

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

Volum I/II

Verificació analítica i numèrica de la patent EP 2305911 aplicada a una xapa nervada comercial per lloses mixtes.

MEMÒRIA

Autor: Carla Ripoll Martínez
Director: Frederic Marimon Carvajal
Miquel Ferrer Ballester
Convocatòria: Abril 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest projecte té com a objectiu l'estudi de les lloses mixtes en la seva fase constructiva. És a dir la caracterització només del comportament de les xapes d'acer conformades en fred, ja que són els únics elements que en aquesta etapa tenen una funció resistiva.

Més específicament es vol aconseguir demostrar la millora de les propietats i definir el comportament de la nova xapa d'acer conformar en fred, KORONA 60, amb un sistema de connexió acer-formigó innovador patentat per la Universitat Politècnica de Catalunya (EP 2305911) respecte les que en l'actualitat estan en ús, mitjançant diferents assajos de laboratori i anàlisis segons l'Eurocodi 3 i GRISPE. L'avantatge principal d'aquesta nova xapa en vers les anteriors i motiu pel qual s'ha realitzat aquest estudi, és la millora del comportament entre acer i formigó.

Es per això que també s'ha tingut en compte en aquest projecte dos perfils addicionals, el PLAIN, sense punxonaments en l'ànima, i l'EMB, sense punxonaments en l'ànima però amb emboticions. Els resultats d'aquests perfils s'han usat per a comparar-los amb el KORONA 60 i poder extreure'n conclusions.

Amb la finalitat de disposar de les dades per arribar a l'objectiu final, s'han realitzat dos tipus d'assajos experimentals, primerament d'un sol va, el qual determina el moment resistent en la meitat del tram (en absència d'esforç tallant) i la rigidesa efectiva a flexió. I assajos de suport intermedi els quals determinen la resistència de la xapa recolzada sobre dos o més suports. Els resultats de les proves s'han tractat com s'especifica en les normes i les conclusions s'han obtingut assolint els paràmetres desitjats mitjançant mètodes analítics i els resultats dels tests.

Addicionalment als assajos experimentals, s'han usat mètodes analítics i simulacions amb elements finits per facilitar la comprovació i validació dels resultats. Pel que fa als estudis analítics s'ha buscat les diferents propietats de les xapes i s'ha definit el seu comportament, mentre que les simulacions s'han usat per comprovar els resultats obtinguts de manera experimental i extreure les corbes Força-Desplaçament.

Aquest projecte inclou una memòria descriptiva dels procediments de càlcul seguits i dels resultats obtinguts juntament amb uns annexos que recullen el desenvolupament numèric dels processos descrits i altra informació complementària.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	5
1. GLOSSARI	9
2. INTRODUCCIÓ	14
2.1. Objectius del projecte.....	14
2.2. Abast del projecte	14
3. LLOSES MIXTES	17
3.1. Definició.....	17
3.2. Sistema de connexió entre materials.....	17
4. ASSAJOS AL LABORATORI	19
4.1. Introducció.....	19
4.1.1. D'un sol va. M ⁺ i M ⁻	19
4.1.2. Suport intermedi. Doble va.	20
4.2. Geometria i material.....	21
4.2.1. Geometria	21
4.2.2. Material	24
4.3. Protocol d'assaig	25
4.3.1. Disposició de l'assaig.....	25
4.3.2. Procediment de muntatge i assaig	27
4.3.3. Equip i instrumentació	30
4.4. Resultats de l'assaig	31
4.4.1. Un sol va. M ⁺ i M ⁻	33
4.4.2. Suport intermedi. Doble va.	38
5. RESULTATS ANALÍTICS ELÀSTICS - KORONA 60	47
5.1. Verificacions	48
5.2. Propietats brutes de la secció.....	49
5.3. Propietats eficaces de la secció.....	55
5.3.1. Moment positiu	56
5.3.1.1. Ala superior	56
5.3.1.2. Ànima.....	60
5.3.1.3. Ala inferior	64

5.3.1.4. Secció completa.....	64
5.3.2. Moment negatiu.....	65
5.3.2.1. Ala superior.....	65
5.3.2.2. Ànima.....	65
5.3.2.3. Ala inferior.....	66
5.3.2.4. Secció completa.....	66
6. RESULTATS ANALÍTICS ELÀSTICS – PLAIN	67
6.1. Propietats brutes de la secció	67
6.2. Propietats eficaces de la secció	67
7. RESULTATS ANALÍTICS ELÀSTICS – EMB	69
7.1. Propietats brutes de la secció	69
7.2. Propietats eficaces de la secció	71
8. RESULTATS ANALÍTICS PLÀSTICS	75
9. ESTUDI AMB SEFICAZ 5 SOFTWARE	79
10. COMPARATIVA DE RESULTATS	81
11. ESTUDI AMB ELEMENTS FINITS	85
11.1. Geometria.....	85
11.2. Elements, material i malla	86
11.3. Condicions de contorn.....	88
11.4. Resolució	89
11.4.1. Estudi dels modes de vinclament	90
11.4.2. Estudi no lineal	91
12. PLANIFICACIÓ I PRESSUPOST DEL PROJECTE	95
12.1. Planificació.....	95
12.2. Pressupost.....	96
13. ESTUDI MEDIAMBIENTAL	97
13.1. Impacte ambiental	97
13.2. Reciclatge dels materials.....	98
14. CONCLUSIONS	99
15. AGRAÏMENTS	101
16. BIBLIOGRAFIA	103

16.1. Referències bibliogràfiques.....	103
16.2. Bibliografia complementària.....	103

ANNEX A. PROPIETATS ELÀSTIQUES EFICACES DE LA SECCIÓ

ANNEX B. RESULTATS DELS ELEMENTS FINITS

ANNEX C. ARTICLE CIENTÍFIC

1. Glossari

α :	<i>coeficient segons EN 1993-1-3:2006 apartat 6.1.7.3 [2].</i>
α_{emb} :	<i>angle de gir de les emboticions respecte l'eix horitzontal.</i>
β_v :	<i>factor segons EN 1993-1-3:2006 apartat 6.1.7.3 [2].</i>
γ_{M0} :	<i>factor de seguretat.</i>
ε :	<i>factor de relació.</i>
η_k :	<i>coeficient corrector de la força mitjana.</i>
$\overline{\lambda}_d$:	<i>esveltesa relativa segons EN 1993-1-3:2006 [2]</i>
$\overline{\lambda}_p$:	<i>esveltesa relativa segons EN 1993-1-5:2005 [6].</i>
μ_R :	<i>coeficient d'ajust.</i>
ρ :	<i>factor reductor.</i>
ρ_{emb} :	<i>factor reductor degut a les emboticions.</i>
σ :	<i>tensió dels diferents elements.</i>
σ_r :	<i>tensió del rigiditzador en l'ala superior.</i>
σ_{cr} :	<i>tensió crítica elàstica de vinclament de la xapa.</i>
$\sigma_{cr,s}$:	<i>tensió crítica.</i>
ϕ :	<i>angle de gir de l'ànima respecte l'eix horitzontal.</i>
χ_d :	<i>factor reductor.</i>
ψ :	<i>rati de tensions (σ_2/σ_1) segons la Tabla 4.1. de EN 1993-1-5:2005 [6].</i>
a :	<i>espai entre els centres de les perforacions.</i>
A_c :	<i>àrea bruta.</i>
$A_{c,eff}$:	<i>àrea eficaç.</i>
A_s :	<i>àrea trobada segons la Fig. 5.11 (Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2]).</i>
b :	<i>amplada de la secció.</i>
\bar{b} :	<i>longitud de la secció de xapa sense rigiditzadors intermedis.</i>
b_d :	<i>longitud corresponent a dues vegades b_p més una vegada b_s.</i>
b_{e1} :	<i>longitud eficaç segons Tabla 4.1 EN 1993-1-5:2005 [6].</i>
b_{e2} :	<i>longitud eficaç segons Tabla 4.1 EN 1993-1-5:2005 [6].</i>
b_{eff} :	<i>longitud eficaç de la zona comprimida.</i>
b_p :	<i>longitud definida segons la Fig. 5.12(Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2]).</i>
b_s :	<i>longitud definida segons la Fig. 5.12(Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2]).</i>
b_u :	<i>longitud de l'ala inferior definida segons la Fig. 5.16.</i>
d :	<i>diàmetre de les perforacions.</i>
E :	<i>mòdul de Young.</i>
e_0 :	<i>amplada de la imperfecció inicial.</i>

F_{crit}	càrrega crítica de vinclament.
F_k :	valor característic fractil 5% de la força.
F_m :	força mitjana.
F_u :	força última/màxima.
f_{yb} :	límit elàstic del material.
$f_{yb,obs}$:	límit elàstic del material experimental.
g_r :	distància entre P i X en direcció a la línia mitja de la secció.
h :	alçada vertical de la secció.
h_{emb} :	alçada de l'embotició.
h_r :	alçada vertical del rigiditzador en l'ala superior.
I_C :	moment d'inèrcia propi respecte el centre de gravetat de l'element.
I_{eff} :	moment d'inèrcia experimental.
I_{EN} :	moment d'inèrcia respecte l'eix neutre de la secció.
$I_{EN,eff}$:	moment d'inèrcia respecte l'eix neutre eficaç de la secció.
I_s :	moment d'inèrcia trobat segons la Fig. 5.11 (Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2]).
I_x :	moment d'inèrcia respecte l'eix x .
I_y :	moment d'inèrcia respecte l'eix y .
k :	coeficient corrector de la desviació tipus.
k_{σ} :	factor de vinclament segons la Tabla 4.1. de EN 1993-1-5:2005 [6].
k_w :	coeficient que considera la coacció parcial al gir de l'ala rigiditzada per les animes o altres elements adjacents.
L :	distància entre màxims consecutius.
l :	longitud de l'element.
l_a :	longitud de suport efectiva segons EN 1993-1-3 apartat 6.1.7.3:2006 [2].
l_b :	longitud de vinclament de la zona en compressió.
l_{emb} :	longitud vertical de les emboticions.
$M_{el,Rd,eff}$:	moment resistent eficaç.
M_{Rk} :	moment resistent experimental.
P :	punt mig de les cantonades.
r :	radi interiors de les cantonades en la secció.
r_m :	radi de la línia mitja de les cantonades en la secció.
$R_{w,Rd}$:	reacció.
s :	desviació tipus.
$s_{eff,0}$:	longitud eficaç segons Figura 5.12 EN 1993-1-3:2006 [2].
$s_{eff,1}$:	longitud eficaç segons Figura 5.12 EN 1993-1-3:2006 [2].
$s_{eff,n}$:	longitud eficaç segons Figura 5.12 EN 1993-1-3:2006 [2].
s_n :	longitud referida a la diferència entre s_w i l'alçada del eix neutre inclinat.

S_{Neff} :	longitud no eficaç segons Figura 5.12 EN 1993-1-3:2006 [2].
S_s :	longitud del suport rígid.
S_w :	alçada inclinada de l'ànima.
t :	gruix de la xapa.
$t_{a,eff,E}$:	gruix reduït segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 10.4 pel càlcul de les propietats brutes.
$t_{a,eff,G}$:	gruix reduït segons GRISPE PLUS D3.1: PERFORATED PROFILES [5] pel càlcul de les propietats brutes.
$t_{b,eff}$:	gruix reduït segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 10.4 i GRISPE PLUS D3.1: PERFORATED PROFILES [5] pel càlcul de les propietats eficaces.
t_{nom} :	gruix nominal de la xapa.
t_{obs} :	gruix de la xapa experimental.
t_{red} :	gruix reduït.
$t_{red,emb}$:	gruix reduït degut a les emboticions.
v :	distància entre l'eix neutre i la fibra més allunyada.
$V_{Ed,1}, V_{Ed,2}$:	valor dels esforços tallants transversals a cada costat de la càrrega local o reacció en el suport.
W_{pl} :	mòdul resistent plàstic.
W_{res} :	mòdul resistent elàstic.
$W_{res,eff}$:	mòdul resistent elàstic eficaç.
W_{Rk} :	mòdul resistent experimental.
X :	intersecció de les línies mitges del perfil en les cantonades.
x :	amplada de la zona plàstica de l'ànima en plastificació parcial.
z :	distància entre l'eix mig de cada part de la secció i l'eix inferior.
z' :	distància entre l'eix mig de cada part de la secció i l'eix superior.
z_0 :	distància vertical entre el centre de gravetat de cada element i l'eix neutre.
z_G :	eix neutre.
$z_{G,eff}$:	eix neutre eficaç.
z_{pl} :	distància entre baricentres de la zona comprimida i traccionada en plastificació.

2. Introducció

La utilització de lloses mixtes està molt estès per a edificis amb estructures metàl·liques, ja que presenta grans avantatges respecte a altres sistemes estructurals.

2.1. Objectius del projecte

Els objectius principals d'aquest treball són els següents:

- Realitzar un anàlisi detallada de les geometries de les xapes d'acer (KORONA 60, PLAIN i EMB) per extreure les propietats elàstiques (tant brutes com eficaces) i plàstiques i observar la variació d'aquestes propietats en funció del gruix i del material del que està constituïda la xapa, segons la normativa de l'Eurocodi-3. D'aquesta manera es podran extreure conclusions de quin comportament tenen envers a un càrrega de moment flector.
- Realitzar una comparativa de resultats entre els diferents perfils; KORONA 60, PLAIN i EMB per poder definir la validesa resistiva al moment flector que té el nou sistema de connexió (KORONA 60) respecte els antics (PLAIN i EMB).
- Verificar les similituds i diferències entre els assajos reals de les xapes d'acer (KORONA 60, PLAIN i EMB) amb els resultats obtinguts mitjançant un programa de simulació per elements finits.

2.2. Abast del projecte

Pel que fa l'abast del projecte, primer de tot, cal tenir en compte que només es dura a terme l'estudi de les lloses mixtes en una etapa constructiva. És a dir, només s'estudiarà la xapa d'acer, sense el formigó ni el mallat corresponent. Per tant els resultats de resistència màxima obtinguts seran únicament comparats amb el pes propi del formigó i el mallat.

Per altre banda, s'estudiaran uns gruixos i longituds específics de la xapa. En el cas del perfil KORONA 60, els resultats podran ser extrapolats a altres mides de xapa però només en les quals les seves dimensions es trobin dins del interval estudiat.

Es realitzaran dos tipus d'assajos, xapa bisuportada pels extrems i suport intermedi, els quals s'utilitzaran per a realitzar la comparació entre els diferents perfils. En canvi, pel que fa l'estudi analític i el de simulació només es durà a terme amb el primer tipus de suport.

3. Lloses mixtes

3.1. Definició

La llosa mixta que també es pot anomenar forjat col·laborant o forjat mixt, és un element estructural usat en estructures mixtes i sotmès bàsicament a esforços de flexió. Està formada per un perfil de xapa d'acer conformat en fred, una armadura superior i un formigonat in situ (Fig. 3.1).



Fig. 3.1. Components d'un forjat col·laborant.

En l'etapa constructiva la xapa té la funció d'encofrat i suport del formigó fresc, mentre que un cop el formigó ha endurit, passa a treballar a tracció. Aquest tipus de forjat permet construccions amb grans llums recolzant les lloses sobre bigues.

La utilització de lloses mixtes aporta moltes avantatges. Per una banda, amb la utilització d'aquests elements hi ha menys construcció in situ, pel fet de que la xapa d'acer actua com a encofrat, evitant la utilització d'encofrats temporals reduint costos de mà d'obra i temps d'execució. Aquest fenomen també fa que la construcció sigui més segura, amb plataformes de treball més estables durant la fase d'execució del forjat.

Per altre banda, són construccions més lleugeres degut a la bona relació resistència-pes, ja que el perfil de la xapa redueix el volum de formigó i aprofita eficientment els materials, utilitzant les millors propietats del formigó i les millors de l'acer.

3.2. Sistema de connexió entre materials

Un dels principals motius de fallida en els forjats col·laborants és el degut al lliscament longitudinal entre la xapa d'acer i el formigó. És per això que es procura augmentar al

màxim el grau d'interacció entre els dos elements.

A part de la connexió química que intervé durant el formigonat també existeixen altres elements que milloren la connexió acer-formigó. La majoria de xapes metàl·liques incorporen un patró repetitiu d'emboticions per tota l'ànima. L'efecte que provoquen és similar a la corrugació de les varetes en les barres d'acer en el formigó armat., de manera que l'esforç tallant longitudinal es transfereixi entre acer i formigó. Tot hi així, aquestes emboticions també són responsables del efecte cunya, el qual transforma el lliscament longitudinal en força sobre la xapa. Això provoca principalment la flexió transversal de la xapa, presentant una rigidesa molt menor, i la separació vertical d'ambdós elements quan el lliscament és suficientment alt per alliberar-los i consegüentment a caiguda de càrrega. Fet que provoca una fallada prematura de la llosa mixta.

Un altres tipus de connexions són les xapes amb perforacions fruit de la patent de la UPC ES2343489 la qual millora l'adhesió entre acer i formigó. El nou sistema de connexió consisteix en realitzar ruptures en forma de corona a la xapa orientades cap on hi ha contacte amb el formigó fresc per a que aquestes ruptures acabades en puntes quedin incrustades al formigó un cop aquest endureixi, adquirint una connexió total entre els dos materials.

4. Assajos al laboratori

4.1. Introducció

Tot i les lloses mixtes estar formades per una xapa, formigó i un mallat, només s'han dut a terme els anàlisis resistents a flexió de la xapa metàl·lica. S'ha estudiat el comportament de la llosa mixta en una etapa constructiva, és a dir, quan el formigó fresc s'està acomodant sobre la xapa d'acer i per tant aquest encara no té cap propietat resistent, més aviat treballa en forma de càrrega respecte l'acer. És per això que és necessari validar la capacitat resistent de la xapa envers el pes del formigó fresc.

Els resultats obtinguts es poden separar en dos estats de càrrega diferents. Pel que fa el mòdul resistent, el qual està directament relacionat amb el moment resistent, ens dona una resposta corresponent a l'estat límit últim (ELU), és a dir, amb càrrega màxima. Mentre que el moment d'inèrcia, per contraposició està estretament relacionat amb la fletxa de la xapa, i per tant una resposta de estat límit de servei (ELS).

Aquest projecte contempla tres tipus d'anàlisis, assaig d'un sol tram aplicant-hi un moment positiu i negatiu i per altre banda, assaig de suport intermedi aplicant-hi un moment negatiu.

4.1.1. D'un sol va. M^+ i M^-

L'assaig de la xapa d'un sol va, s'ha realitzat per a determinar el mòdul resistent en la meitat de la placa (en absència de força de cisallament) i quin estat el seu comportament quan està en la fase constructiva, és a dir, quan està aguantant el formigó fresc. Aquest test ha estat dividit en 2 subtipus; moment flector positiu i moment flector negatiu.

Per tenir suficient informació per a la caracterització del comportament de la xapa i finalment la comparació dels resultats entre perfils, s'han utilitzat diferents espècimens per a cada perfil amb unes propietats geomètriques pròpies. Aquestes diferències geomètriques de cada espècimen es mostren en la Taula 4.1.

Assaig	Model	Amplada (mm)	Longitud (mm)	Gruix (mm)	Nº espècimens
MOMENT POSITIU	KORONA 60	615	3.000	0,75	3
				1	3
				1,2	3
	EMB	615	3.000	0,75	3
	PLAIN	615	3.000	0,75	1
MOMENT NEGATIU	KORONA 60	820	3.000	0,75	3
				1	3
				1,2	3
	EMB	820	3.000	0,75	3
	PLAIN	820	3.000	0,75	1

Taula 4.1 Nombre d'espècimens de l'assaig d'un sol tram segons el model, la longitud, l'amplada i el gruix.

Es van realitzar un total de 22 assajos d'un sol va.

4.1.2. Suport intermedi. Doble va.

Aquest assaig s'ha realitzat per a determinar la resistència de la xapa continua al llarg de dos o més trams o la xapa amb una combinació de de moment i cisallament en suport intermedi. Per altre banda, la resistència a les diferents combinacions moment i reacció en el suport per les diferents mides donades.

Cada resultat ha estat utilitzat per representar la combinació entre la resistència al moment flector i la reacció en els suport (o força de cisallament) per a la amplada de suport donada. Aquesta representació s'ha realitzat amb els gràfics d'interacció on es dibuixa una zona de seguretat utilitzant els valors de moment negatiu extrets de l'assaig d'un un sol tram i la reacció calculada. Després, en aquest mateix gràfic, es representen la combinació dels valors moment i força de cada espècimen de l'assaig de suport intermedi. Aquest últims valors han de quedar dins l'àrea segura del gràfic per demostrar un bon comproment de la secció.

Per tenir suficient informació per a la caracterització del comportament de la xapa i finalment la comparació dels resultats entre perfils, s'han utilitzat diferents espècimens per a cada perfil amb unes propietats geomètriques pròpies. Aquestes diferències geomètriques es mostren en la Taula 4.2.

Model	Amplada (mm)	Gruix (mm)	Longitud (mm)	Nº espècimens
KORONA 60	820	0,75	400	2
			700	2
			1.300	2
		1,2	400	2
			700	2
			1.300	2
EMB	820	0,75	400	2
			700	2
			1.300	2
		1,2	400	2
			700	2
			1.300	2
PLAIN	820	0,75	700	2

Taula 4.2 Nombre d'espècimens de l'assaig de suport intermedi segons el model, la longitud, l'amplada i el gruix.

Es van realitzar un total de 26 assajos de suport intermedi.

4.2. Geometria i material

4.2.1. Geometria

En aquest projecte s'han tingut en compte tres tipus de perfils. El primer i més important ha estat el KORONA 60, patent de la UPC, després el perfil PLAIN i finalment, l'EMB (Fig. 4.1). Aquests dos últims han estat utilitzats únicament per comparar, respecte el primer, el seu comportament en vers a l'aplicació d'un moment flector i veure si els resultats obtinguts de l'assaig de la patent eren suficients.

En primer lloc, la geometria general d'aquests tres perfils és la mateixa per tots, és a dir, les dimensions principals és mantenen, l'única diferència es troba en la forma de la xapa de l'ànima. En el perfil KORONA 60 s'hi troben uns punxonaments distribuïts al portell de manera que formen un triangle isòsceles entre ells, en canvi, pel perfil PLAIN, l'ànima és una xapa completament plana i sense cap peculiaritat, per últim, el perfil EMB, en l'ànima s'hi troben unes emboticions en forma de doble T i completament perpendiculars a l'eix horitzontal.

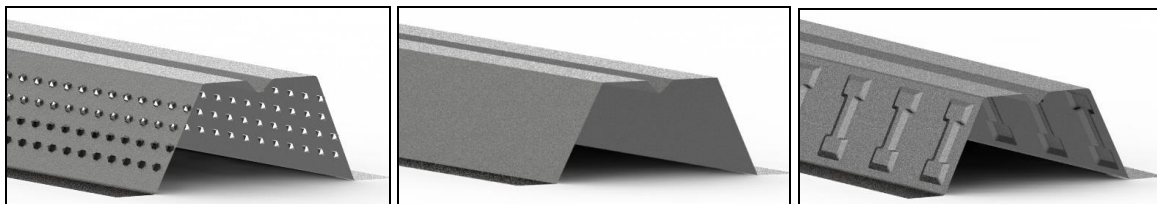


Fig. 4.1. Models d'estudi; KORONA 60, PLAIN i EMB respectivament.

Les dimensions generals que es mantenen constants per a tots els perfils són les següent. Una alçada de 59 mm i una amplada total de 612 mm pel cas de suports en els extrems en moment positiu, i de 820 mm en el cas de suports en els extrems amb moment negatiu i suport intermedi (per evitar tenir ones incompletes i elements volats). Les ànimes estan inclinades amb un angle de 62° . En l'ala superior de la secció s'hi troba un rigiditzador de 11 mm d'alçada i dos nervis més subtils de 2 mm d'alçada al seu voltant. Pel que fa l'ala inferior només consta dels dos nervis més petits de 2 mm d'alçada.

Aquestes dimensions geomètriques principals de les diferents seccions es poden trobar en la Fig. 4.2, i en la Fig. 4.3 amb més detall dels nervis longitudinals que es troben en les ales.

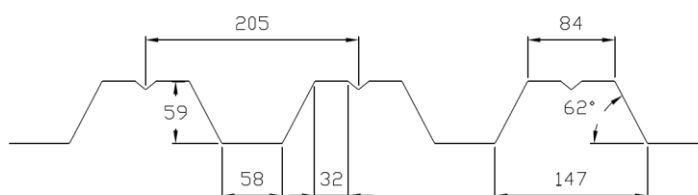


Fig. 4.2. Geometria general de la secció KORONA 60, PLAIN i EMB.

