figura 2.2.1., la càrrega distribuïda equivalent a la imperfecció s'ha repartit equitativament en els nodes que pertanyen a l'eix longitudinal X de la biga que coincideix amb el centre de l'ànima. Per altra banda, la càrrega puntual s'ha aplicat al centre de l'ala superior de la secció central de la barra.

A continuació es detallen les especificacions utilitzades per l'anàlisi del model:

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperfeccions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE400	
	esquerra	dreta	Longitud=5000 mm	$W_{pl,y}=1,307 \times 10^6 \text{mm}^3$
ux	No restringit	No restringit	$I_y=2,3128 \times 10^8 \text{mm}^4$	$W_{pl,z}=2,29 \times 10^5 \text{mm}^3$

uy	Restringit	Restringit	$A= 8,447 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$I_t=5,108 \times 10^5 \text{ mm}^4$
uz	Restringit	Restringit	$h=400 \text{ mm}$	$I_w=4,9 \times 10^{11} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	No restringit	$b=180 \text{ mm}$	$I_z=1,317 \times 10^7 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	No restringit	$e=8,6 \text{ mm}$	$E=2,1 \times 10^5 \text{ MPa}$
θ_z	No restringit	No restringit	$e_1=13,5 \text{ mm}$	$G=80769 \text{ MPa}$
Dades del material				
E=210000 MPa		$f_y=275 \text{ MPa}$		$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 2.2.1.-Taula amb les propietats de l'element analitzat.

Amb l'objectiu de determinar la càrrega màxima admissible de la biga s'ha representat amb el programa de càlcul d'elements finits les següents gràfiques:

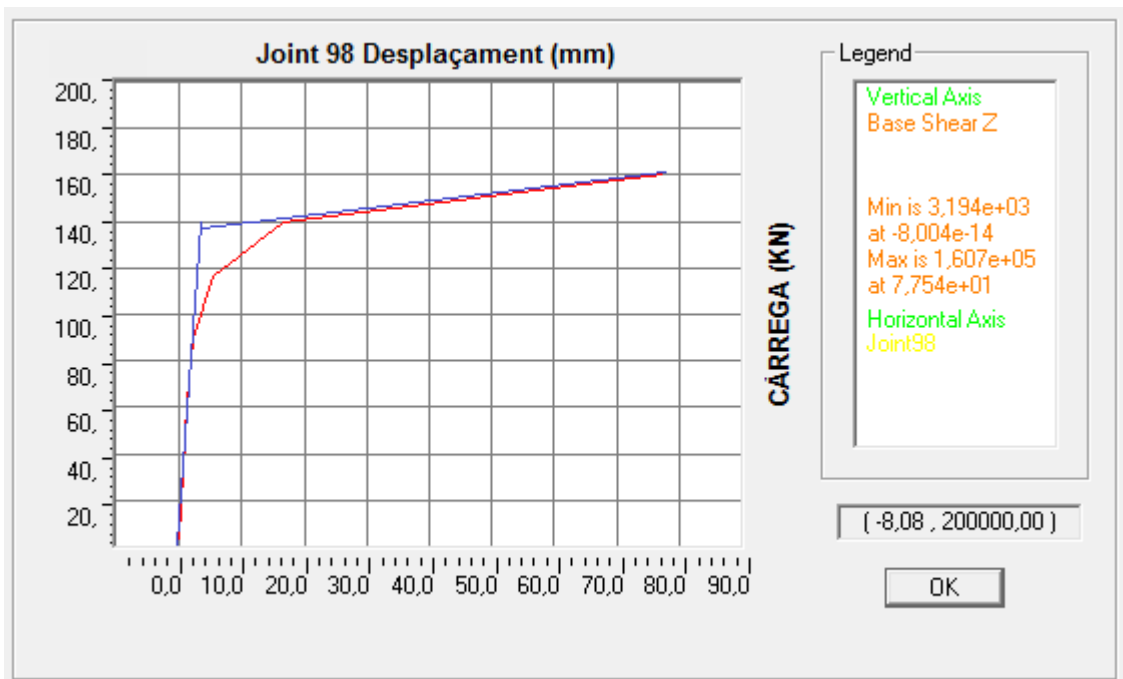


Figura 2.2.2.-Gràfica deformació-Càrrega.

La gràfica de la figura 2.2.2. mostra el desplaçament del node 97 en direcció l'eix Y, respecte la força puntual aplicada a l'ala superior en direcció l'eix Z. S'ha seleccionat aquest node perquè està situat a la zona on es crea més esforç tensional, tal com es pot observar a la figura 2.2.3. Aquest node es troba al cantell comprimit de l'ala superior de la secció central de la barra.

Per fer l'estudi gràfic s'ha utilitzat un anàlisi no lineal per desplaçament controlat amb efecte P-delta. Aquest mètode consisteix en determinar el desplaçament del node que controlem, és a dir, s'ha anat incrementant progressivament les càrregues aplicades fins aconseguir el

desplaçament requerit.

Com es pot apreciar a la gràfica de la figura 2.2.2., l'efecte no lineal de la corba comença a sorgir quan la càrrega vertical P obté el valor de 93 KN. La no-linealitat es va accentuant a mesura que augmenta la càrrega fins a obtenir el valor de 140 KN, on el material arriba al límit del comportament elàstic.

Per tal de determinar un valor com a càrrega màxima admissible, s'ha traçat dues rectes tangents a la corba d'inestabilització representada a la gràfica, i s'ha determinat la càrrega amb un valor de 136 KN.

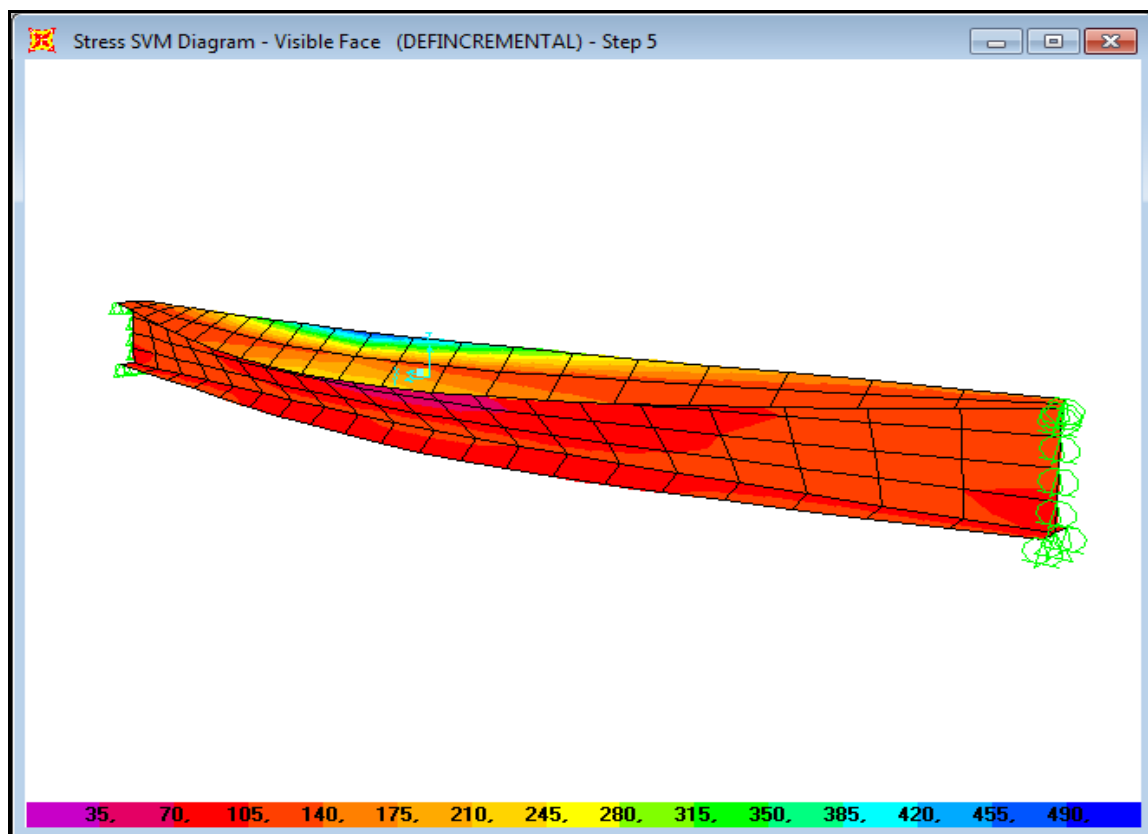


Figura 2.2.3.-Estat tensional de la malla sota la càrrega puntual.

La figura 2.2.3. correspon a la representació gràfica de la tensió de Von Mises de l'element més sol·licitat del model en funció de la càrrega puntual aplicada al centre de la biga.

Tal com es pot apreciar a la figura 2.2.3., els elements shell més sol·licitats són a l'ala superior del centre de la biga, concretament al costat on estan sotmeses a compressió.

Com es pot veure a la gràfica, el límit elàstic adquireix un límit de càrrega de 136 KN, molt pròxim a la càrrega determinada pel valor de tensió de l'element de la malla més sol·licitat acotat a 275 MPa, que dona una càrrega de 140 KN. Aquest valor és exactament el mateix que l'interpretat al de la gràfica del desplaçament del node 97, observat a la figura 2.2.2.

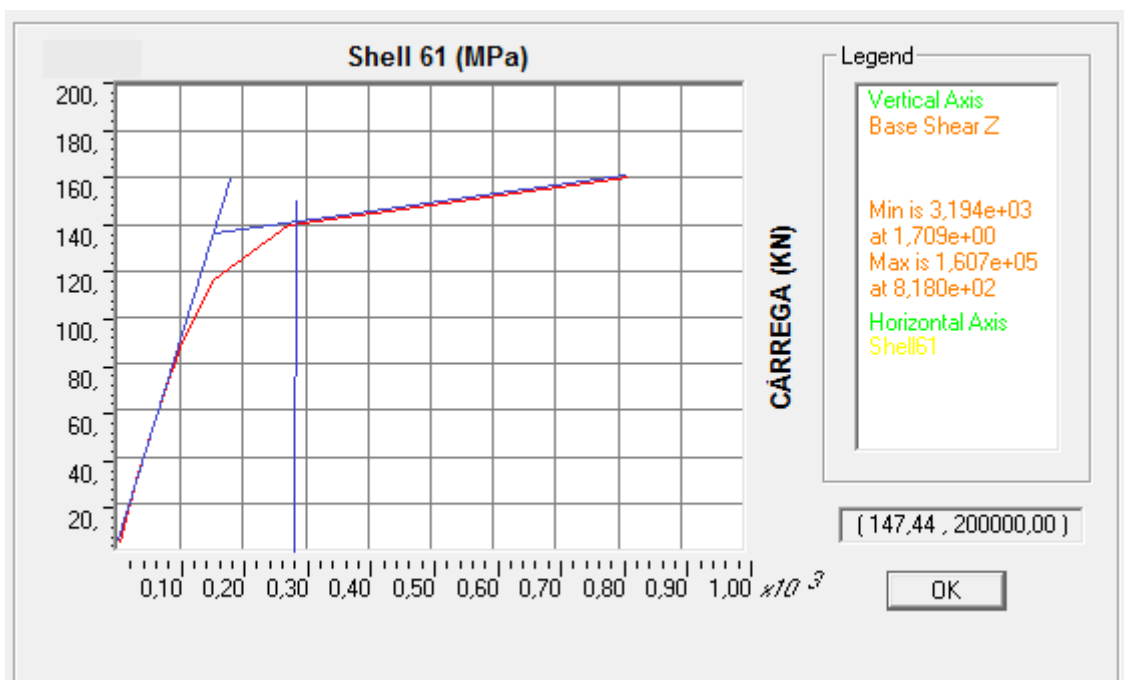


Figura 2.2.4.-Gràfica de la tensió de Von Mises en funció de la càrrega P.

L'element shell calculat adquireix una tensió de 275 MPa quan està sotmès a una càrrega de 140 KN.

Finalment, s'adjunten dues taules comparatives amb els resultats obtinguts mitjançant el càlcul segons el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) i els resultats obtinguts a través de la interpretació de les gràfiques proporcionades mitjançant el programa d'elements finits.

A la taula 2.2.2. es contrasta els valors del moment crític i de la càrrega crítica de l'element.

	MÈTODE CONVENCIONAL(CTE-DB-SE-A)	METODE ELEMENTS FINITS (interpretació gràfiques)
	Límit inestabilitat per vinclament lateral	Límit inestabilitat per vinclament lateral
M_{cr} (KN·m)	167,1	170
Càrrega_{cr} (KN)	133,68	136

Taula 2.2.2.-Taula comparativa dels resultats obtinguts seguint el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) amb els resultats interpretats de les gràfiques.

Per a l'obtenció dels moments crítics expressats a la taula s'ha aplicat l'equació 2.2.1., partint de la càrrega P.

$$M_{cr} = (P \times l) / 4 \quad (\text{Eq. 2.2.1.})$$

ESFORÇ	Percentatge diferencial
M_{cr} (KN·m)	1,70%
Càrrega_{cr} (KN)	1,70%

Taula 2.2.3.-Taula amb els percentatges diferencials entre els resultats obtinguts de les gràfiques i els analítics.

Els valors obtinguts, tant amb l'anàlisi seguint el codi tècnic com amb l'interpretat de la gràfica, tenen una diferència del 1,7 %. Fet que demostra l'aproximació ajustada entre el càlcul analític i l'element fet per elements finits.

2.3.-Biga biarticulada dels dos extrems amb càrrega distribuïda.

En aquest tercer apartat s'ha tractat una biga amb perfil IPE 400 doblement recolzada, sotmesa a una càrrega distribuïda al llarg d'aquesta.

A l'esquema de la figura 2.3. es pot veure l'estat de càrregues de l'element, juntament amb les condicions de contorn de la biga.

Més endavant, a la taula 2.3.1. s'especifiquen les característiques tècniques de la biga juntament amb les dades necessàries per a la seva creació en elements finits.

$L = 5000 \text{ mm}$

$Q = \text{càrrega total aplicada a la biga.}$

$q = \text{càrrega unitària aplicada.}$

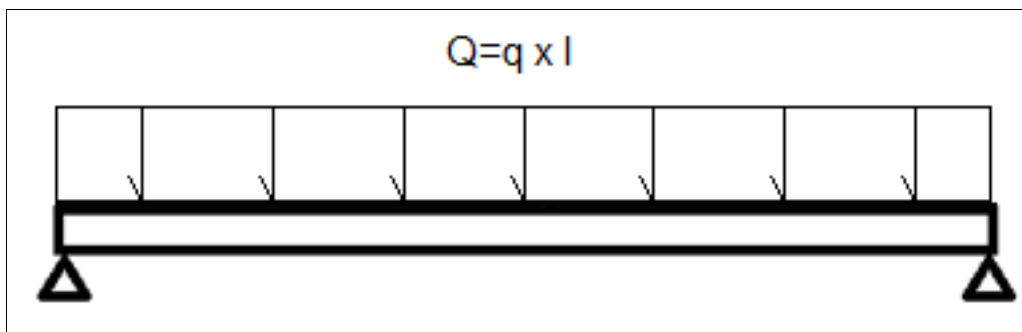


Figura 2.3.-Esquema de les condicions de contorn.

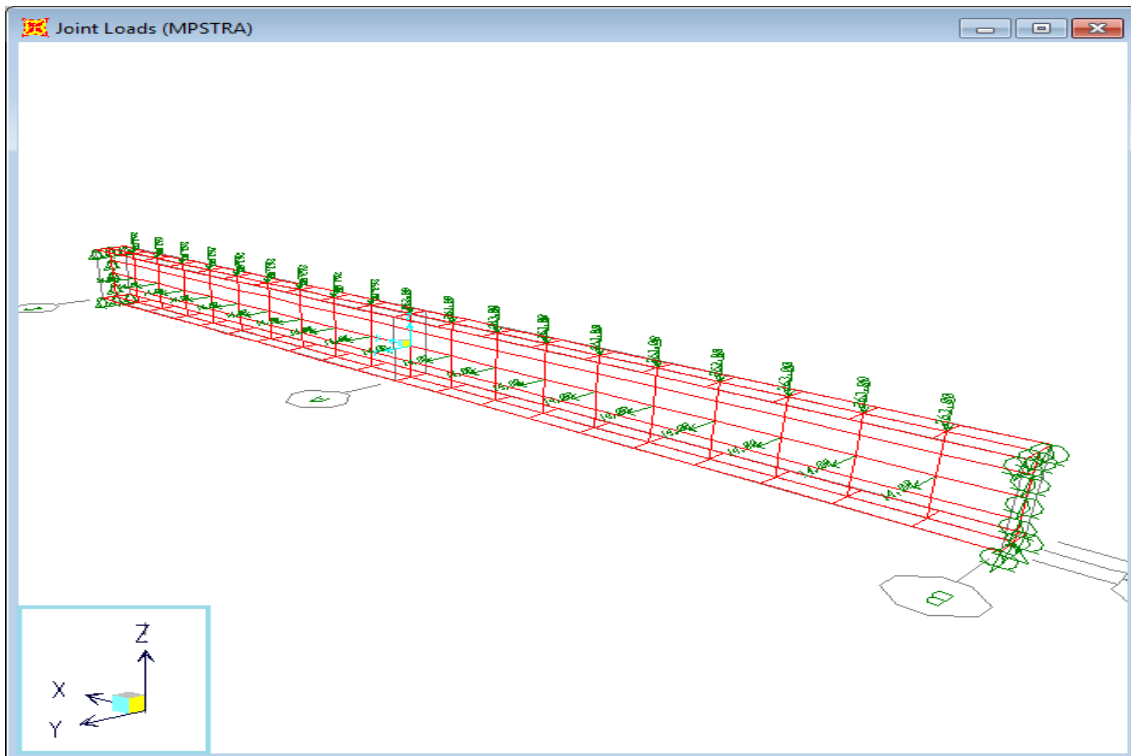


Figura 2.3.1.-Malla de l'element biga amb càrregues aplicades.

