

# Sumari

<b>SUMARI</b>	<b>1</b>
<b>ANNEX A. AMPLIACIÓ DELS MODELS TEÒRICS</b>	<b>3</b>
A.1 Model Bhattacharyya	3
A.2 Model A	9
A.3 Model B (EDO)	13
<b>ANNEX B. MACROS DE MATLAB</b>	<b>17</b>
B.1 Macros per el càlcul del model teòric A	17
B.1.1 Càlcul inicial	17
B.1.2 Segona fase	17
B.1.3 Etapa inicial	19
B.1.4 Etapa intermèdia	23
B.1.5 Bucle inicial_v3	26
B.1.6 Angle doblat	29
B.2 Macros per la representació gràfica	30
B.2.1 Conformat	30
B.2.2 Trajectòria	31
B.3 Macros per el càlcul de deformacions	32
B.3.1 Membrana	32
B.3.2 Bending2	33
B.4 Macro per realitzar una animació del procés de conformat	34
B.4.1 Animacio2	34
<b>ANNEX C. SIMULACIONS COPRA</b>	<b>39</b>
C.1 Perfil experiment de DAMM	39
C.1.1 Línia de processat	39
C.1.2 Resultats simulació	40
C.2 Perfil experiment de Bhattacharyya	44
C.2.1 Línia de processat	44
C.2.2 Resultats de la simulació	45
C.3 Perfil en U	48
C.3.1 Línia de conformat	48
C.3.2 Resultats de la simulació	50
C.4 Perfil en C	52
C.4.1 Línia de conformat	52
C.4.2 Resultat de la simulació	55



---

C.5 Perfil Omega .....	58
C.5.1 Línia de processat .....	58
C.5.2 Resultats de la simulació .....	63
<b>ANNEX D. ESTUDI D'IMPACTE AMBIENTAL</b> .....	<b>65</b>
<b>ANNEX E. PRESSUPOST</b> .....	<b>67</b>



## Annex A. Ampliació dels models teòrics

En aquest annex es realitza de forma més detallada, sempre que sigui necessària, el desenvolupament dels diversos models teòrics presentats a la memòria.

### A.1 Model Bhattacharyya

Suposem una punt P situat a les coordenades (X,Y,Z) en l'estat inicial del procés de conformat. A continuació es considera un punt Q molt proper al P de forma que es trobi a la posició (X, Y, Z+dZ).

Si es considera la trajectòria  $S(z)$  que segueix l'ala del perfil proposada a l'eq. A.1 i situant l'origen de coordenades a la posició (0, 0, Z) s'obté la posició en que es trobaran els punts P i Q durant el procés de fabricació.

$$S(z) = (x, y, z) = (X \cos \theta(z), X \sin \theta(z), z) \quad (\text{Eq. A.1})$$

$$P = (X \cos \theta, X \sin \theta, 0)$$
$$Q = (X \cos(\theta + d\theta), X \sin(\theta + d\theta), dz)$$

La deformació de membrana es pot calcular amb l'eq A.2:

$$\varepsilon_m = \frac{|\overrightarrow{PQ}| - dz}{dz} \quad (\text{Eq. A.2})$$

Per tant, cal calcular la norma del vector  $|\overrightarrow{PQ}|$ .

$$\overrightarrow{PQ} = (X(\cos(\theta + d\theta) - \cos \theta), X(\sin(\theta + d\theta) - \sin \theta), dz)$$
$$|\overrightarrow{PQ}|^2 = X^2 [(\cos(\theta + d\theta) - \cos \theta)^2 + (\sin(\theta + d\theta) - \sin \theta)^2] + dz^2$$

$$|\overrightarrow{PQ}|^2 = X^2 [\cos^2(\theta + d\theta) + \cos^2(\theta) - 2 \cos(\theta + d\theta) \cos \theta + \sin^2(\theta + d\theta) + \sin^2(\theta) - 2 \sin(\theta + d\theta) \sin \theta] + dz^2$$

Utilitzant les expressions trigonomètriques de les eq. A.3, A.4 i A.5, s'obté l'equació A.6

$$\cos x \cos y = \frac{\cos(x + y) + \cos(x - y)}{2} \quad (\text{Eq. A.3})$$



$$\sin x \sin y = \frac{\cos(x-y) - \cos(x+y)}{2} \quad (\text{Eq. A.4})$$

$$\cos(2x) = \cos^2(x) - \sin^2(x) \quad (\text{Eq. A.5})$$

$$|PQ|^2 = X^2 \left[ 4 \sin^2 \frac{d\theta}{2} \right] + dz^2 \quad (\text{Eq. A.6})$$

Simplificant l'eq A. 6 mitjançant l'eq A. 7, s'obté l'eq. A.8

$$\sin(x) \approx x \quad \text{si } x \rightarrow 0 \quad (\text{Eq. A.7})$$

$$|PQ| = \left( X^2 (d\theta)^2 + dz^2 \right)^{1/2} \quad (\text{Eq. A.8})$$

Tot seguit s'aplica el desenvolupament de Taylor que es mostra a continuació, suposant que  $dz^2 > x^2 (d\theta)^2$ .

$$(x+y)^r = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{r}{k} x^{r-k} y^k = x^r + rx^{r-1}y + \frac{r(r-1)}{2!} x^{r-2}y^2 + \dots$$

On:

$$x = dz^2$$

$$y = X^2 (d\theta)^2$$

D'aquesta forma s'obté l'expressió final de la deformació de membrana longitudinal, tal i com es mostra a l'equació A.9.



$$|PQ| = (dz^2)^{1/2} + \frac{1}{2}(dz^2)^{-1/2} X^2 (d\theta)^2 = dz \left[ 1 + \frac{1}{2} X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon = \frac{|PQ| - l_{inicial}}{l_{inicial}} \approx \frac{dz \left[ 1 + \frac{1}{2} X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right] - dz}{dz} \approx \frac{1}{2} X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \quad (\text{Eq. A.9})$$

Per altra banda, cal definir la deformació de doblat transversal per tal de minimitzar l'energia de deformació.

En aquest model es considera que la deformació de doblat transversal segueix l'eq. A. 10.

$$\varepsilon_{bt} = -\frac{y}{R_{ct}} \quad (\text{Eq. A.10})$$

Tot seguit ja es pot calcular la deformació d'energia de deformació,  $dW = \{\sigma\}\{\varepsilon\}dV$ , que s'obté de les expressions A.9 i A.10, considerant un comportament del material rígid.

$$W_t = \int_0^L W_{bt} + W_m = \int_0^L \left[ \frac{1}{4} \sigma_y t^2 \theta + \frac{1}{6} \sigma_y a^3 t \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 \right] dz \quad (\text{Eq. A.11})$$

Per tal d'obtenir l'equació diferencial que minimitzi l'expressió A.11 s'ha d'aplicar la teoria del càlcul variacional de Euler.

Donada una expressió del tipus  $V(y) = \int_0^T F(t, y(t), y'(t))$  es vol trobar una funció  $y(t)$  que minimitzi el valor de  $V(y)$ .

S'anomena  $y^*(t)$  la funció òptima de  $y(t)$  que minimitza el valor de  $V(y)$ . D'aquesta forma es poden expressar totes les funcions de  $y(t)$  i  $y'(t)$  tal com indica l'eq A.12 i A.13.

$$y(t) = y^*(t) + \beta P(t) \quad (\text{Eq. A.12})$$

$$y'(t) = y^{*'}(t) + \beta P'(t) \quad (\text{Eq. A.13})$$

On  $P(t)$  és una trajectòria arbitrària que ha de complir les següents característiques:



$$P(0) = 0$$

$$P(T) = 0$$

El fet que cada valor de  $\beta$  defineixi una trajectòria particular permet expressar el funcional  $V(y)$  en funció de la variable  $\beta$ . D'aquesta forma per minimitzar el funcional cal aplicar l'equació A.14.

$$\frac{dV}{d\beta} = 0 \quad (\text{Eq. A.14})$$

$$V(\beta) = \int_0^T F(t, y^*(t) + \beta P(t), y'^*(t) + \beta P'(t)) dt \quad (\text{Eq. A.15})$$

Cal aplicar a l'eq A.15 l'expressió A.14, per tal de minimitzar el funcional. D'aquesta forma s'arriba a l'expressió A.16.

$$V'(\beta) = \int_0^T \frac{\partial F}{\partial \beta} dt = \int_0^T \left( \frac{\partial F}{\partial y} \frac{dy}{d\beta} + \frac{\partial F}{\partial y'} \frac{dy'}{d\beta} \right) dt = \int_0^T F_y P(t) dt + \int_0^T F_{y'} P'(t) dt \quad (\text{Eq. A.16})$$

A més a més s'ha de complir  $\left[ \frac{dV}{d\beta} \right]_{\beta=0} = 0$  ja que  $y(t) = y^*(t) \xrightarrow{\text{si}} \beta = 0$ . Aquesta condició ens permet trobar l'expressió A.17

$$\int_0^T F_y P(t) dt + \int_0^T F_{y'} P'(t) dt = 0 \quad (\text{Eq. A.17})$$

Si s'integra el segon terme de l'eq. A.17 per parts s'obté l'eq. A.18

$$\int_0^T F_{y'} P'(t) dt = [F_{y'} P(t)]_0^T - \int_0^T P(t) \frac{d}{dt} F_{y'} dt \quad (\text{Eq. A.18})$$

A on  $[F_{y'} P(t)]_0^T$  s'anul·la ja que per definició  $P(0) = P(T) = 0$ .

Així, utilitzant les expressions A.16, A.17 i A.18 podem obtenir la següent expressió:

$$V'(\beta) = \int_0^T F_y P(t) dt - \int_0^T P(t) \frac{d}{dt} F_{y'} dt = \int_0^T P(t) \left( F_y - \frac{d}{dt} F_{y'} \right) dt = 0$$



Com que  $P(t)$  és una funció arbitrària no pot valer 0, per tant per minimitzar el funcional s'ha de complir l'eq A.19.

$$F_y - \frac{d}{dt} F_{y'} = 0 \quad (\text{Eq. A.19})$$

En el cas del model de Bhattacharyya i aplicant l'eq A.19 tenim que:

$$F(z, \theta, \theta') = \frac{1}{4} \sigma_y t^2 \theta + \frac{1}{6} \sigma_y a^3 t \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2$$
$$\frac{\partial F}{\partial \theta} - \frac{d}{dz} \left( \frac{\partial F}{\partial \theta'} \right) = 0 \quad (\text{Eq. A.20})$$

Amb l'eq A.20 es pot obtenir l'equació diferencial (eq. A.21) que permet trobar la funció  $\theta(z)$  que minimitza l'energia de deformació per aquest model teòric.

$$\frac{1}{4} \sigma_y t^2 - \frac{1}{3} \sigma_y a^3 t \left( \frac{d^2 \theta}{dz^2} \right) = 0 \quad (\text{Eq. A.21})$$

Resolent l'eq. A.21:

$$\theta(z) = \frac{3t}{8a^3} z^2 + Az + B \quad (\text{Eq. A.22})$$

Les condicions de contorn de l'eq. A.22 són les següents:

$$\theta(0) = 0 \longrightarrow B = 0$$
$$\theta'(0) = 0 \longrightarrow A = 0$$

Per altra banda, aquest model permet pronosticar la longitud de deformació necessària (eq. A.23) per tal que es pugui minimitzar l'energia de deformació.

$$\theta(L) = \Delta \theta_{etapa} \longrightarrow \Delta \theta_{etapa} = \frac{3t}{8a^3} L^2 \longrightarrow L = \sqrt{\frac{\Delta \theta_{etapa} 8a^3}{3t}} \quad (\text{Eq. A.23})$$

Amb l'eq A.9 i A.22 es pot deduir l'expressió de la deformació de membrana longitudinal del model de Bhattacharyya que apareix a la memòria del projecte (eq. A.24)



$$e = \frac{9}{32} \frac{t^2}{a^6} x^2 z^2 \quad (\text{Eq. A.24})$$

$$0 \leq x \leq a$$

$$0 \leq z \leq L$$

$$L = a \sqrt{\frac{8a\theta_{etapa}}{3t}}$$

Aquets model però presenta un parell de problemes destacables:

- No permet regular o limitar la derivada en  $\theta(L)$ .
- No permet treballar en distàncies entre etapes inferiors al valor trobat de L.

Els resultats d'aquest model es poden veure a la figura A.1 i A.2 on es comparen els resultats de l'apartat 6.3.1 i 6.3.2 respectivament. Els resultats són bastant pitjors que els altres models, per aquest motiu no s'han incorporat a la memòria i es poden consultar a l'annex.

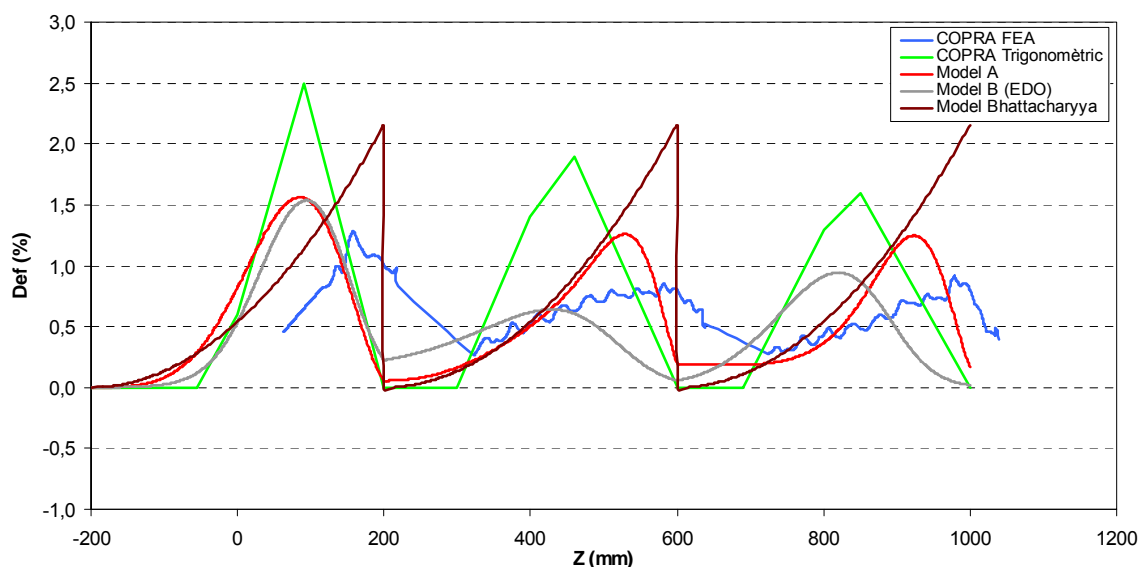


Fig. A.1. Deformació de membrana calculada a 2 mm de l'extrem de l'ala en el perfil de l'apartat 6.3.1 de la memòria





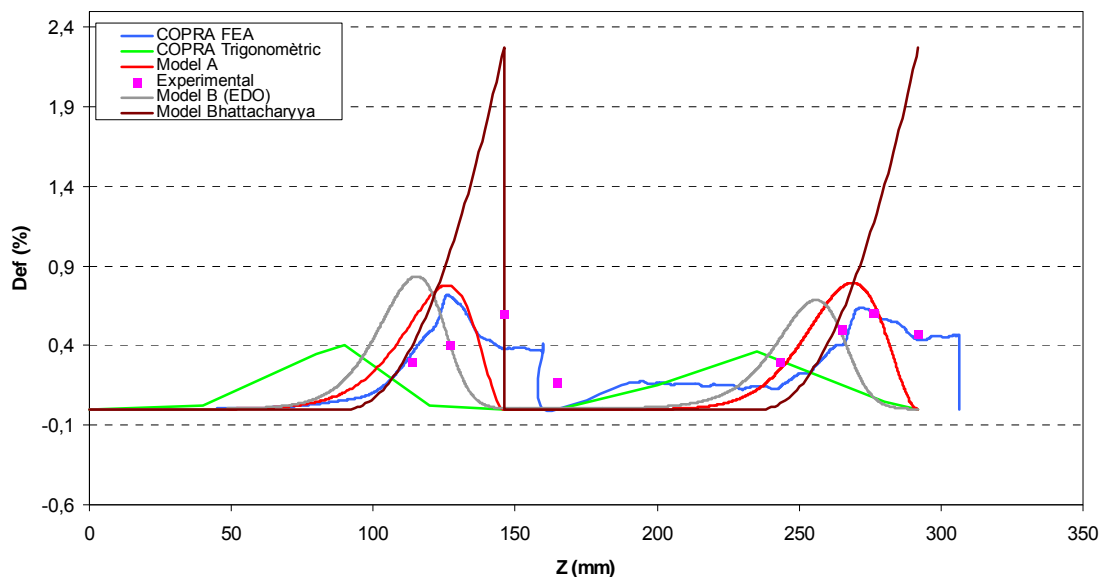


Fig. A.2. Deformació de membrana calculada a 1,5 mm de l'extrem de l'ala en el perfil de l'apartat 6.3.2 de la memòria

## A.2 Model A

El model A es troba suficientment explicat ja a la memòria. A més a més, es poden consultar les macros de MATLAB, en que es pot veure com es realitza el càlcul. Cal destacar però que el càlcul de la deformació transversal està acotat, ja que d'altra forma el valor podria tendir a valors molt elevats per radis d'acord molt petits. Tot això es pot consultar a les macros.