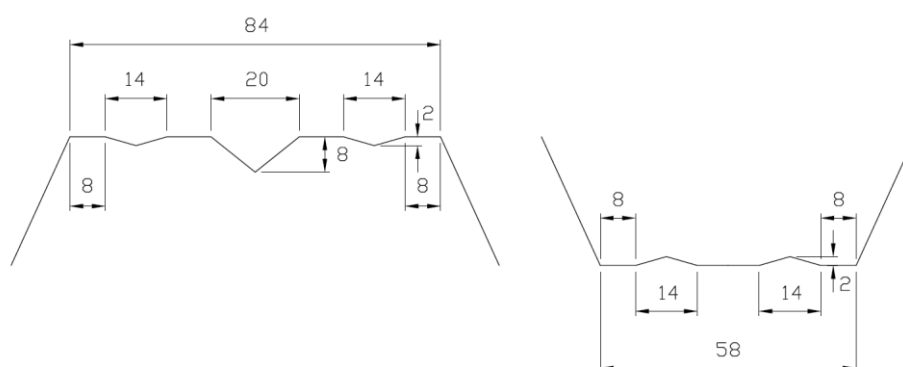


Fig. 4.3. Detall dels petits nervis longitudinals en els perfils KORONA 60, PLAIN i EMB.

S'ha de tenir en compte que aquestes seccions provenen d'una bobina de xapa plana la qual s'ha anat doblegant per tal de aconseguir la geometria desitjada. És per aquest motiu, que les cantonades per on s'han fet aquests plects no són de cantell viu, sinó que consten de un radi d'acord de 3 mm.

Les característiques geomètriques presentades en la Fig. 4.2 i Fig. 4.3 han estat testades aleatòriament abans de cada test per verificar si els seus valors nominals eren correctes. El resultat extret dels tests es poden observar en la Fig. 4.4.

Descripció	Valor nominal (mm)	Valors mig (mm)
Altura del perfil	59	58-60
Pas d'ona	205	205-206
Altura rigiditzador ala superior	11	8
Nervi longitudinal ala superior	2	1,0-1,5 ¹
Nervi longitudinal ala inferior	2	1,0-1,5 ²

Fig. 4.4. Verificació de dimensions principals del perfil KORONA 60, PLAIN i EMB.

El perfil KORONA 60, la patent de la UPC, té uns punxonaments en l'ànima de la secció. Aquests garanteixen una bona connexió entre la xapa i el formigó per a transferir els esforços de cisallament, és per això que han d'estar correctament dimensionats. La geometria d'aquests elements, consta de uns forats quadrats en forma de corona orientats cap on està en contacte amb el formigó fresc. El punxó és de 4 x 4 mm i el centre de cada un d'ells està separat 12 mm en ambdues direccions. El patró que queda és en forma de triangle isòsceles (Fig. 4.5).

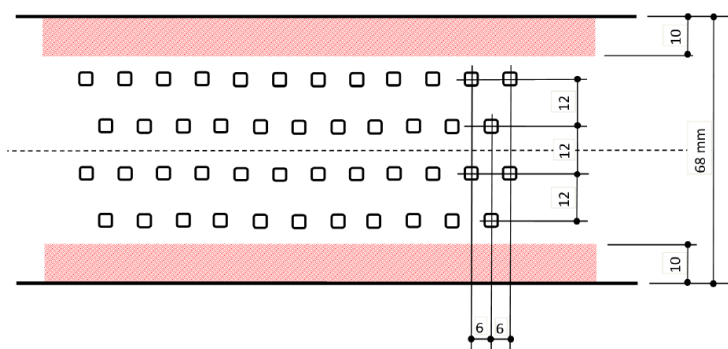


Fig. 4.5. Geometria i dimensions de la secció KORONA 60.

¹ En algunes ones era molt poc marcada o inexistent

² En algunes ones era molt poc marcada o inexistent

El perfil PLAIN, com s'ha explicat anteriorment, no té cap característica geomètrica especial a l'ànima. No és més que el perfil general de la Fig. 4.2 amb l'ànima completament plana, sense forats ni emboticions.

Pel que fa el perfil EMB, consta de unes emboticions en l'ànima, per a mantenir una bona connexió entre la xapa d'acer i el formigó. Aquest és un perfil comercial, anomenat EUROCOL® 60 [1] de l'empresa EUROPERFIL S.A. i les característiques geomètriques d'aquestes emboticions es mostren a continuació (Fig. 4.6). La profunditat de les emboticions és de 1,74 mm.

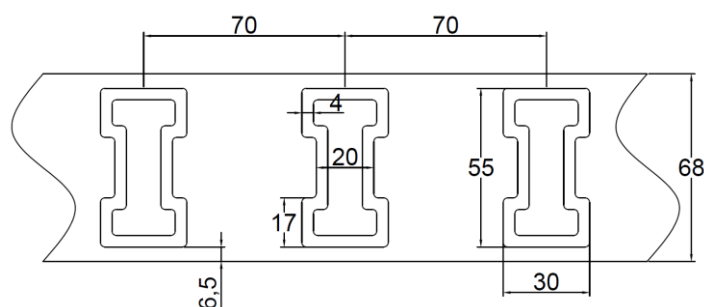


Fig. 4.6. Geometria i dimensions en mm de la secció EMB.

4.2.2. Material

La xapa trapezoidal conformada en fred utilitzada en aquests estudis experimentals, té un acer diferent segons els seus gruixos nominals, 0,75 mm, 1,0 mm i 1,2 mm. Per tots els experiments s'ha utilitzat unes bobines amb un acer de qualitat nominal S230GD+Z275, que segons EN 1993-1-3:2006 [2] tenen un límit elàstic de $f_y = 320 \text{ N/mm}^2$. Aquesta xapa continua ha estat galvanitzada amb zinc pels dos costats, amb un gruix total de 0,04 mm i una massa equivalent de 275 g/m^2 . S'ha controlat la tensió de límit elàstic, la tensió de ruptura i l'allargament percentual del material per cada gruix utilitzat. Els resultats es poden veure en la Taula 4.3.

Gruix (mm)	Acer	Proveïdor	$R_{p0,2\%}$ (N/mm ²)	R_m (N/mm ²)	A80 (%)
0,75	S320GD+Z	ThyssenKrupp Steel Europe	377	474	26
1,00	S320GD+Z	Gutfor S.A	377	427	26,6
1,20	S320GD+Z	ArcelorMittal España, S.A.	388	481	22

Taula 4.3. Resultats dels assajos de les propietats de l'acer.

Tot hi que el procés de conformació en fred altera significativament les característiques de

l'acer, aquests resultats s'han d'interpretar com a simple control. La referència del material base S320GD+Z utilitzat ha de ser el de la bobina anterior al procés de conformat, i les correccions s'han de realitzar utilitzant aquells valors.

Finalment, però, cal remarcar que el coeficient de seguretat utilitzat en tots els apartats els quals s'ha usat aquest límit elàstic ha estat de $\gamma_{MO} = 1$. S'utilitza aquest valor ja que com s'exposa en l'apartat 2 de EN 1993-1-3:2006 [2] l'assaig a tractar és d'estat límit últim a la resistència de seccions transversals a la plastificació, incloent l'abonyegament i el vinclament per distorsió.

4.3. Protocol d'assaig

4.3.1. Disposició de l'assaig

Pel que fa les condicions d'enllaç, s'han considerat les més desfavorables segons l'apartat A.2.1(5) de EN 1993-1-3:2006 [2]. Per un costat hi ha una articulació fixa (Fig. 4.7) i per l'altre una articulació mòbil (Fig. 4.8), aquests s'han usat per evitar qualsevol influència de la restricció de rotació en els suports sobre els resultats dels assajos.



Fig. 4.7. Articulació fixa.

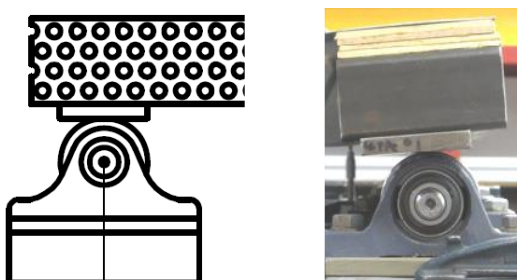


Fig. 4.8. Articulació mòbil.

En quan a la disposició de forces s'ha de diferenciar entre els dos casos d'assaig, per una banda assaig d'un sol tram i per altre, assaig de suport intermedi. Ambdós han estat

efectuats segons l'establert en l'Annex A de EN 1993-1-3:2006 [2].

En el primer assaig, és possible determinar el moment resistent, el mòdul resistent i la inèrcia en el centre de la xapa de forma directe a partir dels resultats experimentals. L'assaig s'ha realitzat en xapes d'un sol tram i la distribució de carregues és tal i com es mostra en la Fig. 4.9. Pel que fa el gràfic de la esquerra, és la distribució real de carregues, en canvi, el gràfic la dreta, és la disposició de carregues alternatives equivalents a les real les quals s'usen per a poder extreure resultats de manera experimental.

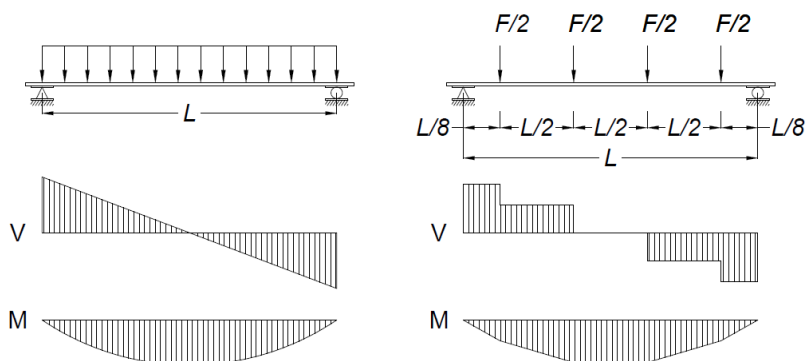


Fig. 4.9. Aplicació de la càrrega teòrica i real, respectivament en un sol va.

En canvi, pel segon assaig (doble va) (Fig. 4.10) es determina la interacció entre la reacció en el suport i el moment resistent. Per a calcular aquesta interacció s'usa la llum s , utilitzada per a representar la part de la xapa entre els punts de flexió zero a cada costat del suport intern sobre una xapa continua de més de dos trams iguals L , la qual es pot obtenir a partir de $s = 0,4 \cdot L$.

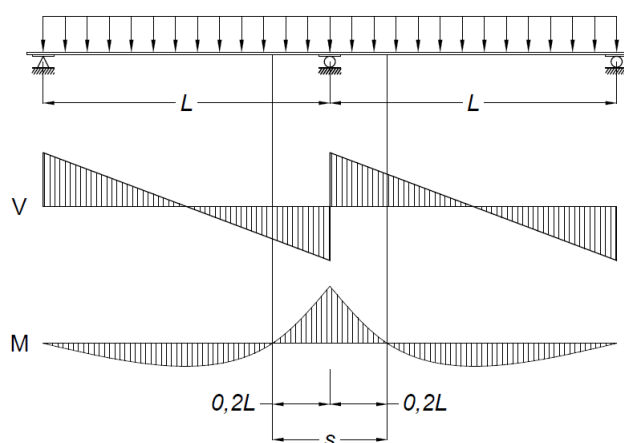


Fig. 4.10. Aplicació de la càrrega en doble va.

Així doncs, aquest longitud de xapa s que forma part de l'assaig de doble tram es pot assimilar a un assaig de suport intermedi (Fig. 4.11) ja que els seus diagrames (tant de tallant com de moment) són molt semblants però invertits.

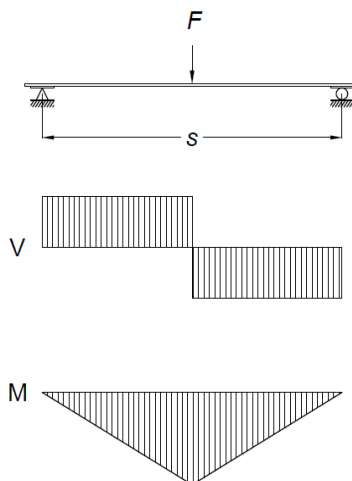


Fig. 4.11. Aplicació de la càrrega en suport intermedi.

4.3.2. Procediment de muntatge i assaig

S'ha de tenir en compte que el procediment de muntatge i assaig de les diferents xapes és força semblant en els dos casos d'assaig però no completament igual. És per això que s'ha de fer diferenciació entre ambdós.

En quan al assaig d'un sol va, se situen manualment les xapes sobre els cavallets de recolzament, just sota el marc de càrrega que suporta el dispositiu del cilindre hidràulic. Com s'ha comentat, s'assaja dos amplex de xapa diferents; 615 mm i 820 mm segons si és M^+ o M^- respectivament.

Pel fixatge de la xapa és realitza utilitzant cargols de mètrica M5 a las platines de recolzament. A més a més, aquesta està lligada a uns angles d'alumini en forma de L en la zona d'aplicació de la càrrega per evitar la seva obertura i reproduir la continuïtat lateral d'ella mateixa, seguint les recomanacions del apartat A.2.1(3) de EN 1993-1-3:2006 [2].

A continuació, s'efectua un centrat general del sistema i es procedeix a la col·locació de uns trossos de tubs rectangulars tallats a 100 mm. En la zona de contacte entre el tub rígid d'acer i la xapa s'intercalen unes plaques de fusta de 8 mm de gruix que repeteixen la càrrega uniformement i amb ductilitat, evitant punts de contacte rígid entre ambdós i també els possibles danys localitzats sobre les ones inferiors del perfil (Fig. 4.12).

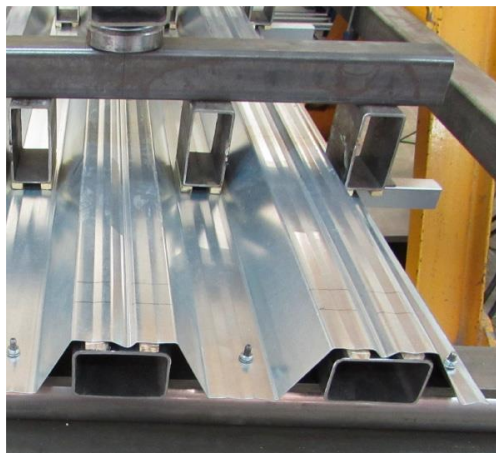


Fig. 4.12. Representació de l'aplicació de la càrrega i fixat de la xapa.

Sobre aquests trossos de tub rectangular es recolza els tubs transversals de 60 x 60 x 4 mm. Seguidament, es centren i col·loquen les ròtules esfèriques sobre ells i els tubs longitudinals d'acer de 100 x 100 x 4 mm.

Finalment, el perfil HE120B, que està inicialment suspès del captador de força, reparteix l'acció del cilindre hidràulic sobre aquests tubs longitudinals mitjançant uns recolzaments de mitja canya (Fig. 4.13).

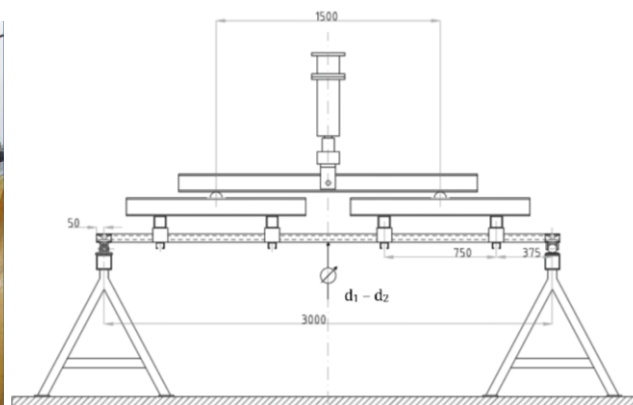


Fig. 4.13. Sistema de càrrega i posició dels captadors de desplaçament en el assaig d'un sol va.

La mesura de la dels desplaçaments es realitza mitjançant dos sensors d1-d2, els quals es troben el punt mig de la xapa, sota la força (Fig. 4.13). Estan calibrats a zero quan la xapa aguanta el seu pes propi més el pes dels perfils i accessoris prèviament nomenats. Estan col·locats a una distància de 10 mm de la cantonada corresponent a la unió entre ala i ànima. Cal tenir en comte, que per garantir una correcta extracció de dades, és necessària una superfície plana, per això s'utilitza una petita placa d'acer en aquesta zona, la qual està

suportat mitjançant un imant.

Per altre banda, l'aplicació de la càrrega es mesura amb una cel·la de càrrega col·locada en el mig de la llum de la xapa, i amb un rang de força d'entre 0 a 50 kN, la qual es calibra a zero amb la biga central de repartiment suspesa. Conseqüentment, el dispositiu de mesura de la força proporcionarà la suma de forces exercides pel cilindre hidràulic més el pes incorporat per dita biga central (Eq 4.1).

$$F_{\text{captador}} = \text{Força en el cilindre hidràulic} + \text{Pes de la biga central} \quad (\text{Eq 4.1})$$

L'aplicació de la càrrega és monotònica creixent mitjançant el control manual de l'equip hidràulic i la duració de l'assaig és sempre superior a 5 minuts. El procediment d'assaig estableix, que el procés de càrrega ha de ser progressiu i a una velocitat constant. Després d'arribar al punt màxim de càrrega i per tant amb la conseqüent caiguda de força, l'assaig ha de continuar més enllà del pic de càrrega i seguir enregistrant els valors de deformació fins que el valor de càrrega s'hagi reduït un 10% o 15% respecte el seu valor pic o bé aquesta deformació sigui 6 vegades més gran que el valor màxim de desplaçament elàstic.

En canvi, pel que fa l'assaig d'un suport intermedi, per aplicar la força sobre el sistema s'utilitza una biga transversal d'acer IPN60 col·locada al mig de la xapa, i just per sota, entre la biga i la xapa, una placa d'acer amb un gruix controlat de 60 mm de petjada (Fig. 4.14). La unió entre la biga IPN60 i el cap del cilindre és mitjançant una junta esfèrica per permetre el correcte assentament d'aquesta durant els tests. Tots aquests elements col·locats sobre la xapa són considerats part de la càrrega, per això, s'han de tenir en compte en l'anàlisi de resultats.

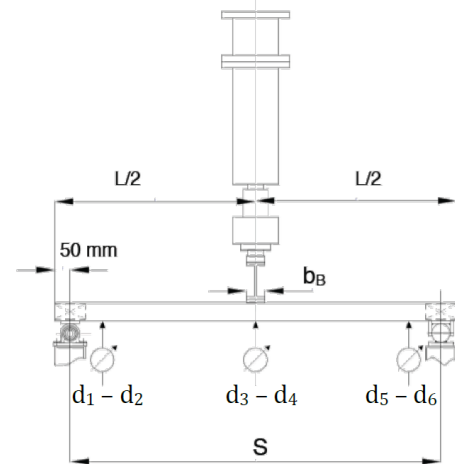


Fig. 4.14. Sistema de càrrega i posició dels captadors de desplaçament en el assaig de suport intermedi.

En quan als desplaçaments, aquests són mesurats mitjançant sis sensor, d1-d2 i d5-d6 al costat dels suports i d3-d4 en el mig de la xapa, sota la força aplicada (Fig. 4.14). Tots ells estan col·locats a una distància de 10 mm de la cantonada corresponent a la unió entre ala i ànima. Cal tenir en compte, que per garantir una correcta extracció de dades, és necessària una superfície plana, per això s'utilitza una petita placa d'acer en aquesta zona, la qual està suportat mitjançant un imant.

La força aplicada es mesura usant la mateixa cel·la de càrrega que en el cas del assaig d'un sol va. La única diferència és que en aquest cas, està calibrada a zero quan no hi ha res sospès d'ella. És per això, que el dispositiu de mesura de la força dona directament la força exercida pel cilindre hidràulic (Eq 4.2).

$$F_{\text{captador}} = \text{Força en el cilindre hidràulic} \quad (\text{Eq 4.2})$$

El procediment d'assaig és el mateix que en l'assaig anteriorment.

4.3.3. Equip i instrumentació

A continuació, es proporciona les característiques de la instrumentació que s'ha utilitzat per a la realització de l'assaig (Fig. 4.15 i Fig. 4.16).

- Aplicació de la força: mitjançant un grup hidràulic d'oli mineral amb bomba d'engranatges, amb un cabal de 5 l/min. Accionat amb un motor elèctric trifàsic de 3 CV a 1500 rpm. El regulador de pressió és de vàlvula proporcional. Controlat externament entre 15 i 240 bar. El cilindre hidràulic encarregat de transmetre la càrrega, té una capacitat màxima de 100 kN i és de doble efecte asimètric (marca Roquet) que mesura rangs d'entre 0 i 50 kN.
- Obtenció de la força: usant una cel·la de càrrega axial amb galgues extensiomètriques, amb una capacitat màxima de 200 kN (marca BLH model C2P1) connectada a l'amplificador extensiomètric elèctric (marca Hottinger Baldwin Messtechnik model HBM MGC-PLUS ML55) que compleix amb la norma ISO 9001. L'amplificador proporciona una excitació elèctrica a la cel·la de càrrega per a mesurar la càrrega aplicada.
- Obtenció del desplaçament: mitjançant uns captadors de desplaçament de tipus resistiu, d'entre ± 25 mm i ± 100 mm, amb una resolució de 0,01 mm (marca Novotechnik model TRS). Alimentats amb una font simètrica de 5 V_{dc}.
- Adquisició de dades: amb una targeta amb 16 entrades i 2 sortides analògiques i amb conversor de 16 bits a 100 kHz (marca Advantech model PLC-816), connectat a un ordinador equipat amb un programa d'obtenció de dades.

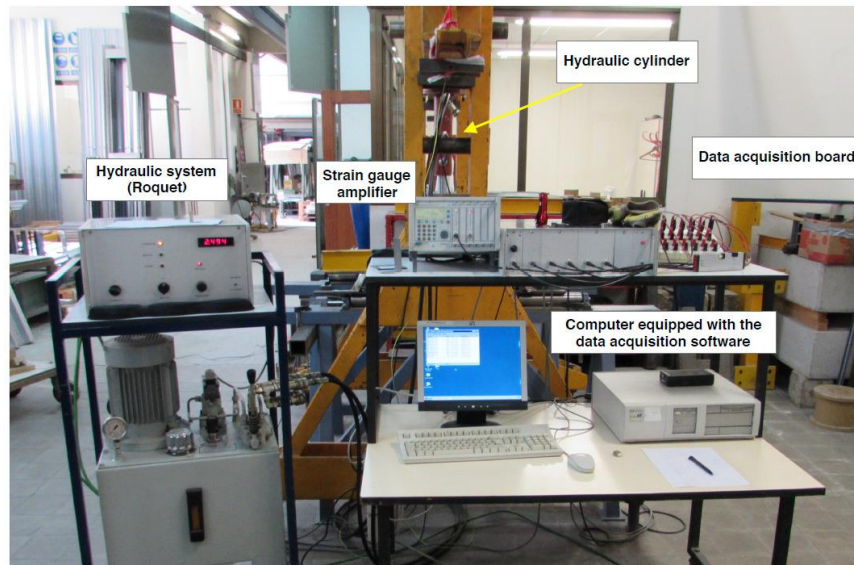


Fig. 4.15. Visió general del sistema d'adquisició de dades.

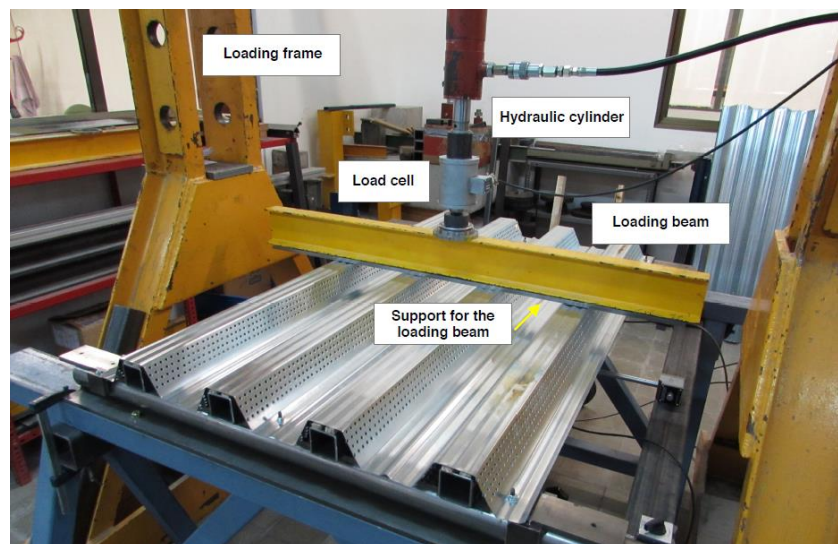


Fig. 4.16. Visió general del sistema de càrrega.

4.4. Resultats de l'assaig

Aquest apartat té el propòsit d'explicar els mètodes analítics que han estat necessaris per extreure la informació necessària i com aquesta ha estat analitzada per després compara els valors calculats i assegurar un bon comportament de la xapa.