Per a fer l'anàlisi amb elements finits, tot considerant l'efecte de 2n ordre, s'ha aplicat una càrrega complementària a la Q inicial, amb l'objectiu de poder proporcionar a la malla unes condicions d'imperfeció geomètriques tal i com menciona la normativa.

El valor de la càrrega q' s'ha definit mitjançant el valor obtingut de la imperfeció (especificat a l'article 5.4.1. del codi CTE-DB-SE-A) i segons les característiques geomètriques del perfil de la barra. Aquesta càrrega s'ha aplicat longitudinalment al centre de l'ànima i en direcció l'eix Y.

A continuació es mostra els càlculs realitzats per a poder determinar la càrrega q' equivalent a la imperfeció:

$$M = 1/8 \times q \times L^2 \quad (\text{Eq.2.3.1.})$$

$$N = 0,85 \times M / h \quad (\text{Eq.2.3.2.})$$

A partir de l'equació 2.3.1. d'on s'obté el moment de la barra amb càrrega distribuïda longitudinalment, i l'equació 2.3.2. per obtenir l'esforç N es pot trobar el valor de la càrrega q' aplicant l'equació 2.3.3.

$$q' = (8 \times N \times e) / L^2 \tag{Eq.2.3.3.}$$

h= 400 mm (alçada del perfil de la biga)

L= 5000 mm (longitud de la biga)

e/L= 1/200 (valor d'imperfeció determinat per la normativa)

El resultat dona una càrrega distribuïda en direcció l'eix Y de 53 N/m.

q'= 53 N/m

Al ser un model creat mitjançant malles, s'ha valorat el fet d'aplicar aquestes càrregues als nodes corresponents als eixos longitudinals. Per tant s'ha dividit l'esforç actuant pel número de nodes que determinen l'eix.

A més a més de les càrregues definides, s'ha tingut en consideració les condicions de contorn que surten expressades a la taula 2.3.1., juntament amb les dimensions i propietats del material del perfil de la biga que s'analitza.

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperfecions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE400	
	superior	inferior	Longitud=5000 mm	$W_{pl,y}=1,307 \times 10^6 \text{mm}^3$
ux	No restringit	No restringit	$I_y=2,3128 \times 10^8 \text{mm}^4$	$W_{pl,z}=2,29 \times 10^5 \text{mm}^3$
uy	No restringit	No restringit	$A= 8,447 \times 10^3 \text{mm}^2$	$I_t=5,108 \times 10^5 \text{mm}^4$
uz	Restringit	Restringit	h=400 mm	$I_w=4,9 \times 10^{11} \text{mm}^6$
θ_x	No restringit	No restringit	b=180 mm	$I_z=1,317 \times 10^7 \text{mm}^4$
θ_y	No restringit	No restringit	e=8,6mm	E=2,1x10 ⁵ MPa
θ_z	No restringit	No restringit	e ₁ =13,5mm	G=80769 MPa
Dades del material				
E=210000MPa		f _y =275 MPa		f _u =410 MPa

Taula 2.3.1.-Taula amb les propietats de l'element analitzat.

Tal i com s'expressa a la taula 2.3.1., les condicions de contorn dels extrems de la biga són els equivalents a unes articulacions. Els nodes que componen els dos extrems estan restringits només en el desplaçament en direcció l'eix Z. Els graus de llibertat corresponents al gir no estan restringits, tenen total llibertat a patir deformacions angulars.

Amb l'objectiu de determinar la càrrega màxima admissible de la biga s'ha representat amb el programa de càlcul d'elements finits les següents gràfiques:

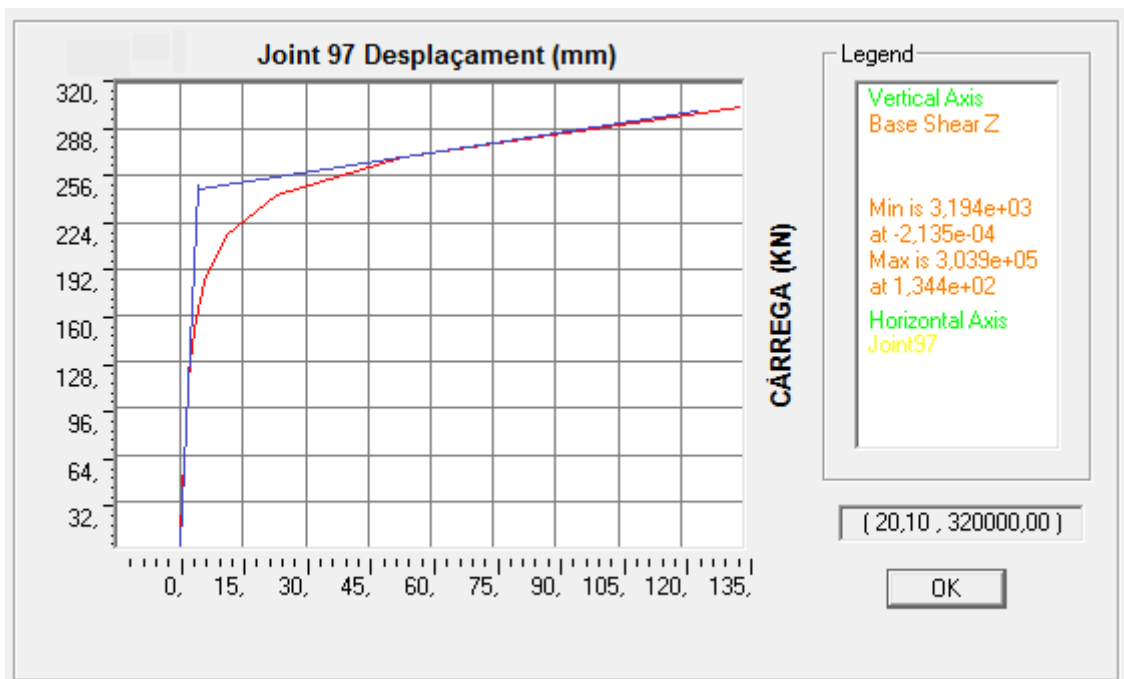


Figura 2.3.2.-Gràfica deformació-Càrrega Q del node 97.

La gràfica de la figura 2.3.2. mostra el desplaçament del node 97 en direcció l'eix Y, l'eix del pla d'inèrcia més dèbil de la biga, respecte la força de càrrega aplicada a l'ala superior en direcció l'eix Z. Aquest node es troba al cantell de l'ala superior sotmès a compressió de la secció del centre de la biga.

Per a dur a terme l'estudi s'ha utilitzat un anàlisi no lineal per desplaçament controlat amb efecte P-delta.

Aquest mètode consisteix en determinar un desplaçament en un punt de l'element, complementant una càrrega externa que va incrementant fins a adquirir l'ineestabilització del sòlid.

Com es pot apreciar a la gràfica de la figura 2.3.2., l'efecte d'ineestabilització comença a sorgir quan la càrrega vertical P obté el valor de 160 KN. La linealitat es perd exponencialment entre

l'interval de 160 kN i 260 kN. A partir del valor de 260 kN el model s'inestabilitza completament i tendeix a adquirir un comportament plàstic.

Per tal de determinar un valor com a càrrega màxima admissible, s'ha traçat dues rectes tangents a la corba d'inestabilització representada a la gràfica i s'ha determinat la càrrega amb un valor de 246 kN.

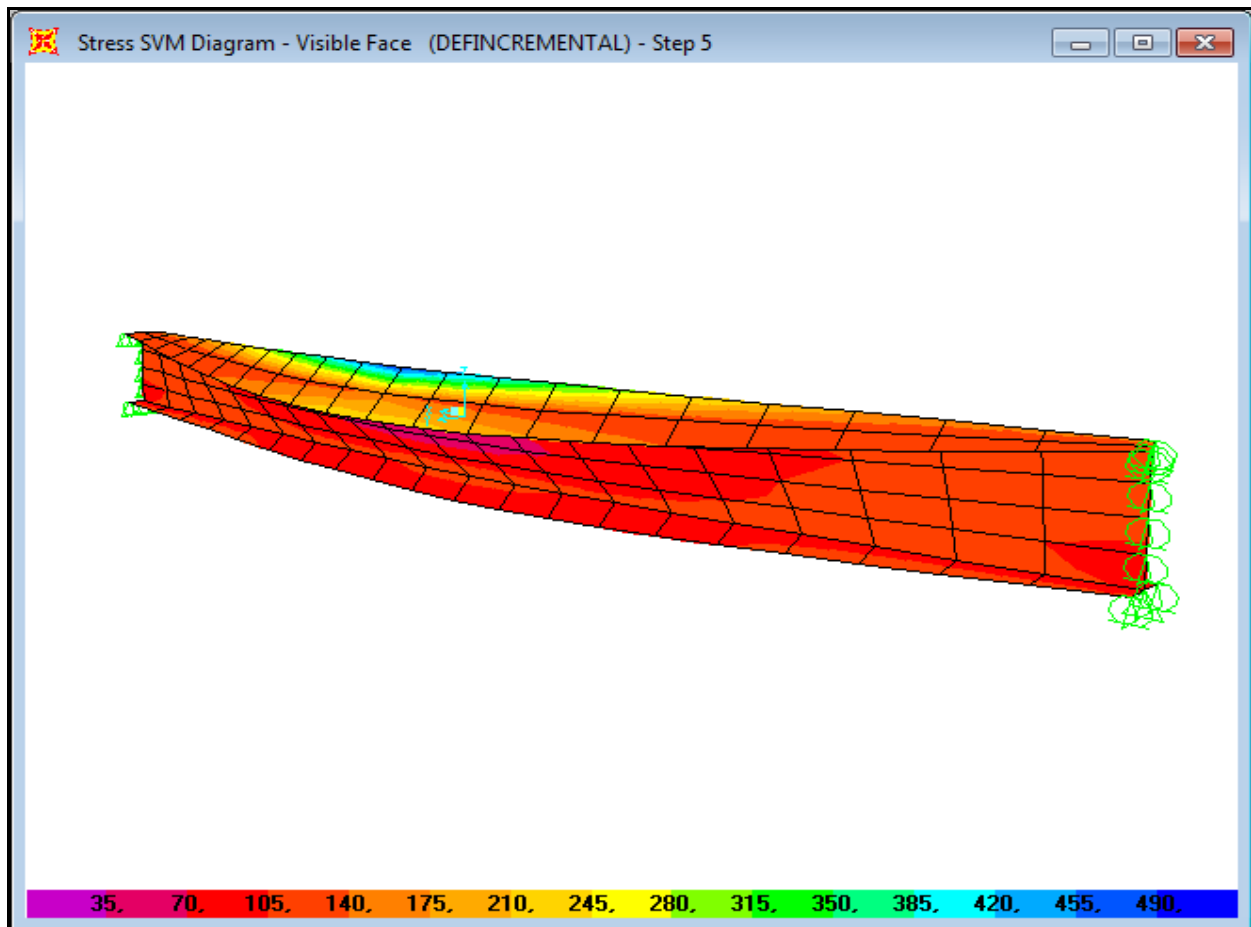


Figura 2.3.3.- Estat tensional de la malla sotmesa a les càrregues.

La figura 2.3.3. correspon a la representació gràfica de la tensió de Von Mises de l'element shell més sol·licitat del model en funció de la càrrega aplicada a la biga.

Com es pot apreciar els elements shell més sol·licitats són a l'ala superior del centre de la biga, concretament al costat on estan sotmesos a compressió. Aquesta observació ens proporciona una eina per determinar quin element shell és el més sol·licitat.

Com es pot veure a la gràfica de la figura 2.3.4., l'efecte d'inestabilització es manifesta quan hi ha

una càrrega de 246 KN, però, si ens fixem en la tensió de Von Misses, aquesta dona un valor de 360 MPa. Per altra banda, considerant el límit de fluència del material de 275 MPa, ens dona un valor acotat a 232 KN.

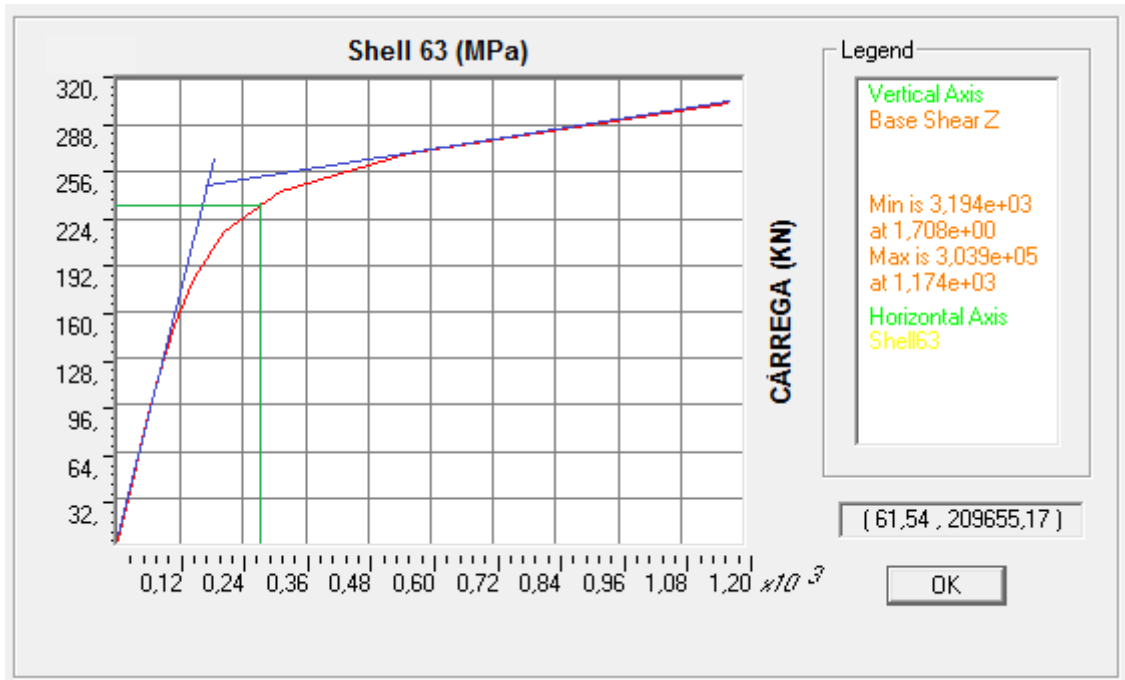


Figura 2.3.4.-Gràfica corba de vinclament tensió de Von Misses- Càrrega Q .

Un cop obtinguts els resultats interpretats de les gràfiques analitzades a la taula 2.3.2. s'ha fet una comparativa amb els resultats obtinguts mitjançant el càlcul segons el codi tècnic (CTE-DB-SE-A), adjunts a l'Annex A.

Els resultats expressats a la taula 2.3.2. representen el moment límit en què l'element pateix la inestabilització lateral. En el cas dels resultats interpretats de les gràfiques, la càrrega expressada és la total. Per a obtenir el moment s'ha aplicat l'equació 2.3.4.

Considerant :

$$q = P/l$$

$$M_b, R_d = (q \times l^2) / 8$$

(Eq. 2.3.4.)

	MÈTODE CONVENCIONAL(CTE-DB-SE-A)	MÈTODE ELEMENTS FINITS (interpretació gràfiques)
	Límit inestabilitat per vinclament lateral	Límit inestabilitat per vinclament lateral
M _{cr} (KN·m)	149,68	153
Càrrega _{cr} (KN)	239,5	246

Taula 2.3.2.-Taula comparativa dels resultats obtinguts seguint el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) amb els resultats interpretats de les gràfiques.