Tot seguit es presentarà la formulació per a l'obtenció de la deformació de doblat longitudinal, que s'ha desenvolupat durant la realització del projecte per tal de millorar els models teòrics existents i també la formulació necessària per a obtenir la distribució de tensions transversals que es generen en el doblat de plaques.

La deformació de doblat longitudinal es pot calcular seguint l'equació A.25.

$$\varepsilon_{bl} = -\frac{Y}{R_c} \quad (\text{Eq. A.25})$$



El radi de curvatura d'un punt de la trajectòria  $S(z)$  es pot calcular seguint l'eq. A. 26

$$\frac{1}{Rc(z)} = \frac{\|S'(z) \times S''(z)\|}{\|S'(z)\|^3} \quad (\text{Eq. A.26})$$

Sabent que la trajectòria  $S(z)$  segueix l'equació A.1 es pot obtenir les equacions A.27 i A.28.

$$S'(z) = \left( -X \sin(\theta) \frac{d\theta}{dz}, X \cos(\theta) \frac{d\theta}{dz}, 1 \right) \quad (\text{Eq. A.27})$$

$$S''(z) = \left( -X \left( \cos(\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \sin(\theta) \frac{d^2\theta}{dz^2} \right), X \left( -\sin(\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \cos(\theta) \frac{d^2\theta}{dz^2} \right), 0 \right) \quad (\text{Eq. A.28})$$

A partir de les equacions A.27 i A.28 obtenim:

$$\|S'(z) \times S''(z)\| = \sqrt{X^2 \left( \sin(\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \cos(\theta) \left( \frac{d^2\theta}{dz^2} \right) \right)^2 + X^2 \left( \cos(\theta) \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \sin(\theta) \left( \frac{d^2\theta}{dz^2} \right) \right)^2 + \left( X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^3 \right)^2}$$

Simplificant:

$$\|S'(z) \times S''(z)\| = \sqrt{X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^4 + X^2 \left( \frac{d^2\theta}{dz^2} \right)^2 + X^4 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^6}$$

Per altra banda:

$$\|S'(z)\|^3 = \left( \sqrt{\left( -X \sin(\theta) \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + \left( X \cos(\theta) \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + 1^2} \right)^3$$

$$\|S'(z)\|^3 = \left( \sqrt{X^2 \sin^2 \theta \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + X^2 \cos^2 \theta \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + 1} \right)^3$$

$$\|S'(z)\|^3 = \left( X^2 \left( \frac{d\theta}{dz} \right)^2 + 1 \right)^{3/2}$$

Així finalment s'obté l'equació A.29 que és la presentada a la memòria del projecte per realitzar el càlcul de la deformació de doblat longitudinal.



$$\varepsilon_{bl} = -Y \frac{X \sqrt{\left(\frac{d\theta}{dz}\right)^4 + \left(\frac{d^2\theta}{dz^2}\right)^2} + X^2 \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^6}{\left(X^2 \left(\frac{d\theta}{dz}\right)^2 + 1\right)^{3/2}} \quad (\text{Eq. A.29})$$

La distribució de tensions que es genera en el doblat de plaques, esta extreta de la referència bibliogràfica [7] que es cita en la memòria. Per més informació de la que s'exposarà a continuació es recomana la seva lectura.

En aquets model es considera que les deformacions en la direcció longitudinal són negligibles, de la mateixa forma que les deformacions elàstiques i, per tant, el material estarà totalment plastificat en tot el gruix. Per últim també es considera un comportament del material elàstic perfectament plàstic.

Si el desenvolupament es realitza en coordenades cilíndriques i es considera un cas de tensió plana (és una de les hipòtesis inicials), el tensor tensió es pot expressar de forma següent:

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{pmatrix}$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}$$

En la figura A.3 es planteja l'equilibri de forces en un diferencial cilíndric. Gràcies al plantejament de l'equilibri es pot obtenir l'eq A.30.

$$\left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right)(r + dr)d\theta dz - \sigma_r r d\theta dz - 2\sigma_\theta dr dz \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0$$

$$\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx \frac{d\theta}{2}$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (\text{Eq. A.30})$$



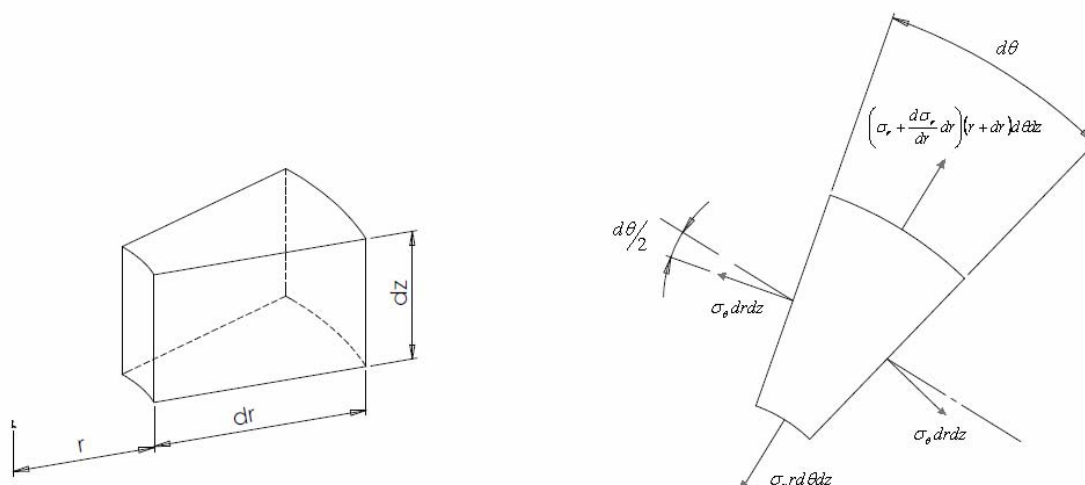


Fig. A.3. Equilibri de forces en un diferencial cilíndric

Aplicant el criteri de Tresca de plasticitat s'obté l'eq A.31.

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} - \sigma_r &= fy \longrightarrow mn \leq r \leq b \\ \sigma_{\theta} - \sigma_r &= -fy \longrightarrow a \leq r \leq mn \end{aligned} \tag{Eq. A.31}$$

Utilitzant l'eq A.30 i A.31 s'aconsegueix la distribució de tensions radials i transversals en el doblat d'una placa.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -fy \ln\left(\frac{b}{r}\right) \longrightarrow mn \leq r \leq b \\ \sigma_r &= -fy \ln\left(\frac{r}{a}\right) \longrightarrow a \leq r \leq mn \end{aligned} \tag{Eq. A.32}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= fy \left(1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right)\right) \longrightarrow mn \leq r \leq b \\ \sigma_{\theta} &= -fy \left(1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right) \longrightarrow a \leq r \leq mn \end{aligned} \tag{Eq. A.33}$$



El valor de  $m$  es troba imposant continuïtat de tensions el la distribució radial.

$$-fy \ln\left(\frac{b}{rn}\right) = -fy \ln\left(\frac{rn}{a}\right) \longrightarrow \frac{b}{rn} = \frac{rn}{a} \longrightarrow rn = \sqrt{ab}$$

Aquesta distribució de tensions compleix l'equilibri de forces transversals (eq. A.34) i el moment resultat és igual al moment plàstic ideal (eq. A.35).

$$\int_a^m -fy \left(1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right) dr + \int_m^b fy \left(1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right)\right) dr = 0 \quad (\text{Eq. A.34})$$

$$M = \int_a^m -fy \left(1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right) r dr + \int_m^b fy \left(1 - \ln\left(\frac{b}{r}\right)\right) r dr = \frac{1}{4} fy \cdot t^2 \quad (\text{Eq. A.35})$$

### A.3 Model B (EDO)

Aquest model segueix el mateix desenvolupament que el model de Bhattacharyya però incorporant la deformació de doblat longitudinal.

Cal redefinir però l'expressió que permet desenvolupar l'equació diferencial, ja que en aquest cas el funcional depèn de més factors (eq. A.36).

$$W = \int_0^L F(z, \theta(z), \theta'(z), \theta''(z)) \quad (\text{Eq. A.36})$$

Es defineix altre vegada la funció  $\theta(z)$  en funció del ideal i d'una arbitrària afectada per un paràmetre.

$$\theta(z) = \theta^*(z) + \beta P(z)$$

En aquest cas  $P(z)$  ha de complir les següents condicions:



$$\theta(0) = A \longrightarrow P(0) = 0$$

$$\theta(L) = B \longrightarrow P(L) = 0$$

$$\theta'(0) = C \longrightarrow P'(0) = 0$$

$$\theta'(L) = D \longrightarrow P'(L) = 0$$

Si es continua amb el mateix desenvolupant que en el model de Bhattacharyya:

$$W(\beta) = \int_0^L F(z, \theta^*(z) + \beta P(z), \theta^{*'}(z) + \beta P'(z), \theta^{*''}(z) + \beta P''(z)) dz$$

$$\frac{dW}{d\beta} = 0$$

$$\int_0^L \left( \frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{d\theta}{d\beta} + \frac{\partial F}{\partial \theta'} \frac{d\theta'}{d\beta} + \frac{\partial F}{\partial \theta''} \frac{d\theta''}{d\beta} \right) dz = 0$$

$$\int_0^L (F_\theta P(z) + F_{\theta'} P'(z) + F_{\theta''} P''(z)) dz = 0$$

A continuació es realitzen les integracions per parts del segon i tercer terme.

$$\int_0^L F_{\theta'} P'(z) dz = [F_{\theta'} P(z)]_0^L - \int_0^L P(z) \frac{d}{dz} F_{\theta'} dz = - \int_0^L P(z) \frac{d}{dz} F_{\theta'} dz$$

$$\int_0^L F_{\theta''} P''(z) dz = [F_{\theta''} P'(z)]_0^L - \int_0^L P'(z) \frac{d}{dz} F_{\theta''} dz = - \int_0^L P'(z) \frac{d}{dz} F_{\theta''} dz$$

$$- \int_0^L P'(z) \frac{d}{dz} F_{\theta''} dz = - \left( \left[ \frac{d}{dz} F_{\theta''} P(z) \right]_0^L - \int_0^L P(z) \frac{d^2}{dz^2} F_{\theta''} dz \right) = \int_0^L P(z) \frac{d^2}{dz^2} F_{\theta''} dz$$

I per tant s'arriba a la següent expressió:

$$W'(\beta) = \int_0^L F_\theta P(z) dz - \int_0^L P(z) \frac{d}{dz} F_{\theta'} dz + \int_0^L P(z) \frac{d^2}{dz^2} F_{\theta''} dz = \int_0^L P(z) \left( F_\theta - \frac{d}{dz} F_{\theta'} + \frac{d^2}{dz^2} F_{\theta''} \right) dz = 0$$

Evidentment, al ser  $P(z)$  una funció arbitrària ha de ser diferent de 0 i s'obté l'expressió per tal d'obtenir la nova equació diferencial (eq A.37).



$$\frac{\partial F}{\partial \theta} - \frac{d}{dz} \left( \frac{\partial F}{\partial \theta'} \right) + \frac{d^2}{dz^2} \left( \frac{\partial F}{\partial \theta''} \right) = 0 \quad (\text{Eq. A.37})$$

Per tal de poder obtenir tant l'equació diferencial simbòlica com una solució d'aquesta numèrica s'han realitzat algunes simplificacions que no resulten sempre vàlides en tots els rangs de valors, fet ja comentat en la memòria. L'equació diferencial que s'obté i que es resol, ja s'ha comentat que es extremadament complexa tot i realitzant aquestes simplificacions, tal i com es pot veure a continuació

$$\begin{aligned} \frac{d^4}{dz^4} y(z) = & -\frac{1}{t^2 ala^2} \left( 8 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right) \left( \frac{1}{4} t^2 \right. \right. \\ & - \frac{1}{16} t^2 ala^2 \left( 4 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right) - 12 ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right) \right. \\ & - \frac{4 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right) \left( \frac{d^3}{dz^3} y(z) \right)}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^3 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)} + \frac{6 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^4 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)} \\ & + \frac{6 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3 ala^2}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^2} - \frac{4 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right) ala^2 \left( \frac{d^3}{dz^3} y(z) \right)}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right) \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^2} \\ & \left. \left. + \frac{8 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3 ala^4}{\left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^3} - \frac{1}{3} ala^3 t \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right) \right. \right. \\ & - \frac{3}{4} \frac{t^2 ala^2 \left( \frac{d^3}{dz^3} y(z) \right) \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^3 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)} \\ & - \frac{3}{4} \frac{t^2 ala^4 \left( \frac{d^3}{dz^3} y(z) \right) \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right) \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^2} \\ & + \frac{3}{4} \frac{t^2 ala^2 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^4 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)} \\ & \left. \left. + \frac{3}{4} \frac{t^2 ala^4 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3}{\left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 \left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^2} + \frac{t^2 ala^6 \left( \frac{d^2}{dz^2} y(z) \right)^3}{\left( ala^2 \left( \frac{d}{dz} y(z) \right)^2 + 1 \right)^3} \right) \right) \end{aligned}$$







## Annex B. Macros de MATLAB

Tot seguit es presenten les diferents macros de MATLAB desenvolupades i utilitzades per la realització del projecte. Cal mencionar que algunes d'aquestes macros estan preparades per treballar tant en perfils en U com en C.