Primer de tot, cal tenir en compte que els valors obtinguts en els assajos han de ser corregits convenientment per tenir en compte la dispersió estadística, les discrepàncies

entre el gruix nominal i la tensió de límit elàstic nominal de $f_{yb} = 320 \text{ N/mm}^2$ (valor de referència) respecte els espècimens assajats, i també la conversió de ample de la xapa assajat, b , al ample normalitzat de $b = 1000 \text{ mm}$.

Per a la obtenció del valor característic, F_k , és important diferenciar entre els assajos amb tres o més espècimen o bé els que només han s'han assajat amb dos o fins i tot un.

En quan al primer cas, a partir dels valors d'assaig dels tres espècimens (nº 1, nº 2 i nº 3), es segueix la proposta general d'un model estadístic de distribució normal per la determinació de la resistència característica amb un fractil del 5% exposat en el Annex D de l'Eurocodi 0 EN 1990-1-3:2002 [3]. Aquest procediment és coincident amb la proposta d'Avis Technique, Cahier 3730_V2 [4] respecte els assajos de xapa nervada que són específics per a la seva utilització de les lloses mixtes. Així doncs, en el seu apartat A1-2, es troba la Taula 1, on per $N = 3$ proporciona un valor $k = 3,37$ que afecta a la desviació tipus s i proporciona el valor característic desitjat segons l'expressió (Eq 4.3):

$$F_k = F_m - k \cdot s \quad (\text{Eq 4.3})$$

En canvi, pel segon tipus d'assaig, només hi ha un o dos espècimen per cada combinació llargada-gruix. Per tant, el procediment estadístic ha utilitzar és per un petit nombre d'assajos.

Al correspondre's a una fallada per abonyegament, el valor, η_k , utilitzat és de $\eta_k = 0,85$ corresponent a EN 1993-1-3:2006 [2], secció A.6.3.3. Per una família de un o dos assajos, la força característica F_k s'obté segons la següent fórmula (Eq 4.4):

$$F_k = \eta_k \cdot F_m \quad (\text{Eq 4.4})$$

Per a la correcció del gruix i la tensió de límit elàstic es segueix un procediment esposat en l'apartat A.6.2 de l'Annex A de EN 1993-1-3:2006 [2]. L'obtenció del coeficient d'ajust, μ_R , s'efectua mitjançant la fórmula (Eq 4.5):

$$\mu_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{t_{obs}}{t} \right)^\beta \quad (\text{Eq 4.5})$$

El paràmetre α és avaluat en 1, ja que es considera un mode de fallada per plastificació en el cas de moment flector positiu per observació directe de la gran ductilitat que mostra la corba de càrrega força-desplaçament. L'explicació resideix en la plastificació parcial existent en la zona traccionada d'aquest perfil asimètric, segons prediu 6.1.4.2 de EN 1993-1-3:2006 [2]. Per altre banda, en el cas de moment flector negatiu, el valor és 0,5 ja que el mode de fallada dominant és l'abonyegament, per observació directe de la baixa ductilitat

que mostra la corba força-desplaçament.

Finalment, es pot observar que no és necessària la correcció del gruix ja que $t_{obs} = t$ en tots els casos.

En quan a l'amplada utilitzada en el assaig d'un sol tram M^+ és de $b = 615$ mm (Fig. 4.17), corresponent a 3 ones, mentre que en el assaig de un sol tram M^- i en el de suport intermedi, aquesta amplada correspon a $b = 820$ (Fig. 4.18), que són 4 ones.

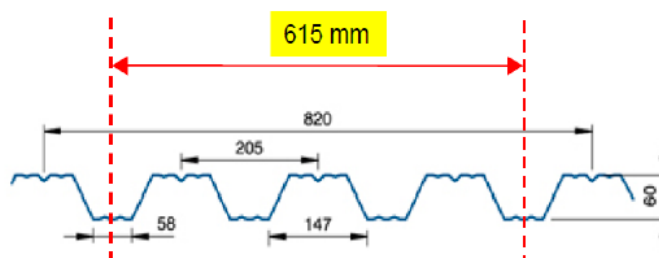


Fig. 4.17. Amplada de cas d'un sol tram M^+ .

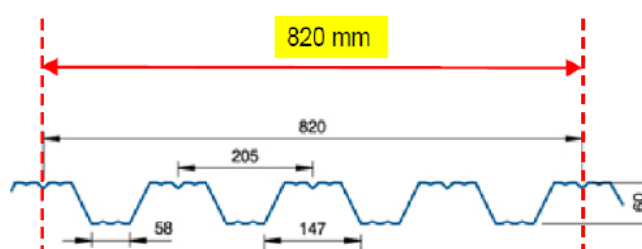


Fig. 4.18. Amplada del cas d'un sol tram M^- i suport intermedi.

4.4.1. Un sol va. M^+ i M^-

Per determinar la força total aplicada al sistema, la força mesurada pel sensor (força enregistrada en els arxius) s'ha de complementar amb la força de la pròpia xapa i de les corresponents bigues de repartiment (Eq 4.6).

$$F = [F_{sensor} + Pes \text{ propi de la xapa} + Bigues \text{ de repartiment}] \quad (\text{Eq 4.6})$$

La força corresponent al pes propi de la xapa i de les bigues de repartiment és de 0,63 kN en el cas de moment flector positiu (M^+) i 0,83 kN en el cas de moment flector negatiu (M^-).

Els resultats obtinguts de la força resistent màxima aplicada a cada espècimen coincident amb la fallada en els diferents assajos són els següents (Taula 4.4 i Taula 4.5). Aquest resultat han estat extrets directament dels gràfics de cada assaig.

Moment positiu				
Model	Longitud (mm)	Gruix (mm)	Espècimen	F _u (kN)
KORONA 60	3.000	0,75	1	11,33
			2	11,23
			3	11,45
		1	1	15,71
			2	15,93
			3	15,57
		1,2	1	22,39
			2	22,47
			3	21,89
EMB	3.000	0,75	1	10,51
PLAIN	3.000	0,75	1	11,8

Taula 4.4. Resultats dels assajos d'un sol tram en moment positiu.

Moment negatiu				
Model	Longitud (mm)	Gruix (mm)	Espècimen	F _u (kN)
KORONA 60	3.000	0,75	1	9,94
			2	10,19
			3	9,66
		1	1	15,67
			2	15,61
			3	15,96
		1,2	1	22,2
			2	22,51
			3	22,53
EMB	3.000	0,75	1	8,76
PLAIN	3.000	0,75	1	10,3

Taula 4.5. Resultats dels assajos d'un sol tram en moment negatiu.

A continuació, com s'ha explicat abans s'aplica el tractament estadístic per més tard poder extreure les propietats més rellevants de l'estudi. Pel cas de del KORONA 60, al tenir tres espècimens per cada combinació de longitud de xapa i gruix s'utilitza un tractament estadístic (Eq 4.3) diferent que en el cas de EMB i PLAIN que només consta de un valor (Eq 4.4). Així doncs, els resultats del valor característic de la força són els següents (Taula 4.6, Taula 4.7, Fig. 4.19 i Fig. 4.20):

Moment positiu					
Model	Longitud (mm)	Gruix (mm)	F _m (kN)	s	F _k (kN)
KORONA 60	3.000	0,75	11,34	0,11	10,96
		1	15,74	0,18	15,11
		1,2	22,25	0,32	21,19
EMB	3.000	0,75	10,51	-	8,93
PLAIN	3.000	0,75	11,80	-	10,03

Taula 4.6. Força resultant del tractament estadístic dels assajos d'un sol tram en moment positiu.

Moment negatiu					
Model	Longitud (mm)	Gruix (mm)	F _m (kN)	s	F _k (kN)
KORONA 60	3.000	0,75	9,93	0,27	9,03
		1	15,75	0,18	15,13
		1,2	22,41	0,18	21,80
EMB	3.000	0,75	8,76	-	7,45
PLAIN	3.000	0,75	10,30	-	8,76

Taula 4.7. Força resultant del tractament estadístic dels assajos d'un sol tram en moment negatiu.

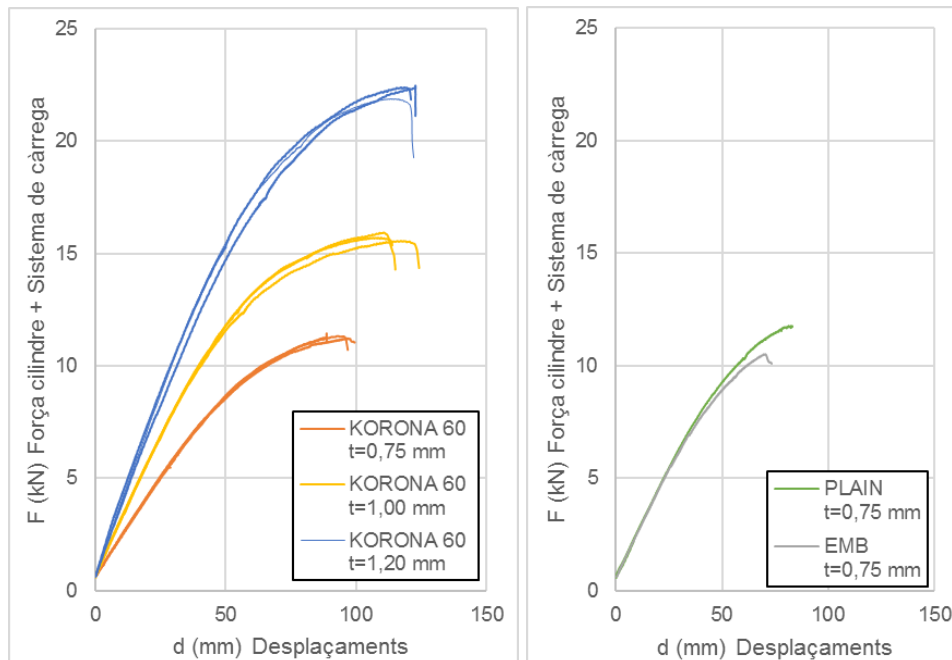


Fig. 4.19. Gràfic F-d dels resultats d'assajos d'un sol va. Moment positiu.

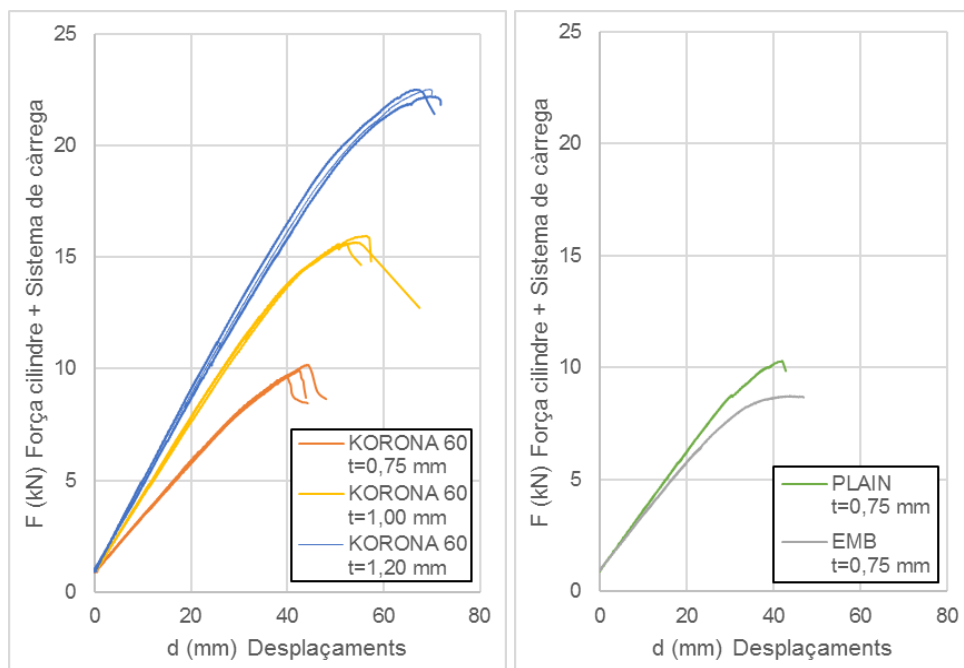


Fig. 4.20. Gràfic F-d dels resultats d'assajos d'un sol va. Moment negatiu.

Tot seguit, s'han de calcular les propietats de la secció, com són el mòdul resistent i el moment d'inèrcia. Primer, cal determinar el moment resistent utilitzant la següent equació (Eq 4.7):

$$M_{Rk} = \frac{1}{8} \cdot F_k \cdot L \quad (\text{Eq 4.7})$$

Un cop calculat el moment resistent, és molt senzill trobar el mòdul resistent, només s'ha de dividir aquest últim pel límit elàstic del material (Eq 4.8).

$$W_{Rk} = \frac{M_{Rk}}{f_{yb}} \quad (\text{Eq 4.8})$$

En canvi, per determinar experimentalment el moment d'inèrcia s'utilitzen els valors incrementals de la força i el desplaçament per l'aplicació d'una formulació d'acord amb el sistema de càrrega (Eq 4.9).

Així, per simple observació dels gràfics d'assaig (Fig. 4.21), es recullen els valors incrementals de ΔF y $\Delta d = (\Delta d_1 + \Delta d_2)/2$ en una ampla zona de comportament lineal del sistema i suficientment significativa de la resposta en el Estat límit de servei (ELS).

$$I_{eff} = 0,0133073 \cdot \frac{\Delta F \cdot L^3}{E \cdot \Delta d} \quad (\text{Eq 4.9})$$

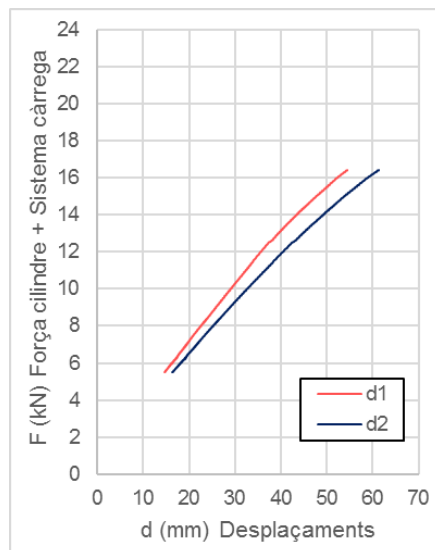


Fig. 4.21. Valors incrementals de força i desplaçament amb els quals es calcula el moment d'inèrcia.

Les propietats calculades es mostren en la Taula 4.8 i Taula 4.9.

Moment positiu				
Model	Gruix (mm)	$M_{R,k}$ (kN·m/m)	$W_{R,k}$ (mm ³ /m)	I_{eff} (mm ⁴ /m)
KORONA 60	0,75	5,67	17731	436249
	1	7,88	24640	575027
	1,2	10,65	33265	710771
EMB	0,75	4,62	14453	436951
PLAIN	0,75	5,19	16218	471098

Taula 4.8. Propietats dels assajos d'un sol tram en moment positiu.

Moment negatiu				
Model	Gruix (mm)	$M_{R,k}$ (kN·m/m)	$W_{R,k}$ (mm ³ /m)	I_{eff} (mm ⁴ /m)
KORONA 60	0,75	3,81	11892	497110
	1	6,40	19999	615212
	1,2	9,05	28295	779095
EMB	0,75	3,13	9804	485830
PLAIN	0,75	3,69	11532	548293

Taula 4.9. Propietats dels assajos d'un sol tram en moment negatiu.

La informació extreta dels gràfics comparatius (Fig. 4.22) i de la Fig. 4.19 i Fig. 4.20 és la següent:

- Els resultats pel PLAIN i l'EMB son força similars als obtinguts en el perfil KORONA 60 amb el mateix gruix de 0,75 mm.
- En els dos tests, moment flector positiu i negatiu, la càrrega final i la rigidesa són una mica superiors en el cas del perfil PLAIN, el qual no té ni emboticions ni punxonaments.
- Els tests de de moment flector positiu presenten plastificació parcial. Aquest fenomen es pot apreciar ja que les corbes dels models no tenen una pendent constant en tot el seu comportament, al final del estudi comencen a plastificar i per tant a ser més planes. Aquest fenomen consisteix en la plastificació inferior de l'ànima deguda a la redistribució de tensions, i per un comportament no completament elàstic.
- Els tests de moment flector negatiu de gruixos grans (1,00 mm i 1,20 mm) presenten un enduriment del material. Com es mostra en les corbes d'aquests models la pendent en la part final de l'assaig tendeix a ser més plana.

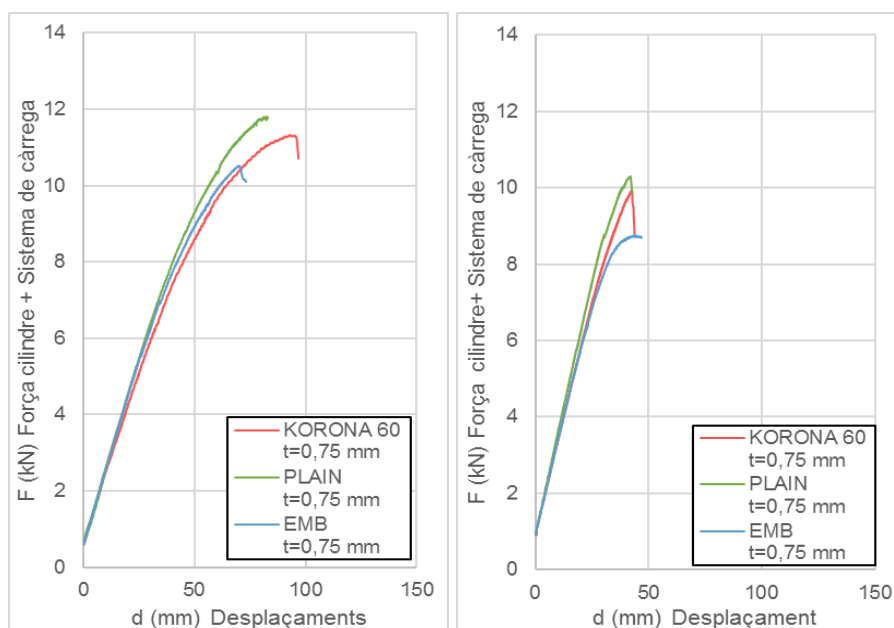


Fig. 4.22. Comparativa de gràfics en l'assaig d'un sol va. Moment flector positiu i moment flector negatiu respectivament.

4.4.2. Suport intermedi. Doble va.

Per determinar la força total aplicada al sistema, la força mesurada pel sensor (força enregistrada en els arxius) s'ha de complementar amb la força de la pròpia xapa i de les

corresponents bigues de repartiment (Eq 4.6).

$$F = [F_{sensor} + Pes\ propi\ de\ la\ xapa + Bigues\ de\ repartiment] \quad (Eq\ 4.10)$$

La força corresponent al pes propi de la xapa i de les bigues de repartiment és de 0,20 kN.

Els resultats obtinguts de la força resistent màxima aplicada a cada espècimen coincidint amb la fallada en els diferents assajos són els següents (Taula 4.10). Aquest resultats han estat extrets directament dels gràfics de cada assaig.

Model	Gruix (mm)	Longitud (mm)	Espècimen	F _u (kN)
KORONA 60	0,75	400	1	19,71
			2	18,29
		700	1	14,25
			2	14,24
		1.300	1	10,24
			2	9,68
	1,2	400	1	48,42
			2	48,79
		700	1	35,91
			2	37,01
		1.300	1	23,11
			2	22,85
EMB	0,75	400	1	21,77
			2	20,5
		700	1	15,73
			2	15,06
		1.300	1	9,22
			2	9,41
	1,2	400	1	47,62
			2	50,07
		700	1	35,11
			2	34,64
		1.300	1	20,47
			2	20,23
PLAIN	0,75	700	1	15,38
			2	14,98

Taula 4.10. Resultats dels assajos de suport intermedi.

Tot seguit, s'ha de fer un tractament estadístic per a cada model de xapa conformada amb fred i per cada gruix i extreure un valor característic de la força resistent.

Com ja s'ha explicat, al tenir dos espècimens per cada combinació de longitud de xapa i gruix s'utilitza un tractament estadístic (Eq 4.4). Així doncs, els resultats del valor característic de la força es troben en la Taula 4.11.

Model	Gruix (mm)	Longitud (mm)	F _m (kN)	F _k (kN)
KORONA 60	0,75	400	19,00	16,15
		700	14,25	12,11
		1.300	9,96	8,47
	1,2	400	48,60	41,31
		700	36,46	30,99
		1.300	22,98	19,53
EMB	0,75	400	21,14	17,97
		700	15,39	13,08
		1.300	9,31	7,91
	1,2	400	48,84	41,51
		700	34,87	29,64
		1.300	20,35	17,30
PLAIN	0,75	700	15,18	12,90

Taula 4.11. Força resultant del tractament estadístic dels assajos de suport intermedi.

Els resultats obtinguts es resumeixen en la Fig. 4.23 i s'extreu la següent informació:

- i) Xapes curtes: per exemple, $L = 400 \text{ mm} / 0,4 = 1000 \text{ mm}$.
 - Per $t = 0,75 \text{ mm}$: el perfil KORONA 60 proveeix un 10% menys de resistència que el EMB.
 - Per $t = 1,20 \text{ mm}$: el perfil KORONA 60 proveeix un 2% més de resistència que el EMB.
- ii) Xapes mitjanes: per exemple, $L = 700 \text{ mm} / 0,4 = 1750 \text{ mm}$.
 - El perfil KORONA 60 proveeix una resistència similar al EMB.
 - Els espècimens del perfil PLAIN tenen uns valors resistius intermedis.
- iii) Xapes llargues: per exemple, $L = 1300 \text{ mm} / 0,4 = 3250 \text{ mm}$.
 - Per $t = 0,75 \text{ mm}$: el perfil KORONA 60 proveeix un 11% més de resistència que el EMB.

- Per $t = 1,20$ mm: el perfil KORONA 60 proveeix un 13% més de resistència que el EMB.

Però, la dispersió dels resultats experimentals no pot ser concloent sobre les diferències exactes entre el sistema KORONA 60 i EMB. Les primeres conclusions són que ambdós sistemes no mostren diferències significatives.

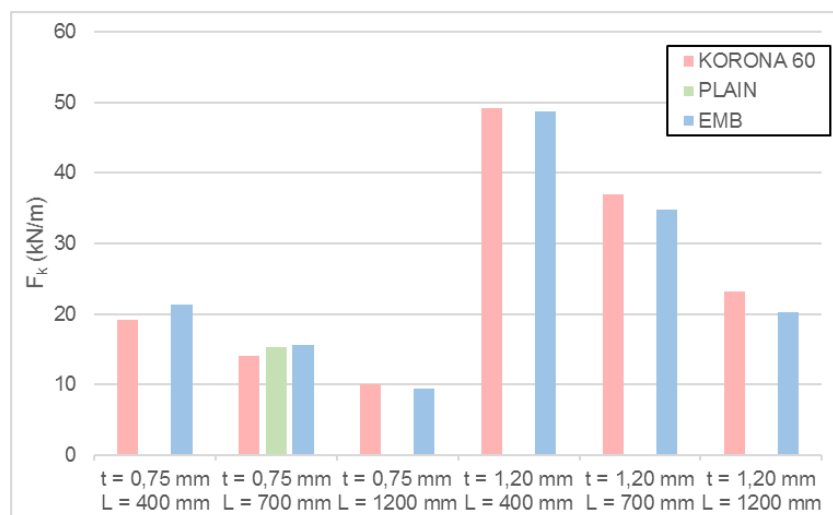


Fig. 4.23. Comparativa de resultats entre els perfils KORONA 60, PLAIN i EMB.

Un cop amb els resultats obtinguts, per a caracteritzar el comportament de cada perfil respecte el gruix i determinar quina combinació de Moment resistent - Reacció és acceptable, s'ha de trobar el moment resistent que juntament amb la força resistent, s'introdueixen en el gràfic per comprovar la validesa de la interacció. És important tenir en compte, que les dades del moment negatiu del assaig d'un sol tram i les del assaig d'aquest apartat (suport intermedi) seran necessàries.

Tot seguit, es calcula la el moment resistent (Taula 4.12) amb la següent equació (Eq 4.11):

$$M_{Ed} = \frac{1}{4} \cdot F_k \cdot L \quad (\text{Eq 4.11})$$

Model	Gruix (mm)	Longitud (mm)	$F_k = F_{Ed}$ (kN/m)	M_{Ed} (kN·m/m)
KORONA 60	0,75	400	19,22	1,92
		700	14,40	2,52
		1.300	10,07	3,27
	1,2	400	49,15	4,91
		700	36,86	6,45

		1.300	23,24	7,55
EMB	0,75	400	21,37	2,14
		700	15,56	2,72
		1.300	9,42	3,06
	1,2	400	48,69	4,87
		700	34,76	6,08
		1.300	20,28	6,59
PLAIN	0,75	700	15,35	2,69

Taula 4.12. Força resistent i moment resistent dels assajos de suport intermedi.