ESFORÇ	Percentatge diferencial
M _{cr} (KN·m)	2,06%
Càrrega _{cr} (KN)	2,70%

Taula 2.3.3.-Taula amb els percentatges diferencials entre els resultats obtinguts de les gràfiques i els analítics.

2.4.- Comparació dels resultats.

La comparació dels resultats, obtinguts en els càlculs mitjançant el mètode convencional i la interpretació de les gràfiques, mostra una diferència entre l'element pilar i els elements biga bastant considerable.

En el cas del pilar s'ha obtingut un valor de càrrega màxima un 36% inferior a l'obtingut mitjançant el càlcul convencional, cenyit al codi tècnic CTE-DB-SE-A. En canvi, en els dos casos de les bigues biarticulades la diferència és entre un 1,7% i un 2,7%.

El percentatge de diferència del pilar és molt elevat, la qual cosa li dona un caràcter conservador respecte el límit de càrrega de l'element. Tot i així, traçant una recta tangent al pendent inicial de la corba, tot considerant un comportament lineal del material, el valor obtingut en creuar-se amb l'abscissa acotada al límit de fluència del material, s'obté un valor molt pròxim al de la resistència última a esforç axial. Aquest fet dona a entendre el disseny correcte de l'element.

En canvi, els percentatges de diferència entre els diferents valors de càrrega màxima de les bigues biarticulades és mínim. Aquesta aproximació permetrà, més endavant, poder efectuar anàlisis més complexes i amb un marge d'error mínim. Aquest fet permetrà, més endavant, obtenir dades analítiques molt precises en l'anàlisi d'estructures més complexes.

Com que són elements simples en estat de càrregues clarament definits, no hi ha marge a l'hora d'interpretar les condicions de contorn. Per tant, aquestes interpretacions realitzades no poden tenir variacions molt remarcables ni influir considerablement amb els resultats.

3.- ANÀLISIS ESTRUCTURAL DE LES CORRETGES

En aquest capítol s'analitzarà el comportament dels elements simples tractats al capítol anterior amb unes condicions de travat concretes, amb l'objectiu d'adquirir dades suficients per a poder constatar si realment les corretges utilitzades poden arribar a influir de manera considerable davant la inestabilitat lateral de les jàsseres dels pòrtics de les naus industrials.

S'ha creat dos casos diferents per a l'obtenció dels resultats. El primer cas consistirà en una biga tipus malla amb un element frame que proporciona un punt de travat just al centre. El segon cas, en canvi, consistirà en fer un estudi d'un pòrtic creat amb elements finits amb corretges mitjançant el software SAP2000. Els resultats interpretats de les gràfiques es compararan amb els resultats obtinguts del càlcul analític del pòrtic amb l'objectiu de determinar el grau de travat que poden proporcionar les corretges a l'estructura.

3.1.-Jàssera amb una corretja com element de travat.

Aquest anàlisi consisteix en una biga IPE400 tipus malla amb un element biga unit perpendicularment a l'ala superior, just a la secció central de la biga.

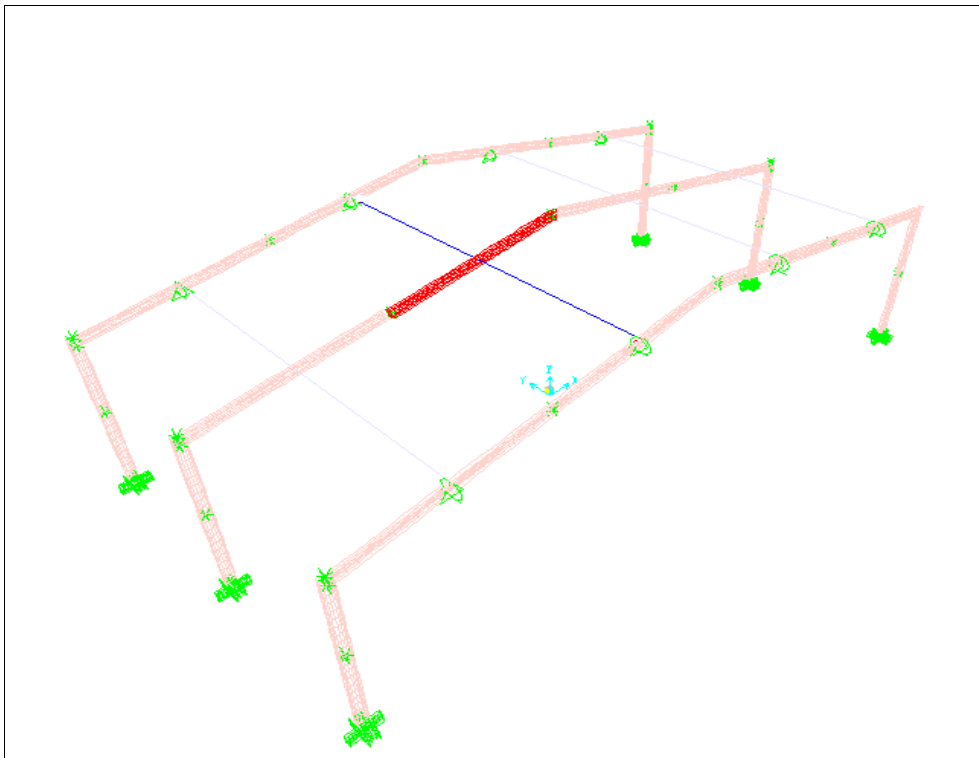


Figura 3.1.-Esquema dels elements analitzats dins l'estructura porticada.

L'objectiu principal d'aquest apartat és determinar el grau de travat que proporciona la corretja, en aquest cas, l'element frame de la figura 3.1.1. Però, el fet que a la normativa no es contempli cap metodologia per determinar el tipus de travat que proporciona sobre la jàssera, l'element mallat utilitzat en aquest estudi correspon en l'analitzat a l'apartat 2.3. del capítol 2 d'aquest projecte. La diferència amb aquest, és el fet que s'hi ha afegit una corretja. Així es podrà obtenir uns resultats bastant fiables del comportament de la jàssera amb la corretja.

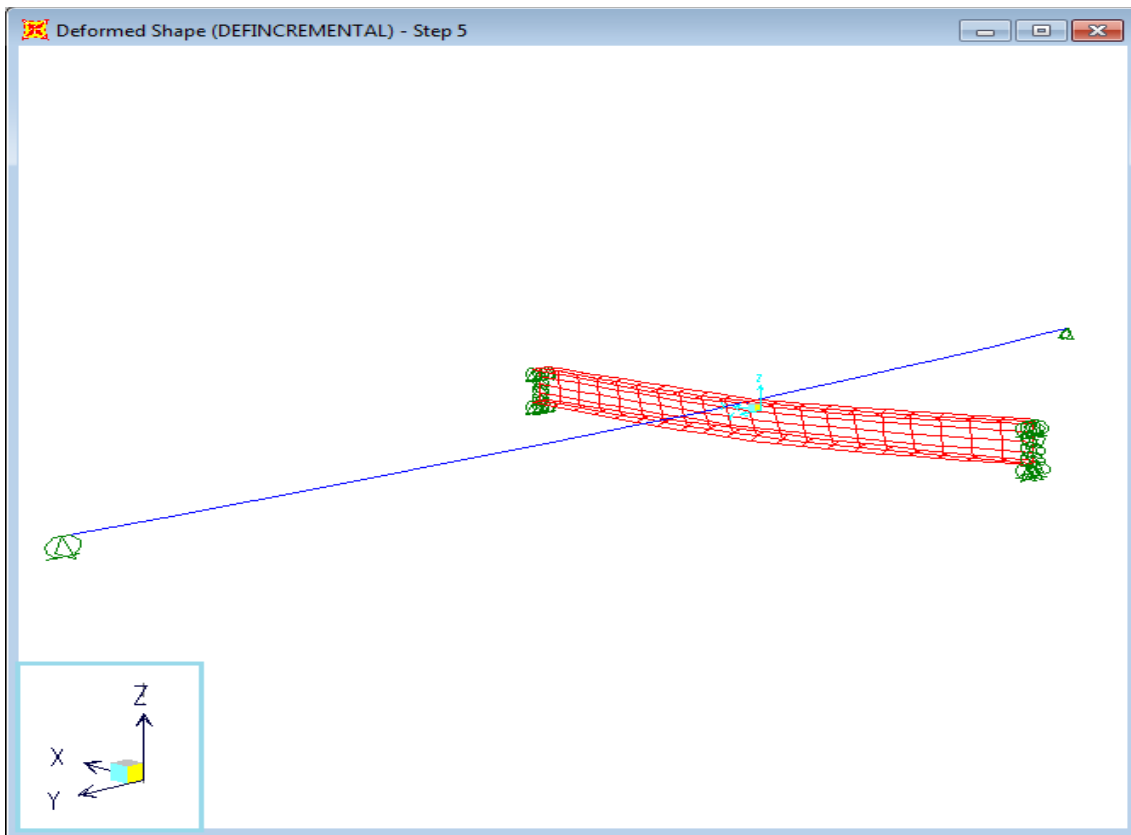


Figura 3.1.1.- Conjunt jàssera-corretja.

S'ha aplicat una càrrega unitària distribuïda a l'eix longitudinal de l'ala superior en direcció a l'eix Z i la càrrega equivalent d'imperfeció, $q=53$ N/m, descrita en l'apartat 2.3. del capítol 2. La càrrega Q unitària s'ha aplicat a la jàssera enlloc de a la corretja amb la intenció d'aproximar-se als càlculs convencionals que es basen en aplicar la càrrega de la coberta a la jàssera.

La unió entre la jàssera i la corretja consisteix en un tipus d'unió "Beam" dels tres nodes centrals de l'ala superior. Aquesta proporciona rigidesa contra la flexió als punts units, però no restringeix la translació ni el gir de l'element.

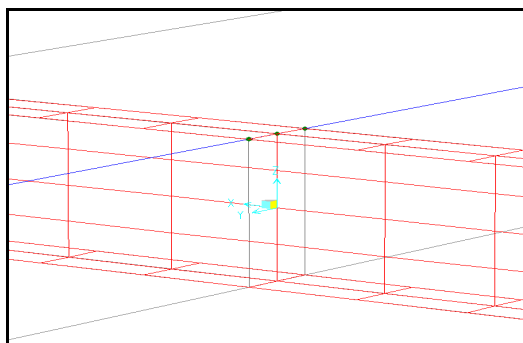


Figura 3.1.2.- Nodes de la unió entre els dos elements.

A continuació es detallen les especificacions utilitzades pel model:

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperficcions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE400	
	dreta	esquerra	Longitud= 5000 mm	$I_y=2,3130 \times 10^8 \text{ mm}^4$
ux	No restringit	No restringit	$A= 8,45 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$W_{pl,y}=1,307 \times 10^6 \text{ mm}^3$
uy	Restringit	Restringit	$h=400 \text{ mm}$	$I_t=5,108 \times 10^5 \text{ mm}^4$
uz	Restringit	Restringit	$b=180 \text{ mm}$	$I_w=4,9 \times 10^{11} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	No restringit	$e=8,6 \text{ mm}$	$I_z=1,32 \times 10^7 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	No restringit	$e_1=13,5 \text{ mm}$	$W_{pl,z}=2,29 \times 10^5 \text{ mm}^3$
θ_z	No restringit	No restringit		
Dades del material				
$E=210000 \text{ MPa}$			$f_y=275 \text{ MPa}$	$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 3.1.1.-Taula de les propietats del model amb elements finits.

CONDICIONS DEL MODEL TIPUS FRAME				
-Element utilitzat: frame				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE200	
	superior	inferior	Longitud= 12000 mm	$I_y=1,943 \times 10^7 \text{ mm}^4$
ux	Restringit	Restringit	$A= 2,848 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$W_{pl,y}=2,2064 \times 10^5 \text{ mm}^3$
uy	No restringit	No restringit	$h=200 \text{ mm}$	$I_t=6,98 \times 10^4 \text{ mm}^4$
uz	Restringit	Restringit	$b=100 \text{ mm}$	$I_w=1,299 \times 10^{10} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	No restringit	$e=5,6 \text{ mm}$	$I_z=1,32 \times 10^7 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	No restringit	$e_1=8,5 \text{ mm}$	$W_{pl,z}=4,461 \times 10^4 \text{ mm}^3$
θ_z	No restringit	No restringit		
Dades del material				
$E=210000 \text{ MPa}$			$f_y=275 \text{ MPa}$	$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 3.1.2.-Taula de les propietats del model tipus frame.

Amb l'objectiu de determinar la càrrega màxima del conjunt d'elements s'ha aplicat una càrrega distribuïda sobre l'ala de la jàssera i una altra càrrega equivalent a la imperfecció de la barra just al centre de l'ànima en direcció a l'eix Y. Les condicions, tant de càrrega com de contorn, són les mateixes que les de l'element simple descrit a l'apartat 2.3. del capítol 2 del projecte.

A la gràfica de la figura 3.1.3. es pot observar el desplaçament del node 98 en direcció l'eix Y, respecte la càrrega distribuïda Q aplicada longitudinalment al centre de l'ala superior de la jàssera.

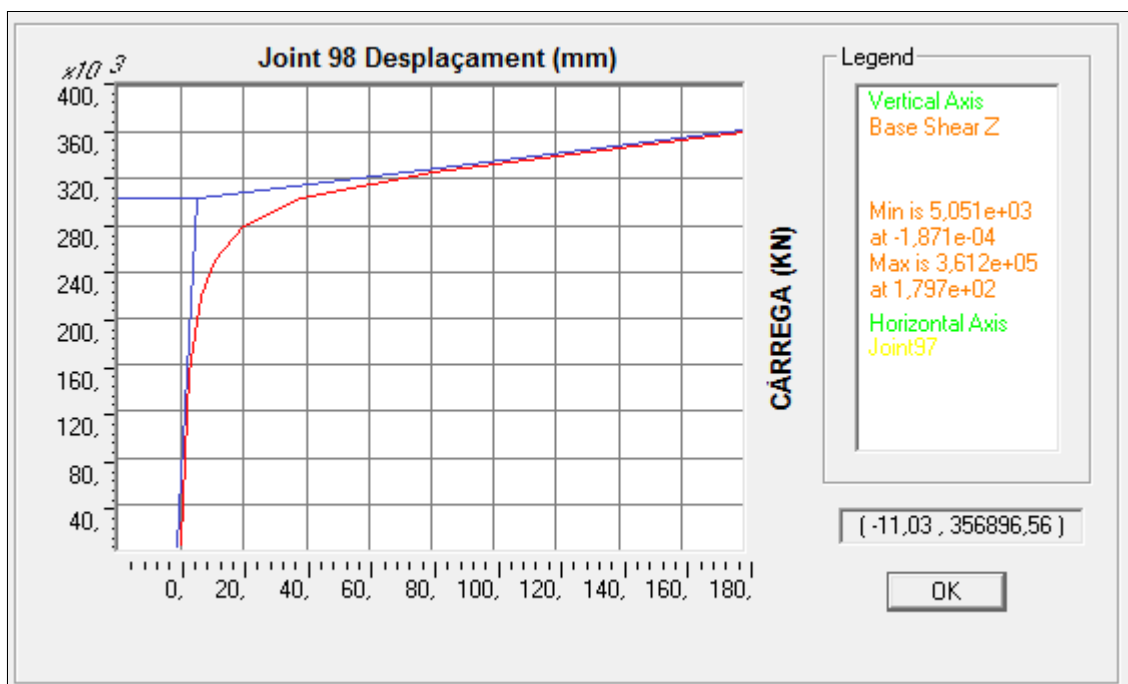


Figura 3.1.3.-Gràfica deformació-càrrega node 98.

El node esmentat es troba al cantell sotmès a compressió de l'ala superior de la jàssera. És el punt que està més sotmès a esforços tensionals.

Fixant-nos en la gràfica, es pot observar que el comportament no lineal apareix a partir d'una càrrega de 160 KN. El pendent de la corba de vinclament es va incrementant fins arribar a un valor de 320 KN, on el material arriba el límit elàstic.

Per a determinar un valor com a límit elàstic, s'ha traçat dues rectes tangents a la corba de comportament elàstic. El valor determinat per la intersecció d'aquestes dues rectes és de 305 KN.