### B.1 Macros per el càlcul del model teòric A.

#### B.1.1 Càlcul inicial

%A = vector columna dels angles doblats. Tantes files com etapes  
%L = vector columna de les L de les etapes  
%ala = valor de la ala del perfil  
%h = espessor.  
%ri = radi intern del perfil  
%re = radi extern del perfil  
%fy = límit elàstic  
%div = nombre de divisions longitudinals  
%nmax = Vector columna de 2 files, la primera fila hi ha el valor de n max  
%de la iteració en l'etapa inicial. A la segona fila hi ha el valor de n  
%max de les altres etapes.

```
function eq=calcul_inicial(A,L,ala,h,ri,re,fy,div,nmax)

[eq(:,1),w]=etapa_inicial(A(1),L(1),ala,h,ri,re,fy,div,nmax(1),0);

s=size(A);

for i=2:s(1)

    [eq(:,i),w1]=etapa_intermedia(A(i),L(i),ala,h,ri,re,fy,div,nmax(2),0,0);

end

end
```

#### B.1.2 Segona fase

%Funció que retorna els diferents paràmetres que minimitzen l'energia de  
%deformació i fan la derivada continua  
%E = matriu amb les dades inicials, te tantes columnes com etapes. La  
%primera fila conte l'angle girat de l'etapa, la segona L, la tercera n,



```

%la quarta f, la cinquena Par1 i la sisena Par2
%ala = valor de l'ala.
%h = gruix
%ri = valor del radi intern
%re = valor del radi extern
%fy = valor del límit elàstic
%div = nombre de divisions longitudinals
%nmax = valor màxim que assoleix n en les iteracions
%nmax_ini = valor màxim que assoleix n en la iteració de la primera etapa
%l1 = valor inicial de L en la iteració de la primera etapa
%l2 = valor final de L en la iteració de la segona etapa

```

Function [E2,derivada,der]=Segona\_fase(E,ala,h,ri,re,fy,div,nmax,nmax\_ini,l1,l2)

```

s=size(E);
for i=1:1:s(2)
    n(i)=E(3,i);
    f(i)=E(4,i);
    par1(i)=E(5,i);
    par2(i)=E(6,i);
end

for j=2:1:s(2)

    y1=angle_doblat(E(1,j-1),E(2,j-1),n(j-1),div,f(j-1),0,par1(j-1),par2(j-1));
    y2=angle_doblat(E(1,j),E(2,j),n(j),div,f(j),0,par1(j),par2(j));

    derivada(j-1)=(y1(2,div)+y2(2,1))/2;
    par2(j-1)=(derivada(j-1)-y1(2,div))/(4*pi/E(2,j-1))+par2(j-1);
    par1(j)=(derivada(j-1)-y2(2,1))/(4*pi/E(2,j))+par1(j);

end

if abs(derivada(1))<1e-6
else

    [eq,w]=bucle_inicial_v3(E(1,1),ala,h,ri,re,fy,div,nmax_ini,derivada(1),l1,l2);
    n(1)=eq(5);
    Long=eq(6);
    par2(1)=eq(7);

end

for i=2:1:s(2)
    if (abs(par1(i))<1e-6) && (abs(par2(i))<1e-6)
    else
        [eq,w]=etapa_intermedia(E(1,i),E(2,i),ala,h,ri,re,fy,div,nmax,par1(i),par2(i));
        n(i)=eq(5);

```





```
E=210000;
ra=0.5*(ri+re);
rn=(ri*re)^0.5;
```

*%jpas és el valor dels increments en la direcció de l'ala del perfil. Per  
%tant serà el valor de la base del rectangle quan es calcula la integral.*

```
jpas=ala/10;
```

*%kpas és el valor dels increments en la direcció del gruix del perfil. Per  
%tant serà el valor de la base del rectangle quan es calcula la integral.*

```
kpas=0.01;
cont=1;
for n=1:0.1:nmax
    n
```

```
    y_ala=angle_doblat(A,L,n,div,0,0,0,par2);
```

```
    wm=0;
    wbl=0;
    wbt=0;
```

```
    for i=2:1:div
```

*%es considera que la longitud es la mateixa i el que varia és el  
%radi en el procés de conformat.*

```
        wbt1=0;
        for k=(ri):kpas:(rn-kpas)
```

```
            if log(ri/ra)<=-0.2
                ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
                if abs(ebt)<=fy/E
                    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
                elseif abs(ebt)>fy/E
                    wbt1=wbt1+abs(ebt*(-fy*(1+log(k/ri))))*kpas;
                end
```

```
            elseif log(ri/ra)>=-0.2
```

*%el factor 0.8 correspon al fet que no tota la zona es  
%troba sempre a la deformació màxima, és a dir, hi ha una  
%zona de transició entre 0 i la ebt*

```
                ebt=0.8*log(k/ra);
                if abs(ebt)<=fy/E
                    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
                elseif abs(ebt)>fy/E
                    wbt1=wbt1+abs(ebt*(-fy*(1+log(k/ri))))*kpas;
                end
```



```
end
end

for k=(rn+kpas):kpas:(ra-kpas)

if log((ri)/ra)<=-0.2
  ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
  if abs(ebt)<=fy/E
    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
  elseif abs(ebt)>fy/E
    wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
  end

elseif log((ri)/ra)>=-0.2
  ebt=0.8*log(k/ra);
  if abs(ebt)<=fy/E
    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
  elseif abs(ebt)>fy/E
    wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
  end

end

end

end

for k=(ra+kpas):kpas:(re)

if log((ri)/ra)<=-0.2
  ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
  if abs(ebt)<=fy/E
    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
  elseif abs(ebt)>fy/E
    wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
  end

elseif log((ri)/ra)>=-0.2
  ebt=0.8*log(k/ra);
  if abs(ebt)<=fy/E
    wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
  elseif abs(ebt)>fy/E
    wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
  end

end

end

end

wbt=wbt+wbt1*ra*y_ala(1,i)*tau(2);
```



```

wm1=0;
for j=jpas:jpas:ala

    em=1/2*j^2*y_ala(2,i)^2;
    if em<fy/E
        wm1=E*em*em*jpas+wm1;
    elseif em>=fy/E
        wm1=fy*em*jpas+wm1;
    end
end
wm=wm+wm1*tau(2);

wbl2=0;
for j=jpas:jpas:ala

    wbl1=0;
    for k=kpas:kpas:(h/2)
        ebl=j*k*(y_ala(2,i)^4+y_ala(3,i)^2+j^2*y_ala(2,i)^6)^0.5/(j^2*y_ala(2,i)^2+1)^1.5;
        if ebl<fy/E
            wbl1=E*ebl*ebl*kpas+wbl1;
        elseif ebl>=fy/E
            wbl1=fy*ebl*kpas+wbl1;
        end
    end
    wbl2=wbl2+wbl1*jpas;
end
wbl=wbl+wbl2*tau(2);
end

wt=wbl+wbt+wm
wtotal(cont)=wt;
cont=cont+1;
if wt<wtmax
    wtmax=wt;
    wbtmax=wbt;
    wmmax=wm;
    wblmax=wbl;
    exp=n;
    factor=0;
elseif wt>=wtmax
end
end

eq=[wtmax;wbtmax;wmmax;wblmax;exp;factor];
end

```





```

wbt=0;

for i=2:1:div
    wbt1=0;
    for k=ri:kpas:(rn-kpas)

        if log(ri/ra)<=-0.2
            ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
            wbt1=wbt1+abs(ebt*(-fy*(1+log(k/ri))))*kpas;

        elseif log(ri/ra)>=-0.2

            %el factor 0.8 correspon al fet que no tota la zona es
            %troba sempre a la deformació màxima, és a dir, hi ha una
            %zona de transició entre 0 i la ebt

            ebt=0.8*log(k/ra);
            wbt1=wbt1+ebt*(-fy*(1+log(k/ri)))*kpas;
        end
    end

    for k=(rn+kpas):kpas:(ra-kpas)

        if log(ri/ra)<=-0.2
            ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
            wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;

        elseif log(ri/ra)>=-0.2
            ebt=0.8*log(k/ra);
            wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
        end
    end

end

for k=(ra+kpas):kpas:re

    if log(ri/ra)<=-0.2
        ebt=0.2*(k-ra)/(h/2);
        wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;

    elseif log(ri/ra)>=-0.2
        ebt=0.8*log(k/ra);
        wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
    end

end

wbt=wbt+wbt1*ra*y_ala(1,i)*tau(2);

wm1=0;

```





```
for j=jpas:jpas:ala

    em=1/2*j^2*y_ala(2,i)^2;
    if em<fy/E
        wm1=E*em*em*jpas+wm1;
    elseif em>=fy/E
        wm1=fy*em*jpas+wm1;
    end
end
wm=wm+wm1*tau(2);

wbl2=0;
for j=jpas:jpas:ala

    wbl1=0;
    for k=kpas:kpas:(h/2)
        ebl=j*k*(y_ala(2,i)^4+y_ala(3,i)^2+j^2*y_ala(2,i)^6)^0.5/(j^2*y_ala(2,i)^2+1)^1.5;
        if ebl<fy/E
            wbl1=E*ebl*ebl*kpas+wbl1;
        elseif ebl>=fy/E
            wbl1=fy*ebl*kpas+wbl1;
        end
    end
    wbl2=wbl2+wbl1*jpas;
end
wbl=wbl+wbl2*tau(2);
end

wt=wbl+wbt+wm
wtotal(contf,contn)=wt;

contn=contn+1;

if wt<wtmax
    wtmax=wt;
    wbtmax=wbt;
    wmmax=wm;
    wblmax=wbl;
    exp=n;
    factor=f;
elseif wt>=wtmax
end
end
contf=contf+1;
end
eq=[wtmax;wbtmax;wmmax;wblmax;exp;factor];
end
```





```
wm=0;
wbl=0;
wbt=0;

for i=2:1:div

    wbt1=0;
    for k=(ri):kpas:(rn-kpas)

        if log(ri/ra)<=-0.2
            ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
            if abs(ebt)<=fy/E
                wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
            elseif abs(ebt)>fy/E
                wbt1=wbt1+abs(ebt*(-fy*(1+log(k/ri))))*kpas;
            end

        elseif log(ri/ra)>=-0.2

            %el factor 0.8 correspon al fet que no tota la zona es
            %troba sempre a la deformació màxima, és a dir, hi ha una
            %zona de transició entre 0 i la ebt

            ebt=0.8*log(k/ra);
            if abs(ebt)<=fy/E
                wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
            elseif abs(ebt)>fy/E
                wbt1=wbt1+abs(ebt*(-fy*(1+log(k/ri))))*kpas;
            end

        end
    end

    for k=(rn+kpas):kpas:(ra-kpas)

        if log((ri)/ra)<=-0.2
            ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
            if abs(ebt)<=fy/E
                wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
            elseif abs(ebt)>fy/E
                wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
            end

        elseif log((ri)/ra)>=-0.2
            ebt=0.8*log(k/ra);
            if abs(ebt)<=fy/E
                wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
            elseif abs(ebt)>fy/E
                wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
            end
        end
    end
end
```



```

        end

    end
end

for k=(ra+kpas):kpas:(re)

    if log((ri)/ra)<=-0.2
        ebt=-0.2*(k-ra)/(h/2);
        if abs(ebt)<=fy/E
            wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
        elseif abs(ebt)>fy/E
            wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
        end

    elseif log((ri)/ra)>=-0.2
        ebt=0.8*log(k/ra);
        if abs(ebt)<=fy/E
            wbt1=wbt1+ebt*ebt*E*kpas;
        elseif abs(ebt)>fy/E
            wbt1=wbt1+abs(ebt*(fy*(1-log(re/k))))*kpas;
        end

    end

end

end

wbt=wbt+wbt1*ra*abs(y_ala(1,i))*tau(2);

wm1=0;
for j=jpas:jpas:ala

    em=1/2*j^2*y_ala(2,i)^2;
    if em<fy/E
        wm1=E*em*em*jpas+wm1;
    elseif em>=fy/E
        wm1=fy*em*jpas+wm1;
    end
end
wm=wm+wm1*tau(2);

wbl2=0;
for j=jpas:jpas:ala

    wbl1=0;
    for k=kpas:kpas:(h/2)
        ebl=j*k*(y_ala(2,i)^4+y_ala(3,i)^2+j^2*y_ala(2,i)^6)^0.5/(j^2*y_ala(2,i)^2+1)^1.5;
        if ebl<fy/E
            wbl1=E*ebl*ebl*kpas+wbl1;
        elseif ebl>=fy/E

```



```
        wbl1=fy*ebi*kpas+wbl1;
    end
    end
    wbl2=wbl2+wbl1*jpas;
    end
    wbl=wbl+wbl2*tau(2);
end

wt=wbl+wbt+wm
wtotal(contl,contn)=wt;
contn=contn+1;
if wt<wtmax
    wtmax=wt;
    wbtmax=wbt;
    wmmax=wm;
    wblmax=wbl;
    exp=n;
    Long=L;
    par=par2;
elseif wt>=wtmax
end
end
contl=contl+1;
end

eq=[wtmax;wbtmax;wmmax;wblmax;exp;Long;par];
end
```

### B.1.6 Angle doblat

```
%Funció que retorna la funció angle girat amb forma combinada sinusoidal %i recta i amb
els termes 1 i 2 addicionals
%At = Angle girat a l'etapa
%L = Longitud entre les etapes
%n = coeficient n de la fórmula
%div = número de columnes que tindrà y
%f = factor de combinació entre forma sinusoidal i recta
%yinicial = angle inicial
%par1 = paràmetre corrector en z=0
%par2 = paràmetre corrector en z=L
```

```
function y=angle_doblat(At,L,n,div,f,yinicial,par1,par2)
tau=linspace(0.00000000000001,L,div);
m=At/L*f;
A=(1-f)*At;
for i=1:div
```



```

y(:,i)=[.5*A*sin(pi*(tau(i)/L)^n-
(1/2)*pi)+.5*A+m*tau(i)+yinicial+(sin(2*pi*tau(i)/L)+2*sin(pi*tau(i)/L))*par1+(sin(2*pi*(tau(i)-
L)/L)+2*sin(pi*(tau(i)-L)/L))*par2;.5*A*cos(pi*(tau(i)/L)^n-
(1/2)*pi)*pi*(tau(i)/L)^n*(n/tau(i))+m+(2*cos(2*pi*tau(i)/L)*pi/L+2*cos(pi*tau(i)/L)*pi/L)*par1
+(2*cos(2*pi*(tau(i)-L)/L)*pi/L+2*cos(pi*(tau(i)-L)/L)*pi/L)*par2;-.5*A*sin(pi*(tau(i)/L)^n-
(1/2)*pi)*pi^2*((tau(i)/L)^n)^2*n^2/tau(i)^2+.5*A*cos(pi*(tau(i)/L)^n-
(1/2)*pi)*pi*(tau(i)/L)^n*n^2/tau(i)^2-.5*A*cos(pi*(tau(i)/L)^n-
(1/2)*pi)*pi*(tau(i)/L)^n*n/tau(i)^2+(-8*cos(2*pi*tau(i)/L)*pi^3/L^3-
2*cos(pi*tau(i)/L)*pi^3/L^3)*par1+(-4*sin(2*pi*(tau(i)-L)/L)*pi^2/L^2-2*sin(pi*(tau(i)-
L)/L)*pi^2/L^2)*par2];
end
end

```

## B.2 Macros per la representació gràfica

### B.2.1 Conformat

```

%funció que genera un gràfic amb la geometria del conformat d'un perfil
%y_ala = funció angle girat per l'ala del perfil
%y_llavi = funció angle girat pel llavi del perfil
%ala = valor de l'ala del perfil
%llavi = valor del llavi del perfil
%tau = vector de coordenades z
%w = dimensió de mitja ànima del perfil
%inc_ala = increments en que es realitzaran les gràfiques de les fibres en l'ala
%inc_w = increments en que es realitzaran les gràfiques de les fibres en
%l'ànima
%inc_llavi = increments en que es realitzaran les gràfiques de les fibres
%en el llavi
%div = nombre de divisions de tau

```

```
function conformat(y_ala,y_llavi,ala,llavi,tau,w,inc_ala,inc_w,inc_llavi,div)
```

```

for j=ala:inc_llavi:llavi
    [l,l1,l2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);
    l2(:,1)=-2*w-l(:,1);
    plot3(l2(:,1),l(:,3),l(:,2));
    hold on;

    plot3(l(:,1),l(:,3),l(:,2));
    hold on;
end

for j=0:inc_ala:ala
    [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);

```



```
l2(:,1)=-2*w-s(:,1);
plot3(l2(:,1),s(:,3),s(:,2));
hold on;
plot3(s(:,1),s(:,3),s(:,2));
hold on;
end

for j=-w:inc_w:(0-inc_w)
    for i=1:div
        b(i,1)=j;
        l2(i,1)=-w+j;
        b(i,2)=0;
        b(i,3)=tau(i);
    end

    plot3(l2(:,1),b(:,3),b(:,2));
    hold on;
    plot3(b(:,1),b(:,3),b(:,2));
    hold on;
end

grid on;
axis equal;

end
```

## B.2.2 Trajectòria

```
%Funció que retorna la trajectòria que segueix una fibra del perfil
%s = trajectòria
%s1 = derivada de la trajectòria
%s2 = segona derivada de la trajectòria
%y_ala = funció angle girat ala
%y_llavi=funció angle girat del llavi respecte de l'ala
%ala = longitud de l'ala
%pos=posició on volem calcular la trajectòria
%tau = vector fila coordenada z del perfil
%div = numero de divisions longitudinals

function [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,pos,tau,div)

x=pos-ala;

if pos<=ala

    for i=1:div
        s(i,1)=(pos*cos(y_ala(1,i)));
        s(i,2)=(pos*sin(y_ala(1,i)));
```



```

s(i,3)=tau(i);
s1(i,1)=(-pos*sin(y_ala(1,i))*y_ala(2,i));
s1(i,2)=(pos*cos(y_ala(1,i))*y_ala(2,i));
s1(i,3)=1;
s2(i,1)=(-pos*(cos(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)^2+sin(y_ala(1,i))*y_ala(3,i)));
s2(i,2)=pos*(-sin(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)^2+cos(y_ala(1,i))*y_ala(3,i));
s2(i,3)=0;
end

elseif pos>ala

for i=1:div
s(i,1)=ala*cos(y_ala(1,i))+x*cos(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i));
s(i,2)=ala*sin(y_ala(1,i))+x*sin(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i));
s(i,3)=tau(i);
s1(i,1)=-ala*sin(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)-
x*sin(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(2,i)+y_llavi(2,i));

s1(i,2)=ala*cos(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)+x*cos(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(2,i)+y_llavi(2,i));
s1(i,3)=1;
s2(i,1)=-ala*(cos(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)^2+sin(y_ala(1,i))*y_ala(3,i))-
x*(cos(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(2,i)+y_llavi(2,i))^2+sin(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(3,i)+
y_llavi(3,i)));
s2(i,2)=ala*(-sin(y_ala(1,i))*y_ala(2,i)^2+cos(y_ala(1,i))*y_ala(3,i))+x*(-
sin(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(2,i)+y_llavi(2,i))^2+cos(y_ala(1,i)+y_llavi(1,i))*(y_ala(3,i)+
y_llavi(3,i)));
s2(i,3)=0;
end

end