Pel que fa el valor de $M_{R,k}$ s'extreu directament dels resultats analitzats del assaig d'un sol tram a moment negatiu.

A continuació, es calcula la reacció $R_{w,Rd}$, la qual és la resistència transversal local de l'ànima sense rigiditzar en les seccions transversals amb una o més ànimes com es pot veure en la Fig. 4.24. Es calcula utilitzant EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 6.1.7.3.

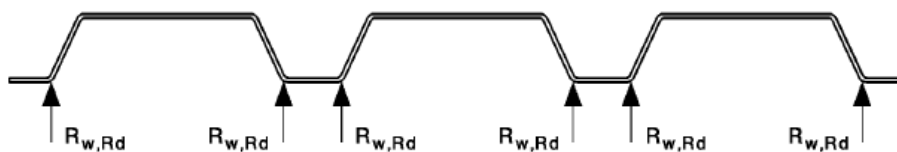


Fig. 4.24. Figura 6.8 de EN 1993-1-3:2006 [2].

S'ha de realitzar una verificació suplementària a les inicials prèvia a aquest càlcul:

$$r/t \leq 10$$

Tot seguit es troba la fórmula per calcular la reacció (Eq 4.12).

$$R_{w,Rd} = \alpha \cdot t^2 \cdot \sqrt{f_{yb}} \cdot E \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \cdot \left(0,5 + \sqrt{0,02 \cdot \frac{l_a}{t}}\right) \cdot \frac{2,4 + \left(\frac{\phi}{90}\right)^2}{\gamma_{M0}} \quad (\text{Eq 4.12})$$

On:

α : coeficient segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 6.1.7.3.

r : radi de curvatura interior de les cantonades de la secció

l_a : longitud de suport eficaç segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 6.1.7.3.

ϕ : angle de gir de les cantonades de la secció.

Pel que fa el coeficient α podem veure que el seu valor és 0,15 ja que la secció pertany a la categoria 2 (Fig. 4.25 (reacció en un suport intermedi) extreta de EN 1993-1-3:2006 [2] Figura 6.9) i a més és una xapa perfilada.

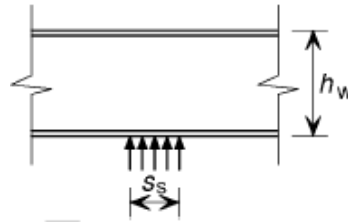


Fig. 4.25. Figura 6.9 de EN 1993-1-3:2006 [2].

La longitud l_a té un valor de 60 mm degut a que la secció és categoria 2 i compleix les següents equacions (Eq 4.13) i (Eq 4.14).

$$\beta_v \leq 0,2; \quad l_a = s_s \quad (\text{Eq 4.13})$$

$$\beta_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|} \quad (\text{Eq 4.14})$$

On:

$V_{Ed,1}$, $V_{Ed,2}$: valor dels esforços tallants transversals a cada costat de la càrrega local o reacció en el suport. $V_{Ed,1} = V_{Ed,2}$

s_s : longitud del suport rígid. $s_s = 60 \text{ mm}$

β_v : factor segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 6.1.7.3

Un cop amb els resultats analitzats es passa a dibuixar els gràfic d'interacció $M_{R,k}-R_{w,Rd}$. La combinació del moment i la reacció utilitzats en aquests gràfics ha de satisfer la següent equació (Eq 4.15). Per a calcular els límits de la zona a favor de la seguretat, la qual està composta per tres segments, primer, $M_{R,k}$ i $R_{w,Rd}$ s'han de multiplicar per 1,25. Per tant, la línia que creua aquests dos valors dona una referència de com dibuixar un dels tres límits. Les altres dues línies corresponen als valors de $M_{R,k}$ i $R_{w,Rd}$.

Finalment, els paràmetres M_{Ed} i F_{Ed} corresponen a la combinació de moment i reacció que han de satisfer l'equació. Aquests són extrets directament del assaig de suport intermedi

per cada model i gruix (Apartat 4.1.1).

$$\frac{M_{Ed}}{M_{R,k}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25 \quad (\text{Eq 4.15})$$

Com que el propòsit principal és caracteritzar el comportament dels diferents perfils durant la fase constructiva, les següents pàgines mostren els gràfics d'interacció $M_{R,k}-R_{w,Rd}$ (Fig. 4.26 i Fig. 4.27).

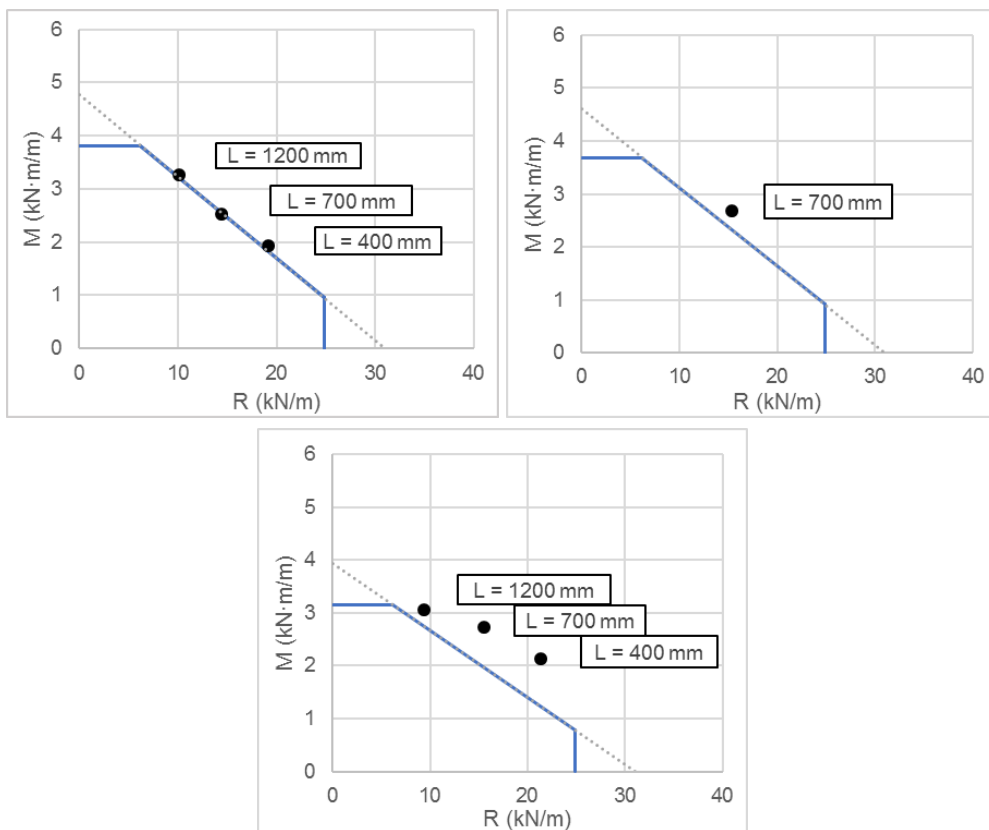


Fig. 4.26. Gràfics d'interacció $M_{R,k}-R_{w,Rd}$ de KORONA 60, PLAIN i EMB respectivament. Gruix $t = 0,75 \text{ mm}$.

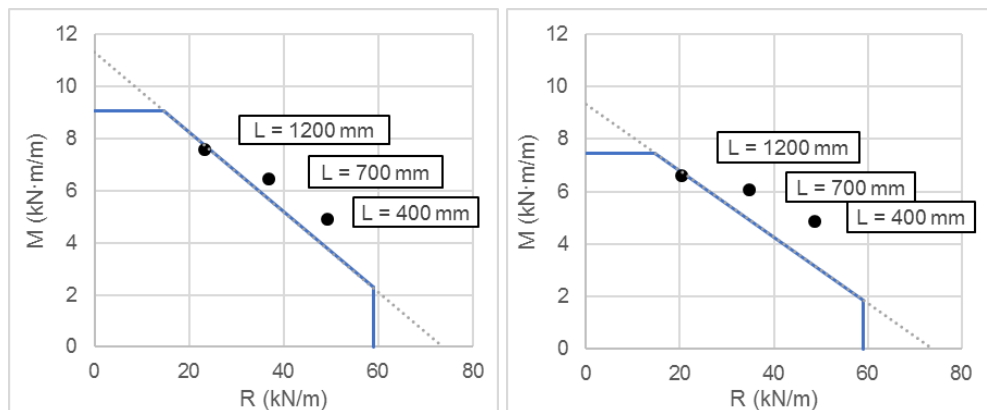


Fig. 4.27. Gràfics d'interacció $M_{R,k}-R_{w,Rd}$ de KORONA 60 i EMB respectivament. Gruix $t = 1,20$ mm.

Com es pot veure en la Fig. 4.26 i Fig. 4.27, el models teòrics s'ajusten als resultats experimentals dels assajos.

5. Resultats analítics elàstics - KORONA 60

Aquesta secció pretén explicar analíticament quin és el comportament d'aquesta secció per poder-ho comparar amb els resultats experimentals extrets dels tests.

L'anàlisi dut a terme, és un anàlisi elàstic, és a dir, la secció té una fallada completament elàstica, sense arribar a plastificar. És la opció que més s'assembla a la realitat, ja que com s'ha observat en les corbes força-desplaçament de la secció 4.4.1, la xapa té un comportament pràcticament lineal. El fet que s'utilitzi aquest anàlisi provoca que en cada punt de diferent alçada de la secció s'hi trobi una tensió pròpia i diferent a la resta (Fig. 5.1), en contraposició al comportament plàstic, que les tensions de les zones traccionada i comprimida són constants però de signe contrari.

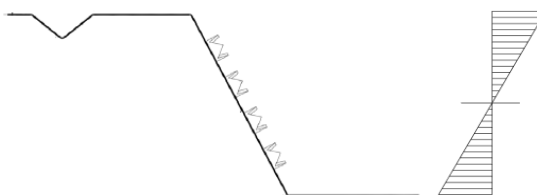


Fig. 5.1. Diagrama elàstic de tensions de la secció.

Així doncs, és necessari definir i enumerar els elements (Fig. 5.2) que s'estudiarà. Respecte la geometria i les diferents configuracions del perfil KORONA 60 es pot trobar en l'apartat 4.2.1 d'aquest mateix projecte, on també hi ha explicat les peculiaritats que aquest introdueix.

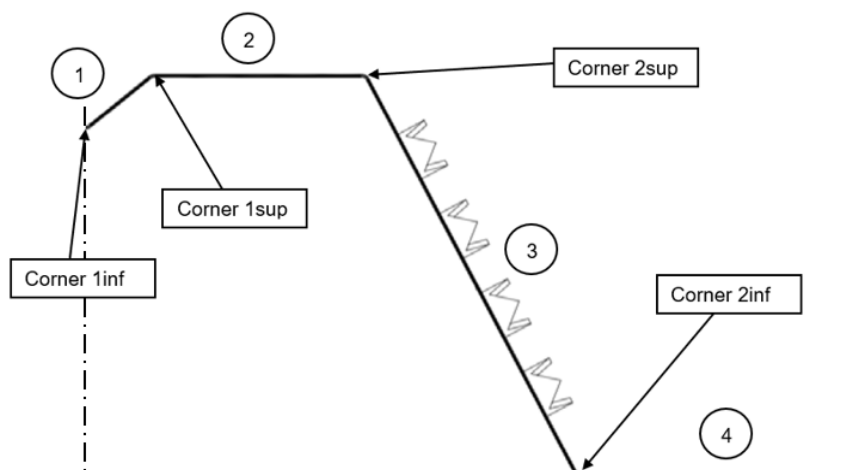


Fig. 5.2. Parts que componen la secció del element KORONA 60.

En aquest apartat és buscaran les propietats brutes i eficaces per a poder fer una comparació amb els resultats experimentals. Les propietats més importants, tant brutes com eficaces, que s'exposen són:

- Inèrcia: representatiu de la fletxa de la secció (ELS).
- Mòdul resistent: representatiu de el moment resistent màxim de la secció (ELU).

5.1. Verificacions

Segons la normativa EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 5.2. s'han de realitzar unes verificacions geomètriques abans de calcular les propietats (Fig. 5.3). D'aquesta manera s'assegura de que els resultats obtinguts són vàlids tant per la resistència en estat límit últim (ELU) com en estat límit de servei (ELS). Aquestes verificacions són les següents:

$$b/t \leq 500$$

$$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$$

$$h/t \leq 500 \cdot \sin(\phi)$$

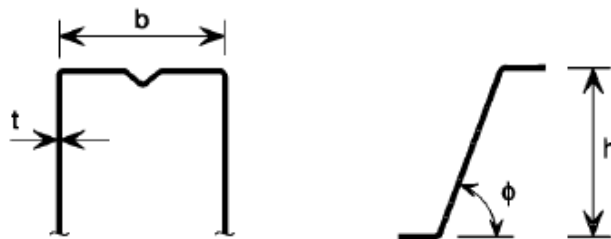


Fig. 5.3. Relacions geomètriques d'amplada-gruix màximes segons EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 5.2.

On:

b: amplada de la secció

h: alçada vertical de la secció.

t: gruix de la xapa.

ϕ : angle de l'ànima respecte l'eix horitzontal.

5.2. Propietats brutes de la secció

Les propietats brutes d'una secció, són les que es calculen considerant propietats homogènies i sense possibilitats de vinclament, d'aquesta manera, es pot considerar un comportament idèntic en vers al esforç aplicat, ja sigui tracció o compressió.

Es tindran en compte una sèrie d'hipòtesis o condicions.

- Es pren com a referència l'eix mig de la xapa.
- Per simetria, només s'utilitzarà mitja ona.

El càlcul d'aquestes propietats, en l'element 3 (l'únic afectat per les perforacions), s'ha realitzat seguint diferents metodologies per a tenir en compte les peculiaritats de les perforacions. S'ha realitzat l'anàlisi de propietats brutes utilitzant sis escenaris diferents.

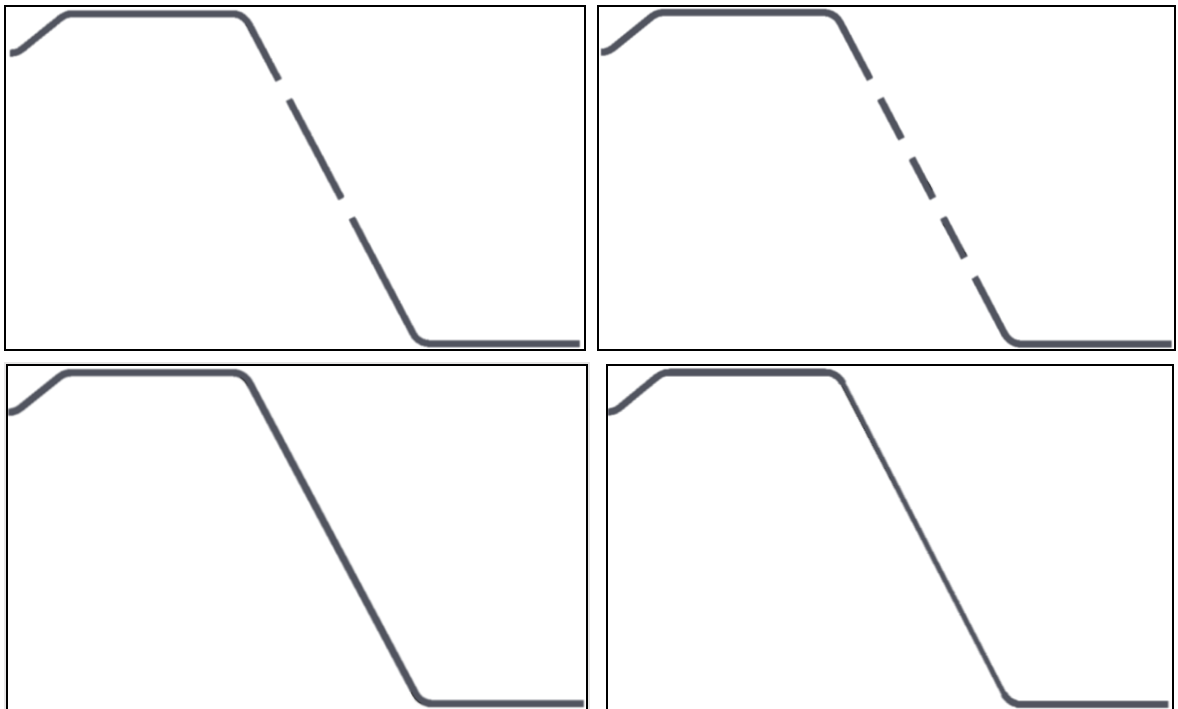


Fig. 5.4. Dibuix de les secció del perfil KORONA 60 segons les diferents metodologies.

El primer de tots, mitjançant l'absència de material en 2 forats a l'ànima (en la Fig. 5.4 el dibuix superior a l'esquerra) (ja que en un tall de secció només agafes com a màxim dos forats), amb l'absència de material en 4 forats a l'ànima (en la Fig. 5.4 el dibuix superior a la dreta) (ja que els forats veïns respecte el tall de secció on només es mostren dos forats, estan molt propers i podrien tenir algun efecte respecte els primers), utilitzar la xapa plana

com si no hi haguessin perforacions (en la Fig. 5.4 el dibuix inferior a l'esquerra) i per últim, utilitzant un gruix reduït $t_{a,eff}$ (en la Fig. 5.4 el dibuix inferior a la dreta). Aquest, es pot extreure usant la següent fórmula (Eq 5.1), explicada en el document GRISPE PLUS D3.1: PERFORATED PROFILES [5]:

$$t_{a,eff,G} = 1,09 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{1,03 \cdot d}{a}\right) \quad (\text{Eq 5.1})$$

El camp d'aplicació per aquesta fórmula és el següent:

- Els elements són perforacions, no punxonats. És a dir, es tracta d'un cercle perfecte el qual s'extreu un material sobrant procedent d'aquesta perforació i no queda material en la zona de la corona.
- Aquestes perforacions es poden trobar tant en l'ànima o com en l'ala.
- La distribució de les perforacions és quadrada (Fig. 5.5). Amb un rang de validesa de $0,2 \leq d/a \leq 0,9$.

On:

d : diàmetre de les perforacions.

a : espai entre els centres de les perforacions.

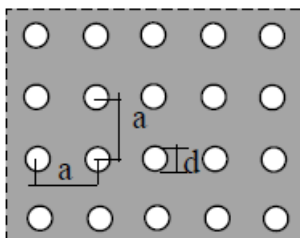


Fig. 5.5. Dimensions i distribució de les perforacions segons GRISPE PLUS.

També es pot utilitzar la fórmula extreta de l'Eurocodi EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 10.4. (Eq 5.2), el qual provoca el mateix efecte en el càlcul d'aquestes propietats eficaces.

$$t_{a,eff,E} = 1,18 \cdot t \cdot \left(1 - \frac{0,9 \cdot d}{a}\right) \quad (\text{Eq 5.2})$$

Pel que fa el camp d'aplicació d'aquesta fórmula és el següent:

- Els elements són perforacions, no punxonats. És a dir, es tracta d'un cercle perfecte el qual s'extreu un material sobrant procedent d'aquesta perforació i no queda material en la zona de la corona.
- La distribució de les perforacions és al portell en forma de triangle equilàter (Fig. 5.6). Amb un rang de validesa de $0,2 \leq d/a \leq 0,9$.

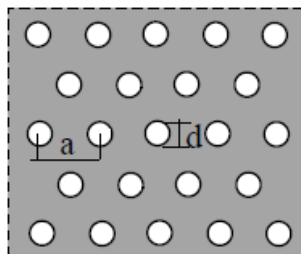


Fig. 5.6. Dimensions i distribució de les perforacions segons l'Eurocodi.

Com es pot veure, aquestes dos opcions, utilitzant el gruix reduït, presenten alguns inconvenients respecte el compliment de les restriccions del perfil KORONA 60. En primera instància, en el perfil a estudiar no es tracta de perforacions sinó de punxonaments més o menys quadrats, per altra banda, la distribució és al portell en forma de triangles isòsceles, com es pot veure en l'apartat 4.2.1 d'aquest projecte. Per tant, no compleix les restriccions proposades, però per a tenir una aproximació força realista de quin serà el comportament d'aquest, en vers a un esforç aplicat, és eficaç.

Les dimensions que mostra en la Fig. 4.2 i Fig. 4.3 no tenen en compte els radis de corb, és a dir, les distàncies donades són respecte el punt X de la Fig. 5.7, però aquesta geometria no és realista, ja que a l'hora de doblegar la xapa inicial per formar la secció, la màquina utilitzada té un radi de corb. Per aquest motiu, primerament, s'ha de buscar la longitud l i b_p (aquesta segona s'utilitzarà en anàlisis posteriors) de cada element amb les següents equacions (Eq 5.3), (Eq 5.4), (Eq 5.5) i (Eq 5.6).

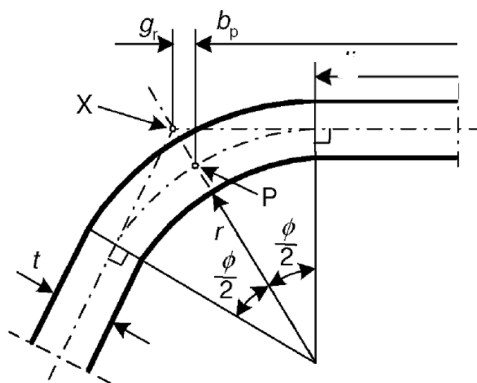


Fig. 5.7. Figura 5.1 de EN 1993-1-3:2006 [2].

On:

X: intersecció de les línies mitges.

P: punt mig de les cantonades.

$$r_m = r + t/2 \quad (\text{Eq 5.3})$$

$$g_r = r_m \cdot \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right) \quad (\text{Eq 5.4})$$

$$bp - l = r_m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (\text{Eq 5.5})$$

$$\text{distancia vertical } (X,P) = \frac{g_r}{\tan\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (\text{Eq 5.6})$$

Tot seguit, es calculen les propietats més importants de cada element, el moment d'inèrcia i el mòdul resistent.

Primer de tot, pel càlcul de l'àrea bruta s'utilitza la següent fórmula (Eq 5.7):

$$A_c = l \cdot t \quad (\text{Eq 5.7})$$

Un cop trobada l'àrea es pot trobar l'eix neutre (zona de la secció on s'anul·len les tensions) de la secció bruta amb la (Eq 5.8) i (Eq 5.9). Aquest s'utilitzarà posteriorment per trobar les altres propietats.

$$z_G = \frac{\sum S}{\sum A_c} \quad (\text{Eq 5.8})$$

$$S = A_c \cdot z \quad (\text{Eq 5.9})$$

On:

z: distància entre l'eix mig de cada part de la secció i l'eix mig de l'element 4.

z₀: distància vertical entre el centre de gravetat de cada element i l'eix neutre de la secció.

z_G: eix neutre

La determinació del moment inèrcia total de la secció es fa a partir del càlcul dels moments

d'inèrcies dels diferents elements calculades respecte l'eix neutre total de la secció. Per a duu a terme aquest càlcul, primer cal tenir en compte el Teorema d'Steiner degut als canvis d'eix (Eq 5.10).

$$I_{EN} = I_c + A_c \cdot z_0^2 \quad (\text{Eq 5.10})$$

On:

I_{EN} : inèrcia respecte l'eix neutre de la secció.

I_c : inèrcia pròpia respecte el centre de gravetat de l'element

Pel que fa la inèrcia pròpia respecte el centre de gravetat de cada element es determina segons la següent equació (Eq 5.11) pels elements els quals el seus eixos de referència propis són paral·lels als eixos de referència globals. Els elements són considerats rectangulars.

$$I_c = \frac{1}{12} \cdot l \cdot t^3 \quad (\text{Eq 5.11})$$

En canvi, pel que fa els elements els quals el seus eixos de referència propis no són paral·lels als eixos de referència globals, s'utilitzen les següents equacions (Eq 5.12), (Eq 5.13) i (Eq 5.14). També són considerats elements rectangulars.

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot l \cdot t^3 \quad (\text{Eq 5.12})$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot t \cdot l^3 \quad (\text{Eq 5.13})$$

$$I_c = \frac{1}{2} \cdot (I_x + I_y) + \frac{1}{2} \cdot (I_x - I_y) \cdot \cos(2 \cdot \phi) \quad (\text{Eq 5.14})$$

Finalment, pel que fa les cantonades entre aquests elements, es menysprea la inèrcia pròpia respecte el centre de gravetat ja que el seu valor és molt inferior en comparació amb la part del teorema d'Steiner que fa referència a la distància respecte l'eix neutre global.