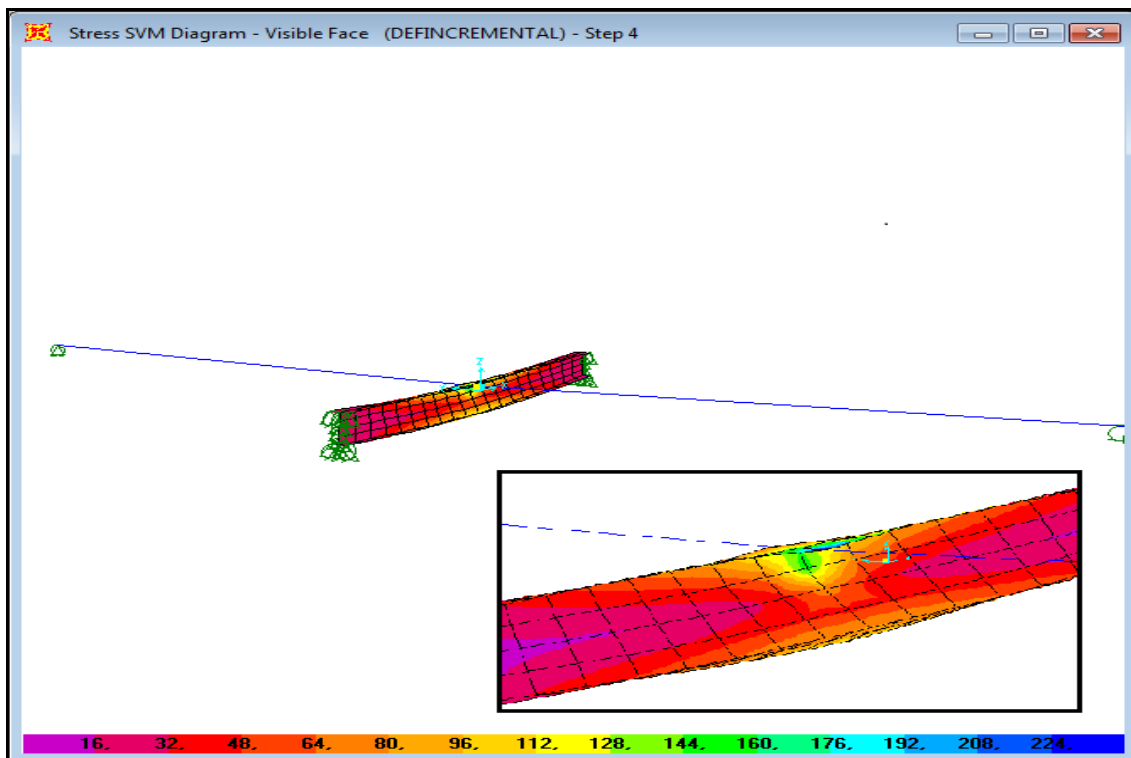
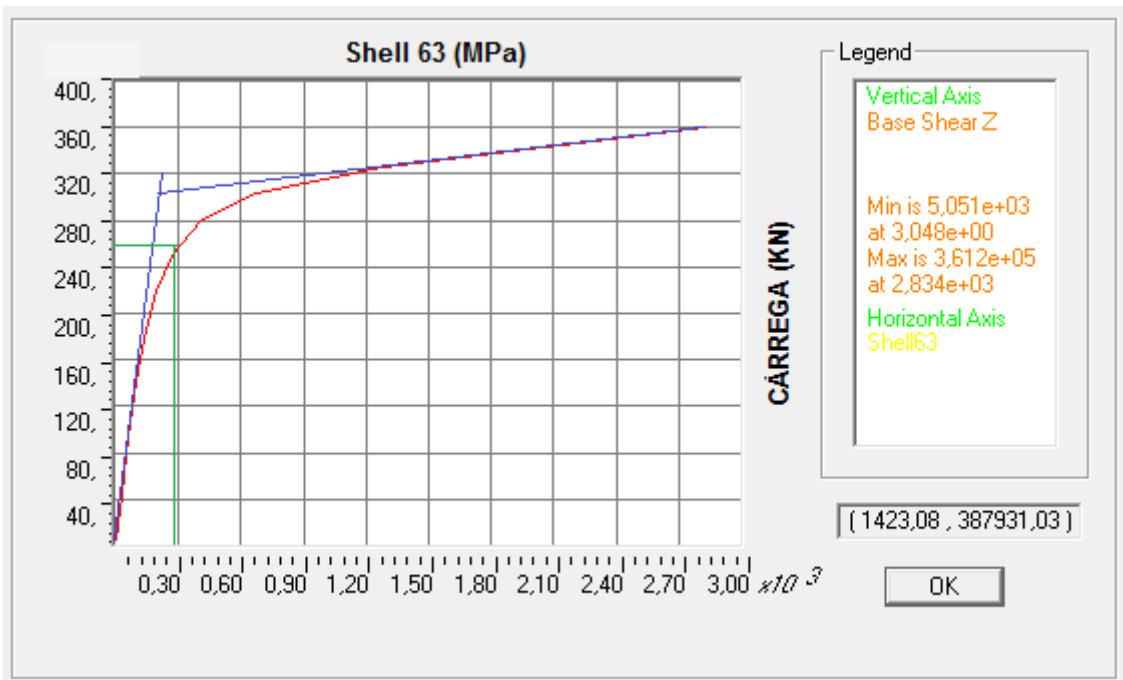


Figura 3.1.4-Estat tensional del conjunt jàssera-corretja.

Com es pot comprobar a la figura 3.1.4., l'element shell que està més sol·licitat es troba al centre de la biga, concretament, a la part interior de la deformació de l'ala superior. És l'element shell 63 el que està més sotmés a compressió.

La gràfica de la figura 3.1.5. mostra la tensió de Von Mises de l'element shell 63 en funció de la càrrega aplicada a la biga. En aquesta es pot observar com la intersecció entre les dues rectes tangents a la corba, una al pendent inicial i la segona al pendent final, pren un valor de 305 KN, el mateix valor que a la gràfica de la figura 3.1.3.



3.1.5.-Gràfica Tensió de Von Misses- Càrrega .

Per altra banda, considerant el límit de fluència del material acotat amb el valor de 275 MPa, traçant una abscissa (abscissa verda) fins a creuar-se amb la corba de vinclament, s'obté un valor de càrrega de 260 KN.

Finalment, s'adjunta una taula comparativa on es comparen els valors de càrrega màxima interpretats de les gràfiques de l'element simple (estudiat a l'apartat 2.3. del capítol 2) respecte els valors obtinguts de la interpretació de les gràfiques de l'element jàssera amb una corretja com element de travat.

	Jàssera sense corretja (element simple apartat 2.3 del capítol 2)	Jàssera amb corretja	%
M_{cr} (KN·m)	153	190	25
Càrrega _{cr} (KN)	246	305	24,4

Taula 3.1.3.-Taula comparativa dels resultats de la jàssera amb corretja i sense.

3.2.-Anàlisi d'un pòrtic d'una nau industrial sota la influència de corretges com elements de travat.

En el present apartat es pretén estudiar el comportament d'un pòrtic d'una nau industrial considerant els elements de coberta, en aquest cas corretges, com elements estabilitzadors de la pròpia estructura.

La normativa de càlcul estructural no té en consideració les corretges com un element estabilitzador dins el conjunt de l'estructura. Per aquest motiu i amb l'objectiu de determinar la influència de les corretges com elements estructurals estabilitzadors d'un pòrtic, se'n crearà un amb elements finits mitjançant el software SAP2000 per, posteriorment, comparar els resultats amb els del càlcul analític del pòrtic sense corretges.

Per altra banda, amb l'objectiu de determinar el grau de veracitat dels resultats interpretats de les gràfiques, es crearà un pòrtic igual a l'esmentat anteriorment, però sense corretges i, posteriorment, es compararà amb els resultats del càlcul analític.

Comparant els tres resultats es podrà verificar la influència a nivell estructural de les corretges en tot el conjunt del pòrtic.

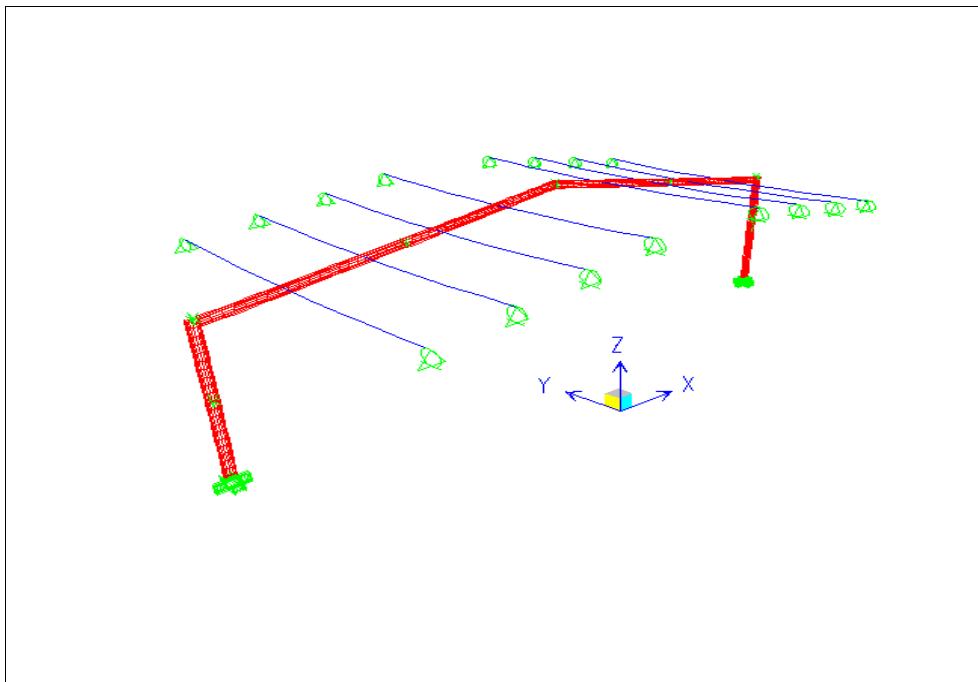


Figura 3.2.1.- Pòrtic compost per bigues d'elements finits, amb les corretges tipus frame.

Com es pot observar a la figura 3.2.1., s'ha creat un pòrtic d'una nau industrial compost per elements finits amb quatre elements frame de perfil IPE 200 perpendiculars al pòrtic i units a l'ala superior de la jàssera.

Un factor molt important a tenir en compte a l'hora d'interpretar aquests tipus d'anàlisi, són les condicions contorn i, en aquest cas, el pòrtic queda constituït per dos elements simples: el pilar i la

jàssera. A aquest últim se li ha aplicat una restricció just al centre de l'aigua, de manera que queda dividit en dos trams d'igual longitud. Els graus de llibertat que s'han restringit són els translacionals en direcció l'eix X i l'eix Y. Aquests punts de travat són considerats les creus de sant Andreu, element emprat en els pòrtics dels extrems de les naus per a contrarestar les càrregues perpendiculars a la paret d'aquesta.

A la figura 3.2.2. es mostra el dimensionat general del pòrtic analitzat.

La resta de condicions de contorn s'especifiquen a cada un dels elements analitzats.

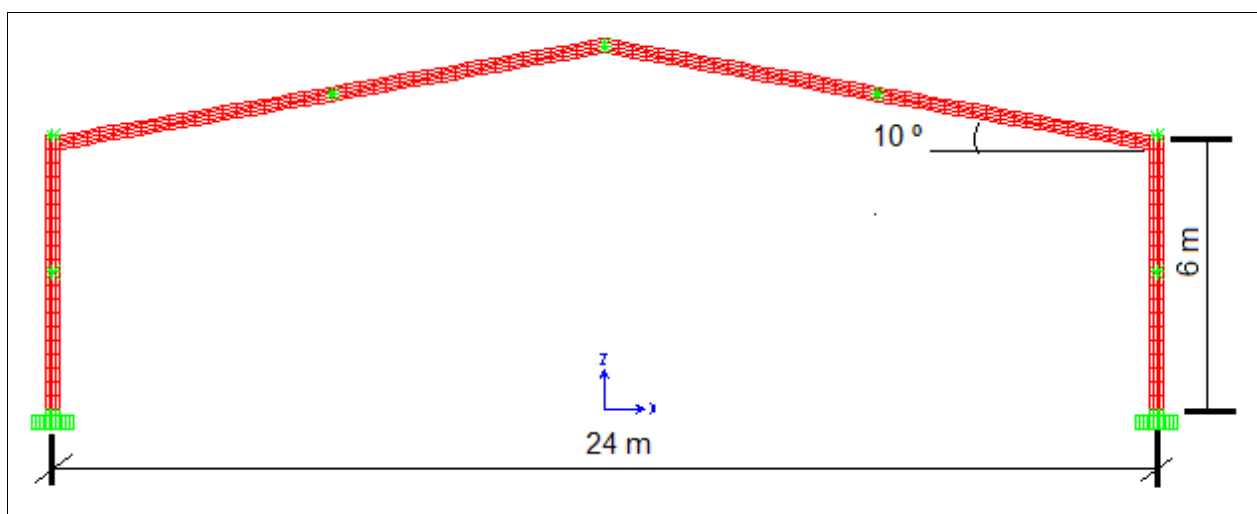


Figura 3.2.2.-Esquema dimensions del pòrtic.

3.2.1.- Anàlisi d'un pilar en interacció amb la resta del pòrtic .

En aquest apartat s'estudia el comportament de l'element pilar del pòrtic.

El pilar és un perfil IPE 300, amb l'extrem inferior encastat i l'extrem superior restringit per desplaçament en les direccions respecte l'eix X i l'eix Y. Només té permès el desplaçament en la direcció de l'eix longitudinal, l'eix Z.

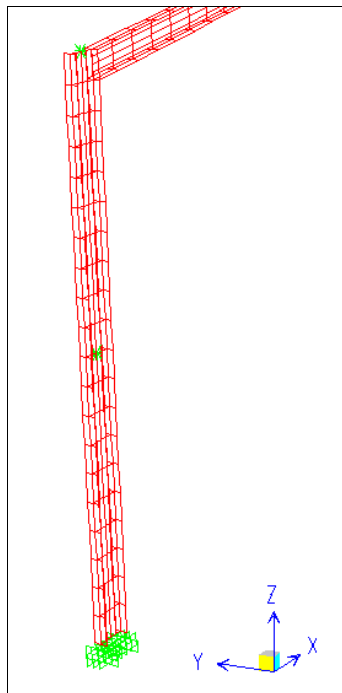


Figura 3.2.1.1.- Mallat del pilar analitzat.

Seguidament s'adjunta una taula amb les propietats de l'element:

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperfeccions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE300	
	superior	inferior	Longitud= 6000 mm	$W_{pl,y}=6,28 \times 10^5 \text{ mm}^3$
ux	Restringit	Restringit	$I_y=8,35 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$W_{pl,z}=1,25 \times 10^5 \text{ mm}^3$
uy	Restringit	Restringit	$A= 5,38 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$I_t=2,01 \times 10^5 \text{ mm}^4$
uz	No restringit	Restringit	$h=300 \text{ mm}$	$I_w=1,26 \times 10^{11} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	Restringit	$b=150 \text{ mm}$	$I_z=6,037 \times 10^6 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	Restringit	$T_w=7,1 \text{ mm}$	
θ_z	No restringit	Restringit	$t_f=15 \text{ mm}$	
Dades del material				
$E=210000 \text{ MPa}$		$f_y=275 \text{ MPa}$		$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 3.2.1.-Propietats de l'element pilar.

La gràfica de la figura.3.2.3. representa el desplaçament en l'eix Y del perfil, respecte la càrrega

aplicada a les jàsseres del pòrtic, del node 64 del pilar. S'ha escollit aquest node perquè pertany a la secció de la biga més sol·licitada.

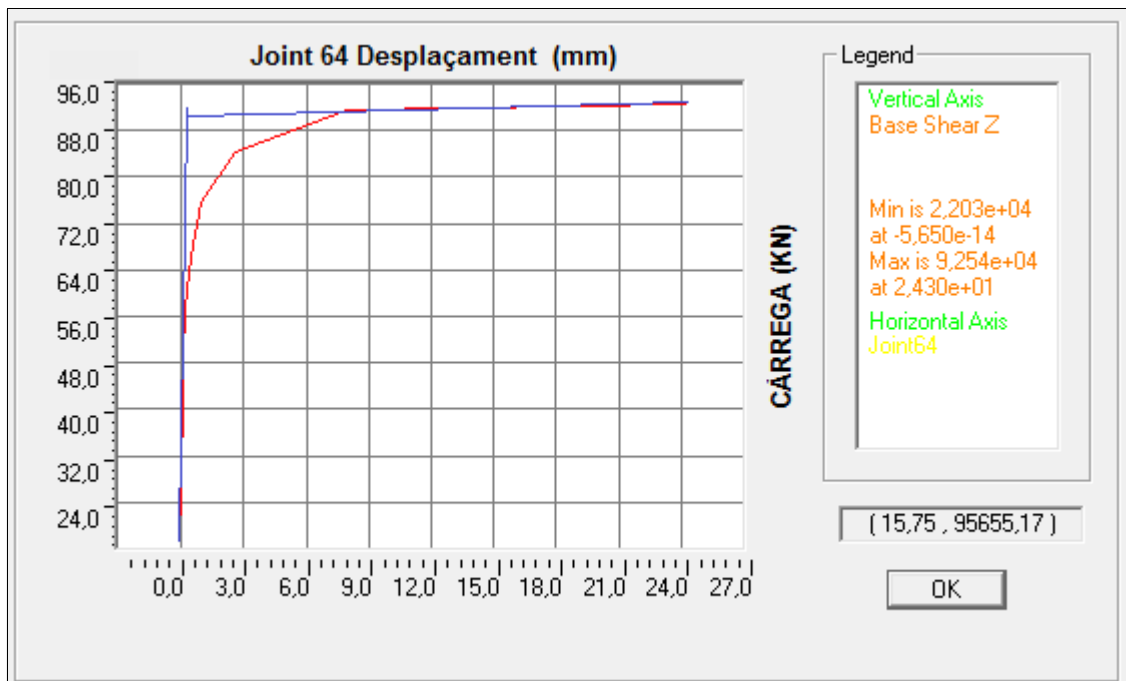


Figura 3.2.3.-Gràfica Desplaçament-càrrega del node 64.