```

## B.3 Macros per el càlcul de deformacions

### B.3.1 Membrana

```

% Funció que retorna la component de membrana
% y_ala = funció angle doblat per l'ala del perfil
% y_llavi = funció angle doblat pel llavi del perfil
% ala = longitud de l'ala
% pos = posició on es vol calcular la deformació de membrana
% div = nombre de divisions longitudinals

```

```
function memb=membrana(y_ala,y_llavi,ala,pos,div)
```

```
x=pos-ala;
```





```
if pos<=ala
    for i=1:div
        memb(1,i)=(0.5*pos^2*y_ala(2,i)^2)*100;
    end

elseif pos>ala
    for i=1:div
        memb(1,i)=(0.5*ala^2*y_ala(2,i)^2+0.5*x^2*(y_ala(2,i)+y_llavi(2,i))^2)*100;
    end
end

end
```

### B.3.2 Bending2

%funció que retorna la deformació de doblat longitudinal all llarg de tot el perfil en una posició determinada

%y\_ala = Funció angle girat per l'ala del perfil  
%y\_llavi = Funció angle girat pel llavi del perfil  
%ala = valor de l'ala del perfil  
%pos = valor de la coordenada X original on es vol calcular la deformació  
%de bending  
%h = Gruix on es vol calcular la deformació  
%tau = vector de coordenades longitudinals  
%div = nombre de posicions de tau

```
function bend=bending2(y_ala,y_llavi,ala,pos,h,tau,div)
```

```
if pos<=ala
```

```
    [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,pos,tau,div);
```

```
    for i=1:div
```

```
        v=cross(s1(i,:),s2(i,:));
```

```
        a=norm(s1(i,:),2);
```

```
        bend(i)=-h*norm(v,2)/(a^3)*100*y_ala(3,i)/(abs(y_ala(3,i)));
```

```
    end
```

```
elseif pos>ala
```

```
    [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,pos,tau,div);
```

```
    for i=1:div
```

```
        v=cross(s1(i,:),s2(i,:));
```



```

a=norm(s1(i,:),2);

bend(i)=-h*norm(v,2)/(a^3)*100*(y_ala(3,i))/(abs(y_ala(3,i)));
end

end

```

## B.4 Macro per realitzar una animació del procés de conformat

### B.4.1 Animacio2

%Funció que retorna la animació del conformat d'un perfil amb l'evolució de  
%l'angle en funció de y\_ala i y\_llavi.

```

%y_ala = funció angle girat per l'ala del perfil
%y_llavi = funció angle girat pel llavi del perfil
%ala =dimensió ala del perfil
%llavi = dimensió del llavi del perfil
%tau = vector de coordenada longitudinal
%w = dimensió de la meitat de l'ànima del perfil
%inc_ala = separació de les fibres a representar en l'ala
%inc_llavi = separació de les fibres a representar en el llavi
%inc_w = separació de les fibres a representar en l'ànima
%div = número de divisions columnes de tau

```

```
function F=animacio2(y_ala,y_llavi,ala,llavi,tau,w,inc_ala,inc_llavi,inc_w,div)
```

```
for k=1:div
```

```

for j=ala:inc_llavi:llavi
[s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);
for i=1:(div-k+1)
c1(i,1)=j;
c1(i,2)=0;
c1(i,3)=tau(i);
end
pos=1;
for l=(div-k+1):div
c1(l,1)=s(pos,1);
c1(l,2)=s(pos,2);
c1(l,3)=s(pos,3)+tau(i);
pos=pos+1;
end
end

```



```
l2(:,1)=-2*w-c1(:,1);
plot3(l2(:,1),c1(:,3),c1(:,2));
hold on;
plot3(c1(:,1),c1(:,3),c1(:,2));
hold on;

end

for j=0:inc_ala:ala
[s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);
for i=1:(div-k+1)
a1(i,1)=j;
a1(i,2)=0;
a1(i,3)=tau(i);
end
pos=1;
for l=(div-k+1):div
a1(l,1)=s(pos,1);
a1(l,2)=s(pos,2);
a1(l,3)=s(pos,3)+tau(i);
pos=pos+1;
end

l2(:,1)=-2*w-a1(:,1);
plot3(l2(:,1),a1(:,3),a1(:,2));
hold on;
plot3(a1(:,1),a1(:,3),a1(:,2));
hold on;
plot3(a1(:,1),a1(:,3),a1(:,2));
hold on;
end

for j=-w:inc_w:(0-inc_w)
for i=1:div
b(i,1)=j;
l2(i,1)=-w+j;
b(i,2)=0;
b(i,3)=tau(i);
end

plot3(l2(:,1),b(:,3),b(:,2));
hold on;
plot3(b(:,1),b(:,3),b(:,2));
hold on;
end

view(40,22);
grid on;
xlim([-2*w-llavi,llavi]);
ylim([0,tau(div)]);
zlim([0,llavi]);
daspect([1 1 1]);
```



```
F(k)=getframe(gcf);
hold off;
end

%segona part del conformat

for k=1:(div-1)

    for j=ala:inc_llavi:llavi

        [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);

        for i=1:(div-k)

            c1(i,1)=s(i+k,1);
            c1(i,2)=s(i+k,2);
            c1(i,3)=s(i,3);

            end

            for i=(div-k):div

                c1(i,1)=s(div,1);
                c1(i,2)=s(div,2);
                c1(i,3)=s(i,3);
            end

            l2(:,1)=-2*w-c1(:,1);
            plot3(l2(:,1),c1(:,3),c1(:,2));
            hold on;
            plot3(c1(:,1),c1(:,3),c1(:,2));
            hold on;

        end

    for j=0:inc_ala:ala

        [s,s1,s2]=trajectoria(y_ala,y_llavi,ala,j,tau,div);

        for i=1:(div-k)

            a1(i,1)=s(i+k,1);
            a1(i,2)=s(i+k,2);
            a1(i,3)=s(i,3);

            end

        end

    end
```



```
for i=(div-k):div

    a1(i,1)=s(div,1);
    a1(i,2)=s(div,2);
    a1(i,3)=s(i,3);
end

l2(:,1)=-2*w-a1(:,1);
plot3(l2(:,1),a1(:,3),a1(:,2));
hold on;
plot3(a1(:,1),a1(:,3),a1(:,2));
hold on;

end

for j=-w:inc_w:(0-inc_w)
    for n=1:div
        b(n,1)=j;
        l2(n,1)=-w+j;
        b(n,2)=0;
        b(n,3)=tau(n);
    end

    plot3(l2(:,1),b(:,3),b(:,2));
    hold on;
    plot3(b(:,1),b(:,3),b(:,2));
    hold on;

end

view(40,22);
grid on;
xlim([-2*w-llavi,llavi]);
ylim([0,tau(div)]);
zlim([0,llavi]);
daspect([1 1 1]);

F(k+div)=getframe(gcf);
hold off;

end

end
```





## Annex C. Simulacions COPRA

Tot seguit es presentaran les imatges de les diferents línies de conformat i dels resultats de l'anàlisi per elements finits de les diferents tensions en una secció intermèdia del perfil.

### C.1 Perfil experiment de DAMM

#### C.1.1 Línia de processat

Línia de fabricació amb tres etapes separades entre elles 400 mm. En cada etapa es doble 30° l'ala del perfil. El dissenys dels rodets de cada estació es poden veure a la figura C.1 i C.2.

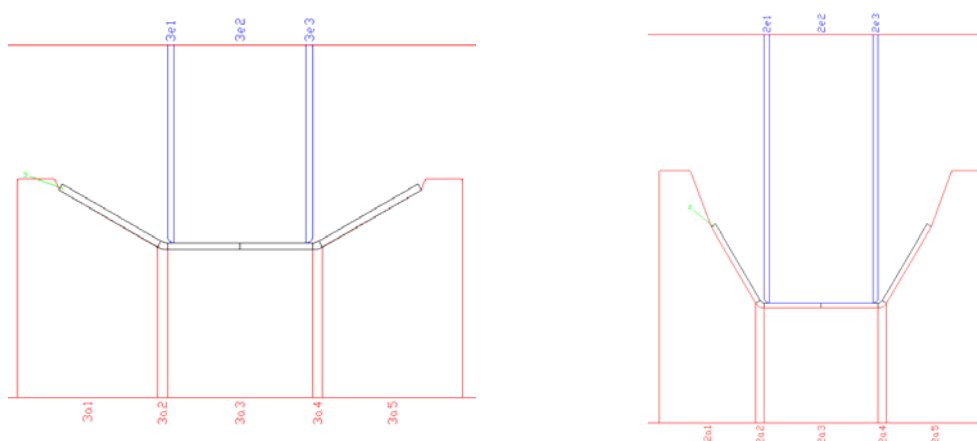


Fig. C.1. Rodets etapa 1 (esquerra) i de la etapa 2 (dreta)



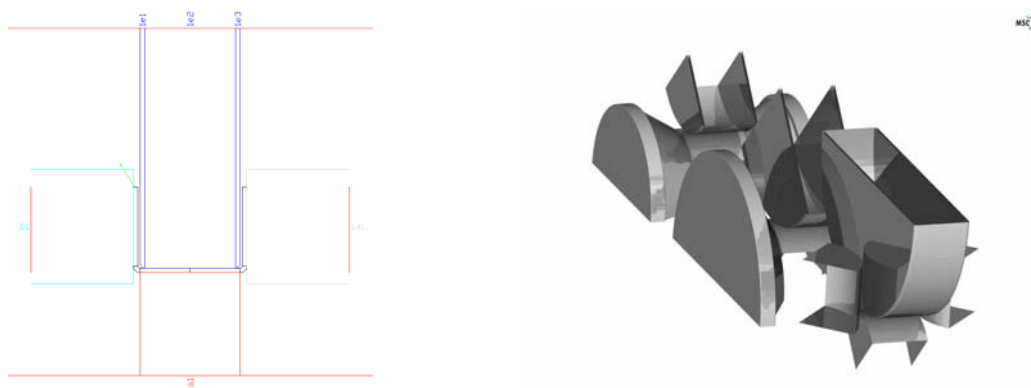


Fig. C.2. Rodets etapa 3 (esquerra) i línia de conformat (dreta)

### C.1.2 Resultats simulació

Tot seguit es presenten les tensions normals residuals en una secció al mig del perfil, així com la tensió equivalent de Von Mises, la deformació plàstica equivalent i la distribució de deformació transversal (fig. C.3 – C.8)