En quan al mòdul resistent s'utilitza la següent fórmula (Eq 5.15).

$$W_{res} = \frac{\sum I_{EN}}{v} \quad (\text{Eq 5.15})$$

On:

W_{res} : mòdul resistent.

v : distància del eix neutre de la secció a la fibra més allunyada d'ell, max (z_0).

Així doncs, els resultats obtinguts segons les diferents metodologies d'estudi es mostren en la Taula 5.1 i Taula 5.2.

t (mm)	2x Forats	4x Forats	Plana	Gruix reduït segons GRISPE	Gruix reduït segons EUROCODI
0,75	538621,95	528537,85	545227,12	512619,02	525700,98
1,00	728340,39	714704,98	737272,00	693247,02	709488,59
1,20	880155,12	863678,34	890948,20	837136,78	858133,37

Taula 5.1. Moment d'inèrcia elàstica (mm^4/m) de la secció per el perfil KORONA 60 segons cada metodologia.

t (mm)	2x Forats	4x Forats	Plana	Gruix reduït segons GRISPE	Gruix reduït segons EUROCODI
0,75	16701,46	16128,71	16828,00	15619,10	16110,97
1,00	22584,20	21809,73	22755,31	21122,70	21730,13
1,20	27291,63	26355,76	27498,40	25506,91	26290,85

Taula 5.2. Mòdul resistent elàstic (mm^3/m) de la secció per el perfil KORONA 60 segons cada metodologia.

Un cop obtinguts els resultats, s'han analitzat utilitzant gràfics comparatius (Fig. 5.8 i Fig. 5.9). El resultat de xapa plana, sense tenir en compte cap geometria particular en l'ànima, és el que dona uns resultats més optimistes, i per tant els més restrictius. Per altre banda, es pot observar una incongruència. Els resultats del gruix reduït segons GRISPE i l'Eurocodi donen un valors massa inferiors i conservador. A la pràctica, aquests haurien de ser similars al cas de 2 forats, ja que és la geometries més semblants. Això té una raó de ser, i és que el gruixos reduït són molt menors que el nominal fet que es vegi disminuïda fortament les propietats. I per últim, en el cas de 4 forats, s'ha comprovat que dona uns valors molt conservadors com era d'esperar.

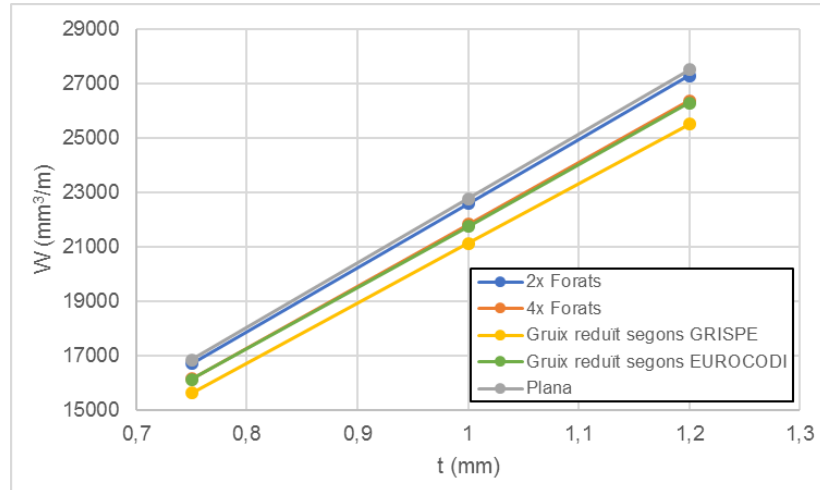


Fig. 5.8. Mòdul resistent elàstic brut pel perfil KORONA 60 segons els diferents gruixos.

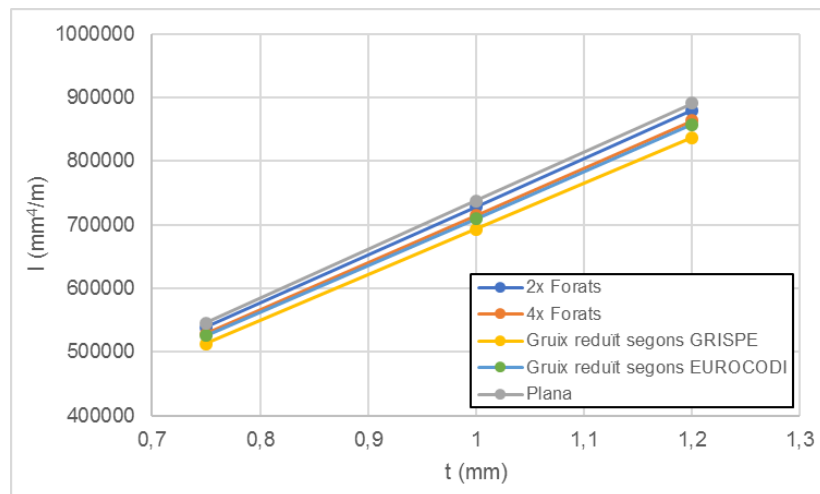


Fig. 5.9. Moment d'inèrcia elàstica bruta pel perfil KORONA 60 segons els diferents gruixos.

5.3. Propietats eficaces de la secció

Pel que fa les propietats eficaces de la secció continuen sent les mateixes que les anteriors, però ara tenint en compte la no homogeneïtat i el vincament de les seccions. D'aquesta manera es tindrà en compte els efectes de les concentracions de les tensions buscant un gruix eficaç per tots els elements que es trobin parcialment o totalment comprimits.

Es tindran en compte una sèrie d'hipòtesis o condicions.

- La zona comprimida (ala superior o inferior segons l'assaig) assumeix un gruix reduït equivalent a l'àrea eficaç de la xapa.
- L'ànima assumeix un gruix reduït equivalent i proporcional a la zona comprimida.

Aquestes propietats, al dependre de les tensions, s'ha de diferenciar entre aplicació de moment flector positiu i moment flector negatiu.

5.3.1. Moment positiu

5.3.1.1. Ala superior

En quan a l'ala superior, s'ha de diferencia entre el càlcul de les propietats elàstiques efectives segons si est troba en la zona on hi ha rigiditzador intermedi o contràriament, si està en la zona sense rigiditzador. Com es mostrarà seguidament, hi ha una part de la zona plana que també es veurà afectada pels dos càlculs, el de zona plana i amb rigiditzador. Així doncs, primer cal trobar quina serà la secció eficaç de l'ala en la zona plana, és a dir, l'element 2. Per saber quina serà aquesta secció, s'utilitza la normativa EN 1993-1-5:2005 [6] apartat 4.4. El procediment explica que per a trobar aquesta secció eficaç s'ha d'utilitzar un factor reductor ρ i multiplicar-lo per l'àrea bruta (Eq 5.16). Aquest també s'utilitzarà la secció efectiva.

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c \quad (\text{Eq 5.16})$$

On:

$A_{c,eff}$: secció eficaç.

ρ : factor reductor.

Per trobar aquest factor reductor abans s'han de trobar altres valors importants sobre la secció. Mitjançant el procediment detallat en l'Eurocodi 3 es pot trobar l'esveltesa relativa segon les següents formules (Eq 5.17) i (Eq 5.18).

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr}}} = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{\left(28,4 \cdot \varepsilon \cdot k_{\sigma}^{\frac{1}{2}}\right)} \quad (\text{Eq 5.17})$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} \quad (\text{Eq 5.18})$$

On:

$\bar{\lambda}_p$: esveltesa relativa.

\bar{b} : longitud de la secció de xapa sense rigiditzadors intermedis (b_{p2}).

σ_{cr} : tensió crítica elàstica de vinclament de la xapa.

ε : factor de relació.

k_σ : factor de vinclament respecte al rati ψ i a les condicions d'enllaç. Valor segons la taula 4.1. de EN 1993-1-5:2005 [6].

El factor de vinclament és $k_\sigma = 4$, ja que la distribució de tensions de l'ala superior correspon a un estat de tensions uniforme ($\sigma_1 = \sigma_2$) (Fig. 5.10) on $\psi = 1$ (Taula 4.1. de EN 1993-1-5:2005 [6]).

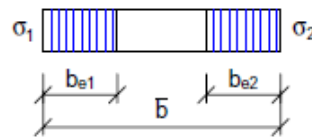


Fig. 5.10. Estat tensional previst de la xapa en l'ala superior.

On:

ψ : rati de tensions (σ_2/σ_1). Valor segons la taula 4.1. de EN 1993-1-5:2005 [6].

b_{e1} , b_{e2} : longitud efectiva segons Tabla 4.1 EN 1993-1-5:2005 [6].

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot \bar{b}$$

Finalment, ja es pot calcular el factor reductor ρ que varia segons el material utilitzat. En el cas que ens pertoca, per l'acer, s'utilitzaran les següents fórmules (Eq 5.19) i (Eq 5.20).

$$\rho = \frac{1 - 0,55 \cdot \frac{(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p}}{\bar{\lambda}_p}; \quad \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad (\text{Eq 5.19})$$

$$\rho = 1; \quad \bar{\lambda}_p < 0,673 \quad (\text{Eq 5.20})$$

Aquest factor en indica si cal considerar la regió \bar{b} en tota la seva longitud o per contra, no s'ha de considerar tota la regió \bar{b} efectiva. Així doncs, un cop trobat aquest coeficient, es pot calcular la longitud efectiva de la zona plana de l'ala segons la següent equació (Eq 5.21).

$$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b} \quad (\text{Eq 5.21})$$

On:

b_{eff} : longitud efectiva de la secció de xapa sense rigiditzadors intermedis

Un cop arribats aquest punt, cal obtenir l'àrea efectiva de la part dels rigiditzadors de l'ala superior. S'utilitza el procediment indicat en la normativa EN 1993-1-3:2006 [2].

Per obtenir aquesta àrea, primer s'ha de calcular una primera secció efectiva utilitzant les especificacions de la Fig. 5.11, tenint en compte que la longitud de l'element 2 és la indicada en la figura, en canvi, pels altres elements s'utilitza la longitud real.

Per altre banda, també s'obté una primera inèrcia efectiva, però aquesta vegada com es pot veure en la Fig. 5.11 la longitud del element 2 és diferent al utilitzat en el càlcul de l'àrea. Pel que fa als altres elements és mantenen igual.

Amb les dades anteriors, es calcula la tensió crítica σ_{cr} (Eq 5.22).

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \cdot k_w \cdot E}{A_s} \cdot \sqrt{\frac{I_s \cdot t^3}{4 \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}} \quad (\text{Eq 5.22})$$

On:

E : mòdul de Young.

A_s , I_s : àrea i moment d'inèrcia trobats segons la Fig. 5.11.

b_p , b_s : longituds definides segons la Fig. 5.12.

k_w : coeficient que considera la coacció parcial al gir de l'ala rigiditzada per les animes o altres elements adjacents.

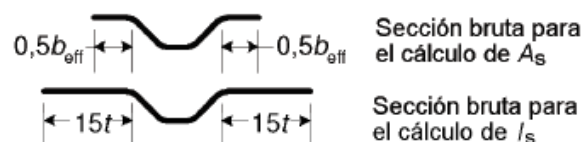


Fig. 5.11. Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2].

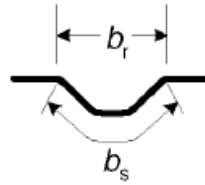


Fig. 5.12. Figura 5.11 de EN 1993-1-3:2006 [2].

Per les ales en compressió que consten de un rigiditzador intermedi, el valor k_w es calcula de la següent forma (Eq 5.23), (Eq 5.24), (Eq 5.25) i (Eq 5.26):

$$k_w = k_{w0}; \quad \frac{l_b}{s_w} \geq 2 \quad (\text{Eq 5.23})$$

$$k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot l_b}{s_w} - \left(\frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right); \quad \frac{l_b}{s_w} < 2 \quad (\text{Eq 5.24})$$

$$l_b = 3,07 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_s \cdot b_p^2 \cdot (2 \cdot b_p + 3 \cdot b_s)}{t^3}} \quad (\text{Eq 5.25})$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2 \cdot b_d}{s_w + 0,5 \cdot b_d}} \quad (\text{Eq 5.26})$$

On:

l_b : longitud de vinclament de la zona en compressió

s_w : alçada inclinada de l'ànima.

b_d : longitud corresponent a dues vegades b_p més una vegada b_s .

Obtingut el valor $\sigma_{cr,s}$, es calcula el valor de l'esveltesa relativa i posteriorment un factor reductor, el quals s'obtenen de forma directa a partir de les següents expressions (Eq 5.27), (Eq 5.28), (Eq 5.29) i (Eq 5.30).

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (\text{Eq 5.27})$$

$$\chi_d = 1; \quad \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (\text{Eq 5.28})$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d; \quad 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (\text{Eq 5.29})$$

$$\chi_d = 0,66 / \bar{\lambda}_d; \quad \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (\text{Eq 5.30})$$

On:

$\bar{\lambda}_d$: esveltesa relativa.

χ_d : factor reductor.

Finalment, el gruix reduït de la part de l'ala superior on està el rigiditzador i la part plana que té contacte directe amb ell es troba gràcies a l'(Eq 5.31).

$$t_{red} = \chi_d \cdot t \quad (\text{Eq 5.31})$$

Els resultats doncs, tindran un aspecte similar al de la Fig. 5.13.

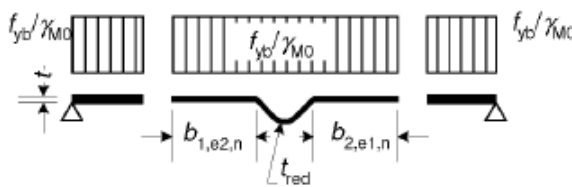


Fig. 5.13. Figura 5.10 de EN 1993-1-3:2006 [2].

5.3.1.2. Ànima

Pel que fa el càlcul de les propietats eficaces de l'ànima, al tenir unes perforacions s'aplica un gruix $t_{b,eff}$ igual al de la següent equació (Eq 5.32), extreta del document GRISPE PLUS D3.1: PERFORATED PROFILES [5] o bé de l'Eurocodi EN 1993-1-3:2006 [2] apartat 10.4. Els camps d'aplicació d'aquesta fórmula són els anteriorment explicats tant pel $t_{a,eff,E}$ com pel $t_{a,eff,G}$. Així doncs, aquest gruix reduït és necessari per tenir en compte les perforacions que existeixen en l'ànima, i és per aquest motiu que només s'usa en aquesta zona.

$$t_{b,eff} = t \cdot \sqrt[3]{1,18 \cdot \left(1 - \frac{d'}{a}\right)} \quad (\text{Eq 5.32})$$

Un cop tenint en compte el nou gruix, es procedeix al càlcul del mòdul resistent segons l'apartat 6.1.4.2 de la normativa EN 1993-1-3:2006 [2]. S'utilitza aquest càlcul ja que en els anàlisis experimentals i més concretament, en l'observació dels gràfics Força-Desplaçament, s'ha pogut apreciar que pel que fa l'assaig de moment flector positiu, la

corba no té una pendent constant, és a dir, al final de l'assaig té una zona plàstica a diferència del cas de moment flector negatiu que té un comportament elàstic (Fig. 5.14). Així doncs, abans de la fallada de la secció es pot apreciar una petita plastificació parcial en la zona traccionada de l'ànima (Fig. 5.15), mentre que la resta de la secció encara té un comportament elàstic, i per tant, la seva ruptura serà de manera plàstica.

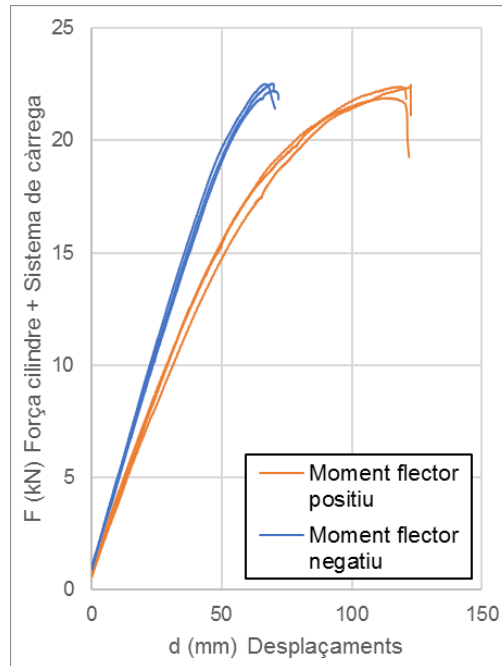


Fig. 5.14. Gràfic comparatiu F-d dels resultats d'assajos d'un sol tram de moment positiu i negatiu.

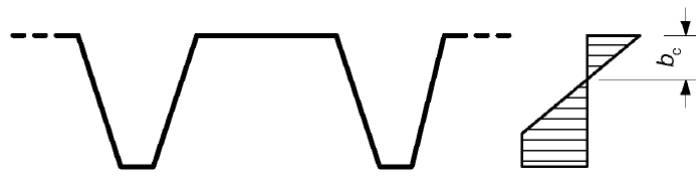


Fig. 5.15. Figura 6.4 de EN 1993-1-3:2006 [2].

En la primera aproximació de l'eix neutre s'assumeix que tota la l'ànima és completament efectiva i per altre banda, que la part del rigiditzador i la part plana de l'ala superior tenen la mateixa tensió com es mostra en la Fig. 5.16.

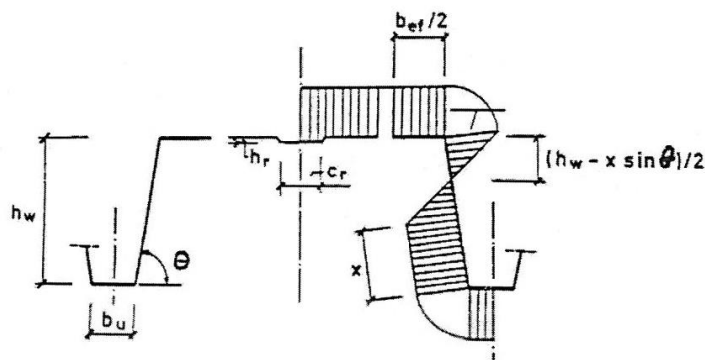


Fig. 5.16. Primera aproximació de l'eix neutre efectiu.

Assumint que el gruix de la zona plàstica és x i aplicant les condicions d'equilibri trobem una primera aproximació de l'eix neutre i per tant de x (Eq 5.33).

$$\frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \cdot A_{\text{compressió}} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \cdot A_{\text{tracció}} \quad (\text{Eq 5.33})$$

Seguidament es pot calcular la tensió real que té el rigiditzador de l'ala superior (Eq 5.34).

$$\sigma_r = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{h_r}{h - x \cdot \sin(\theta)} \right) \quad (\text{Eq 5.34})$$

On:

σ_r : tensió del rigiditzador en l'ala superior.

h_r : alçada vertical del rigiditzador en l'ala superior.

x : amplada de la zona plàstica de l'ànima en plasticació parcial.

Aquest és un procés iteratiu ja que un cop trobada la tensió es pot tornar a calcular la distància x de la zona plasticada fins a convergir en un valor.

El procés explicat és útil en el cas de l'estat límit últim (ELU) i per tant el càlcul del mòdul resistent, ja que com s'ha explicat, aquest mètode té en compte una plasticació parcial que només apareix al final de la corba de Força-Desplaçament. En canvi, en estat límit de servei (ELS) no es troba en aquesta zona de la corba, sinó que molt abans, quan la plasticació de l'ala encara no es mostra en la secció. És per aquest motiu, que el càlcul del moment d'inèrcia serà no tindrà en compte aquesta part de l'anàlisi.

Tot seguit es calcula la longitud eficaça de l'ànima, aquesta si que s'utilitza tant en ELU com

en ELS. El càlcul segueix l'apartat 5.5.3.4 de la normativa EN 1993-1-3:2006 [2]. Com es pot veure en la Fig. 5.17, en la part superior de l'ànima respecte l'eix neutre (zona comprimida) s'hi ha de trobar una longitud equivalent reduïda, igual que en l'ala superior, per obtenir l'àrea eficaç.

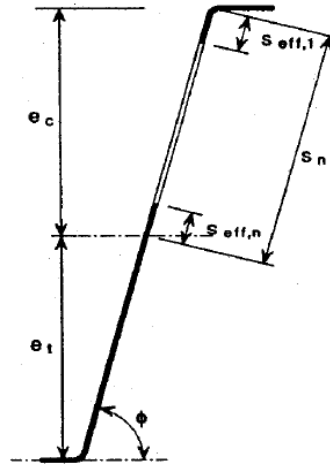


Fig. 5.17. Figura 5.12 de EN 1993-1-3:2006 [2].

Per calcular aquesta àrea eficaç de l'ànima, s'utilitzen les longituds equivalents $s_{eff,1}$ i $s_{eff,2}$. Aquestes, es troben gracies a les següents equacions (Eq 5.35), ((Eq 5.36) i ((Eq 5.37).

$$s_{eff,0} = 0,95 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \cdot f_{yb}}} \quad (\text{Eq 5.35})$$

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} \quad (\text{Eq 5.36})$$

$$s_{eff,n} = 1,5 \cdot s_{eff,0} \quad (\text{Eq 5.37})$$

Així doncs, podem veure que la longitud no eficaç de l'ànima es troba segons la següent fórmula (Eq 5.38).

$$s_{Neff} = s_n - (s_{eff,1} + s_{eff,n}) \geq 0 \quad (\text{Eq 5.38})$$

On:

s_{Neff} : longitud inclinada no eficaç de l'ànima.

s_n : longitud referida a la diferència entre alçada total inclinada de la secció i l'alçada del eix neutre inclinat.

Aquesta longitud es restarà a la longitud total del l'ànima en el càlcul de l'àrea eficaç de la secció i així obtenir la longitud eficaç.

5.3.1.3. Ala inferior

L'ala inferior, al estar a la zona de tracció, no pot patir vinclament (fenomen procedent de la compressió) i per tant es comporta com si tota l'àrea fos eficaç, per això es realitza el mateix càlcul que en l'apartat de les propietats elàstiques brutes.

5.3.1.4. Secció completa

Pel que fa el càlcul de les propietats de la secció completa, s'ha de agafar totes les longituds i guixos dels elements trobats anteriorment i juntament amb les tensions trobades a l'ànima, calcular el mòdul resistent i el moment d'inèrcia resistent

Els elements que s'han vist afectats i modificats per algun tipus de reducció, ja sigui de gruix o longitud, són els següents (cadascun ha estat explicat el procediment dins del seu apartat anteriorment):

- Corner 1inf: s'ha modificat el gruix.
- Element 1: s'ha modificat el gruix.
- Corner 1sup: s'ha modificat el gruix.
- Element 2: s'ha modificat el gruix i la longitud.
- Element 3: s'ha modificat la tensió (ELU) i per altre banda el gruix i la longitud (ELU i ELS).

La fórmula usada per calcular el moment resistent en ELU ha estat la següent (Eq 5.39). Aquestes tensions són les que han tingut en compte la plastificació parcial i els gruixos reduïts.

$$M_{el,Rd,eff} = \sigma \cdot A \cdot z' \quad (\text{Eq 5.39})$$

On:

σ : tensió dels diferents elements.

z' : distància entre la fibra neutre de cada element i l'eix superior.

Tot seguit es troba el mòdul resistent gràcies al moment trobat anteriorment (Eq 5.40).

$$W_{res,eff} = \frac{M_{el,Rd,eff}}{f_{yb}/\gamma_{M0}} \quad (\text{Eq 5.40})$$

Pel que fa el càlcul del moment d'inèrcia (ELS), s'ha realitzat un procés iteratiu usant les formules de la secció bruta:

- 1) Obtenció de l'àrea eficaç $A_{c,eff}$ gràcies als gruixos reduïts i longituds eficaces.
- 2) Càlcul del nou eix neutre eficaç $Z_{G,eff}$ a partir de la z i la S_{eff} .
- 3) Iteració de tot el procediment de càlcul de l'àrea eficaç a partir del nou eix neutre eficaç. Repetir fins que els valors del eix neutre siguin similars.
- 4) Obtenció de la inèrcia $I_{EN,eff}$, i del mòdul resistent $W_{res,eff}$.

Així doncs, els resultats obtinguts segons els diferents gruixos es mostren en la Taula 5.3.

	$t_{a,eff}$ segons GRISPE PLUS			$t_{a,eff}$ segons EUROCODI		
	t=0,75 mm	t=1,00 mm	t=1,20 mm	t=0,75 mm	t=1,00 mm	t=1,20 mm
Moment d'inèrcia $I_{EN,eff}$ (mm ⁴ /m)	472070,74	684878,57	846250,52	472070,74	684878,57	846250,52
Mòdul resistent $W_{res,eff}$ (mm ³ /m)	17062,54	25361,02	32373,90	17062,54	25361,02	32373,90

Taula 5.3. Propietats eficaces de la secció del perfil KORONA 60 pel moment positiu.