Al centrar-nos en la gràfica s'observa com la biga comença a patir efectes no lineals a partir d'una càrrega de 56 KN. La corba va incrementant el pendent progressivament fins arribar al valor de 94 KN, on adquireix un pendent pràcticament horitzontal, fet que dóna a entendre que el material està dins la zona elasto-plàstica i arriba al límit elàstic.

Per determinar el valor del límit elàstic del component s'ha traçat dues rectes tangents a la corba de vinclament. La primera recta és tangent al pendent inicial de la corba, mentre que la segona recta, és tangent al pendent final. El valor obtingut en la intersecció d'aquestes dues rectes és de 92 KN.

Per a poder comprovar de manera gràfica la influència de les corretges en el pòrtic, s'ha realitzat un anàlisi del mateix pòrtic però sense corretges. El resultat es mostra a la figura 3.2.4. on es pot veure la gràfica del desplaçament en funció de la càrrega del node 64.

Considerant el mateix node que l'estudiat a la figura 3.2.3. i aplicant el mateix criteri que s'ha utilitzat per a determinar el valor de càrrega màxima del límit elàstic, s'ha obtingut el valor a 80 KN.

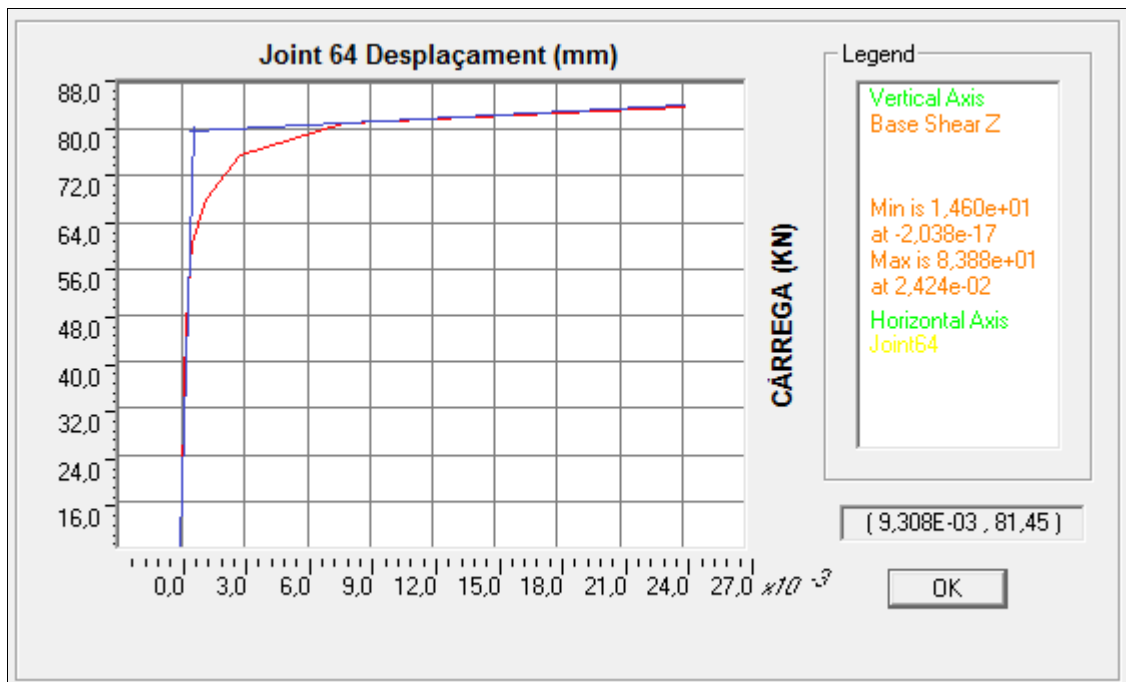


Figura 3.1.4.-Gràfica desplaçament- càrrega del node 64.

El resultat interpretat de les gràfiques es contrasta a la taula 3.2.2. amb el resultat obtingut mitjançant el càlcul analític convencional extret de l'annex B i de les interpretacions de les gràfiques dels dos pòrtics, un amb corretges i l'altre sense.

S'ha de tenir present que els valors mostrats a les taules, a diferència dels valors adquirits de les gràfiques, representen la càrrega que pertoca a l'element analitzat ja que, els valors de les abscisses de les gràfiques, pertanyen a la càrrega total del conjunt, és a dir, la suma de reaccions.

El valor del càlcul analític s'ha obtingut mitjançant la interpolació dels esforços de disseny amb els coeficients més sotmesos de les interaccions d'esforços.

Finalment a la taula 3.2.2. es contrasta els diferents valors obtinguts dels diferents anàlisis emprats.

Pcr (KN)	% incrementat	ANÀLISI EMPRAT
39,16	-	Càlcul analític
40	2,00%	Element del pòrtic sense considerar les corretges
46	17,00%	Element del pòrtic sota la influència de les corretges

Taula 3.2.2.-Taula comparativa dels resultats obtinguts mitjançant els càlculs i la interpretació de les gràfiques.

3.2.2.-Anàlisi del tram de jàssera .

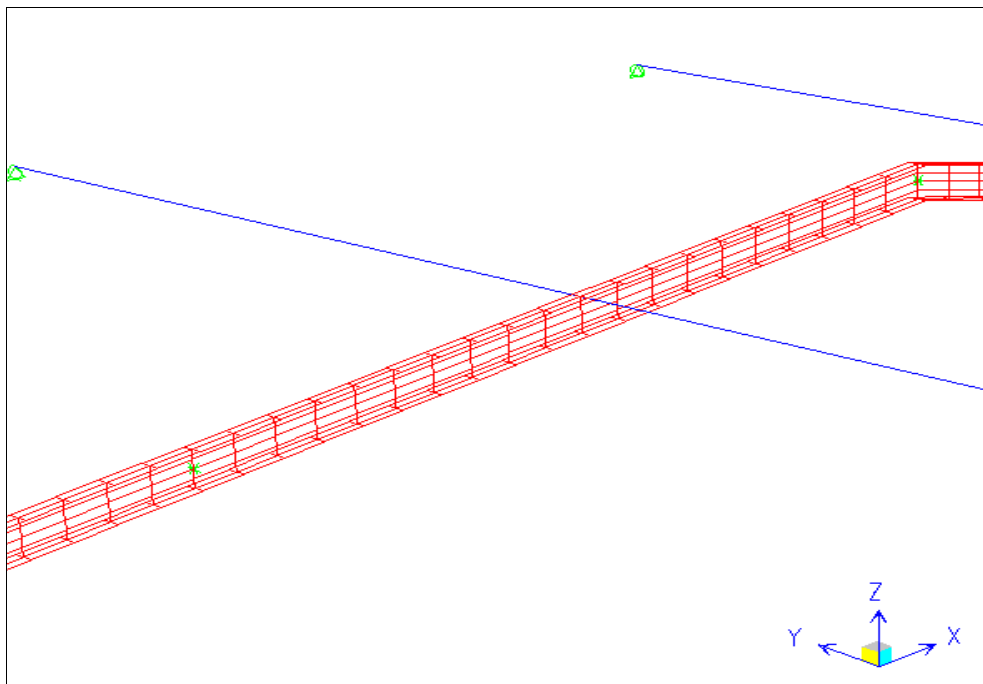


Figura 3.2.6.-Malla tram de jàssera .

En aquest últim apartat s'estudia el tram de la jàssera, la longitud d'aquest és la meitat de la longitud total de la jàssera del pòrtic de secció constant, concretament és un perfil IPE 300, tal i com es pot veure a la taula de les propietats de l'element shell.

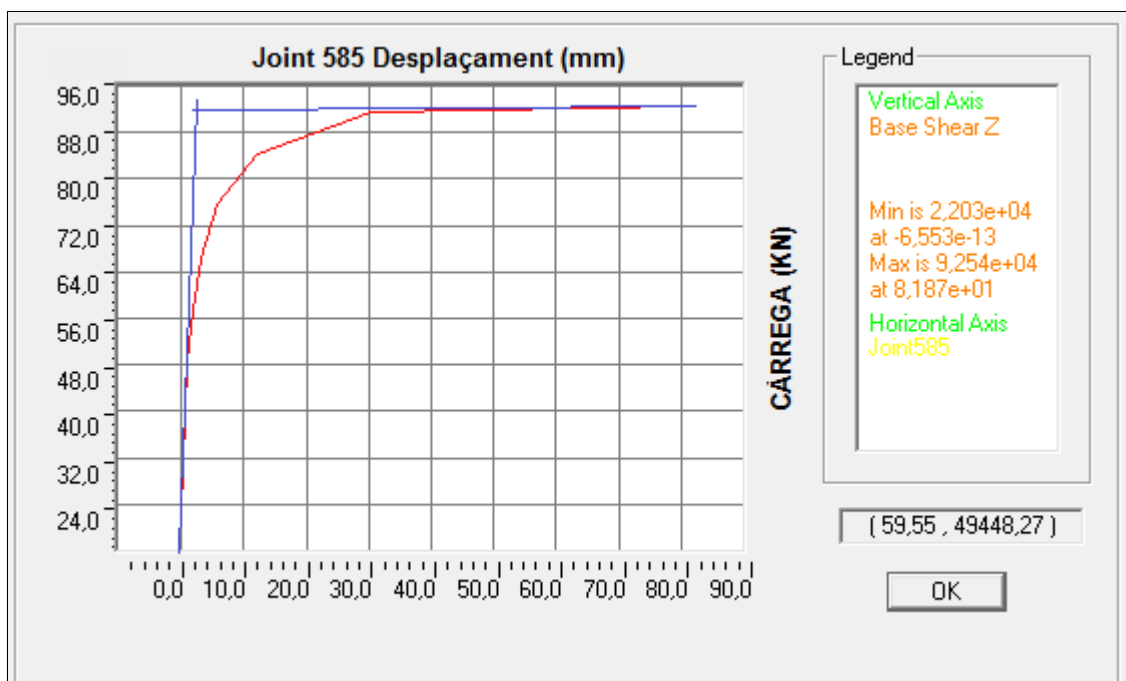
Aquest tram de jàssera té com a condicions de contorn restringit el desplaçament, tant en direcció a l'eix X com en direcció a l'eix Y.

A la taula següent s'especifica totes les propietats de l'element:

CONDICIONS DEL MODEL D'ELEMENTS FINITS				
-Element utilitzat: Shell-thin.				
-Tipus d'anàlisi: No lineal amb efecte P-delta.				
-Tipus de càrrega: Càrrega incremental per desplaçament controlat.				
-Imperficcions inicials: Càrrega incremental equivalent amb la deformació inicial.				
Condicions de contorn			Dades del perfil IPE300	
	superior	inferior	Longitud= 6092 mm	$W_{pl,y}=6,28 \times 10^5 \text{ mm}^3$
ux	Restringit	Restringit	$I_y=8,35 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$W_{pl,z}=1,25 \times 10^5 \text{ mm}^3$
uy	Restringit	Restringit	$A= 5,38 \times 10^3 \text{ mm}^2$	$I_t=2,01 \times 10^5 \text{ mm}^4$
uz	No restringit	No restringit	$h=300 \text{ mm}$	$I_w=1,26 \times 10^{11} \text{ mm}^6$
θ_x	No restringit	No restringit	$b=150 \text{ mm}$	$I_z=6,037 \times 10^6 \text{ mm}^4$
θ_y	No restringit	No restringit	$T_w=7,1 \text{ mm}$	
θ_z	No restringit	No restringit	$t_f=15 \text{ mm}$	
Dades del material				
$E=210000 \text{ MPa}$			$f_y=275 \text{ MPa}$	$f_u=410 \text{ MPa}$

Taula 3.2.5.-Taula de les propietats de l'element analitzat.

S'ha agafat el node més sol·licitat, en aquest cas el node 585, situat a l'alçada del punt de travat amb la corretja.



3.2.7.-Gràfica desplaçament-càrrega node 585.

Tal i com s'ha fet en els casos anteriors, s'ha adquirit la càrrega màxima de l'element mitjançant

dues rectes tangents als dos pendents dels extrems de la corba de comportament no lineal elàstic del material. La intersecció entre les dues rectes determina un valor de 92 KN.

Com a l'apartat anterior, es mostra la gràfica del comportament no lineal elàstic del mateix node emprat a la figura 3.2.7, amb l'objectiu de comparar els resultats. La diferència però, és que en aquest cas el node pertany al pòrtic sense corretges.

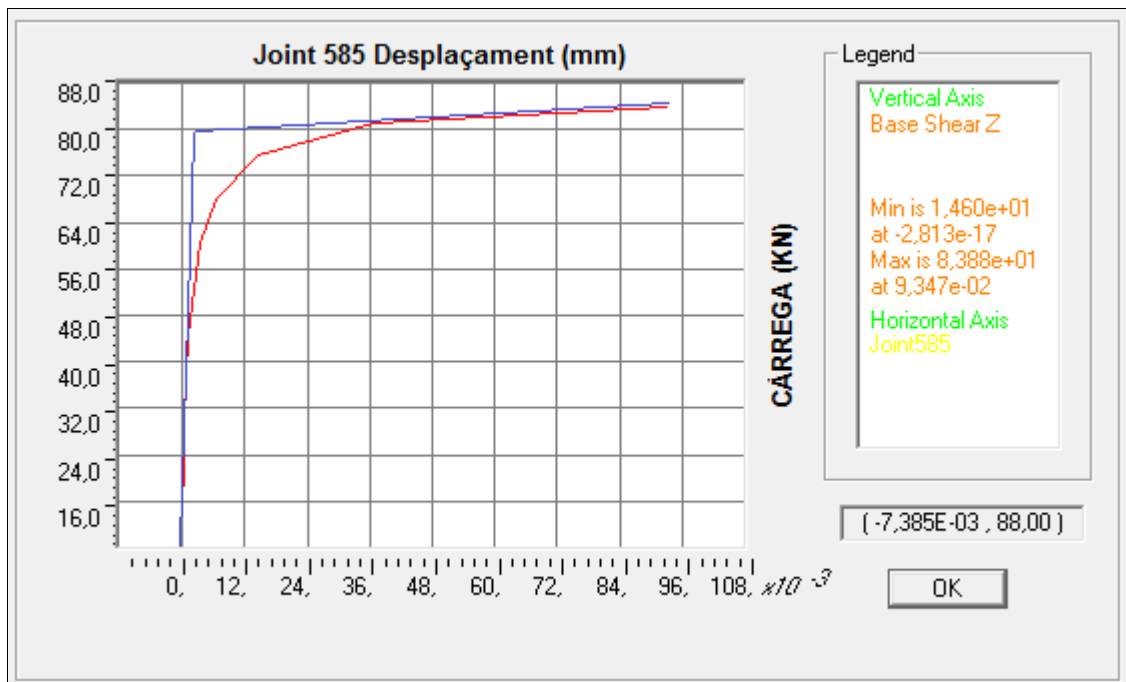


Figura 3.2.8.- Gràfica desplaçament- càrrega del node 585.

Com es pot observar a la gràfica de la figura 3.2.8., el valor obtingut de la intersecció de les rectes tangencials al pendent inicial i al pendent final de la corba del comportament elàstic del node 585, està acotat a 80 KN.

Finalment s'adjunta una taula comparativa amb els valors de l'annex B i els resultats trobats mitjançant la interpretació de la gràfica i el corresponent càlcul analític.

Per a dur a terme la conversió dels valors de l'Annex B s'ha aplicat l'equació 3.2.2.1.

$$M = (q \times l^2) / 8 \quad (\text{Eq.3.2.2.1})$$

l=12 m (longitud d'una de les dues aigües del pòrtic)

M: Mb, Rd Moment resistent (obtingut dels càlculs analítics realitzats a l'Annex B)

Obtinguent el valor de q a partir de l'equació 3.2.2.1. i multiplicant-la per la longitud total de la coberta, dóna com a resultat l'esforç total sobre l'estructura.