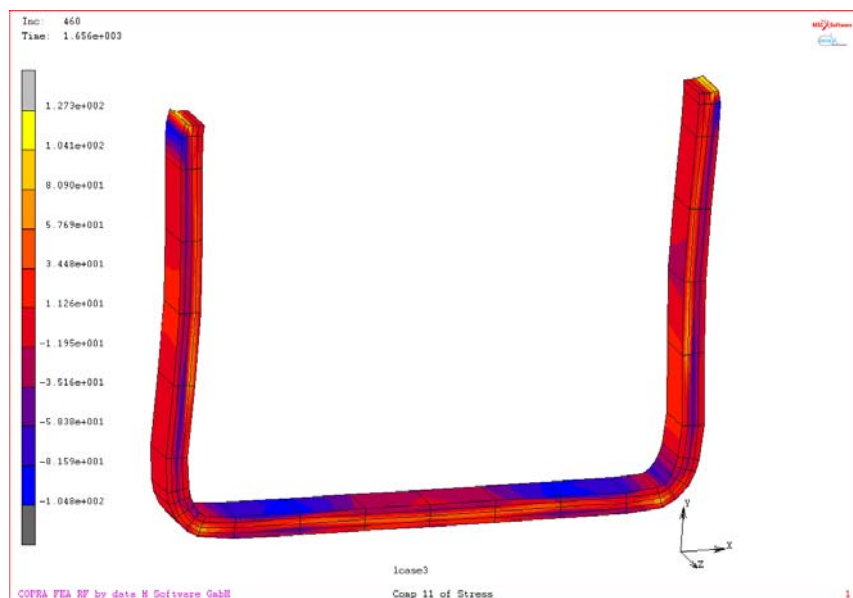


Fig. C.3. Sx





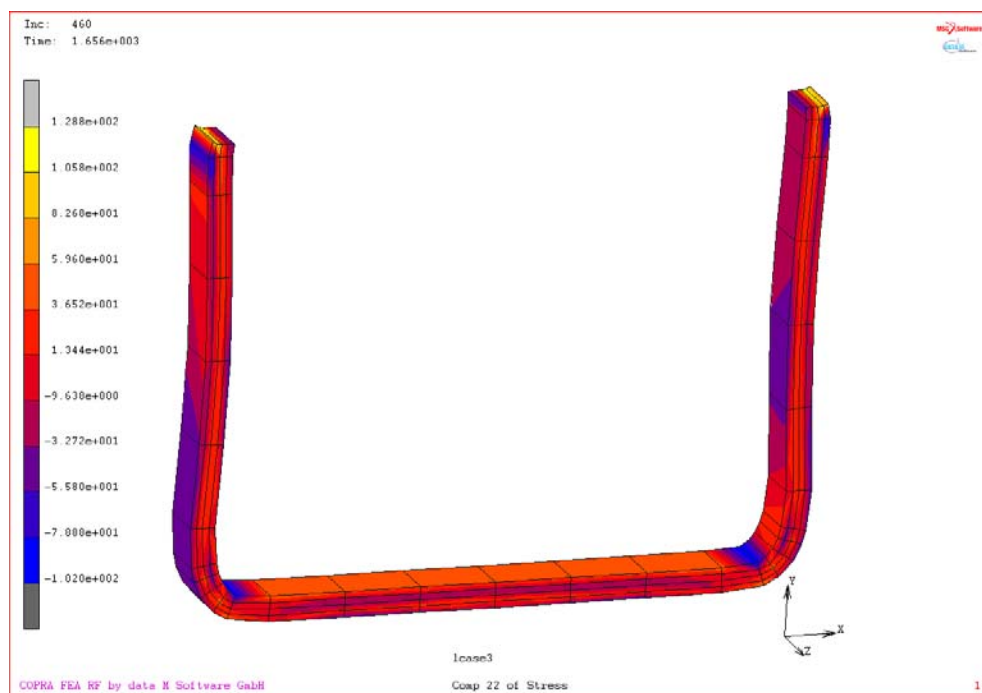


Fig. C.4.  $S_y$

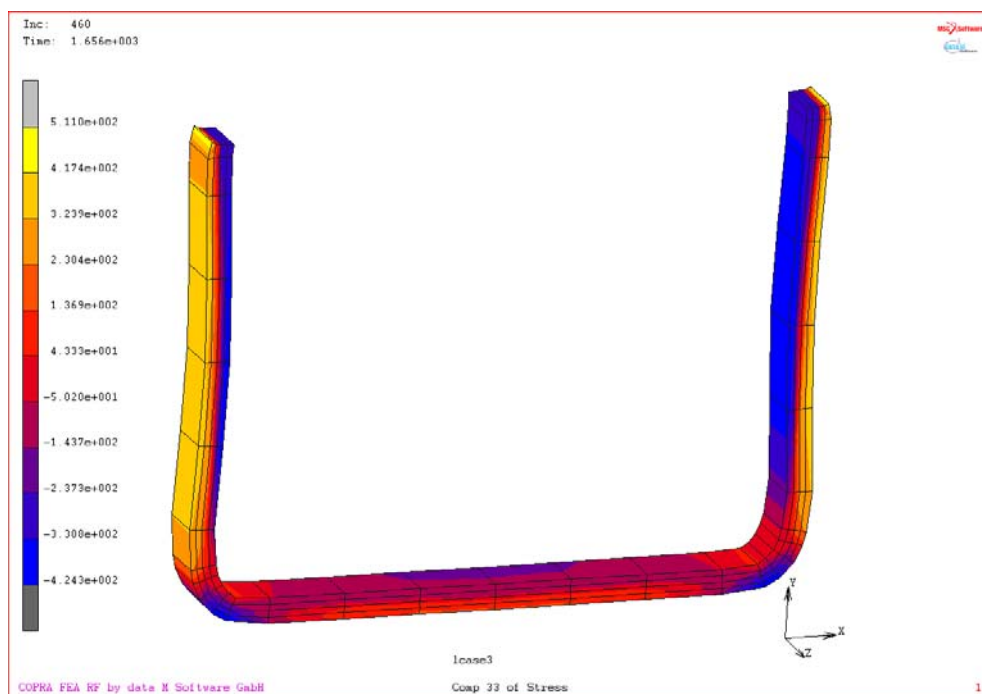


Fig. C.5.  $S_z$



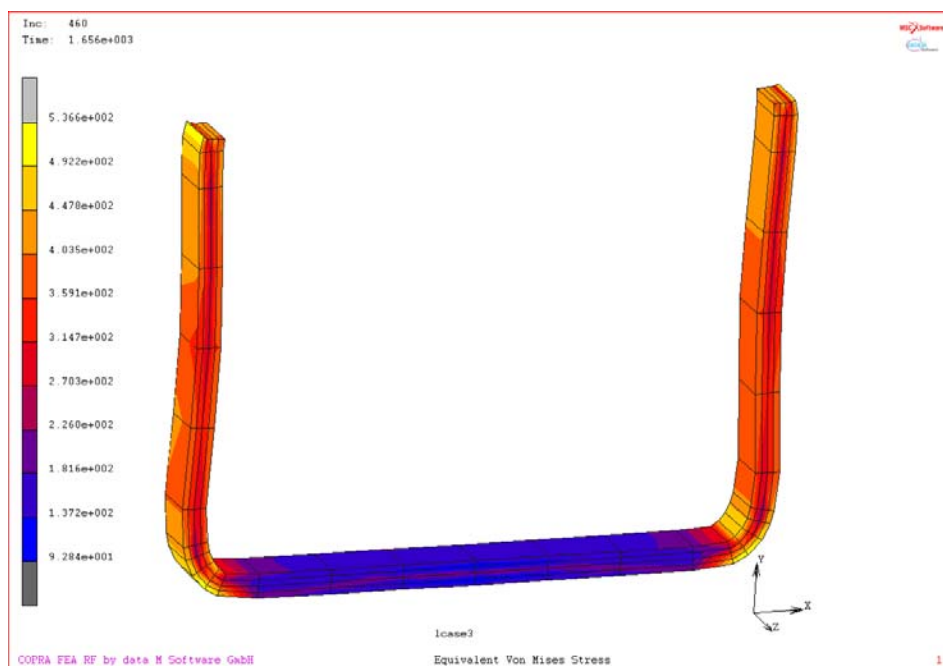


Fig. C.6. Tensió equivalent de Von Mises

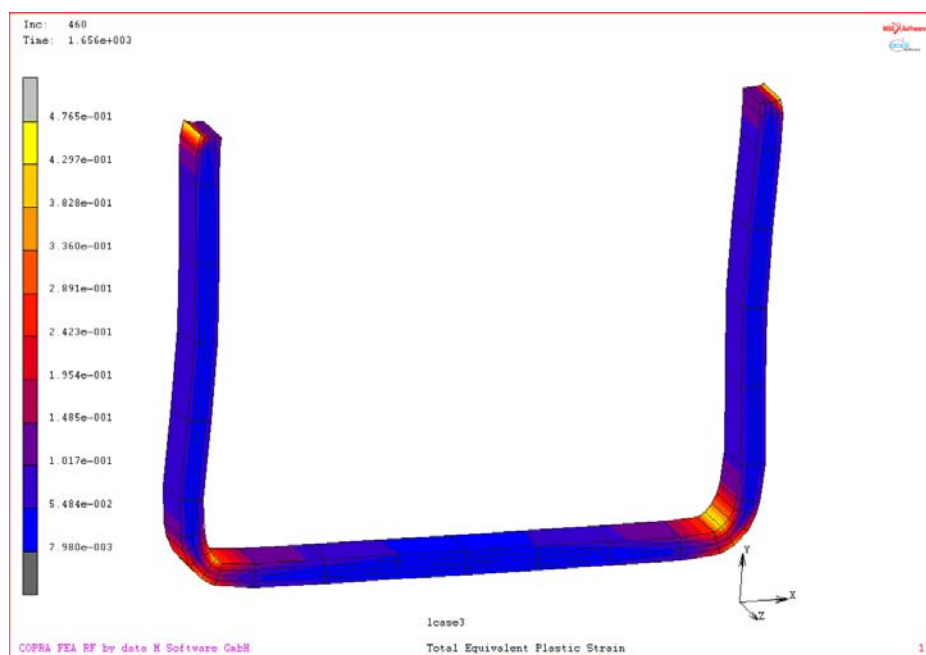


Fig. C.7. Deformació plàstica equivalent



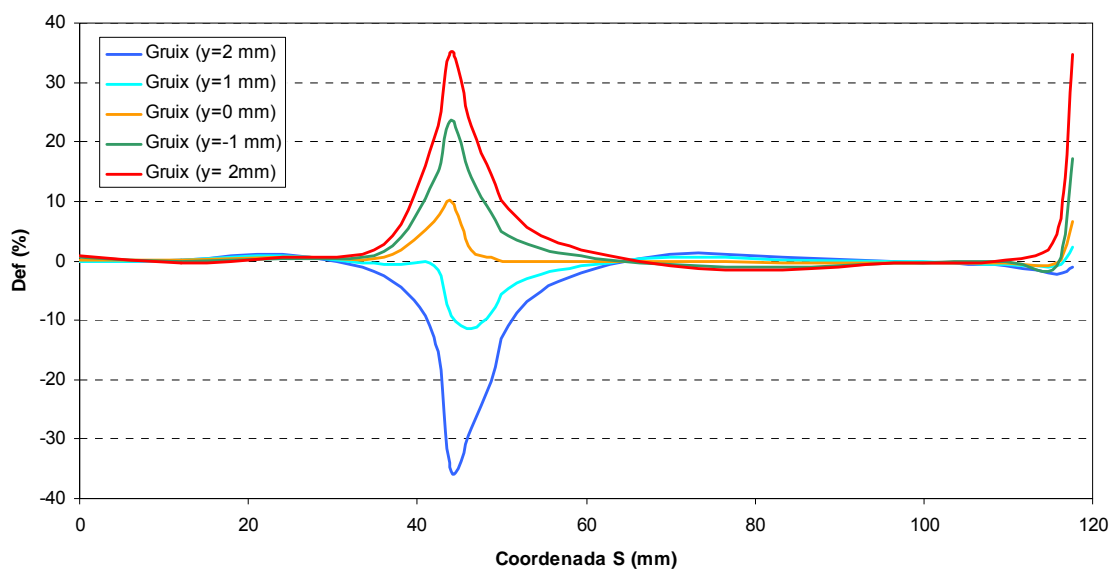


Fig. C.8. Distribució de la deformació transversal

En aquest resultat es pot veure que l'extrem presenta un pic molt elevat de deformació, aquest fet pot ser causat per l'ondulació de l'ala existent a causa de un disseny no òptim del procés de conformat.



## C.2 Perfil experiment de Bhattacharyya

### C.2.1 Línia de processat

Línia de fabricació amb dos etapes separades entre elles 146 mm. En cada etapa es doble 40° l'ala del perfil. El dissenys dels rodets de cada estació es poden veure a la figura C.9 i C.10.

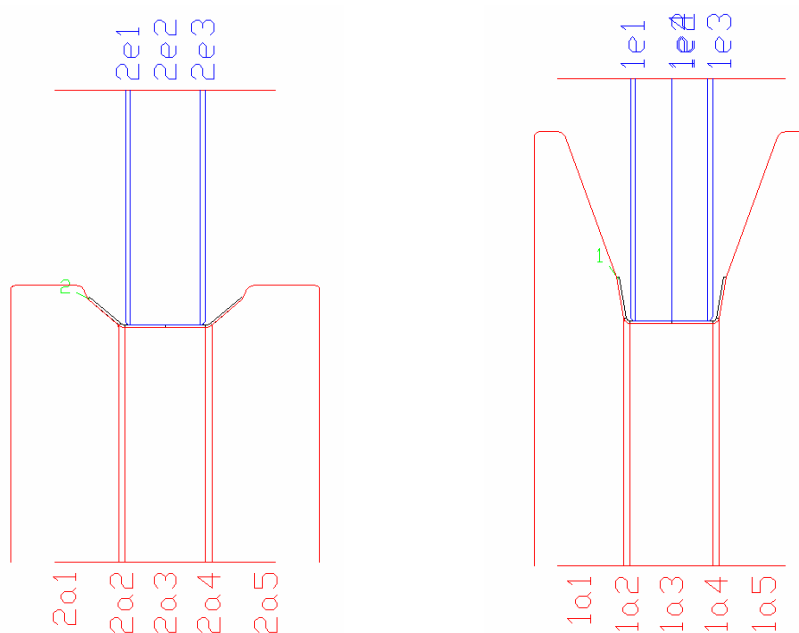


Fig. C.9. Rodets etapa 1 (esquerra) i etapa 2 (dreta)

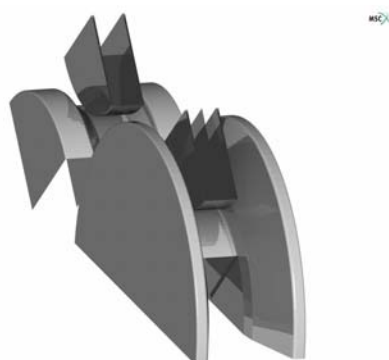


Fig. C.10. Línia de conformat



## C.2.2 Resultats de la simulació

A continuació es mostren les tensions normals residuals en una secció al mig del perfil, així com la tensió equivalent de Von Mises, la deformació plàstica equivalent i la distribució de la deformació transversal residual (fig. C.11 – C.16).