5.3.2. Moment negatiu

5.3.2.1. Ala superior

L'ala superior, en aquest cas, al estar a la zona de tracció, no pot patir vinclament (fenomen procedent de la compressió) i per tant es comporta com si tota l'àrea fos eficaç, per això es realitza el mateix càlcul que en l'apartat de les propietats elàstiques brutes.

5.3.2.2. Ànima

El procediment ha seguir és el mateix que en l'apartat de moment positiu (apartat 5.3.1.2), però amb dues diferències. Primer de tot, en aquest cas l'eix neutre va referenciat a l'ala superior, l'element 2, és a dir, l'alçada del eix neutre es mesura des de la fibra mitja de l'element 2, i per tant, la distància s_n es veurà afectada. La segona diferència és que no es demostra la possibilitat de plasticació parcial de l'ànima, i per tant té una trencada fràgil. És per aquest motiu que en el càlcul tant del mòdul resistent com en el del moment d'inèrcia és el que en l'apartat 5.3.1.2 s'usa pel càlcul del moment d'inèrcia únicament.

5.3.2.3. Ala inferior

Per a l'ala inferior es procedeix de la mateixa manera que per a l'ala superior en el assaig de moment flector positiu (apartat 5.3.1.1) amb les variacions que es detallen a continuació. El càlcul de l'esveltesa $\overline{\lambda}_p$ i el factor reductor ρ es realitza de la mateixa manera, però pel que fa la segona part de càlcul, la que pertany a l'obtenció del gruix reduït degut al rigiditzador, no es té en compte, ja que com es pot veure en la geometria no hi ha rigiditzador en l'ala inferior.

5.3.2.4. Secció completa

Pel que fa el càlcul de la secció completa, s'ha de agafar totes les longituds i guixos dels elements i es procedir de la mateixa manera que en càlcul de les propietats brutes.

Els elements que s'han vist afectats i modificats per algun tipus de reducció, ja sigui de gruix o longitud, són els següents (cadascun ha estat explicat el procediment dins del seu apartat anteriorment):

- Corner 1inf: s'ha modificat el gruix.
- Element 1: s'ha modificat el gruix.
- Corner 1sup: s'ha modificat el gruix.
- Element 2: s'ha modificat el gruix i la longitud.
- Element 3: s'ha modificat el gruix i la longitud.

El procediment iteratiu realitzat és el mateix que en el cas de moment positiu i els resultats es mostren en la Taula 5.4.

	$t_{a,eff}$ segons GRISPE PLUS			$t_{a,eff}$ segons EUROCODI		
	t=0,75 mm	t=1,00 mm	t=1,20 mm	t=0,75 mm	t=1,00 mm	t=1,20 mm
Moment d'inèrcia $I_{EN,eff}$ (mm ⁴ /m)	301299,94	475060,48	596822,05	301299,94	475060,48	596822,05
Mòdul resistent $W_{res,eff}$ (mm ³ /m)	7650,38	12419,84	15793,56	7650,38	12419,84	15793,56

Taula 5.4. Propietats eficaces de la secció del perfil KORONA 60 pel moment negatiu.

6. Resultats analítics elàstics – PLAIN

Pel que fa aquest apartat té la mateixa finalitat que en el perfil KORONA 60; comparar els resultats analítics, tenint en compte deformacions elàstiques, que es trobaran seguidament amb els resultats experimentals. En quan al perfil PLAIN, utilitzat en aquest anàlisi, és un perfil que té la mateixa geometria que el KORONA 60 però sense punxonaments, és a dir, en la zona de l'ànima es troba una xapa completament plana.

Així doncs, les dimensions geomètriques i les diferents configuracions d'anàlisi, igual que les del perfil KORONA 60, es troben en l'apartat 4.2.1 d'aquest projecte.

6.1. Propietats brutes de la secció

Les propietats brutes d'aquesta xapa es calculen de la mateixa manera que en el perfil KORONA 60, però aquesta vegada sense tenir en compte les perforacions en l'ànima. Així doncs, els resultats trobats per aquest anàlisi es troben en la Taula 6.1.

	t=0,75 mm
Moment d'inèrcia I_{EN} (mm ⁴ /m)	545227,12
Mòdul resistent W_{res} (mm ³ /m)	16828,00

Taula 6.1. Propietats brutes de la secció del perfil PLAIN.

6.2. Propietats eficaces de la secció

En quan a les propietats eficaces, passa una cosa semblant com en les propietats brutes, els càlculs realitzats, són els mateixos que pel perfil KORONA 60 però sense tenir en compte les perforacions en l'ànima. Així doncs, els resultats obtinguts tant per l'aplicació d'un moment positiu com un moment negatiu són els següents (Taula 6.2):

	M+	M-
	t=0,75 mm	t=0,75 mm
Moment d'inèrcia $I_{EN,eff}$ (mm⁴/m)	480683,49	330939,98
Mòdul resistent $W_{res,eff}$ (mm³/m)	17467,02	8553,14

Taula 6.2. Propietats eficaces de la secció del perfil PLAIN.

7. Resultats analítics elàstics – EMB

Aquest apartat té la mateixa finalitat que en el perfil KORONA 60 i el perfil PLAIN; comparar els resultats analítics, tenint en compte deformacions elàstiques, amb els resultats experimentals. En quan al perfil EMB, utilitzat en aquest anàlisi, és un perfil que té la mateixa geometria que el KORONA 60 però que en lloc de punxonaments hi ha emboticions, és a dir, en la zona de l'ànima es troba la xapa amb unes emboticions que igual que els punxonaments, serveixen per crear un enllaç amb el formigó.

Així doncs, les dimensions geomètriques i les diferents configuracions d'anàlisi, igual que les del perfil KORONA 60 i el perfil PLAIN, es troben en l'apartat 5.2.1 d'aquest projecte.

7.1. Propietats brutes de la secció

Les propietats brutes d'aquesta xapa s'obtenen de la mateixa manera que en el perfil KORONA 60, però, utilitzant unes metodologies diferents per a tenir en compte les emboticions. Així doncs, primer s'utilitza la embotició pròpiament dita, és a dir, es fa un tall de secció per la zona corresponent a l'eix vertical del centre geomètric de l'embotició (en la Fig. 7.1 el dibuix de l'esquerra). Per altre banda, s'utilitza la xapa plana, com si les emboticions no afectessin al càlcul d'aquestes propietats (en la Fig. 7.1 el dibuix de la dreta).

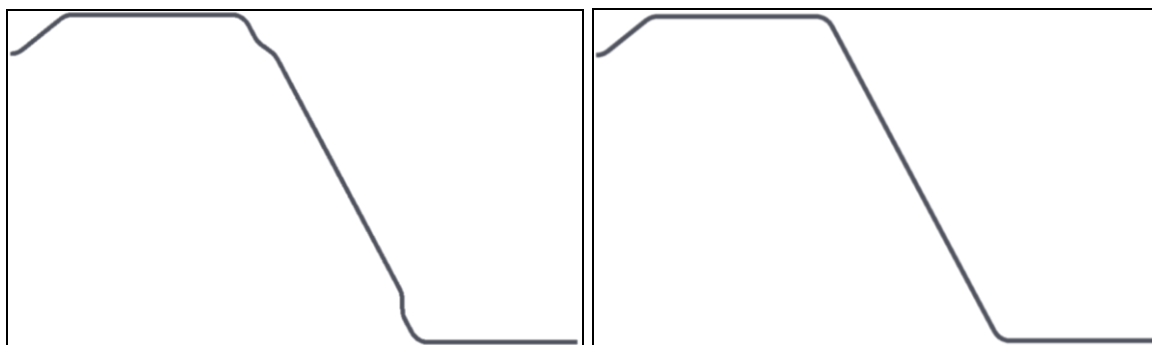


Fig. 7.1. Dibuix de les secció del perfil EMB segons les diferents metodologies.

Així doncs, els resultats trobats per aquest anàlisi es troben en la Taula 7.1.

	Emboticions	Plana
	t=0,75 mm	t=0,75 mm
Moment d'inèrcia $I_{EN,eff}$ (mm ⁴ /m)	546250,15	545227,12
Mòdul resistent $W_{res,eff}$ (mm ³ /m)	16710,01	16828,00

Taula 7.1. Propietats brutes de la secció del perfil EMB.

Un cop obtinguts els resultats, s'han analitzat utilitzant gràfics comparatius (Fig. 7.2 i Fig. 7.3). Les dues metodologies d'estudi han donat uns resultats semblants. Això significa que en aquest cas, les emboticions no afecten de manera massa significativa el càlcul d'aquestes propietats elàstiques brutes.

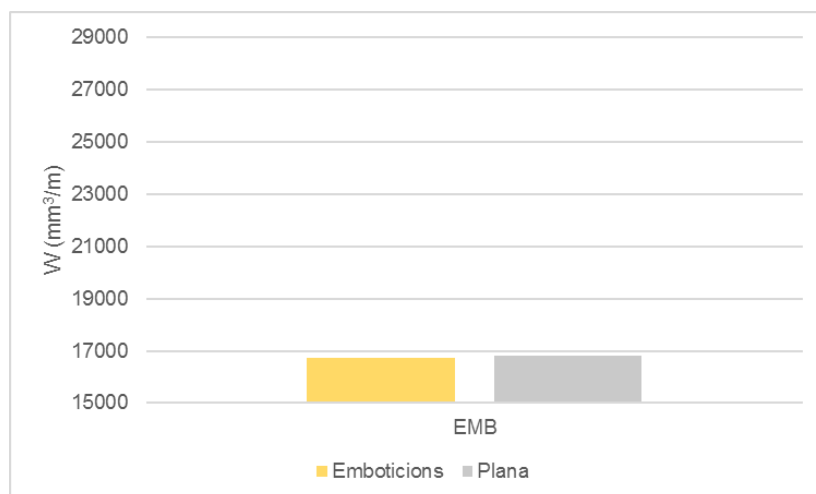


Fig. 7.2. Representació del mòdul resistent elàstic brut pel EMB en un gràfic de columnes.

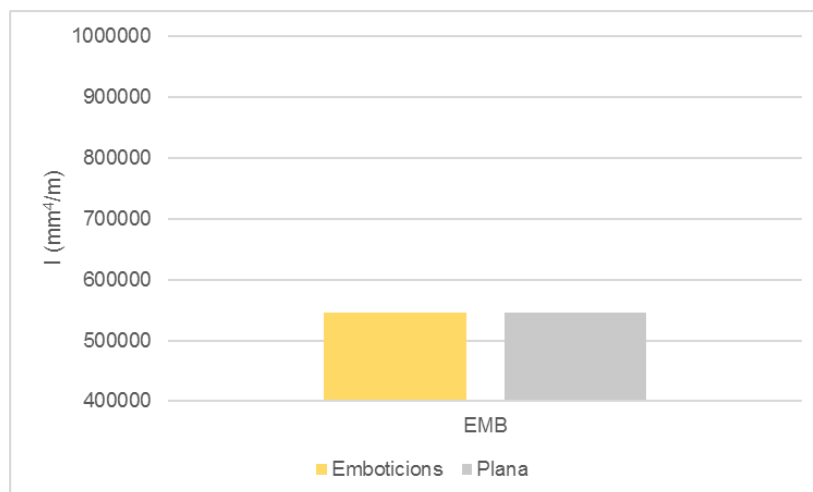


Fig. 7.3. Representació del moment d'inèrcia elàstic brut pel EMB en un gràfic de columnes.

7.2. Propietats eficaces de la secció

Pel que fa les propietats eficaces, aquestes en canvi, el seu anàlisi és sensiblement diferent al utilitzat en el perfil PLAIN. Al tenir emboticions en l'ànima, s'ha d'usar un gruix reduït en aquesta zona. Així doncs l'únic càlcul que es veurà afectat serà en l'element 3.

Per a la realització d'aquests càlculs s'utilitzarà el document GRISPE PLUS D3.1: STEEL DECKS WITH EMBOSSMENTS [7]. Primer, però, cal veure l'àmbit d'aplicació aquestes formules:

- L'element pot tenir tant emboticions com indentacions (Fig. 7.4).

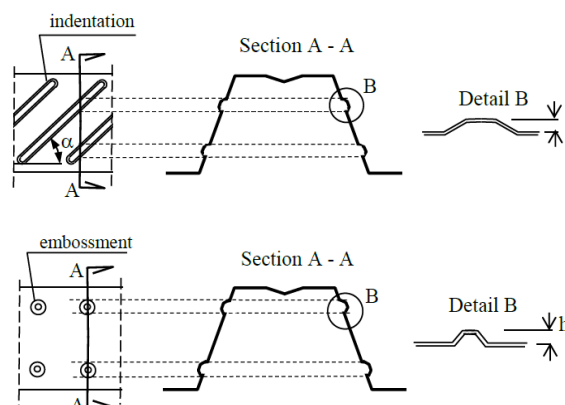


Fig. 7.4. Geometries possibles pel càlcul de propietats efectives segons GRISPE PLUS D3.1: STEEL DECKS WITH EMBOSSMENTS [7].

- Els càlculs que es poden duu a terme són resistència de les xapes a la flexió, a una càrrega local o reacció al suport i la combinació de les anteriors.
- La geometria de les emboticions o indentacions ha de complir les següents restriccions:

$$0,71 \text{ mm} \leq t \leq 1,21 \text{ mm}$$

$$h_{emb} \leq 0,9$$

$$30^\circ \leq \alpha_{emb} \leq 60^\circ$$

Igual que en el cas de la xapa punxonada, no totes les restriccions es compleixen en el cas real a estudiar. Pel que fa l'angle α en el cas que ens concerneix és de 90° , fora del rang d'aplicació d'aquest mètode. Però tot hi així, és una eina molt bona per trobar uns resultats que poden ser útils en la comparació amb els valors experimentals d'aquesta xapa.

Un cop donat per bo aquest mètode, es passa a l'explicació de les variants de càlcul respecte a la xapa plana PLAIN. Com s'explica en el document de GRISPE PLUS D3.1: STEEL DECKS WITH EMBOSSEMENTS [7] s'ha de buscar un gruix reduït $t_{red,emb}$ per la zona de l'ànima.

És per això que s'utilitza un factor reductor per disminuir el valor del gruix de la xapa (Eq 7.1.):

$$t_{red,emb} = \rho \cdot t \quad (\text{Eq 7.1.})$$

Per a trobar aquest factor reductor, s'utilitzen uns coeficients extrets de la Table 6.3.1 que es troba en GRISPE PLUS D3.1: STEEL DECKS WITH EMBOSSEMENTS [7] i la següent fórmula (Eq 7.2.):

$$\rho = A \cdot h_{emb} + B \quad (\text{Eq 7.2.})$$

On:

h_{emb} : alçada de les emboticions.

A, B : coeficients extrets de la Table 6.3.1 que es troba en GRISPE PLUS D3.1: STEEL DECKS WITH EMBOSSEMENTS [7].

Per trobar aquests coeficients utilitzant la taula anteriorment nomenada, s'ha de filtrar per tipus de deformació, gruix de la xapa i alçada de la deformació. En aquest cas, el tipus de deformació és indentació, pel que fa el gruix és 0,71 mm i finalment, l'alçada de la

deformació es troba entre 1,5 mm i 2,75 mm. Així doncs, s'extreuen els dos valors i es calcula el factor reductor.

El procediment ha seguir és el següent:

- 1) En la primera iteració o iteració 0, el gruix efectiu de la xapa amb emboticions s'ha de calcular segons EN 1993-1-3:2006 [2] (igual que en la secció PLAIN) sense tenir en compte les emboticions.
- 2) Pel que fa les següents iteracions, si que s'han de tenir en compte les emboticions, considerant-les com un element pla de longitud l_{emb} amb un gruix reduït de $t_{red,emb}$.

Així doncs, un cop arribat a la segona iteració, s'aplica aquest gruix reduït però només en la part de l'ànima corresponent a la longitud vertical projectada de la embotició l_{emb} trobada anteriorment. Per tant, el que es fa és, un cop es tenen les diferents longituds reduïdes i gruixos reduïts de cada element i es passa al càlcul de les diferents propietats de la secció, s'utilitza el gruix reduït $t_{red,emb}$ en la zona de l'ànima segons la longitud l_{emb} , en comptes del gruix de la xapa.

Així doncs, els resultats obtinguts tant per l'aplicació d'un moment positiu com un moment negatiu són els següents (Taula 7.2):

	M+	M-
	t=0,75 mm	t=0,75 mm
Moment d'inèrcia $I_{EN,eff}$ (mm⁴/m)	414936,22	159289,97
Mòdul resistent $W_{res,eff}$ (mm³/m)	14223,12	3386,86

Taula 7.2. Propietats eficaces de la secció del perfil EMB.

8. Resultats analítics plàstics

També és important la obtenció i comprovació dels resultats del comportament plàstic d'aquesta secció. En aquest tipus d'assaig, la xapa es comporta com si tingués deformacions plàstiques i per tant la seva fallada fos completament plàstica. Això permet trobar unes propietats "màximes" en les quals podrien treballar aquests perfils, ja que en els anàlisis elàstics els valors sempre seran inferiors degut a no arribar a aquesta zona plàstica del material.

El fet de tenir un anàlisi plàstic fa que sigui molt més senzill treballar ja que les tensions són constants però de signe contrari tant en la parts traccionada com en la comprimida, fet que facilita l'anàlisi. La distribució d'aquestes tensions té un aspecte semblant al de la Fig. 8.1.

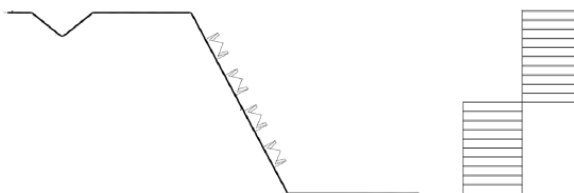


Fig. 8.1. Diagrama plàstic de tensions de la secció.

Per tant, el càlcul de les propietats de la secció es redueix a igualar les tensions de la part traccionada i les de la part comprimida, $A_1 \cdot f_{yd} = A_2 \cdot f_{yd}$. Tenint en compte que la àrea 1 de la fórmula anterior és la part superior o comprimida, i la àrea 2 és la part inferior o traccionada. S'ha de tenir en compte que aquestes àrees, segons el perfil són diferents, més específicament, les àrees de l'ànima. Així doncs, s'han estudiat els tres perfils per separat, i pel que fa cada un, s'han utilitzat distintes metodologies de càlcul en l'ànima per trobar les propietats plàstiques tenint en compte les peculiaritats de cada xapa. S'ha dut a terme tots aquests càlculs per tal de poder fer una comparativa posterior dels resultats.

En quan a les metodologies usades per a cada xapa, han sigut les mateixes que les trobades en les propietats elàstiques brutes

Així doncs, un cop trobat aquest eix neutre, igualant tensions, s'ha de calcular el mòdul resistent. Per fer-ho, es busca el baricentre de les dues parts de la secció (traccionada i comprimida) i la distància entre ells Z_{pl} . Aquesta serà la distància per calcular el mòdul resistent degut a les forces resultants de les dues tensions.

La fórmula pel càlcul del mòdul resistent és la següent (Eq 8.1).

$$W_{pl} = \frac{A}{2} \cdot z_{pl} \quad (\text{Eq 8.1})$$

On:

z_{pl} : distància entre baricentres de la zona comprimida i traccionada en plastificació.

W_{pl} : mòdul resistent plàstic.

En quan als moments d'inèrcia, en aquest cas, no és tenen en compte ja que no tenen cap raó de ser en un anàlisi que no sigui completament elàstic.

Els resultats obtinguts a partir d'un càlcul per a l'obtenció del mòdul resistent en un cas de plasticitat total de la xapa es mostren en la Taula 8.1.

t (mm)	KORONA 60				EMB		PLAIN
	2x Forats	4x Forats	Gruix reduït	Plana	Emboticions	Plana	Plana
0,75	20225,83	19605,31	20500,81	20955,38	20976,67	20955,38	20955,38
1,00	27346,51	26507,45	27678,98	28332,97	-	-	-
1,20	33044,78	32030,95	33426,33	34236,73	-	-	-

Taula 8.1. Mòdul resistent plàstic (mm^3/m) de la secció per cada perfil i cada metodologia.

Un cop obtinguts els resultats, s'han analitzat utilitzant gràfics comparatius (Fig. 8.2 i Fig. 8.3). Pel que fa el perfil KORONA 60, com es pot observar en la Fig. 8.2, el resultat de xapa plana, sense tenir en compte cap geometria particular en l'ànima, és el que dona uns resultats més optimistes, i per tant els més restrictius. Per altre banda, en el cas del 2 forats i gruix reduït tenen un valor molt similar entre ells. Això és degut a que tant utilitzar un gruix reduït com tenir en compte dos forats fan la mateixa funció a l'hora de calcular aquestes propietats i també són les geometries més semblants a la realitat de la xapa en aquest estudi. I per últim, en el cas de 4 forats, s'ha comprovat que dona uns valors més conservadors com era d'esperar.

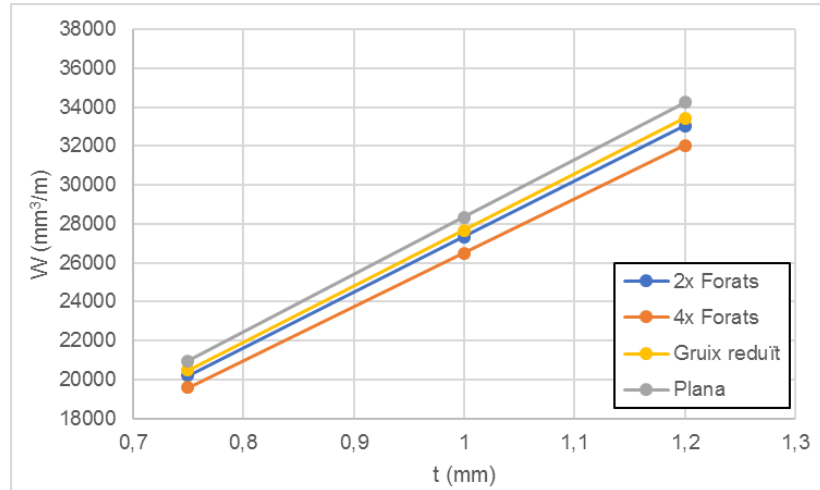


Fig. 8.2. Mòdul resistent plàstic pel perfil KORONA 60 segons els diferents gruixos.

En quan el cas del perfil EMB (Fig. 8.3), les dues metodologies d'estudi han donat uns resultats semblants. Això significa que en aquest cas, les emboticions no afecten de manera massa significativa el càlcul d'aquestes propietats elàstiques brutes.

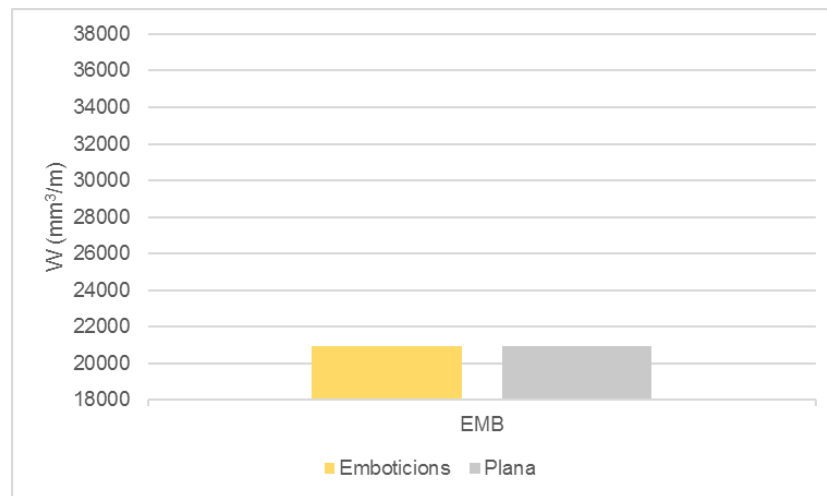


Fig. 8.3. Representació del mòdul resistent plàstic pel EMB en un gràfic de columnes.

9. Estudi amb Seficz 5 software

Apart dels resultats analítics proposats anteriorment, s'ha volgut fer un estudi complementari per ampliar aquesta comparativa de resultats i veure si els càlculs analítics són correctes.

Així doncs, s'ha fet un estudi amb un programari anomenat Seficz 5 software el qual estima la inèrcia i el mòdul resistent segons una geometria donada i especificant les propietats del material i els diferents gruixos de les parts. Aquest programari fa el càlcul de les propietats elàstiques de la secció segons l'Eurocodi ENV 1993-1-3: 1996 [8] però considerant que aquestes xapes són planes. És a dir, el programa té en compte que la secció pot constar de diferent rigiditzadors en els diferents elements que la componen, però no forats, ni punxonats, ni emboticions en cap dels seus elements.