Càrrega sobre l'estructura (KN)	% incrementat (respecte el valor menor)	ANÀLISI EMPRAT
84	5,00%	Càlcul analític
80	-	Element del pòrtic sense considerar les corretges
92	15,00%	Element del pòrtic sota l'influència de les corretges

Taula 3.2.6.-Taula comparativa resultats mitjançant el càlcul convencional i per elements finits del tram de jàssera .

3.3-Comparació dels resultats.

Primerament, a l'anàlisi realitzat a l'apartat 3.1. d'una biga biarticulada amb una biga fixada a l'ala superior perpendicularment a l'eix longitudinal simulant una corretja unida a una jàssera, s'ha obtingut un increment, en comparació a la mateixa biga sense la corretja, d'un 25% de la càrrega del límit elàstic.

Tal i com es pot observar a la gràfica de la figura 3.3.1., on es mostra la corba de comportament elàstic (blau) de l'element simple descrit a l'apartat 2.3 del capítol 2 i la corba del mateix element amb una corretja com element de travat, descrit a l'apartat 3.1.. Es pot distingir clarament la diferència esmentada anteriorment.

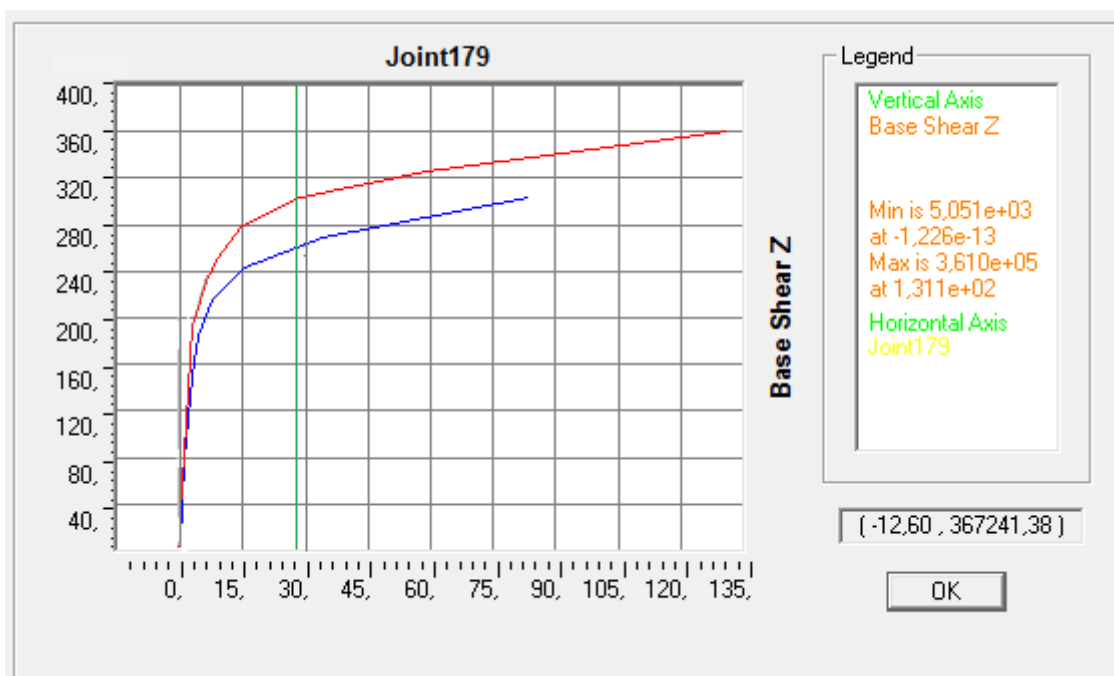


Figura 3.3.1.-Gràfica comparativa de les corbes de vinclament lateral a partir de la deformació del node 179 en funció de la càrrega aplicada.

Aquest increment dóna a entendre que la corretja influeix de manera considerable a l'estabilitat de la jàssera d'un pòrtic. Ara bé, les condicions de contorn del conjunt jàssera-corretja són una aproximació interpretada del comportament que tindria l'element dins el conjunt del pòrtic. Fet que pot influir en aquest percentatge tan elevat.

Seguidament, a l'apartat 3.2. s'ha creat, mitjançant el software SAP2000, un pòrtic en elements finits amb corretges assentades sobre les jàsseres aplicant el mateix criteri que l'utilitzat a l'apartat

3.1. de manera que s'ha dut a terme l'anàlisi del comportament de la jàssera sota l'influència de les corretges com elements estabilitzadors.

Paral·lelament, s'ha fet el càlcul analític del pòrtic sense considerar les corretges, on solament s'ha considerat el travat provocat per la creu de sant Andreu enmig de cada una de les dues jàsseres.

A part del càlcul analític del pòrtic sense les corretges, també s'ha creat el mateix pòrtic en elements tipus mallat per a poder comparar els resultats amb els analítics, i així, validar el poc marge d'error que comporta comparar els resultats analítics amb els resultats dels elements finits.

La diferència entre els resultats obtinguts analíticament amb els del programa del pòrtic sense corretges varien entre un 2% i un 5%. Aquests percentatges tan baixos verifiquen el petit marge d'error que hi ha entre el càlcul analític i el sistema per elements finits.

Per tant, a l'hora de comparar els resultats obtinguts del pòrtic sense corretges amb el que en té, es pot demostrar certa credibilitat fins al punt d'arribar a un error mínim del 5%.

Finalment, els resultats obtinguts del pòrtic amb corretges com element de travat, augmenten entre un 10% i un 15% respecte els resultats del pòrtic sense corretja.

4.- RESUM DEL PRESSUPOST

a) A l'estudi no es contempla cap realització material, únicament s'estima l'import a la realització del seu estudi:

- Les hores invertides per l'autor del projecte en la realització d'aquest. Considerant una valorització de 45€ cada hora útil.

b) Confecció esquema pressupost projecte:

PARTIDA	Uts.	CONCEPTE	Quantitat (uts.)	Cost unitari (€)	TOTAL (€)
1	Hores	Hores per la realització del projecte	425	45	19125
TOTAL COST DEL PROJECTE					19125

5.- CONCLUSIONS

En l'anàlisi d'elements estructurals simples s'ha contemplat que en el cas de l'element pilar hi ha una variació, entre el valor del càlcul per elements finits respecte el càlcul convencional ajustat al codi tècnic, del 35%. Mentre que, els percentatges diferencials entre els resultats analítics i els gràfics de les dues barres biarticulades són de 1,7% i 2,7%. En aquests elements, el marge d'interpretació de la normativa no es veu gaire influenciat pel criteri de la persona que l'interpreta, ja que es tracta d'elements amb unes condicions de contorn clarament definides, de manera que els coeficients i les variables que intervenen en el càlcul també n'estan.

En el cas de les bigues biarticulades, el fet d'obtenir uns resultats tan pròxims amb els del càlcul convencional, dóna un valor afegit a l'hora d'obtenir dades del comportament de les corretges com element estabilitzador de l'estructura. Per aquest motiu, i el fet que el càlcul del grau de travat de les corretges en un conjunt estructural no es veu referenciat a la normativa estructural, s'ha dut a terme un anàlisi d'un element simple amb una corretja. El resultat obtingut ha sigut un increment de la càrrega màxima aplicada d'un 25%. Fet considerable tinguent en compte que, com s'ha esmentat abans, les condicions de contorn de l'element simple estan clarament definits.

A l'anàlisi del pòrtic per el mètode d'elements finits, s'ha comprovat que l'increment de càrrega admissible per l'estructura està entre un 15% i un 17%. Tot i ser uns valors inferiors a l'anàlisi d'una jàssera amb una corretja, s'ha de considerar que, el marge d'error dels resultats obtinguts del pòrtic és superior al de l'anàlisi simplificat a una jàssera i una corretja. Per aquest motiu, es pot considerar que com menor sigui el marge d'error del conjunt del pòrtic tendirà més a apropar-se al valor del cas ideal.

El fet que comporta un increment del 15% de càrrega admissible en una estructura amb coberta lleugera, és un valor que s'hauria de tenir en compte, ja que pot donar pas a un dimensionat de l'estructura més optimitzat i alhora més econòmic.

6.-RELACIÓ DE DOCUMENTS.

El present estudi està constituït per la següent relació de documents.

- Document número 1: Memòria.
- Document número 2: Pressupost.

7.- BIBLIOGRAFIA

Referències bibliogràfiques

Normatives

- (1) *CTE-Documento Básico-Seguridad Estructural-Acero (2008)*. Madrid:Consejo superior de Colegios de Arquitectos de Madrid
- (2) *CTE-Documento Básico-Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación.(2009)*. Madrid. Consejo superior de Colegios de Arquitectos de Madrid.
- (3) *CTE-Documento Básico-Seguridad Estructural-.(2009)*. Madrid. Consejo superior de Colegios de Arquitectos de España.
- (4) *Eurocódigo 3 : Proyecto de Estructuras de Acero. (1996) Madrid AENOR*

Llibres

- (5) *Designer's guide to en 1993-1-1 Eurocode 3:Design of steel structures general rules and rules for buildings.(2004)* London. L. Gardner and Thomas Nethercot.
- (6) Argüelles Álvarez, R; Argüelles Bustillo, R; Ariaga Martitegui, F; Atienza Reales J. R; ((2005) *Estructuras de acero: Cálculo*. Madrid.

Projectes

- (7) *Estudi de l'influència del vinclament en pòrtics de naus industrials*. Roger Falcó

8.- GLOSSARI

M	Moment flector
V	Esforç tallant
N	Esforç normal
L_p	Longitud relativa a vinclament lateral.
β	Coefficient longitud relativa a vinclament.
L	Longitud
γ_{M0}	Coefficient de seguretat relatiu a la plastificació.
γ_{M1}	Coefficient de seguretat relatiu a l'inestabilitat.
f_y	Límit elàstic del material.
A	Àrea de la secció.
h	cantell perfil biga.
B	Amplada del perfil de la biga.
t_w	Espessor ànima del perfil.
t_f	Espessor ala del perfil
r	Radi unió entre l'ala i l'ànima del perfil.
$I_{y-y'}$	Inèrcia eix y-y' del perfil.
ε	Factor reductor límit tensional a nivell de secció.
$I_{z-z'}$	Inèrcia eix z-z' del perfil.
I_t	Mòdul a torsió.
I_w	Mòdul de guerxament.
E	Mòdul elàstic.

G	mòdul elàstic a tallant.
W_{el}	Mòdul resistent elàstic.
W_{pl}	Mòdul resistent plàstic.
N_{cr}	Càrrega crítica d'Euler.
N_{pl}	Càrrega d'esgotament plàstic.
α	Coefficient d'imperfeció elàstica.
$\bar{\lambda}$	Esveltesa reduïda.
X	Coefficient de reducció per vinclament.
K_y, K_z	Coefficients d'interacció.
Ψ	Relació entre moments.
$C_{m,y}$	Factor de moment flector rquivalent.
K_ϕ	Restricció imposada pels recolzaments sobre gir a torsió.
C_1	Factor determinat per a les condicions de contorn i llei de moments flectors de la biga.
C_2	Factor multiplicador definit per la posició de la càrrega en l'eix z-z'.
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esveltesa reduïda de la barra respecte el vinclament lateral.
α_{LT}	Coefficient d'imperfeció elàstica respecte el vinclament lateral.
X_{LT}	Coefficient de reducció per vinclament lateral.

9.-AGRAÏMENTS

Voldria agrair, d'alguna manera, a totes les persones que m'han donat suport per a poder dur a terme l'elaboració d'aquest projecte.

Sobretot al professor Xavier Cahís, tutor d'aquest projecte, pel suport constant que m'ha donat per a poder tirar endavant aquest estudi.

A la meva família i parella, per la seva paciència i ajuda.

Moltes gràcies

ANNEX A.-COMPROVACIÓ CÀRREGUES MÀXIMES DELS ELEMENTS SIMPLES.

En aquest capítol dels annexos, es realitzarà el càlcul segons el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) dels tres elements simples.

Els resultats obtinguts es compararan amb els valors interpretats de les gràfiques dels anàlisis per elements finits.

A.1.-Element pilar amb càrrega puntual a compressió.

$$L = 5000 \text{ mm}$$

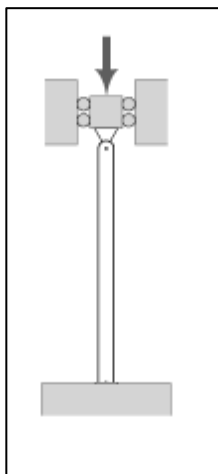


Figura A.1.1.-Esquema de les condicions de contorn de l'element.

$$A = 8447,06 \text{ mm}^2$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$b = 180 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

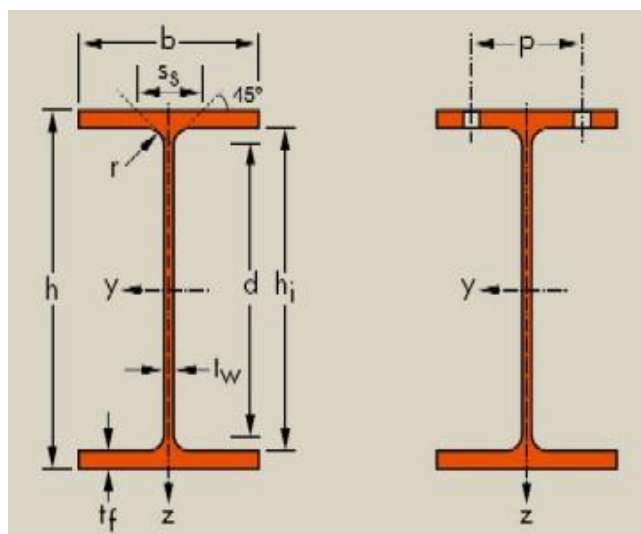
$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$I_y = 2,3128 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 1,156 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 1,307 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$I_z = 1,317 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$



$$W_{el,z} = 1,464 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,z} = 2,29 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_t = 5,108 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 4,905 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$

A.1.1.-Càlcul a nivel de secció.

A.1.1.1.-Classificació de la secció.

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Límit elàstic del perfil: $f_y = 275 \text{ MPa}$

-Ala:

$$c = \frac{(b - t_w - 2 \cdot r)}{2} = \frac{(180 - 8,6 - 2 \cdot 21)}{2} = 64,7 \text{ mm}$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$c/t_f \leq 9 \cdot \xi \Rightarrow 4,79 \leq 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Ànima:

$$c = (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) = 331 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$c/t_w \leq 38 \cdot \xi \Rightarrow 38,49 \leq 38,64 \text{ Classe 3}$$

A.1.1.2.- Resistència de la secció:

.-Resistència a compressió:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{8447,06 \times 275}{1,05} = 2212,325 \text{ KN}$$

A.2.2.2-Resistència a moment flector:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{1,30715 \cdot 10^6 \times 275}{1,05} = 342,35 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A.1.2.- Càlcul a nivell de barra.

A.1.2.1.-Càlcul resistència a compressió:

$$N_{pl} = \frac{\pi^2 \times E \times I_{z-z'}}{L_p^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 1,3178 \cdot 10^7}{3500^2} = 2229,63 \text{ KN}$$

$$L_p = L \times \beta = 5000 \times 0,7 = 3500 \text{ mm}$$

A.1.2.2.-Càlcul resistència a compressió considerant l'efecte d'inestabilitat lateral.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{8447 \times 275}{2229,63 \cdot 10^3}} = 1,02$$

$$h/b = 400/180 = 2,2 \Rightarrow \text{curva } b$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} \times 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (1,02 - 0,2) + 1,02^2] = 1,16$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,58$$

$$N_{pl,Rd} = \chi_{LT} \times \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = 0,58 \times \frac{8447,06 \times 275}{1,05} = 1283,1 \text{ KN}$$

A.2.- Element biga biarticulada amb càrrega puntual al centre.