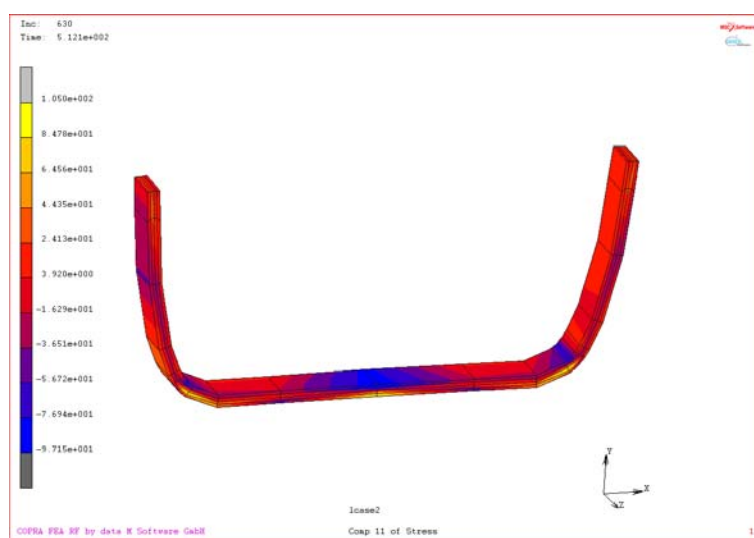


Fig. C.11.  $S_x$

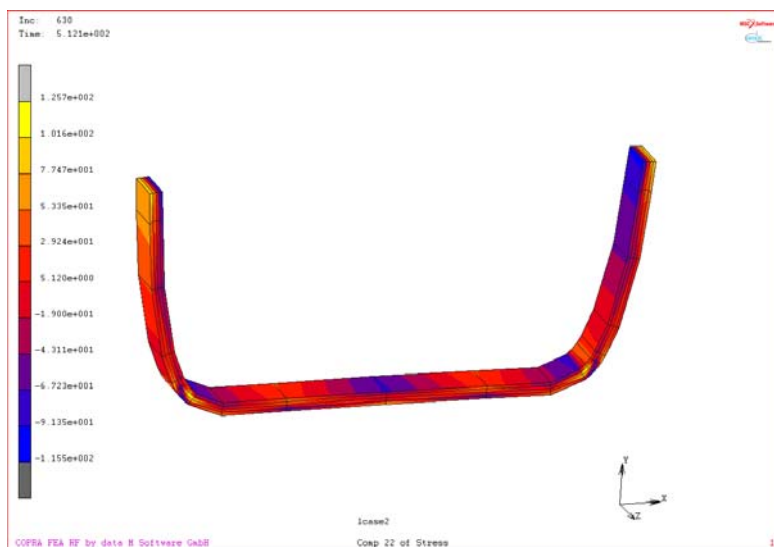


Fig. C.12.  $S_y$



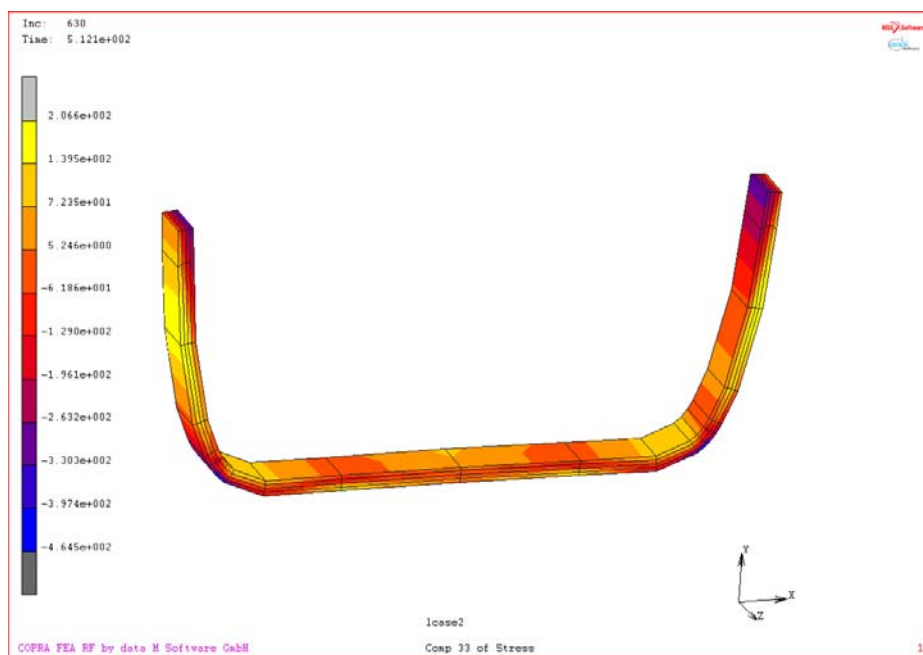


Fig. C.13. Sz

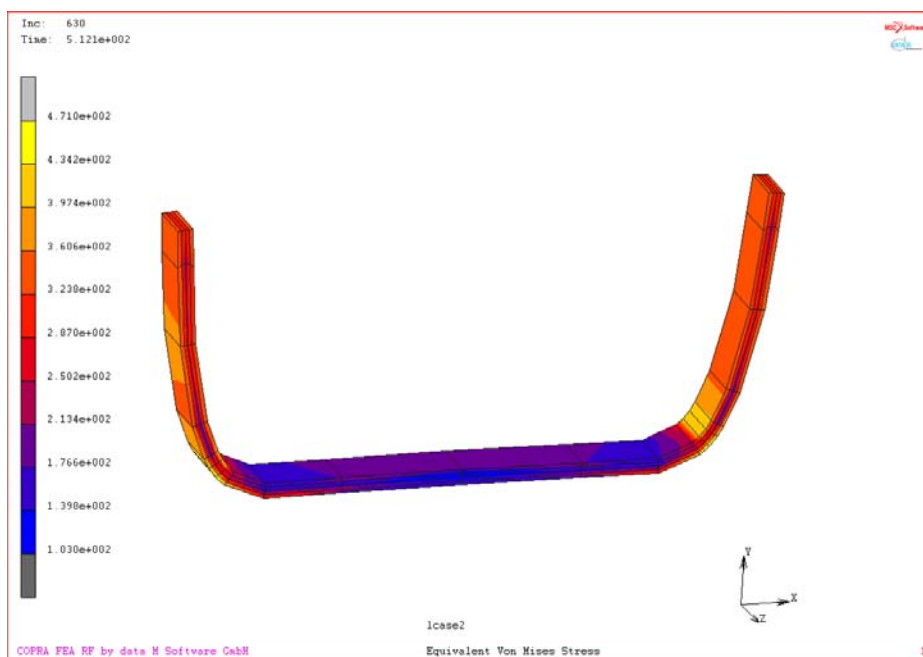


Fig. C.14. Tensió equivalent de Von Mises



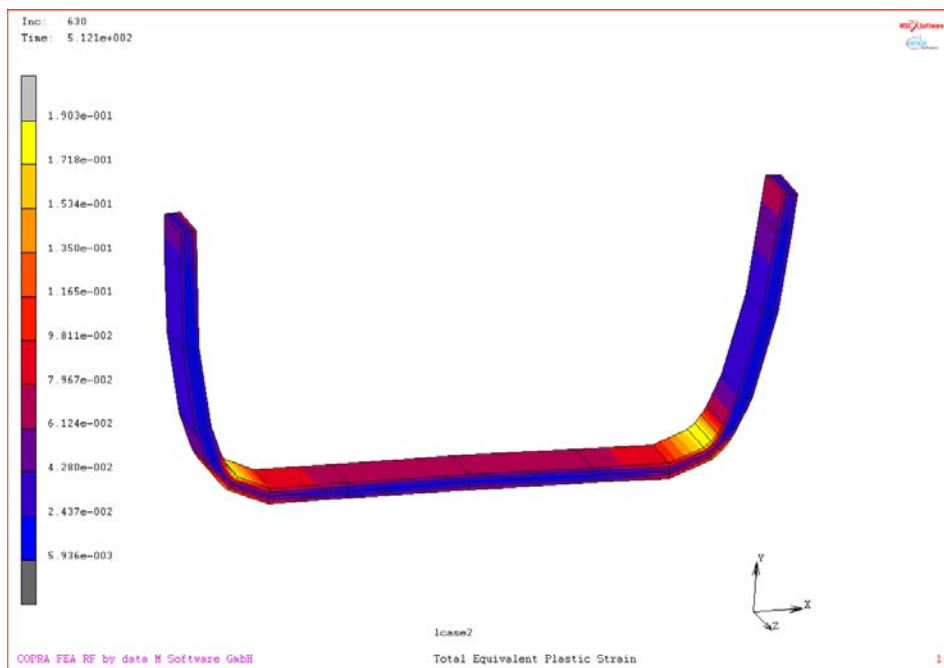


Fig. C.15. Deformació plàstica equivalent

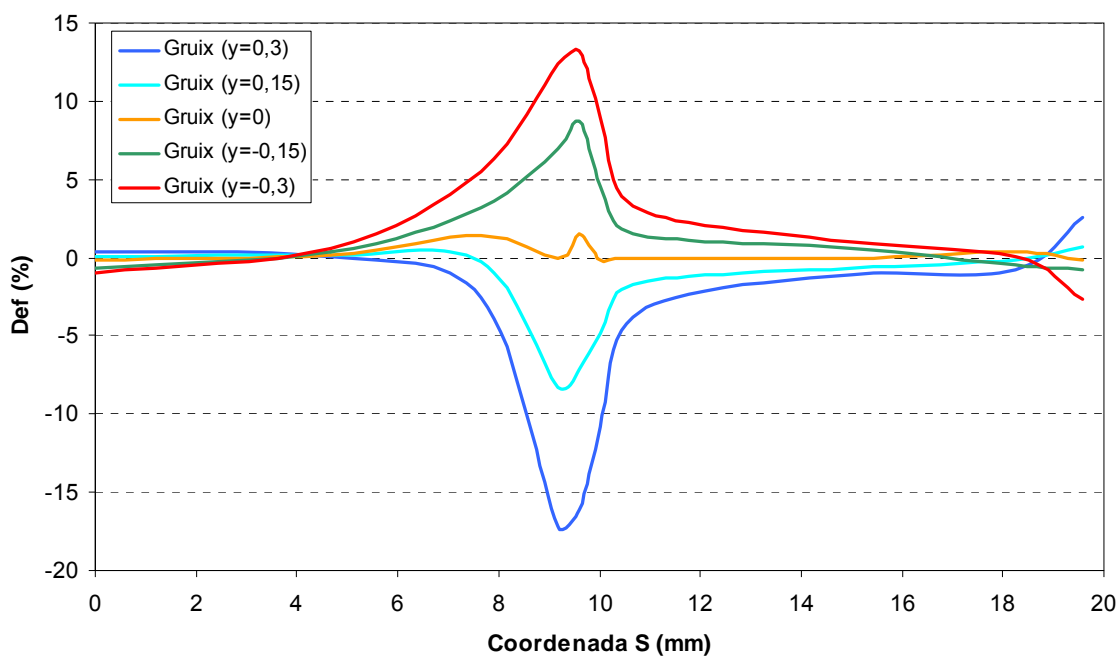


Fig. C.16. Distribució de la deformació transversal residual



## C.3 Perfil en U

### C.3.1 Línia de conformat

Els detalls de cada una de les diferents etapes es poden consultar a la memòria, en l'apartat corresponen. A continuació es mostren la geometria dels diferents rodets (fig C.17 – C.21).

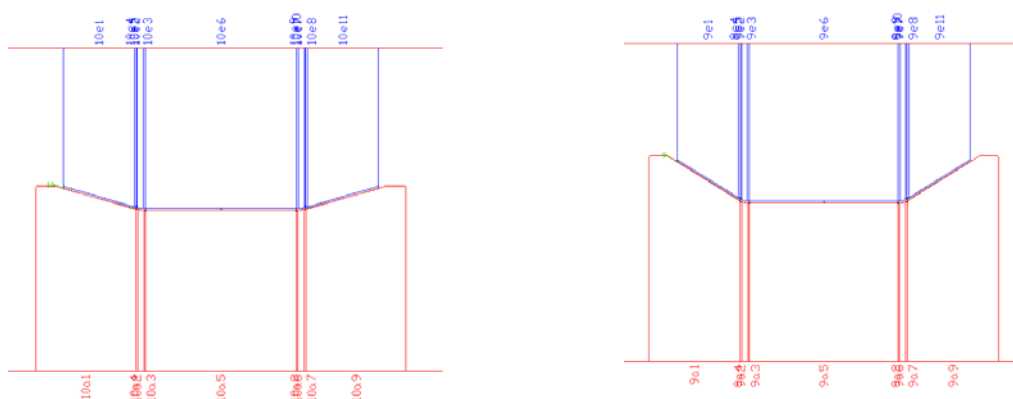


Fig. C.17. Rodets etapa 1 (esquerra) i etapa 2 (dreta)

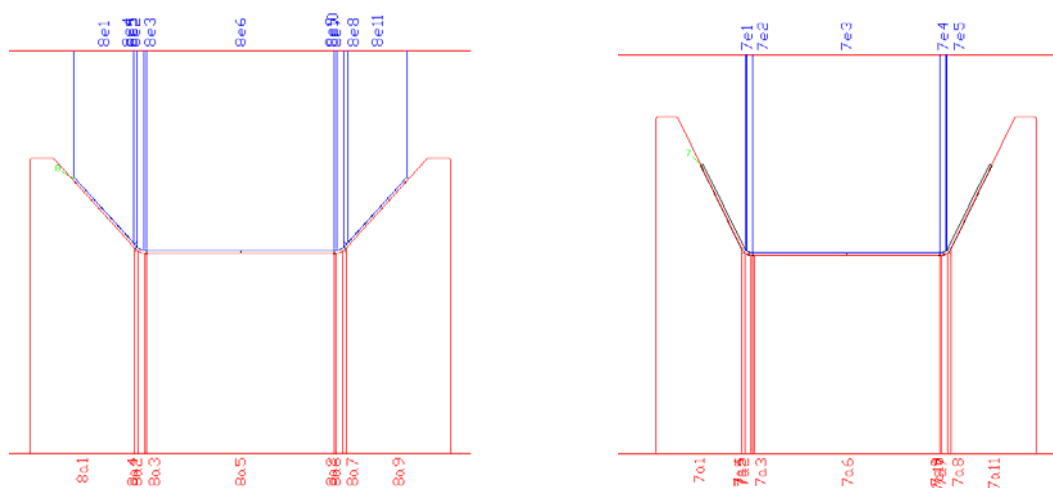


Fig. C.18. Rodets etapa 3 (esquerra) i etapa 4 (dreta)





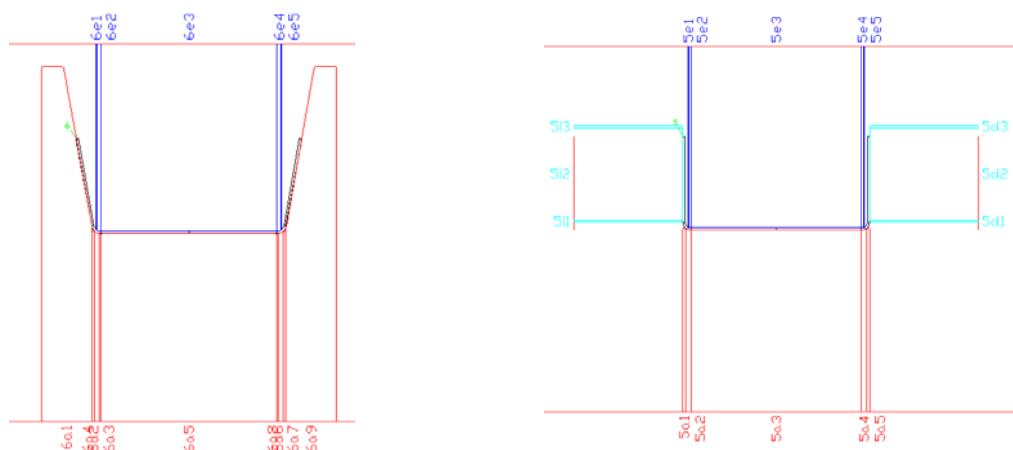


Fig. C.19. Rodets etapa 5 (esquerra) i etapa 6 (dreta)

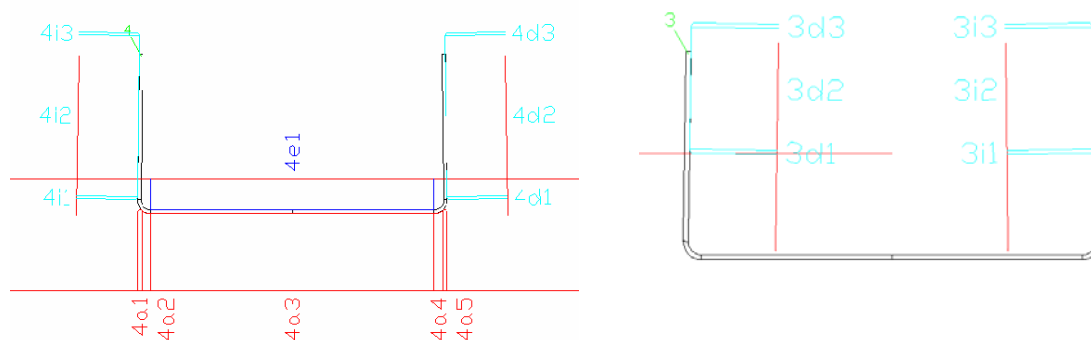


Fig. C.20. Rodets etapa 7a (esquerra) i etapa 7b (dreta)

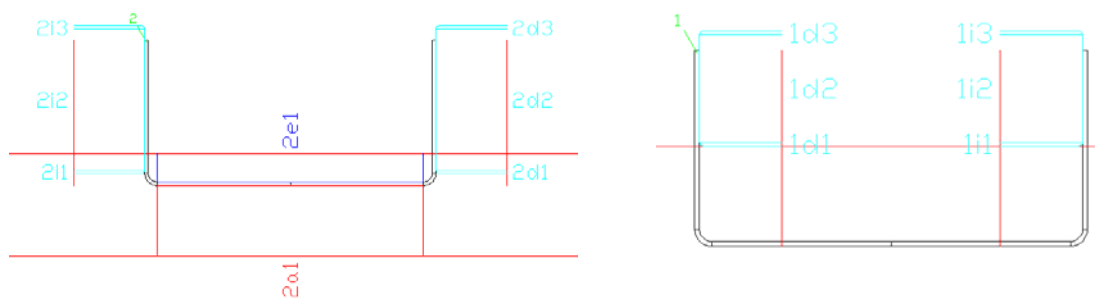


Fig. C.21. Rodets etapa 8a (esquerra) i etapa 8b (dreta)



La etapes 7 i 8 consten de dos parts, ja que el programa COPRA no permet definir més de dos eixos laterals a la mateixa estació, per tant s'han realitzat dos etapes diferents però situades sobre la mateixa coordenada longitudinal, és a dir, sense cap separació entre elles. D'aquesta forma s'aconsegueix l'etapa tal i com s'havia previst.

### C.3.2 Resultats de la simulació

A continuació es presenten els resultats de la simulació amb COPRA no mostrats a la memòria, és a dir, la tensió normal en x, en y i en z, tot i que aquesta si que hi es present, però amb un gràfic de diferent forma (fig C.22 – C.24)