El programari s'ha utilitzat pels tres perfils, tot hi que com aquest mètode no té en compte els punxonaments i les emboticions, els resultats per les diferents seccions han donat igual. Així que les úniques diferències de resultats han vingut donades pel gruix dels diferents casos 0,71 mm, 0,96 mm i 1,16 mm (corresponen als gruixos nominals dels anàlisis però descomptant el gruix de la capa de zinc de 0,04 mm).

Els resultats obtinguts es poden veure a continuació (Taula 9.1):

t (mm)	M+		M-	
	$I_{EN,eff}$ (mm ⁴ /m)	$W_{res,eff}$ (mm ³ /m)	$I_{EN,eff}$ (mm ⁴ /m)	$W_{res,eff}$ (mm ³ /m)
0,75	482465,56	16268,59	355475,22	8947,02
1,00	717447,61	22700,20	585902,83	16189,17
1,20	873683,12	27495,41	748150,34	21126,93

Taula 9.1. Propietats de les seccions segons Seficz 5 software.

10. Comparativa de resultats

Observant els gràfics comparatius (Fig. 10.1, Fig. 10.2, Fig. 10.3 i Fig. 10.4) extrets dels resultats analítics i experimentals del perfil KORONA 60 i els gràfics comparatius (Fig. 10.5 i Fig. 10.6) dels tres models estudiats, es pot afirmar que:

- i) Moment flector positiu: els resultats experimentals són casi iguals als efectius trobats analíticament.
 - Per $t = 1,20$ mm, els resultats experimentals i efectius són pràcticament els mateixos que els plàstics. Això significa que tota o pràcticament tota la secció acaba per plastificar i per tant té un comportament similar al plàstic.
 - Per $t = 1,00$ mm, els resultats experimentals i efectius estan més a prop de la corba de resultats plàstics que dels resultats elàstics bruts. Això significa que gran part de la secció plastifica.
 - Per $t = 0,75$ mm, els resultats experimentals i efectius estan més a prop de la corba de resultats elàstics bruts que dels resultats plàstics. Això significa que una petita part de la secció acaba plastificant. En el cas particular del model PLAIN, això està molt més accentuat i els resultats elàstics bruts són pràcticament iguals als experimentals i elàstics efectius, fet que fa la secció tota efectiva.
- ii) Moment flector negatiu: els resultats experimentals es troben entre l'interval de resultats plàstics i elàstics, i a més, bastant similars als elàstics bruts, fet que fa la secció tota efectiva.
 - Per $t = 1,20$ mm, els resultats experimentals s'apropen més a la corba de resultats plàstics. Això és degut al enduriment del material, fenomen amb uns efectes semblants a la plastificació parcial amb un gràfic força-desplaçament similar.
 - Per $t = 1,00$ mm, els resultats experimentals s'apropen més a la corba de resultats plàstics, però no tant com en el cas de $t = 1,20$ mm. També es troba enduriment del material però no tant accentuat com l'anterior.
 - Per $t = 0,75$ mm, els resultats experimentals s'apropen més a la corba de resultats elàstics bruts. Això significa que no hi ha enduriment del material ni plastificació parcial.

En la Fig. 10.1 es pot observar una incongruència, resultats elàstics bruts inferiors als elàstics efectius. Això té una raó de ser, el gruix reduït proposat per l'Eurocodi i GRISPE és menor que el utilitzat en el càlcul efectiu.

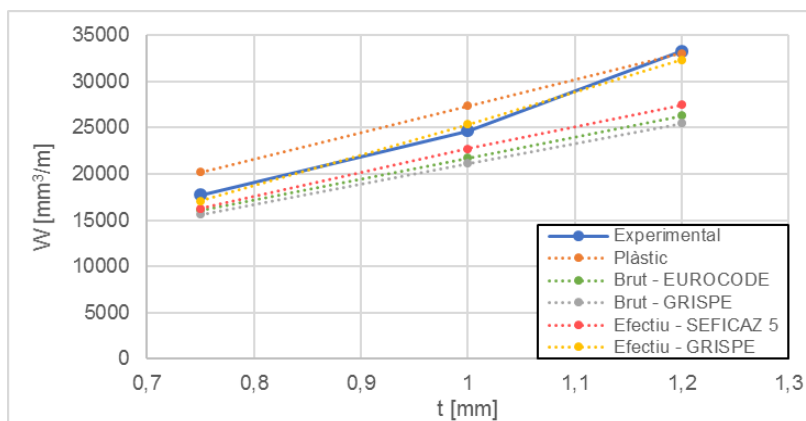


Fig. 10.1. Mòdul resistent del perfil KORONA 60 a moment flector positiu.

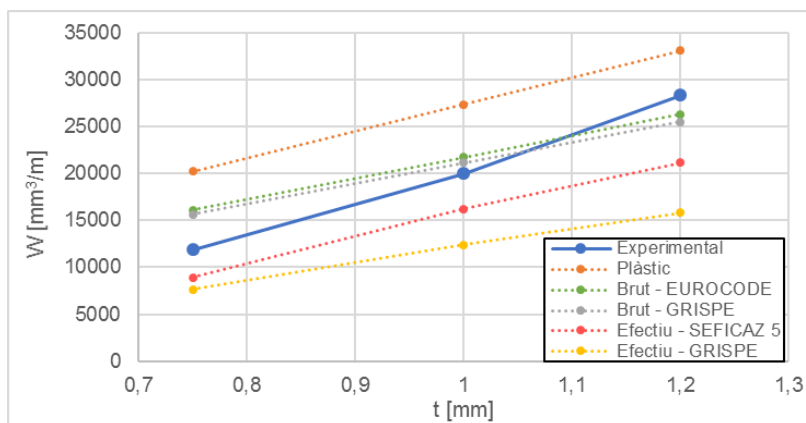


Fig. 10.2. Mòdul resistent del perfil KORONA 60 a moment flector negatiu.

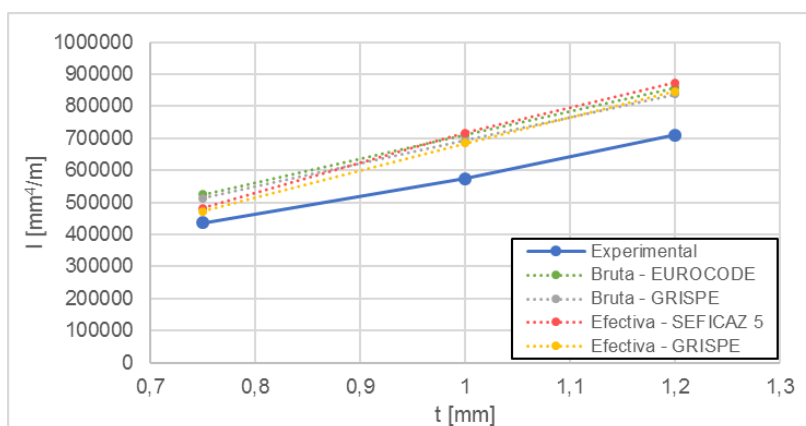


Fig. 10.3. Moment d'inèrcia del perfil KORONA 60 a moment flector positiu.

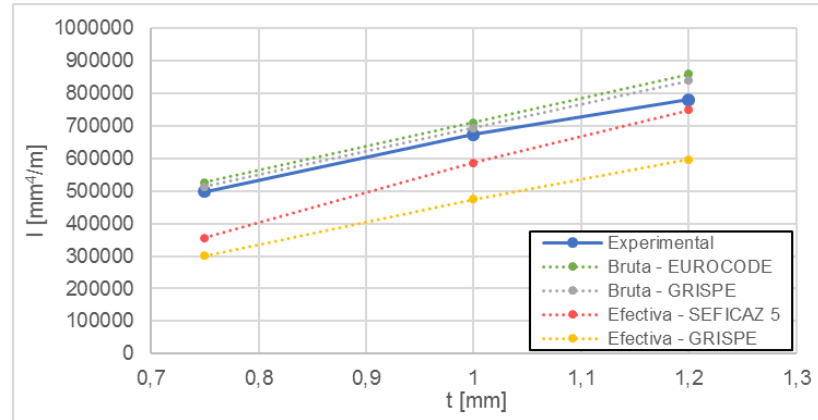


Fig. 10.4. Moment d'inèrcia del perfil KORONA 60 a moment flector negatiu.

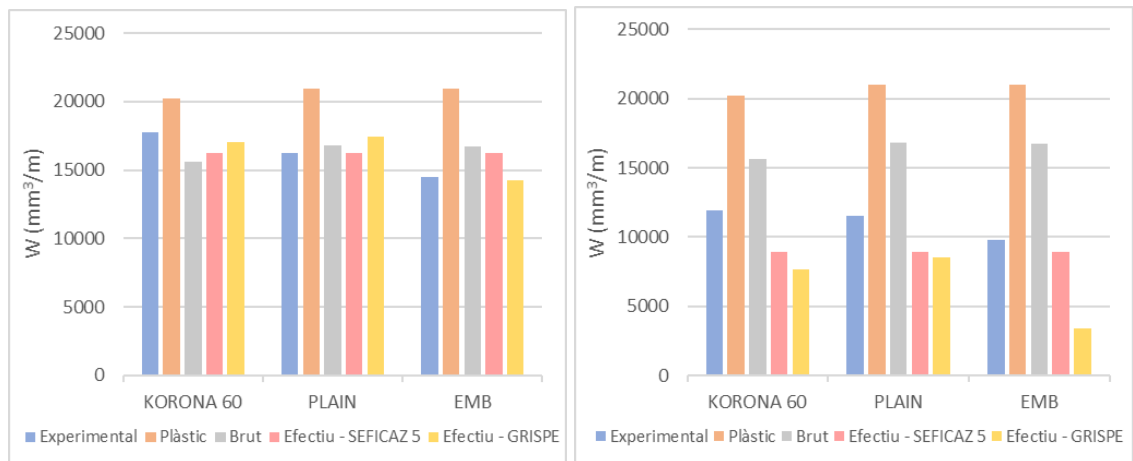


Fig. 10.5. Mòdul resistent segons els diferents perfils a moment flector positiu (esquerra) i negatiu (dreta).

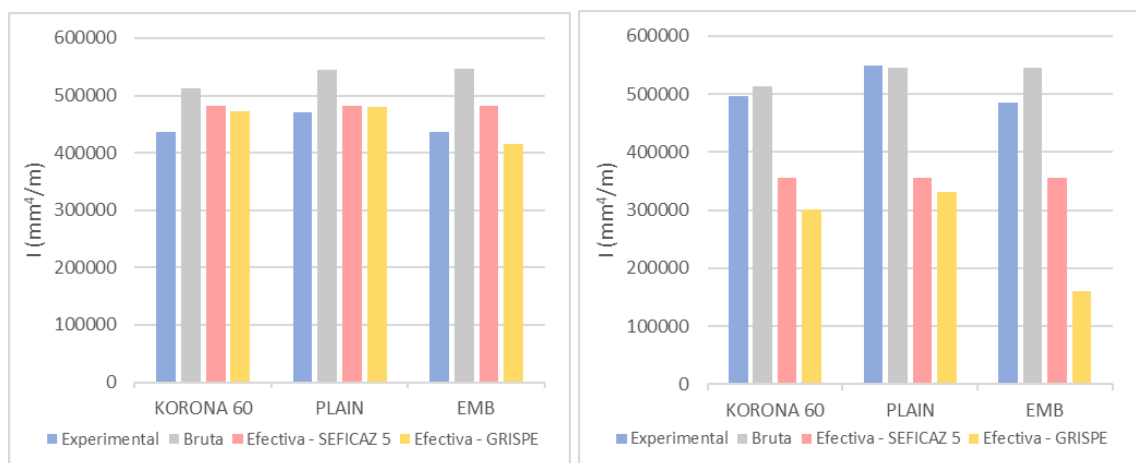


Fig. 10.6. Moment d'inèrcia segons els diferents perfils a moment flector positiu (esquerra) i negatiu (dreta).

11. Estudi amb elements finits

Per tal de aprofundir en el comportament de la xapa durant l'assaig i poder observar amb detall el tipus de fallada del material y quina és la resistència dels seus elements, es realitza una anàlisi per elements finits que simuli de la forma més veraç possible les condicions únicament de l'assaig de moment positiu.

La simulació es realitza mitjançant el programa d'elements finits ANSYS® en la seva versió 2019 R1. Aquest programa permet les anàlisis de vinclament i simulacions de materials amb comportaments no lineals.

11.1. Geometria

S'han simulat els diferents perfils estudiats en aquest projecte. Els rigiditzador, les emboticions i el punxonat han sigut reproduïdes amb la màxima exactitud i les mides són les mesurades en el assaig experimental (Apartat 4.2.1).

Malgrat l'assaig es realitza amb una xapa de 3 ones, es descarta la possibilitat de fer la simulació del model real complet ja que l'augment de la complexitat i del nombre de nodes alenteix el càlcul excessivament. En el cas del perfil KORONA 60, la simulació es realitza en mitja ona i pel perfil PLAIN i EMB, en 1 ona completa. Per això s'aplicaran les condicions de simetria corresponents. La llum de la xapa és de 3000 mm.

El model s'ha confeccionat mitjançant el programa SOLIDWORKS® (Fig. 11.1) i s'ha importat a ANSYS® en format IGES.

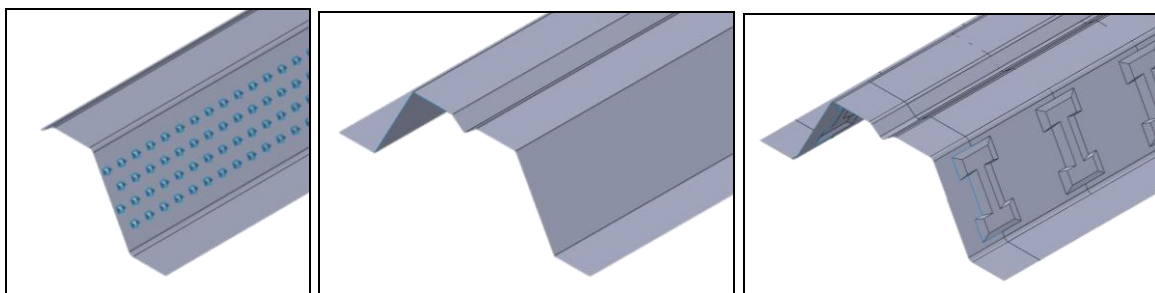


Fig. 11.1. Models geomètrics; KORONA 60, PLAIN i EMB respectivament.

11.2. Elements, material i malla

L'element utilitzat (*element type*) és el SHELL 281. És un element adequat per simular membranes de gruix constant ja que es comporta de manera elàstica no lineal. Està format per 8 nodes (I, J, K, L, M, N, O i P) amb 6 graus de llibertat per node (translacions x,y i z, i rotacions sobre els tres eixos). A la Fig. 11.2 es mostra la configuració de l'element.

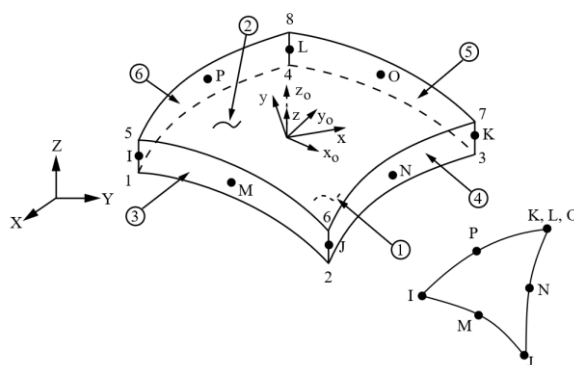


Fig. 11.2. Representació de l'element SHELL 281.

El gruix d'aquesta membrana s'introdueix en la caracterització de la secció tipus *Shell* durant el preprocés. Per a la caracterització del material ha sigut necessari introduir:

- *Corba de comportament del material*: es defineix l'acer amb la corba mostrada a la Fig. 11.3. Aquesta corba és una simplificació bilineal de la corba real del material, on el límit elàstic és el valor experimental trobat en l'apartat 4.2.2 i el mòdul tangent de la zona de plastificació de 21. S'ha realitzat aquesta simplificació per a poder optimitzar el càlcul dels resultats i que la simulació convergís més ràpidament.

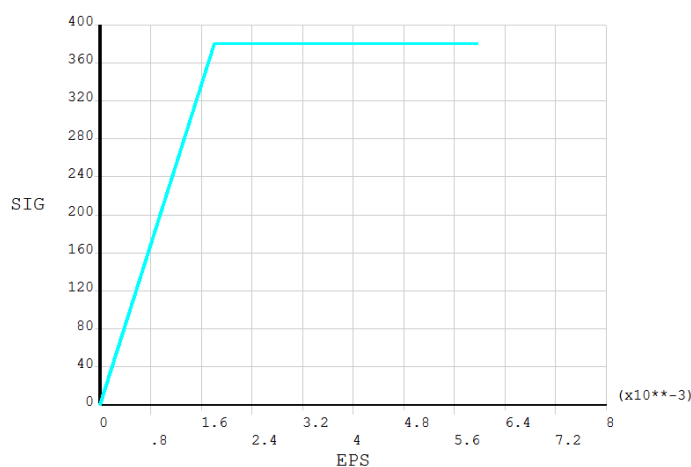


Fig. 11.3. Corba tensió-deformació del material.

- *Mòdul elàstic*: encara que el material estigui caracteritzat intrínsecament amb la corba, ANSYS® exigeix aquest valor que utilitza en la descàrrega del material.

Pel que fa la malla utilitzada en aquests models, s'han de diferenciar tres zones de mallat diferenciat, una part central, una zona de transició y una zona exterior. La zona central i de transició es troben entre les dues seccions central d'aplicació de la força (375 mm a dreta i esquerra del centre), mentre que la zona exterior compona la resta de la xapa (Fig. 11.4).

Pel que fa la zona central és la part on el mallat és més fi, utilitzant elements quadrats de 3x3 mm de longitud. En canvi, la zona exterior, és la part on el mallat és més gran. Cada tram de la secció té dos elements i pel que fa en la direcció longitudinal de la xapa, la mida d'aquests és de 34 mm. S'utilitzen elements quadrats.

La zona de transició, com indica el seu nom, és una zona on progressivament es va augmentant la mida dels elements. S'han utilitzat elements triangulars.

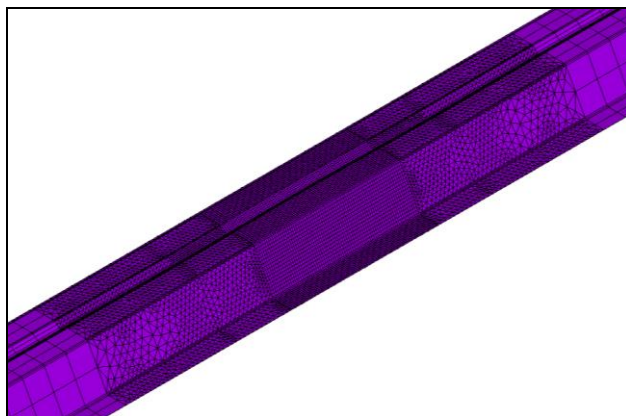


Fig. 11.4. Zones de mallat.

La zona de les emboticions s'han utilitzat elements triangulars. Per optimitzar el càlcul de la solució en la zona central s'ha utilitzat el model real de emboticions, amb arrodoniment de cantonades, mentre que en la zona de transició i exterior s'ha utilitzat un model simplificat (Fig. 11.5).

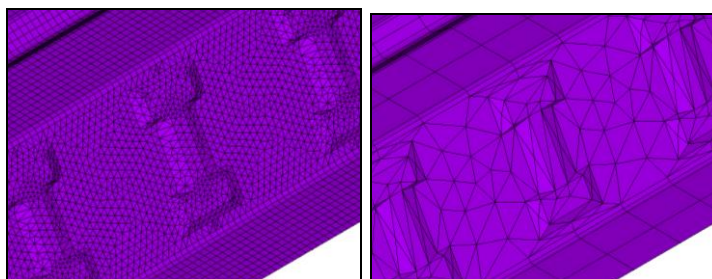


Fig. 11.5. Mallat i geometria de les emboticions.

Pel que fa la zona dels punxonaments també s'han utilitzat elements triangulars i cada quart de corona constà de un únic element (Fig. 11.6).

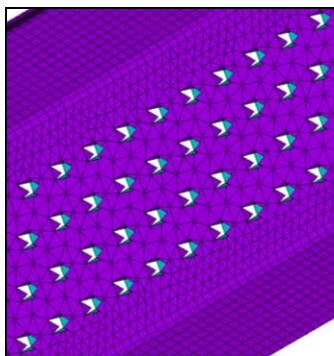


Fig. 11.6. Mallat del punxonat.

11.3. Condicions de contorn

L'objectiu principal de les condicions d'enllaç és reproduir amb la màxima exactitud les condicions de l'assaig.

Durant l'assaig, un dels extrems de la xapa s'uneix als recolzaments mitjançant cargols (articulació fixe) i l'altre està simplement recolzat sobre un corró (articulació mòbil).

Per simular-ho, es restringeixen els desplaçaments dels nodes interior de l'ala inferior de la secció extrema de la xapa. En un dels extrems s'ha restringit el desplaçament en els eixos X, Y i Z per tal de simular el cas d'articulació fixe (Fig. 11.7, esquerra) i en l'altre només en l'eix Y per a simular el cas d'articulació mòbil (Fig. 11.7, dreta).

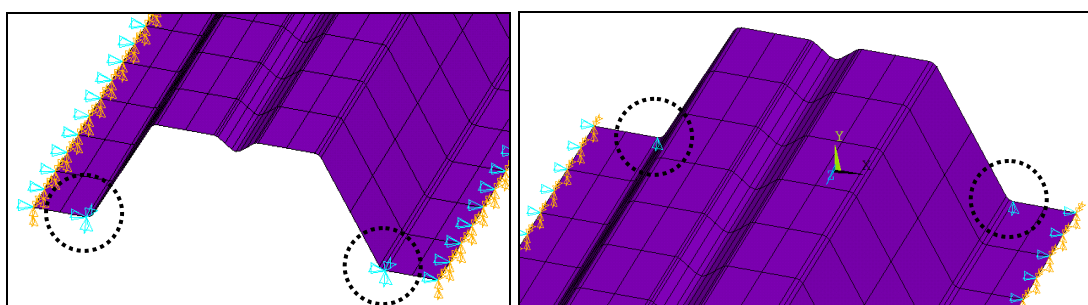


Fig. 11.7. Condicions d'enllaç.

Les condicions de simetria per tal de simular la resta de la xapa són representades com a restriccions en desplaçament en l'eix X, i rotacions en Y i Z, tal i com es pot observar a la Fig. 11.8.

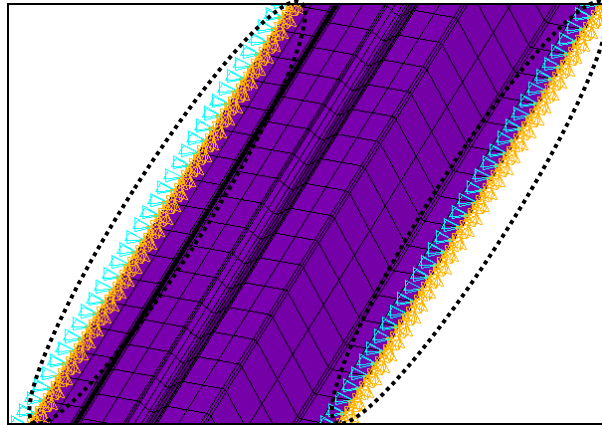


Fig. 11.8. Condicions de simetria.

Les carregues s'han aplicat en forma de força puntual en els nodes interior de l'ala inferior de quatre seccions separades equidistantment (Fig. 11.9), com s'explica en l'apartat 4.3.1. Aquestes forces estan aplicades en el eix vertical i prenen valors diferents segons l'etapa de la simulació i el tipus de xapa i gruix.

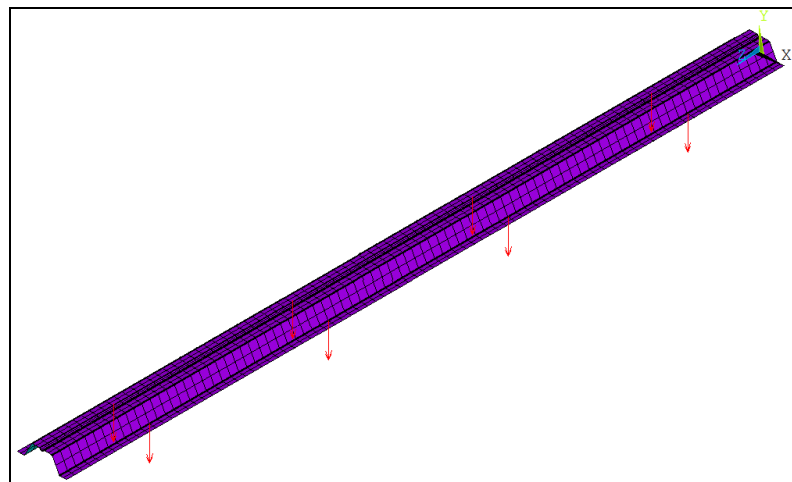


Fig. 11.9. Distribució de la càrrega.