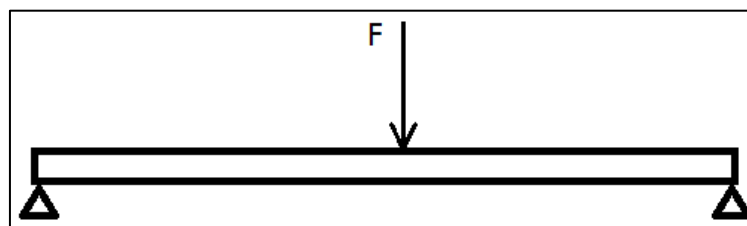


Figura A.2.1.- Esquema de les condicions de contorn utilitzades.

$$L = 5000 \text{ mm}$$

$$A = 8447,06 \text{ mm}^2$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$b = 180 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$I_y = 2,3128 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 1,156 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 1,307 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

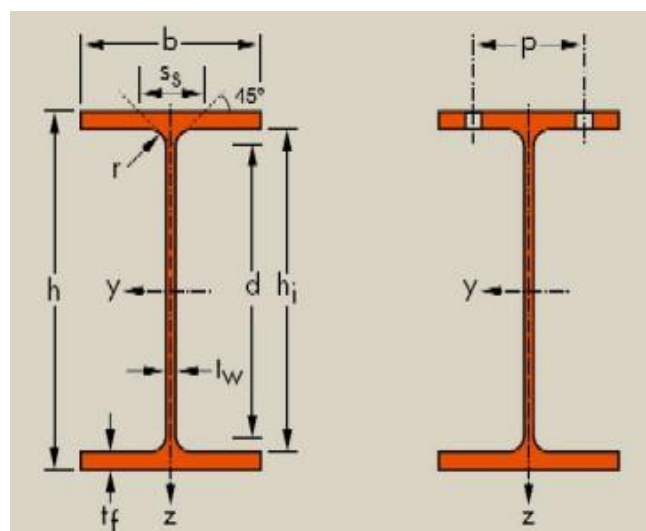
$$I_z = 1,317 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,z} = 1,464 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,z} = 2,29 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_t = 5,108 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 4,905 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$



A.2.1.-Càlcul anivell de secció.**A.2.1.1.-Classificació de la secció:**

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Límit elàstic del perfil: $f_y = 275 \text{ MPa}$

-Ala:

$$c = \frac{(b - t_w - 2 \cdot r)}{2} = \frac{(180 - 8,6 - 2 \cdot 21)}{2} = 64,7 \text{ mm}$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$c/t_f \leq 9 \cdot \xi \Rightarrow 4,79 \leq 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Ànima:

$$c = (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) = 331 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$c/t_w \leq 72 \cdot \xi \Rightarrow 38,49 \leq 66,24 \text{ Classe 1}$$

A.2.1.2.- Resistència de la secció:

-Resistència al moment flector:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} x f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{1,30715 \cdot 10^6 x 275}{1,05} = 342,35 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

.-Resistència a tallant:

$$A_v = A - 2 x b x t_f + (t_w + r) x t_f = 3986,6 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v x \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{3986,6 x \left(\frac{275}{\sqrt{3}}\right)}{1,05} = 602,817 \text{ KN}$$

A.2.2.- Càlcul a nivell de barra.

A.2.2.1.-Càlcul moment crític.

$$\kappa_\phi = 1$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$G = 80769,23 \text{ MPa}$$

$$L_p = L x \kappa_\phi = 5000 x 1 = 5000 \text{ mm}$$

$$\kappa = L_p \sqrt{\frac{G x I_t}{E x I_w}} = 5000 x \sqrt{\frac{80769,23 x 5,108 \cdot 10^5}{2,1 \cdot 10^5 x 4,905 \cdot 10^{11}}} = 9,868$$

$$c_1 = 1,365$$

$$c_2 = 0,553$$

La càrrega s'ha aplicat a l'ala superior de la biga, per tant:

$$M_{cr} = c_1 x \frac{\pi}{L_p} x \sqrt{G x I_t x E x I_z} x \left[1 + \frac{\pi^2}{\kappa^2} x (1 + c_2^2) - c_2 x \frac{\pi}{\kappa} \right]$$

$$M_{cr} = 1,365 x \frac{\pi}{5000} x \sqrt{80769,23 x 5,1 \cdot 10^5 x 2,1 \cdot 10^5 x 1,3178 \cdot 10^7} x$$

$$\left[\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{9,868^2} \times (1 + 0,553^2)} - \left(0,553 \times \frac{\pi}{9,868}\right) \right] = 257,157 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A.2.2.2.-Càlcul del moment màxim considerant la inestabilitat lateral:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,307 \cdot 10^6 \times 275}{257,157 \cdot 10^6}} = 1,182$$

$$h/b = 400/180 = 2,2 \hat{=} \Rightarrow \text{curva } b$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (1,182 - 0,2) + 1,182^2] = 1,365$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,488$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times \frac{W_y \times f_y}{\gamma_{M0}} = 0,51 \times \frac{1,307 \cdot 10^6 \times 275}{1,05} = 167,1 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A.3.- Element biga biarticulada amb càrrega distribuïda.

$$L = 5000 \text{ mm}$$

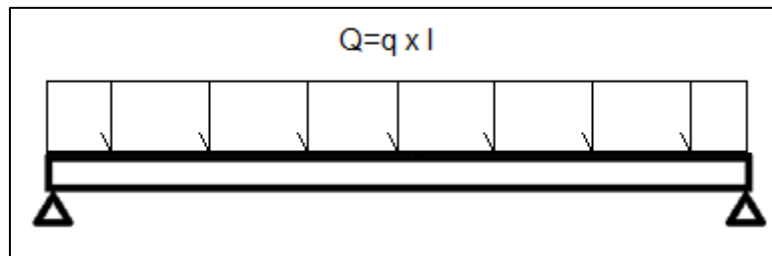


Figura A.3.1.-Esquema de les condicions de contorn de l'element.

$$A = 8447,06 \text{ mm}^2$$

$$h = 400 \text{ mm}$$

$$b = 180 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$I_y = 2,3128 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 1,156 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 1,307 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

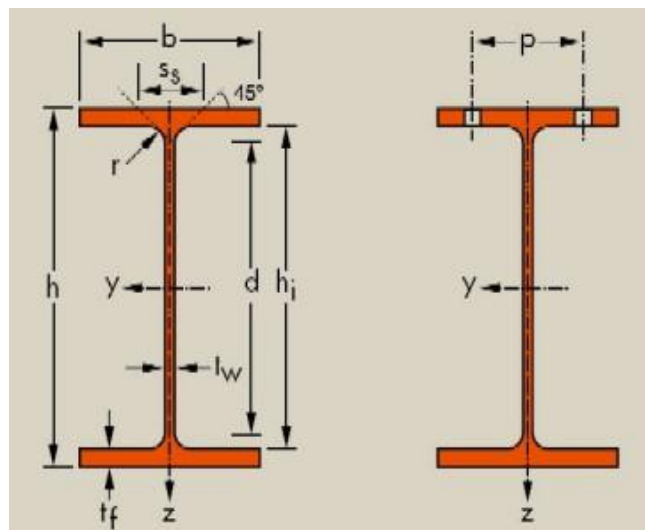
$$I_z = 1,317 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,z} = 1,464 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,z} = 2,29 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_t = 5,108 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 4,905 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$

**A.3.1.-Càlcula nivel de secció****A.3.1.1.-Classificació de la secció:**

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Límit elàstic del perfil: $f_y = 275 \text{ MPa}$

-Ala:

$$c = \frac{(b - t_w - 2 \cdot r)}{2} = \frac{(180 - 8,6 - 2 \cdot 21)}{2} = 64,7 \text{ mm}$$

$$t_f = 13,5 \text{ mm}$$

$$c/t_f \leq 9 \cdot \xi \Rightarrow 4,79 \leq 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Ànima:

$$c = (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) = 331 \text{ mm}$$

$$t_w = 8,6 \text{ mm}$$

$$c/t_w \leq 72 \cdot \xi \Rightarrow 38,49 \leq 66,24 \text{ Classe 1}$$

A.3.1.2.- Resistència de la secció

A.2.2.1-Resistència a moment flector:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} x f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{1,30715 \cdot 10^6 x 275}{1,05} = 342,35 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A.2.2.2.-Resistència a tallant:

$$A_V = A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f = 3986,6 \text{ mm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \times \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{3986,6 \times \left(\frac{275}{\sqrt{3}}\right)}{1,05} = 602,817 \text{ KN}$$

A.3.2.- Càlcul a nivell de barra.

A.3.2.1.-Càlcul del moment crític.

$$\kappa_\phi = 1$$

$$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$G = 80769,23 \text{ MPa}$$

$$L_p = L \times \kappa_\phi = 5000 \times 1 = 5000 \text{ mm}$$

$$\kappa = L_p \sqrt{\frac{G \times I_t}{E \times I_w}} = 5000 \times \sqrt{\frac{80769,23 \times 5,108 \cdot 10^5}{2,1 \cdot 10^5 \times 4,905 \cdot 10^{11}}} = 9,868$$

$$c_1 = 1,132$$

$$c_2 = 0,459$$

La càrrega s'ha aplicat a l'ala superior de la biga, per tant:

$$M_{cr} = c_1 \times \frac{\pi}{L_p} \times \sqrt{G \times I_t \times E \times I_z} \times \left[1 + \frac{\pi^2}{\kappa^2} \times (1 + c_2^2) - c_2 \times \frac{\pi}{\kappa} \right]$$

$$M_{cr} = 1,132 \times \frac{\pi}{5000} \times \sqrt{80769,23 \times 5,1 \cdot 10^5 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 1,3178 \cdot 10^7} \times \left[\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{9,868^2} \times (1 + 0,459^2)} - (0,459 \times \frac{\pi}{9,868}) \right] = 234,703 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A.3.2.2.-Càlcul del moment màxim considerant la inestabilitat lateral

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \times f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1,307 \cdot 10^6 \times 275}{234,703 \cdot 10^6}} = 1,237$$

$$h/b = 400/180 = 2,2 \Rightarrow \text{curva } b$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\begin{aligned} \phi_{LT} &= 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} \times 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (1,237 - 0,2) + 1,237^2] = \\ &= 1,442 \end{aligned}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,45$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times \frac{W_y \times f_y}{\gamma_{M0}} = 0,45 \times \frac{1,307 \cdot 10^6 \times 275}{1,05} = 149,68 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

ANNEX B.-COMPROVACIÓ DE LES CÀRREGUES MÀXIMES DELS ELEMENTS DEL PÒRTIC.

En aquest capítol dels annexos, es realitzarà el càlcul segons el codi tècnic (CTE-DB-SE-A) del pòrtic de la nau industrial.

Els resultats obtinguts es compararan amb els valors interpretats de les gràfiques de l'apartat 3.2 de la memòria.

B.1.-Element pilar.

$$A = 5381,56 \text{ mm}^2$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$I_y = 8,356 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 5,57 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 6,28 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

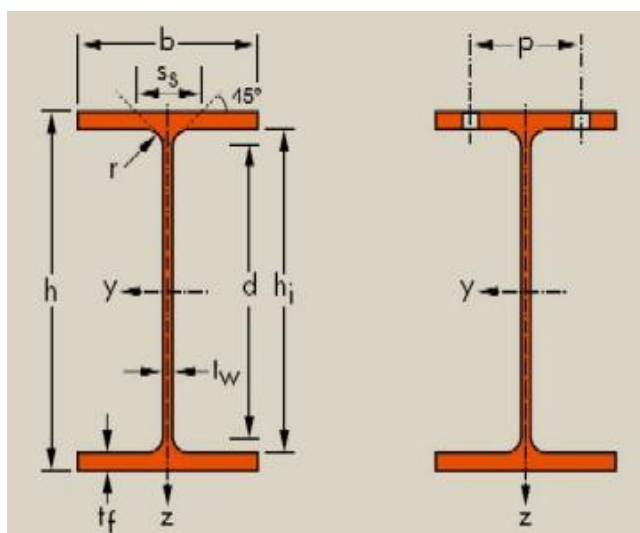
$$I_z = 6,03 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,z} = 8,05 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

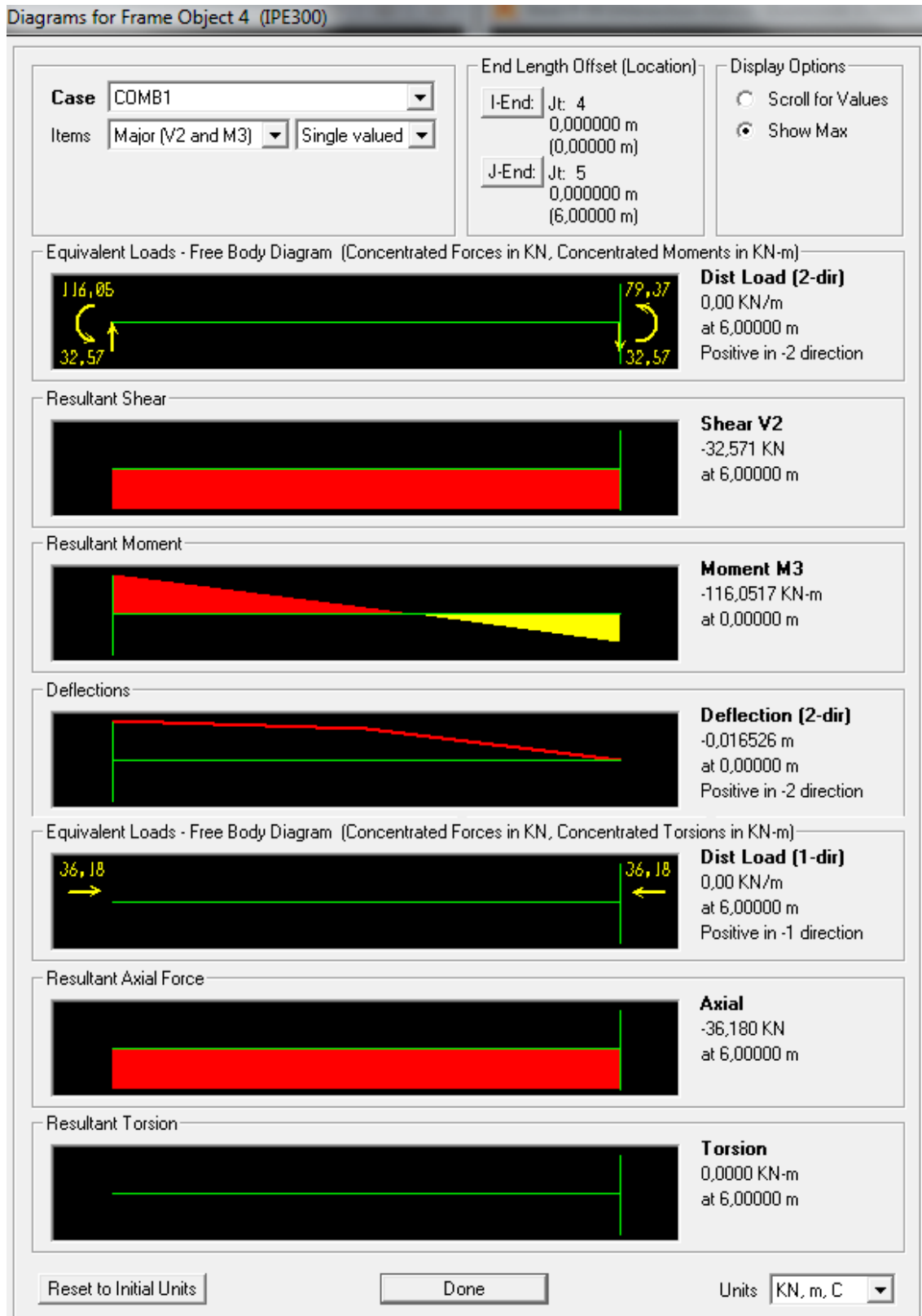
$$W_{pl,z} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_t = 2,012 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$



Esforços actuants	Propietats acer
$N_{ed} = 36,18 \text{ KN}$	$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
$M_{ed} = 116,05 \text{ KN}\cdot\text{m}$	$G = 80769 \text{ MPa}$
$V_{Ed} = 32,57 \text{ KN}$	$L = 6000 \text{ mm}$



Classificació de la secció:

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Límit elàstic del perfil: $f_y = 275 \text{ MPa}$

-Ala:

$$c = \frac{(b - t_w - 2 \cdot r)}{2} = \frac{(150 - 7,1 - 2 \cdot 15)}{2} = 56,45 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$c/t_f \leq 9 \cdot \xi \Rightarrow 5,27 \leq 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Ànima:

$$c = (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) = 248,6 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

Resistència de la secció:

Determinació de la h necessària per a poder suportar tot l'esforç axial.

$$h = \frac{N_{ed}}{t_f \times f_y} = 12,29$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \times \left(\frac{h}{2} + \frac{N_{ed}}{2 \times t_w \times f_y} - (t_f + r) \right) = 0,53 > 0,5 \text{ Flexocompressió}$$

-Ànima :

$$\frac{c}{t} \leq \frac{396 \times \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = 60,8 > 45,88 \text{ Classe 1}$$

-Ala:

$$\frac{c}{t} \leq 9 \times \varepsilon = 5,27 < 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Resistència a l'esforç tallant.

$$V_{pl,Rd} = A_v \times \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 322,08 \text{ KN}$$

$$A_v = h \times t_w = 2130 \text{ mm}^2$$

$$\frac{V_{pl,Rd}}{2} > V_{Ed}$$

Com que la condició anterior és compleix l'esforç tallant no es considerarà a l'hora de fer l'interacció d'esforços.