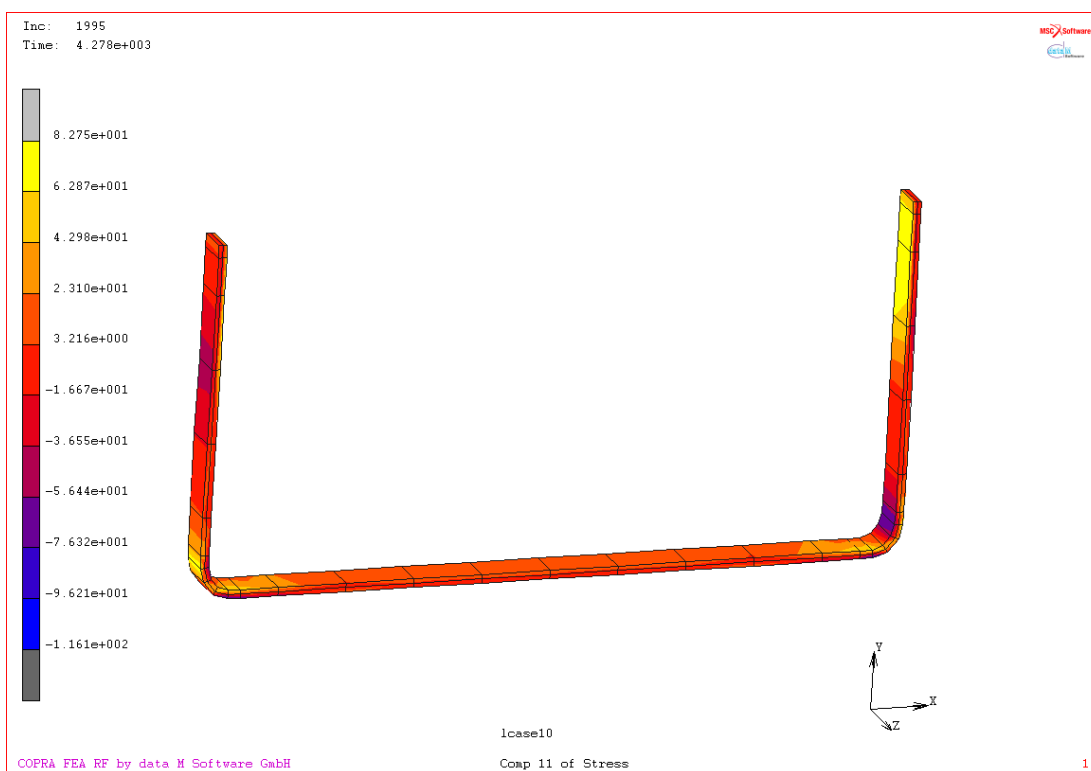


Fig. C.22. Sx



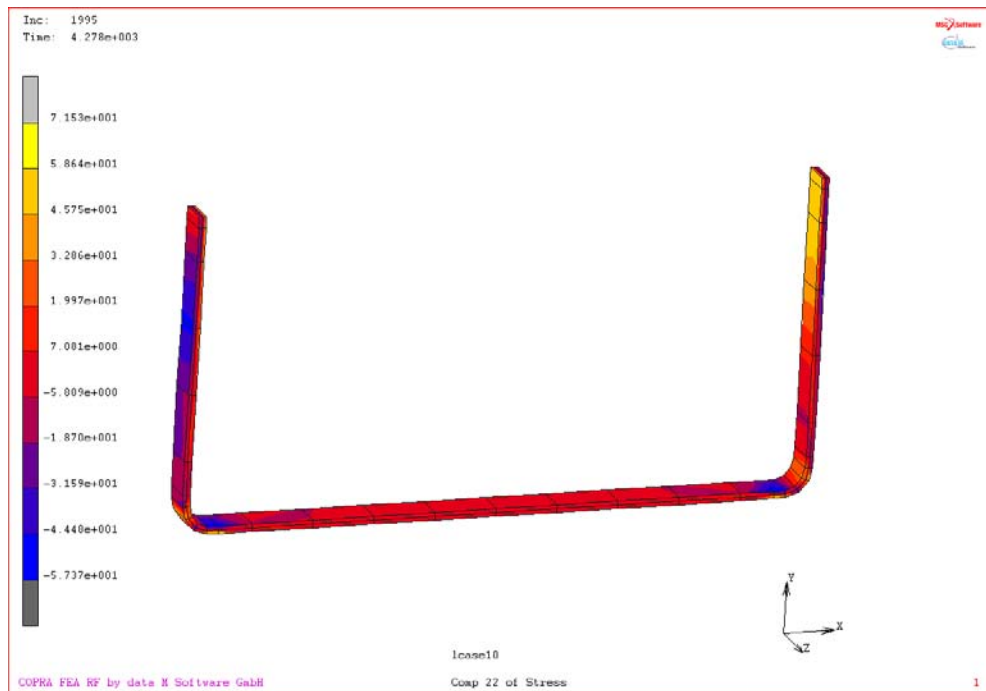


Fig. C.23. Sy

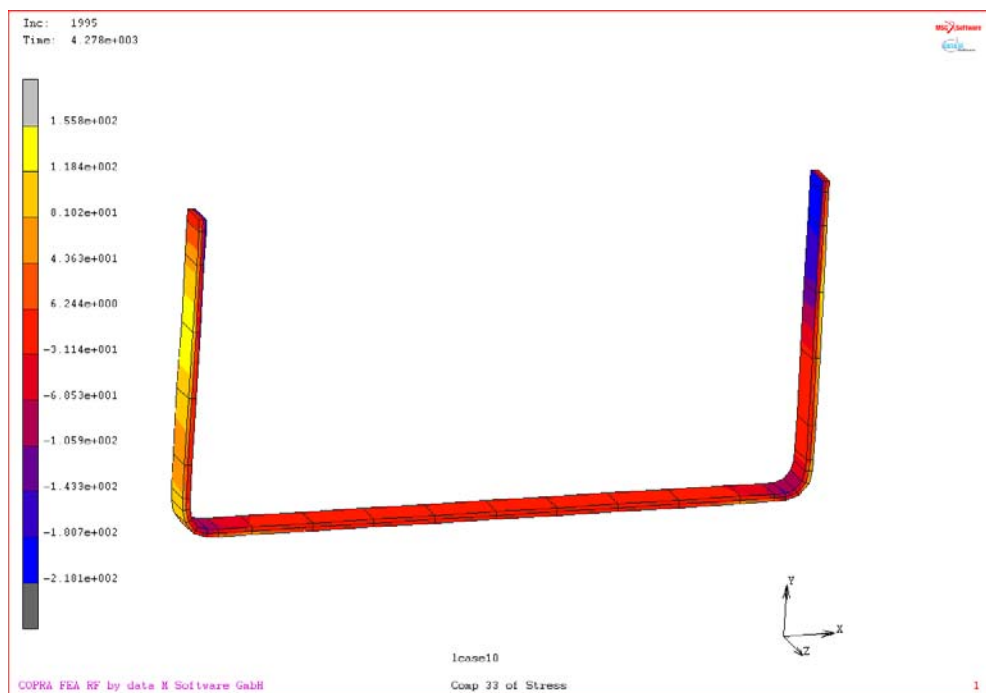


Fig. C.24. Sz



## C.4 Perfil en C

### C.4.1 Línia de conformat

Els detalls de cada una de les diferents etapes es poden consultar a la memòria. A continuació es mostren la geometria dels diferents rodets (fig C.25 – C.32).

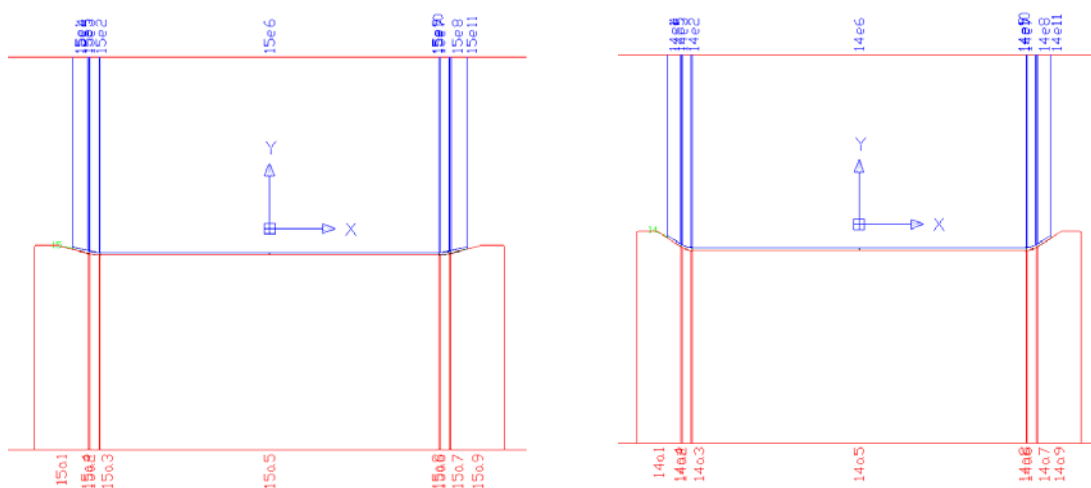


Fig. C.25. Rodets etapa 1 (esquerra) i etapa 2 (dreta)

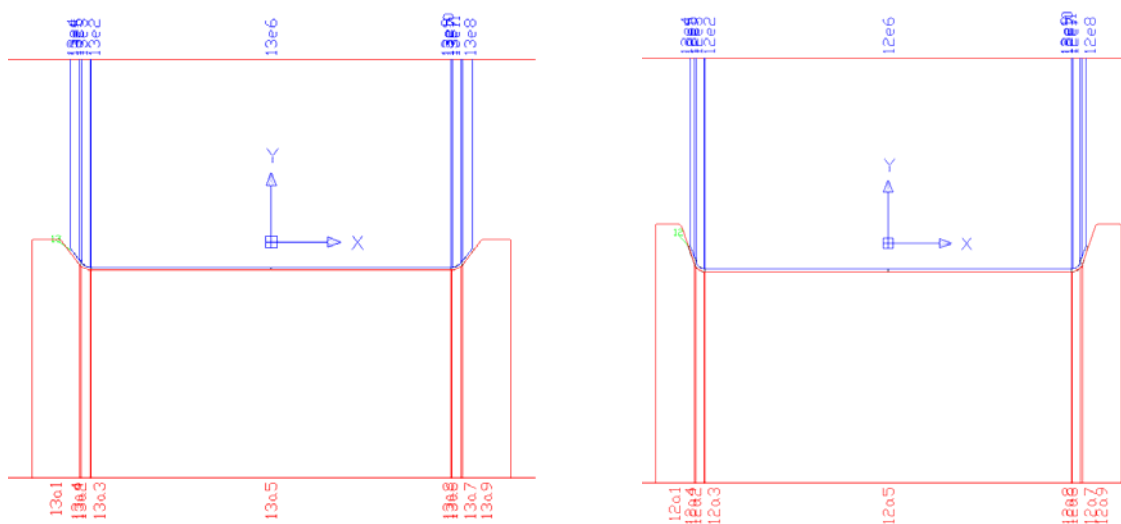


Fig. C.26. Rodets etapa 3 (esquerra) i etapa 4 (dreta)



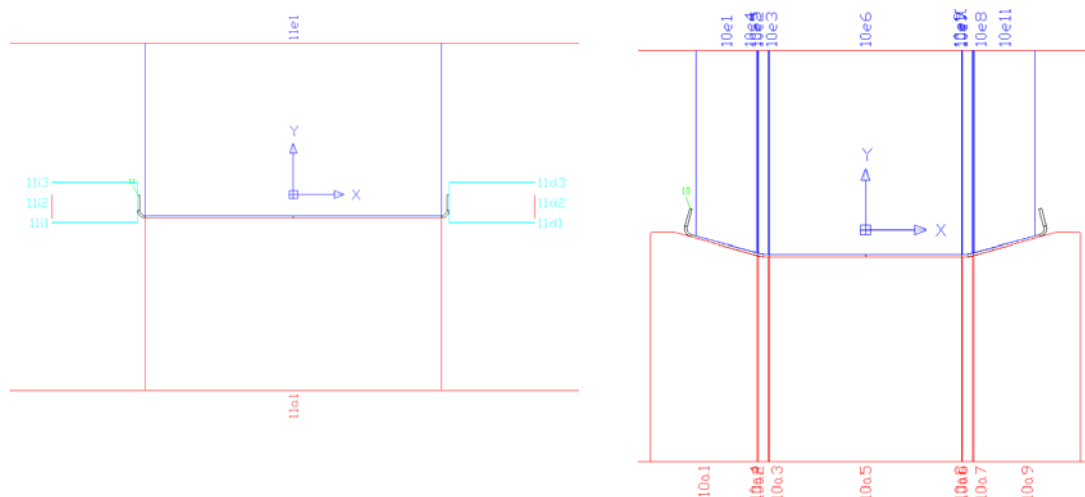


Fig. C.27. Rodets etapa 5 (esquerra) i etapa 6 (dreta)

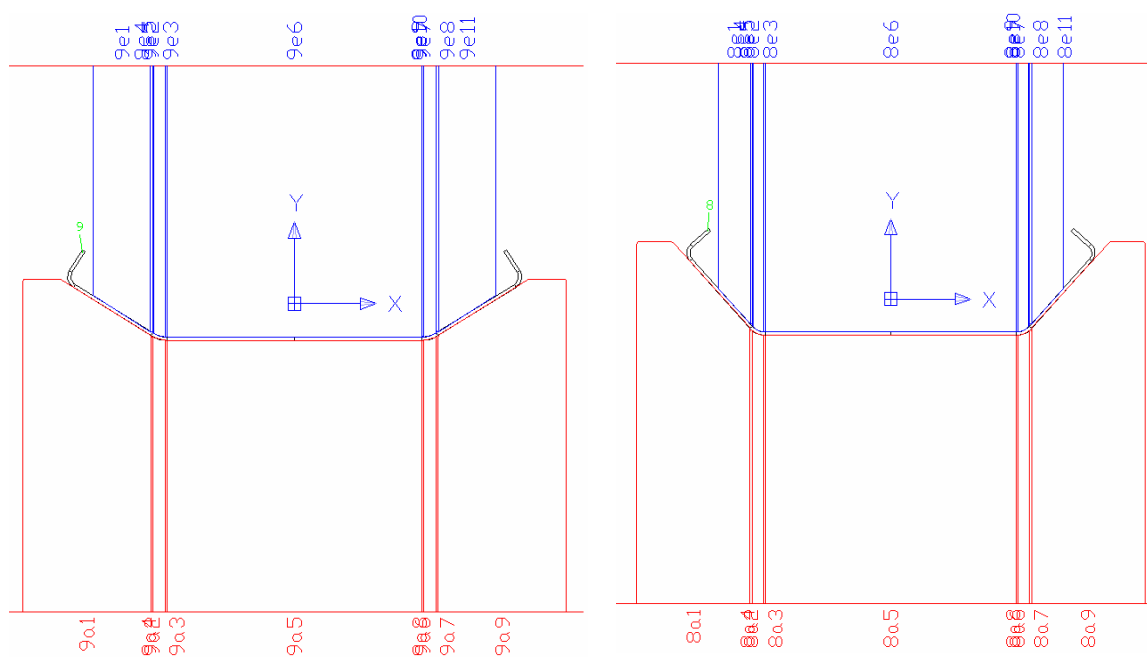


Fig. C.28. Rodets etapa 7 (esquerra) i etapa 8 (dreta)



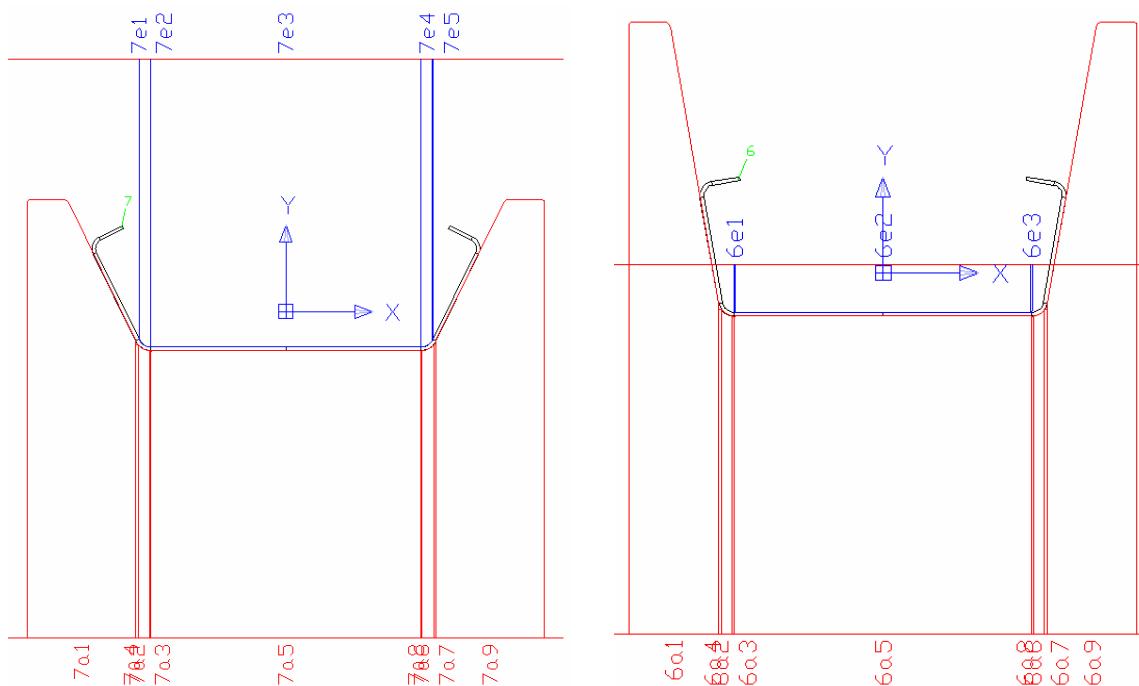


Fig. C.29. Rodets etapa 9 (esquerra) i etapa 10 (dreta)

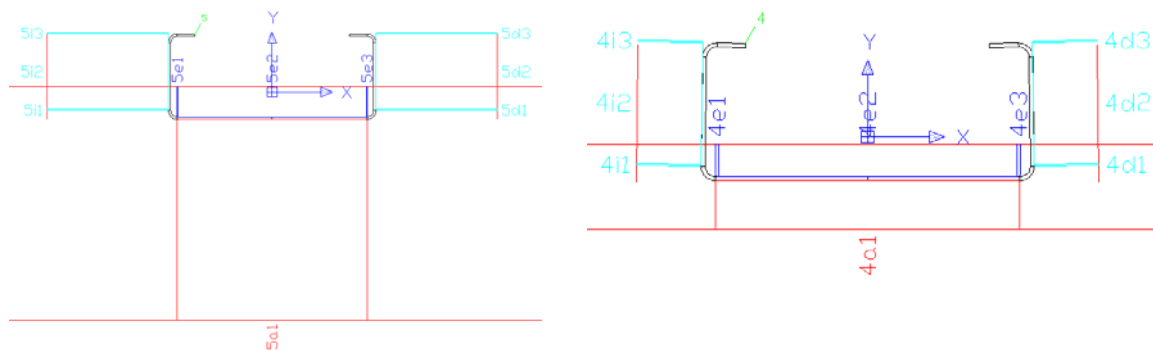


Fig. C.30. Rodets etapa 10 (esquerra) i etapa 11a (dreta)



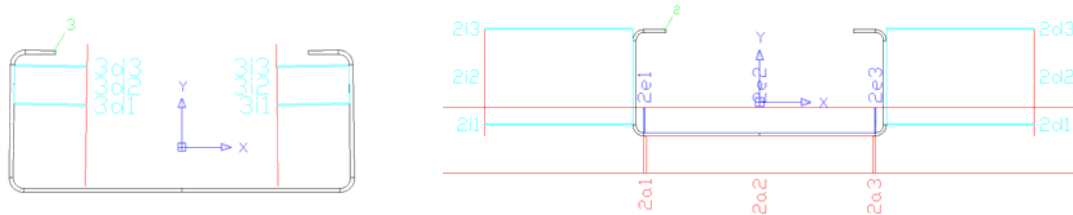


Fig. C.31. Rodets etapa 11b (esquerra) i etapa 12a (dreta)

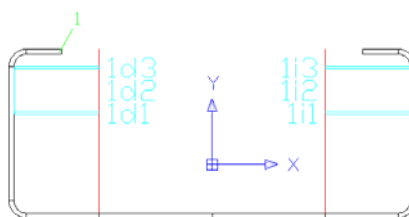


Fig. 0.32. Rodets etapa 12a

Les estacions 11 i 12 tornen a estar compostes per dos etapes diferents superposades al utilitzar rodets laterals interiors i exteriors al mateix temps.