11.4. Resolució

Per poder simular el comportament de la xapa s'han de realitzar dos tipus d'anàlisi:

1. *Estudi dels modes de vinclament*: simulació lineal dels diferents modes de vinclament i introducció d'una imperfecció inicial.
2. *Estudi del comportament no lineal*: simulació el procés d'aplicació de la força de manera no lineal utilitzant el mètode de càlcul Arc-length.

11.4.1. Estudi dels modes de vinclament

L'abonyegament és un tipus d'inestabilitat que es dona en peces de poc gruix. Aquest està provocat per una compressió excessiva que irremediament provoca el vinclament de la xapa. Aquesta compressió provoca zones circulars on l'estat tensional disminueix conforme més a prop es troba del centre fins a formar una ròtula plàstica i la disminució sobtada de la resistència.

Per tenir en compte aquest fenomen, s'ha d'introduir una petita imperfecció inicial en la xapa per tal de deixar que la ròtula es formi. És per això que es realitza un anàlisi *Eigen-Buckling*. S'aplica una càrrega de 1 N repartida en els diferents nodes de càrrega mostrats en l'apartat 11.3. per trobar els diferents modes de vinclament i els vectors propis associat a les diferents deformades.

El mode de vinclament que és més fidel a la realitat dels assajos és el que es mostra en la Fig. 11.10, d'on extraiem una càrrega crítica de vinclament, un vector propi de la fletxa i la distància entre màxims consecutius.

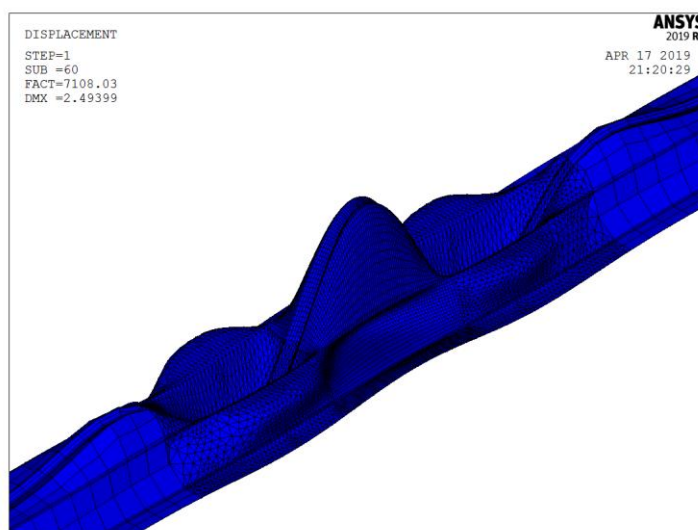


Fig. 11.10. Mode de vinclament de la xapa.

Gràcies a l'(Eq 11.1 s'extreu el factor d'escala per posteriorment fer un actualització de la geometria i introduir la imperfecció en el model geomètric.

$$\text{Factor} = \frac{e_0}{\text{Vector propi}} \quad (\text{Eq 11.1})$$

On:

e_0 : amplada de la imperfecció inicial $e_0 = L/200$.

L : distància entre màxims consecutius.

Els resultats es mostren en la Taula 11.1.

	t (mm)	Fcrit (N)	Vector pròpi (mm)	L (mm)	e0 (mm)	Factor
KORONA 60	0,75	3555,55	2,52	231,00	1,16	0,46
	1,00	6520,49	2,27	198,00	0,99	0,44
	1,20	9563,54	2,12	184,50	0,92	0,44
PLAIN	0,75	7108,03	2,49	222,30	1,11	0,45
EMB	0,75	7658,93	1,71	201,25	1,01	0,59

Taula 11.1. Resultats de l'estudi de modes de vinclament.

11.4.2. Estudi no lineal

Un cop amb la geometria creada, es va passar a realitzar una anàlisi no lineal usant el mètode Arc-length (*Large Displacement Static*) el qual a partir d'un increment de força, el sistema itera fins a arribar a una diferència petita de desplaçaments (Fig. 11.11).

S'imposa una força superior a l'obtinguda en els assajos experimentals per tal de assegurar que trobem la corba desitjada.

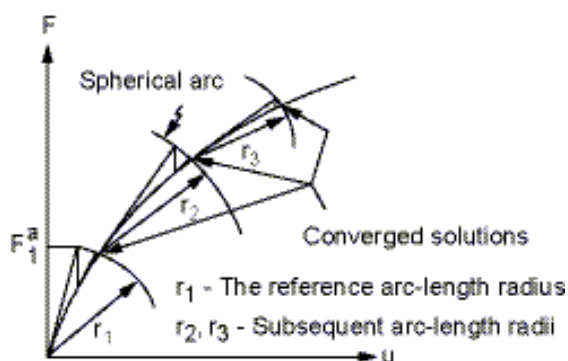


Fig. 11.11. Gràfic que representa el procés de funcionament del mètode de Arc-Length.

Els resultats obtinguts mostren com es forma una ròtula que provoca la fallada sobtada de la xapa per abonyegament (Fig. 11.12), de la mateixa manera que passa en els assajos experimentals. Per altre banda, també es pot apreciar que les ones d'abonyegament no es troben totalment alineades en el centre de la xapa (Fig. 11.13) i els rigiditzadors s'obren i perden la seva funcionalitat principal.

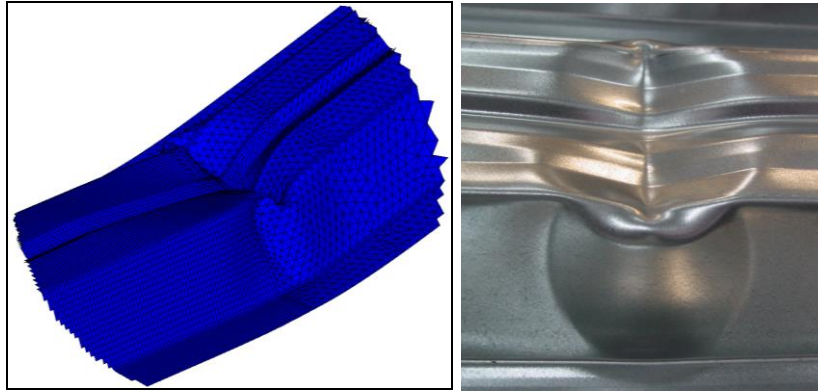


Fig. 11.12. Ròtula formada en la xapa segons l'anàlisi amb elements finits (esquerra) i els assajos experimentals (dreta).

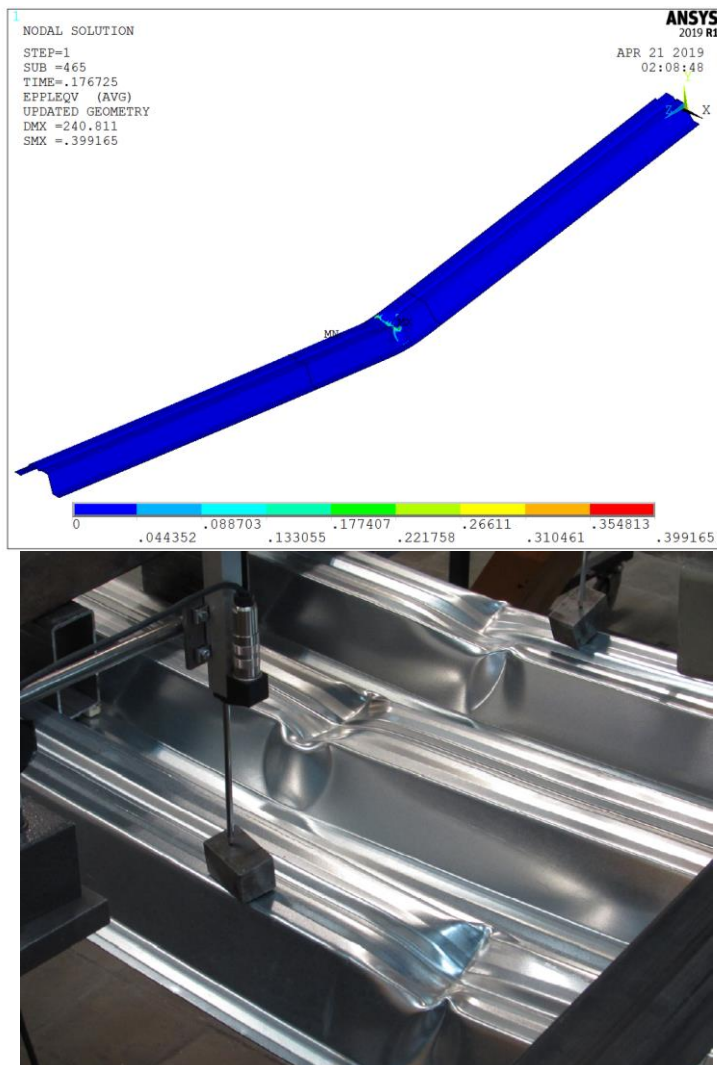


Fig. 11.13. Plastificació de la xapa segons l'anàlisi amb elements finits (superior) i els assajos experimentals (inferior).

La Fig. 11.14 mostra els gràfics comparatius força-deformació entre els resultats experimentals i els de la simulació.

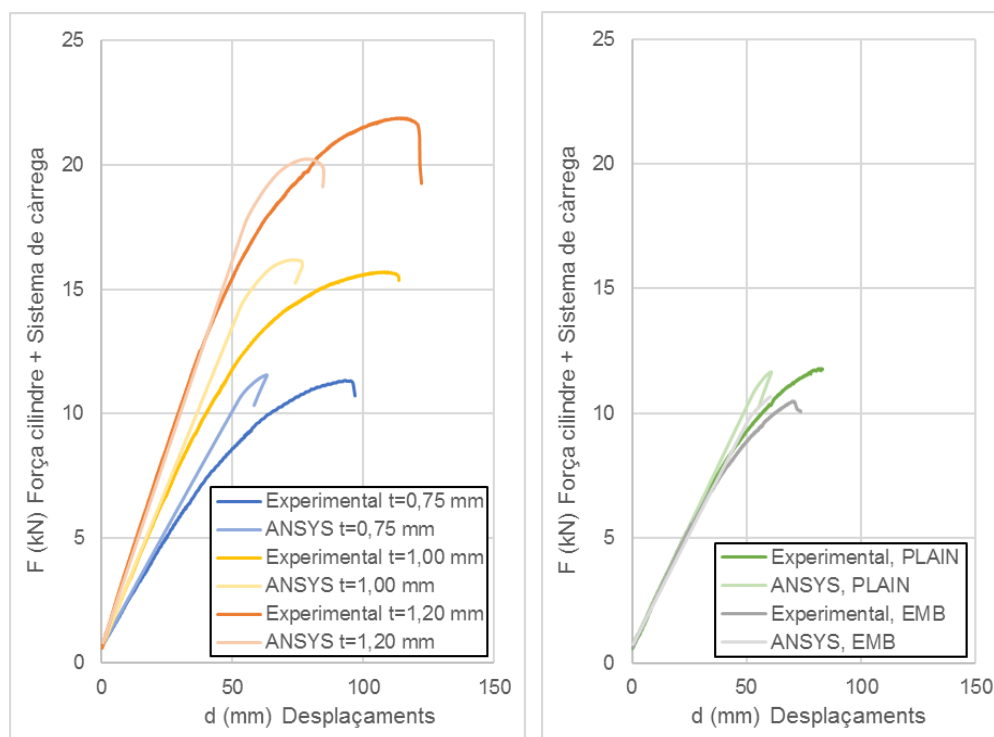


Fig. 11.14. Gràfic F-d comparatiu dels resultats d'assajos experimentals i els resultats de la simulació dels perfils KORONA 60 (esquerra) i PLAIN i EMB (dreta).

Observant aquests gràfics es pot afirmar que les la força màxima resistent de la xapa abans de la fallada per abonyegament és pràcticament igual en el cas dels assajos experimentals com en les simulacions.

Les petites diferències que es mostren en el gràfic és la desviació que té la corba en el cas de la simulació respecte a la experimental en la meitat de procés de càrrega de la força. Això és degut a que la corba de material utilitzada en aquestes simulacions és bilineal i en els assajos experimentals la corba característica del material té un comportament més estable i continu durant l'assaig.

12. Planificació i pressupost del projecte

12.1. Planificació

La planificació seguida durant aquest projecte està composta per unes etapes les quals es van duu a terme per a aconseguir els resultats desitjats.

A continuació, es mostra un gràfic de GANTT (Fig. 12.1) del projecte amb les diferents etapes i la seva cronologia i durada.

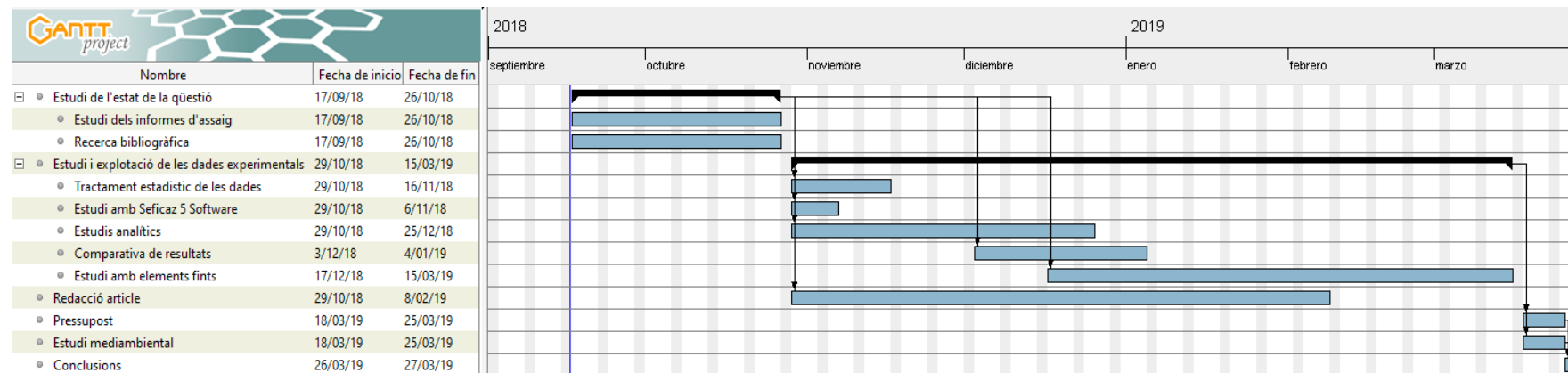


Fig. 12.1. Gràfic GANTT de planificació del projecte.

12.2. Pressupost

En aquest apartat s'han realitzat el càlcul del pressupost del projecte amb totes els recursos que s'han utilitzat. Els resultats extrets es troben en la Taula 12.1.

	Concepte	Unitats	Preu unitari	Preu total
Costos de personal	Estudi de l'estat de la qüestió	120 h	22 €/h	2.640 €
	Explotació de dades	20 h	22 €/h	440 €
	Estudi amb Seficaz	10 h	22 €/h	220 €
	Estudi analític	100 h	22 €/h	2.200 €
	Comparativa de resultats	30 h	22 €/h	690 €
	Estudi amb elements finits	100 h	22 €/h	2.200 €
	Redacció d'un article científic	20 h	22 €/h	440 €
Costos materials	Ordinador	6 mesos	42 €/mes	250 €
	Llicència SOLIDWORKS	6 mesos	110 €/mes	660 €
	Llicència ANSYS	6 mesos	333 €/mes	2.000 €
	Llicència SEFICAZ 5	6 mesos	0 €/mes	0 €
Altres costos	Material, internet, transport...	-	-	500 €
Subtotal				12.240 €
IVA (21%)				2.570 €
Total				14.810 €

Taula 12.1. Pressupost del projecte.

La valoració econòmica pel projecte *Verificació analítica i numèrica de la patent EP 2305911 aplicada a una xapa nervada comercial per lloses mixtes* és de **CATORZE MIL VUIT-CENTS DEU EUROS (14.810 €, IVA inclòs)**.

13. Estudi mediambiental

El respecte pel medi ambient és un tema fonamental avui en dia, és per això que qualsevol element ha de ser sostenible i minimitzar l'impacte ambiental durant el seu cicle de vida. Tot hi que actualment, la incidència dels forjats col·laborant amb el medi ambient és baixa, la utilització de lloses mixtes d'acer suposa un pas més endavant i una millora en la seguretat de les persones i qualitat del medi ambient.

13.1. Impacte ambiental

A l'hora de relacionar els materials usats en les lloses mixtes d'acer i l'entorn cal parlar dels següents punts.

El primer, l'estalvi dels materials, el qual fa referència a la sostenibilitat que pot aportar l'ús de materials com acer i formigó en la construcció. L'objectiu de fer treballar conjuntament l'acer i el formigó és el gran aprofitament i eficàcia que s'obté a l'hora d'utilitzar l'acer a tracció i el formigó a compressió. Aquesta unió és lleugera i consumeix menys materials per a un nivell de resistència similar que altres estructures, com per exemple, el formigó armat. Aquesta millora és un dels punts més importants cap a on cal orientar la construcció. És imprescindible que s'operi de manera eficient i sostenible utilitzant estructures resistents i lleugeres.

El segon punt és la millora la seguretat dels personal que treballa amb aquestes estructures. Amb la utilització d'aquests elements s'evita la utilització d'encofrats temporals pel simple fet de que la pròpia xapa d'acer actua com a encofrat. Així doncs, aquest fenomen fa que la construcció sigui més segura, amb plataformes de treball més estables durant la fase d'execució del forjat.

Finalment, l'ús d'acer incorpora un procés de galvanitzat de xapes per tal de protegir-les de les inclemències del temps. És durant aquest procés de protecció on s'incorpora el zinc. El zinc és molt soluble en presència de ferro i la ingesta de grans quantitats pot provocar febre, nàusees i diarrea. A més, la fabricació electrolítica de zinc pot produir boires que continguin àcid sulfúric i sulfat de zinc que irriteren l'aparell respiratori i digestiu. Però l'impacte més important que afecta les xapes d'acer galvanitzat està relacionada amb la seva manipulació on es poden crear fums a partir de l'òxid del zinc. És per aquest motiu que és molt important tenir una correcta ventilació de l'espai de treball i una bona protecció per evitar danys als treballadors.

13.2. Reciclatge dels materials

Tot i les millores ambientals que aporten aquest element estructural, un dels punts més importants és el reciclatge dels materials un cop la seva vida útil ha finalitzat. És imprescindible reciclar les lloses i per fer-ho, primer cal una correcta separació del formigó i l'acer. Aquesta materials només podran tornar a ser útils si són degudament separats i classificats.

Pel que fa el reciclatge del formigó és molt simple. Les runes de formigó són transportades a una planta de reciclatge, on posteriorment es trituren. Després, els fragments d'àrid procedents dels residus del formigó son classificats per mida per facilitar el seu ús. Un cop classificat, ja estan llestos per a ser reutilitzats en diferents aplicacions com poden ser, en la construcció de carreteres.

En canvi, el reciclatge de l'acer galvanitzat és sensiblement més complicat el formigó. Per duu a terme aquesta tasca, es trasllada l'acer a les acereries que utilitzen forns elèctrics d'arc. L'acer s'introdueix en aquests forns per a tornar a convertir-se en estat líquid i posteriorment tornar a prendre la forma desitjada segons les necessitats. Pel que fa el zinc del galvanitzat, aquest durant el procés d'escalfament es volatiliza i és recollit en uns filtres de pols. Posteriorment aquesta pols és utilitzada altre cop en la producció de zinc refinat, ja que és un material reciclatge 100% sense perdre les propietats físiques i químiques.

14. Conclusions

Després de realitzar totes les proves descrites en aquest document i analitzar els resultats, ja podem discutir el comportament de les xapes d'acer usades en les lloses mixtes durant la seva fase constructiva. S'ha traçat una caracterització de cada model segons el gruix i s'ha establert una àrea de combinació moment-reacció en la qual s'assegura un bon funcionament de la xapa d'acer. S'ha comprovat que els resultats experimentals estan dins d'aquesta àrea i per tant són vàlids.

Per altre banda, gràcies als assajos de un sol tram de moment flector positiu i negatiu, s'ha pogut obtenir el valor de la resistència de la xapa, així com els moment d'inèrcia i el mòdul resistent. A partir dels quals s'ha pogut afirmar que, en general, el perfil KORONA 60 ha funcionat millor que l'EMB segons les proves per a cada combinació de longitud i gruix.

També s'han trobat aquestes mateixes propietats de forma analítica, seguint tant els procediments explicats en l'Eurocodi con els mètodes presentats per GRISPE. Gràcies a això, s'ha pogut observar que els resultats compleixen amb les expectatives respecte la realitat i s'ha pogut dibuixar amb precisió el comportament d'aquests perfils. Una de les conclusions més important a la que s'ha arribat ha sigut que en el cas del moment flector positiu es pot observar una petita plastificació en la part inferior de la secció de les xapes, mentre que en el cas de flexió negativa, la xapa es completament elàstica.

Pel que fa els resultats de la simulació usada en els anàlisis per elements finits, la qual ha sigut una eina molt útil per comprendre el comportament de la xapa, han proporcionat molta informació de la fallada per vinclament que han patit les xapes durant els assajos. S'ha demostrat que és una eina vàlida per a l'estudi d'aquests elements sense la necessitat de duu a terme assajos experimentals, els quals tenen un cost més elevat.

En resum, es pot dir que la millor solució que hi ha actualment en xapes d'acer conformades en fred per a lloses mixtes és la KORONA 60, ja que per una banda, gràcies a la corona de punxonat té una millor interacció acer-formigó i per tant minimitza la possibilitat de lliscament entre materials. I per altre banda, ha assolit les expectatives i ha sigut demostrat que segons les normes, pot ser usada ja que compleix amb les condicions presentades en aquest treball d'una manera més eficaç que la seva competència.

15. Agraïments

M'agradaria agrair als professors i tutors del meu projecte, Prof. Frederic Marimon i Prof. Miquel Ferrer per l'ajuda prestada durant tot el projecte, però sobretot durant els estudis analítics i les simulacions d'elements finits amb ANSYS®. També vull agrair als professors del departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria que m'han prestat ajuda quan l'he necessitat.

I per últim, donar les gràcies a la meua família i amics pel suport que m'han donat des de el primer dia i la paciència i comprensió que han tingut amb mi.

16. Bibliografia

16.1. Referències bibliogràfiques

- [1] EUROPERFIL. *EUROCOL 60: Perfiles para forjado colaborante*. España, 2006.
- [2] CEN (Comitè europeu de normalització) . *EN 1993-1-3: Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules- Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. Brussel·les, 2006.
- [3] CEN (Comitè europeu de normalització). *EN 1990-1-3: Eurocode 0. Eurocode. Basis of structural design*. Brussel·les. 2002.
- [4] CSTB. *Cahier 3730_V2 : Cahier des prescriptions techniques communes aux procédés de planchers collaborants. Groupe spécialisé n° 3 Structures, planchers et autres composants structuraux de la Commission chargée de formuler des Avis Techniques*. França, 2014.
- [5] Anna Palisson. *GRISPE PLUS D3.1: Perforated profiles*. França, 2018.
- [6] CEN (Comitè europeu de normalització). *EN 1993-1-5: Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements*. Brussel·les, 2005.
- [7] Anna Palisson. *GRISPE PLUS D3.1: Steel decks with embossments*. França, 2018.
- [8] CEN (Comitè europeu de normalització). *ENV 1993-1-3: Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3: General rules- Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. Brussel·les, 1996.

16.2. Bibliografia complementària

ECCS TWG 7.5. *Worked examples according to EN 1993-1-3. Eurocode 3, Part 1.3*. 2006

LERMA (Laboratori d'elasticitat i resistència de materials). *Ensayos experimentales a flexión M+ y M- del perfil Korona 60, de la empresa Europerfil S.A, con los espesores; 0,75-1,0-1,20 mm, según norma Eurocódigo-3 Parte 1-3 [EN 1993-1-3:2006]*. Barcelona, ETSEIB, 2017.

LERMA (Laboratori d'elasticitat i resistència de materials). *Eurocode 3 Internal Support Test*

Comparison between UPCPatent and EUROCOL60 sheeting designs for composite slabs with thicknesses of 0,75 and 1,2 mm, according to EN 1993-1-3:2006. Barcelona, ETSEIB, 2016.