B.1.1-Vinclament per flexió

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{6,28 \cdot 10^5 \times 275}{1,05} = 164,57 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A \times f_{yd}} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl} \times f_{yd}} = 0,025 + 0,705 = 0,73 < 1 \text{ Compleix}$$

-Càlcul resistència a compressió:

$$N_{cr,y-y'} = \frac{\pi^2 \times E \times I_{y-y'}}{L_p^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 8,356 \cdot 10^7}{4200^2} = 9,817 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$N_{cr,z-z'} = \frac{\pi^2 \times E \times I_{z-z'}}{L_p^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 6,0378 \cdot 10^6}{4200^2} = 7,0941 \cdot 10^5 \text{ N}$$

$$L_p = L \times \beta = 6000 \times 0,7 = 4200 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_{y-y'} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{5381 \times 275}{9,817 \cdot 10^6}} = 0,388$$

$$\bar{\lambda}_{z-z'} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{5381 \times 275}{7,0941 \cdot 10^5}} = 1,44$$

$$t_f = 10,7 < 40 \text{ mm}$$

$$h/b = 300/150 = 2 \Rightarrow \text{curva b}$$

Pla y-y' \longrightarrow corba a, $\alpha_y = 0,21$

Pla z-z' \longrightarrow corba b, $\alpha_y = 0,34$

$$\begin{aligned} \phi_y &= 0,5 \times [1 + \alpha_y \times (\bar{\lambda}_y \times 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \times [1 + 0,21 \times (0,388 - 0,2) + 0,388^2] = \\ &= 0,59 \end{aligned}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0,96$$

$$\begin{aligned} \phi_z &= 0,5 \times [1 + \alpha_z \times (\bar{\lambda}_z \times 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (1,44 - 0,2) + 1,44^2] = \\ &= 1,74 \end{aligned}$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,366$$

Càrrega d'esgotament plastic:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{5381 \times 275}{1,05} = 1.409 \text{ KN}$$

Factors d'interacció per a seccions de classe 1 i 2:

$$\kappa_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{c,Rd}} \leq 1 + 0,8 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{c,Rd}}$$

$$\kappa_y = 1,005 \leq 1,021$$

$$\kappa_z = 1 + (2 \times \bar{\lambda}_z - 0,6) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}} \leq 1 + 1,4 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}}$$

$$\kappa_z = 1,16 < 1,098$$

Factors del moment flector:

$$\psi = \frac{-79,03}{116,05} = -0,68$$

B.1.2.- Vinclament lateral.

$$\kappa_\theta = 0,7$$

$$\kappa = \kappa_\theta \times L \times \sqrt{\frac{G \times I_t}{E \times I_w}} = 3,29$$

$$c_1 = 3,009$$

$$c_2 = 0$$

$$M_{cr} = c_1 \times \frac{\pi}{L_p} \times \sqrt{G \times I_t \times E \times I_z} \times \left[\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\kappa^2} \times (1 + c_2^2)} - c_2 \times \frac{\pi}{\kappa} \right] = 446,7 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = W_{y,pl} \times f_y = 172,8 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_u}{M_{cr}}} = 0,62$$

Corba b

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0,76$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,83 \leq 1$$

$$C_{m,y} = 0,6 + 0,4 \times \psi \geq 0,4 \quad C_{m,y} = 0,328 \geq 0,4 \text{ S'agafarà } 0,4$$

$$\kappa_{LT} = 1 - \frac{0,1 \times \lambda_z}{C_{m,y} - 0,25} \times \frac{N_{ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}} = 0,93$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times W_{y,pl} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 136,6 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ed} < M_{b,Rd} , 116,05 < 136,6 \text{ Compleix}$$

B.1.3.- Comprovació per les barres considerant el vinclament lateral.

$$\frac{N_{ed}}{\chi_y \times A \times f_{yd}} + \kappa_y \times \frac{C_{m,y} \times M_{y,ed}}{\chi_{LT} \times W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

$$0,37 < 1 \text{ Compleix}$$

Per perfils susceptibles a torsió

$$\frac{N_{ed}}{\chi_z \times A \times f_{yd}} + \kappa_{LT} \times \frac{M_{y,ed}}{\chi_{LT} \times W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

$$0,81 < 1 \text{ Compleix}$$

Esgotament per plastificació:

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,ed}} \leq 1 \quad \frac{N_{ed}}{A \times f_{yd}} + \frac{M_{y,ed}}{W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

$$0,73 < 1 \text{ Compleix}$$

B.2.- Element jàssera .

$$A = 5381,56 \text{ mm}^2$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$I_y = 8,356 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 5,57 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$W_{pl,y} = 6,28 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

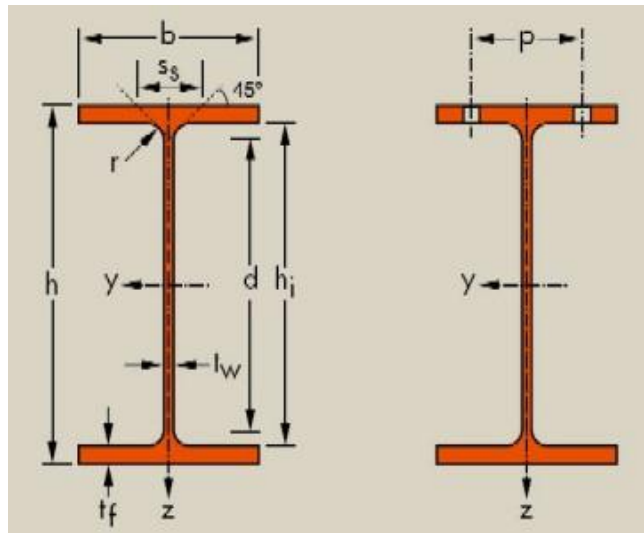
$$I_z = 6,03 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,z} = 8,05 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$$

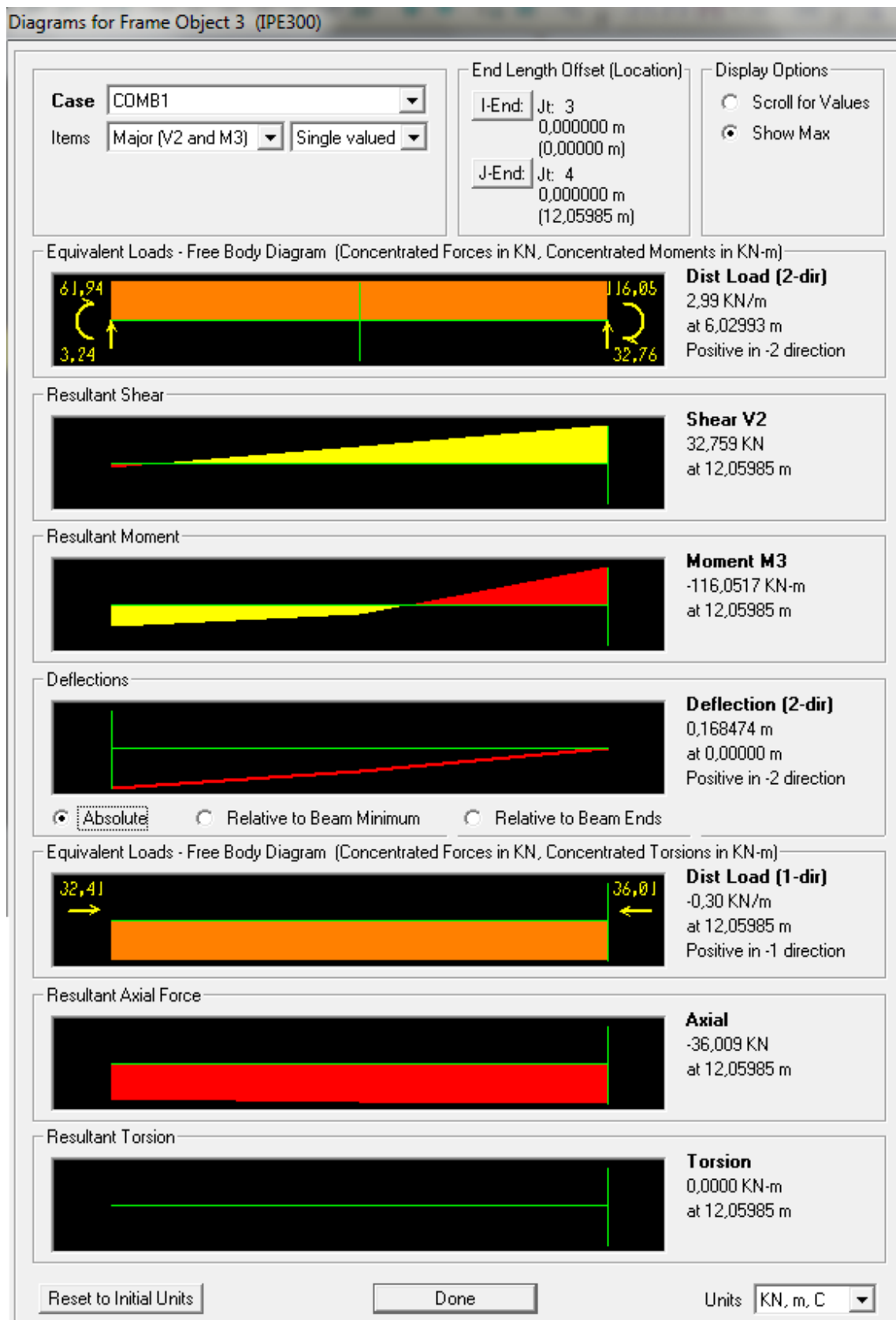
$$W_{pl,z} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$$

$$I_t = 2,012 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

$$I_w = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ mm}^6$$



Esforços actuant	Propietats acer
$N_{ed} = 36,009 \text{ KN}$	$E=2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
$M_{ed} = 116,05 \text{ KN}\cdot\text{m}$	$G=80769 \text{ MPa}$
$V_{Ed} = 32,759 \text{ KN}$	$L=3140\text{mm}$



.-Classificació de la secció:

B.2.1.1.-Classificació de la secció:

$$\xi = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,92$$

Límit elàstic del perfil: $f_y = 275 \text{ MPa}$

-Ala:

$$c = \frac{(b - t_w - 2 \cdot r)}{2} = \frac{(150 - 7,1 - 2 \cdot 15)}{2} = 56,45 \text{ mm}$$

$$t_f = 10,7 \text{ mm}$$

$$c/t_f \leq 9 \cdot \xi \Rightarrow 5,27 \leq 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Ànima:

$$c = (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) = 248,6 \text{ mm}$$

$$t_w = 7,1 \text{ mm}$$

B.1.1.2.- Resistència de la secció:

Determinació de la h necessària per a poder suportar tot l'esforç axial.

$$h = \frac{N_{ed}}{t_f \cdot f_y} = 12,23$$

$$\alpha = \frac{1}{c} \times \left(\frac{h}{2} + \frac{N_{Ed}}{2 \times t_w \times f_y} - (t_f + r) \right) = 0,50 \leq 0,5 \text{ Flexocompressió}$$

-Ànima :

$$\frac{c}{t} \leq \frac{36 \times \varepsilon}{\alpha} = 66,24 > 45,88 \text{ Classe 1}$$

-Ala:

$$\frac{c}{t} \leq 9 \times \varepsilon = 5,27 < 8,28 \text{ Classe 1}$$

-Resistència a l'esforç tallant.

$$V_{pl,Rd} = A_v \times \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 322,08 \text{ KN}$$

$$A_v = h \times t_w = 2130 \text{ mm}^2$$

$$\frac{V_{pl,Rd}}{2} > V_{Ed}$$

Com que la condició anterior és compleix l'esforç tallant no es considerarà a l'hora de fer l'interacció d'esforços.

A.1.2.3-Resistència a moment flector:

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl} \times f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{6,28 \cdot 10^5 \times 275}{1,05} = 164,57 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{N_{Ed}}{A \times f_{yd}} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl} \times f_{yd}} = 0,025 + 0,705 = 0,73 < 1 \text{ Compleix}$$

.- Càlcul a nivell de barra.

B.2.1.-Vinclament a flexió:

$$N_{cr,y-y'} = \frac{\pi^2 \times E \times I_{y-y'}}{L_p^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 8,356 \cdot 10^7}{6092^2} = 4,666 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$N_{cr,z-z'} = \frac{\pi^2 \times E \times I_{z-z'}}{L_p^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \cdot 10^5 \times 6,0378 \cdot 10^6}{6092^2} = 3,372 \cdot 10^5 \text{ N}$$

$$L_p = L \times \beta = 6000 \times 1 = 4200 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_{y-y'} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,y}}} = \sqrt{\frac{5381 \times 275}{4,666 \cdot 10^6}} = 0,563$$

$$\bar{\lambda}_{z-z'} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{5381 \times 275}{3,372 \cdot 10^5}} = 2,09$$

$$t_f = 10,7 < 40 \text{ mm}$$

$$h/b = 300/150 = 2 \Rightarrow \text{curva b}$$

$$\text{Pla } y-y' \longrightarrow \text{corba a, } \alpha_y = 0,21$$

$$\text{Pla } z-z' \longrightarrow \text{corba b, } \alpha_z = 0,34$$

$$\begin{aligned} \phi_y &= 0,5 \times [1 + \alpha_y \times (\bar{\lambda}_y \times 0,2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0,5 \times [1 + 0,21 \times (0,563 - 0,2) + 0,563^2] = \\ &= 0,696 \end{aligned}$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 1,05$$

$$\begin{aligned} \phi_z &= 0,5 \times [1 + \alpha_z \times (\bar{\lambda}_z \times 0,2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (2,09 - 0,2) + 2,09^2] = \\ &= 3 \end{aligned}$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0,19$$

Càrrega d'esgotament plastic:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{5381 \times 275}{1,05} = 1.409 \text{ KN}$$

Factors d'interacció per a seccions de classe 1 i 2:

$$\kappa_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{c,Rd}} \leq 1 + 0,8 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_y \times N_{c,Rd}}$$

$$\kappa_y = 1,008 \leq 1,18$$

$$\kappa_z = 1 + (2 \times \bar{\lambda}_z - 0,6) \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}} \leq 1 + 1,4 \times \frac{N_{Ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}}$$

$$\kappa_z = 1,48 < 1,18$$

Factors del moment flector:

$$\psi = \frac{-61,94}{116,05} = -0,53$$

B.2.2.-Càlcul de l'element a vinclament lateral.

$$\kappa_\theta = 1$$

$$\kappa = \kappa_\theta \times L \times \sqrt{\frac{G \times I_t}{E \times I_w}} = 3,29$$

$$c_1 = 1,132$$

$$c_2 = 0,459$$

$$M_{cr} = c_1 \times \frac{\pi}{L_p} \times \sqrt{G \times I_t \times E \times I_z} \times \left[\sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\kappa^2} \times (1 + c_2^2)} - c_2 \times \frac{\pi}{\kappa} \right] = 84,81 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = W_{y,pl} \times f_y = 172,8 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{M_u}{M_{cr}}} = 1,42$$

Corba b

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \times [1 + \alpha_{LT} \times (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 1,71$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0,37 \leq 1$$

$$C_{m,y} = 0,6 + 0,4 \times \psi \geq 0,4 \quad C_{m,y} = 0,388 \geq 0,4 \text{ S'agafarà } 0,4$$

$$\kappa_{LT} = 1 - \frac{0,1 \times \lambda_z}{C_{m,y} - 0,25} \times \frac{N_{ed}}{\chi_z \times N_{c,Rd}} = 0,95$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times W_{y,pl} \times \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 63,936 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ed} < M_{b,Rd} , 116,05 < 63,936 \text{ No Compleix}$$

B.2.3.- Comprovació per les barres comprimides i flectades considerant el vinclament lateral.

$$\frac{N_{ed}}{\chi_y \times A \times f_{yd}} + \kappa_y \times \frac{C_{m,y} \times M_{y,ed}}{\chi_{LT} \times W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

$$0,763 < 1 \text{ Compleix}$$

Per perfils susceptibles a torsió

$$\frac{N_{ed}}{\chi_z \times A \times f_{yd}} + \kappa_{LT} \times \frac{M_{y,ed}}{\chi_{LT} \times W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

$$1,81 < 1 \text{ No es Compleix}$$

Esgotament per plastificació:

$$\frac{N_{ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{pl,ed}} \leq 1 \quad \frac{N_{ed}}{A \times f_{yd}} + \frac{M_{y,ed}}{W_{y,pl} \times f_{yd}} \leq 1$$

0,705 < 1 *Complex*