#### C.4.2 Resultat de la simulació

A continuació es presenten els resultats de la simulació amb COPRA no mostrats a la memòria, és a dir, la tensió normal en x, en y i en z, tot i que aquesta si que hi es present, però amb un gràfic de diferent forma (fig C.33 – C.35)



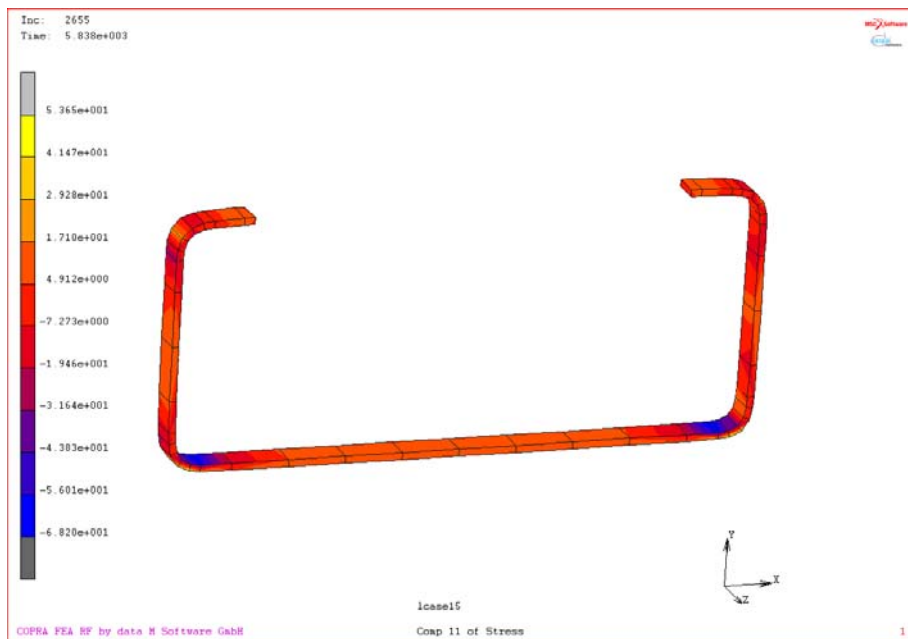


Fig. C.33. Sx

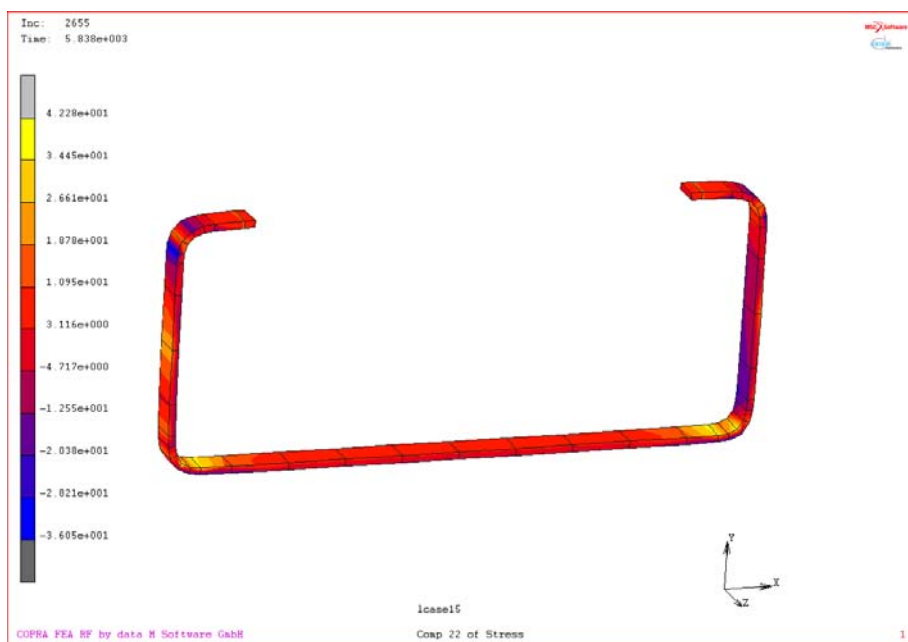


Fig. C.34. Sy





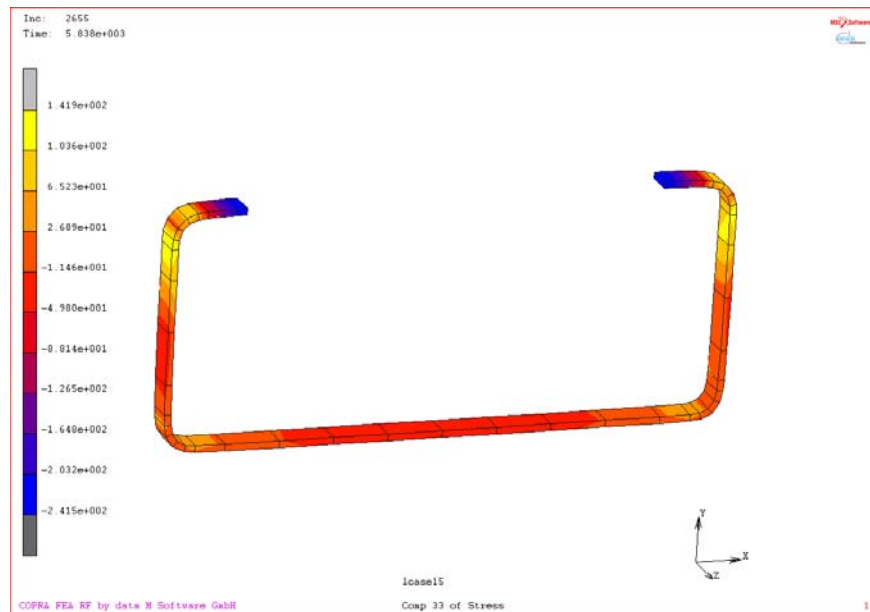


Fig. C.35. Sz



## C.5 Perfil Omega

### C.5.1 Línia de processat

Les característiques de la línia estan ben detallades a la memòria del projecte. Aquí es mostra la diferents geometries dels rodets en cadascuna de les diferents etapes. (fig C.36 – fig C.46).

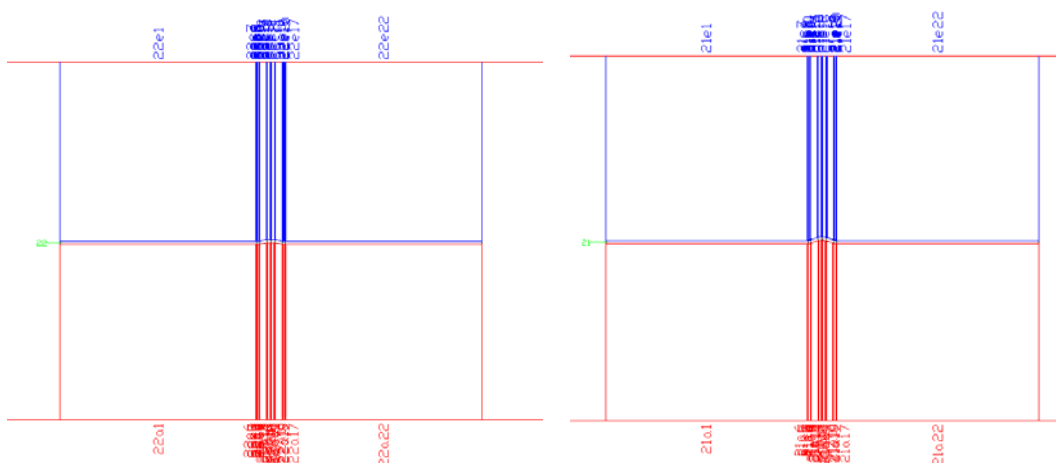


Fig. C.36. Rodets etapa 1 (esquerra) i etapa 2 (dreta)

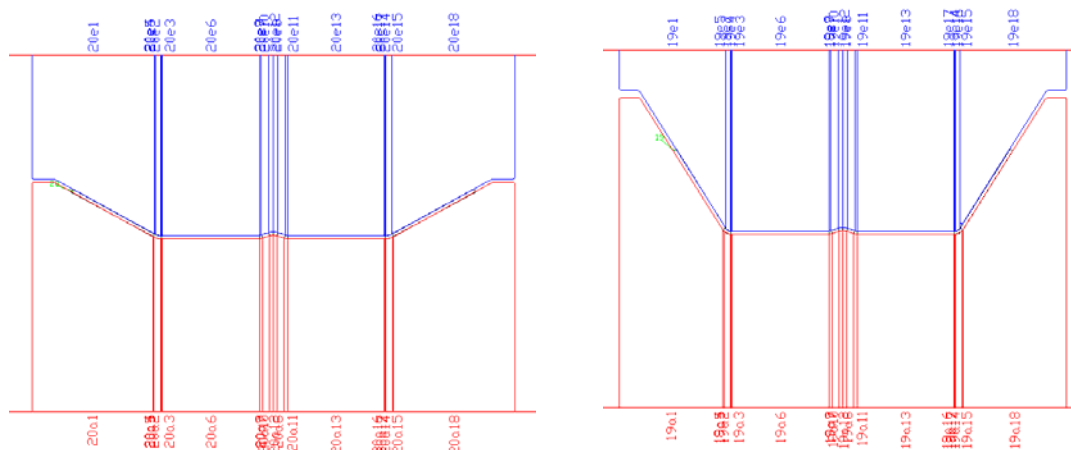


Fig. C.37. Rodets etapa 3 (esquerra) i etapa 4 (dreta)



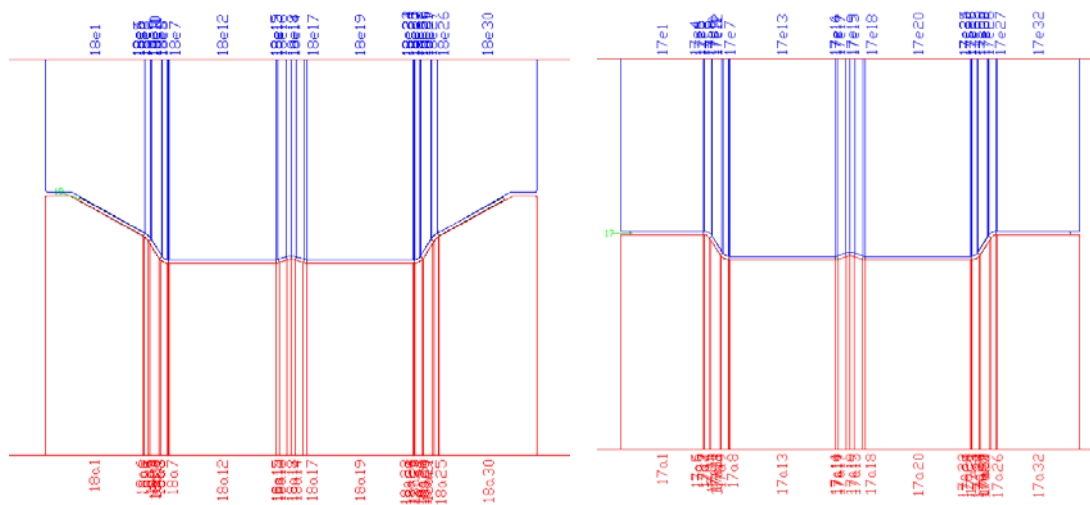


Fig. C.38. Rodets etapa 5 (esquerra) i etapa 6 (dreta)

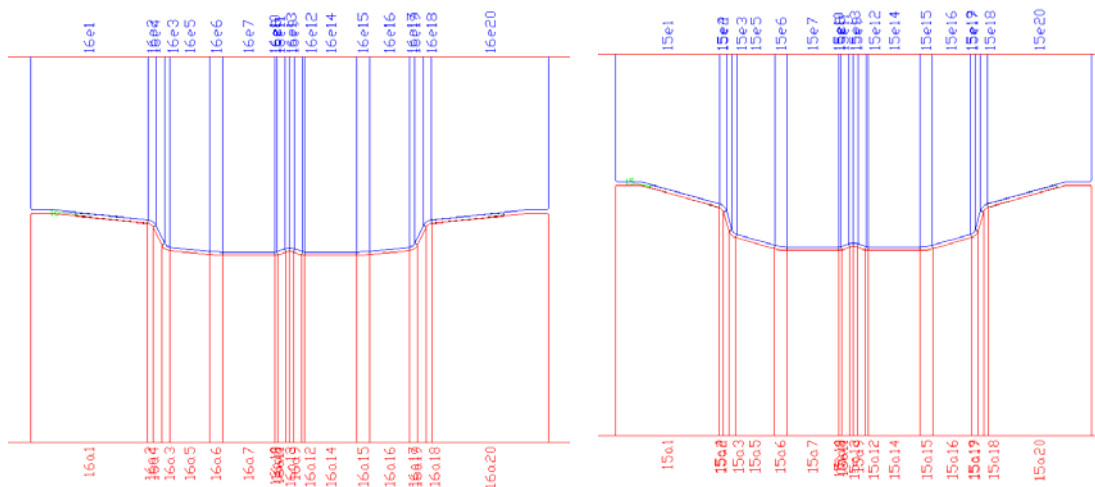


Fig. C.39. Rodets etapa 7 (esquerra) i etapa 8 (dreta)



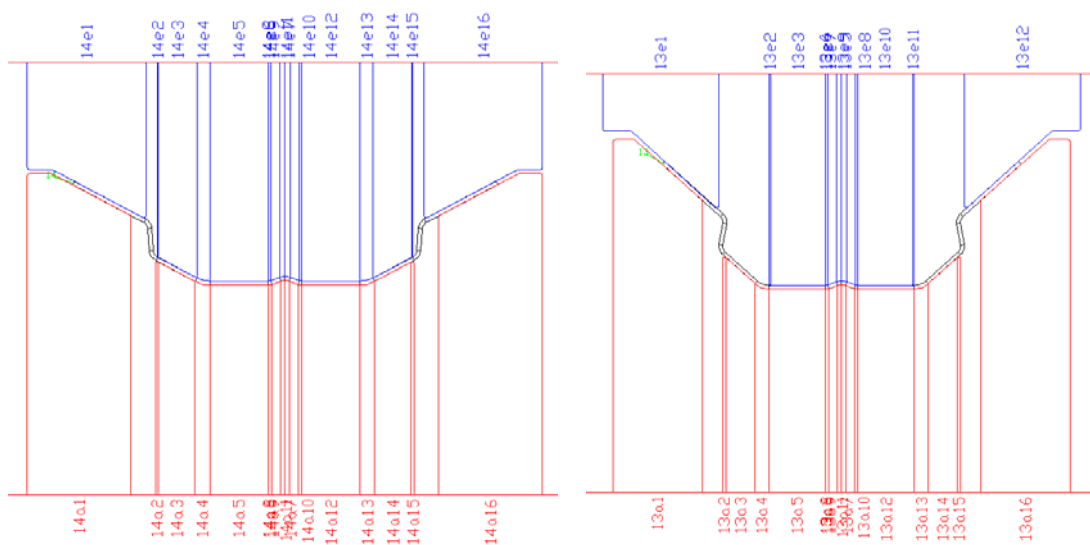


Fig. C.40. Rodets etapa 9 (esquerra) i etapa 10 (dreta)

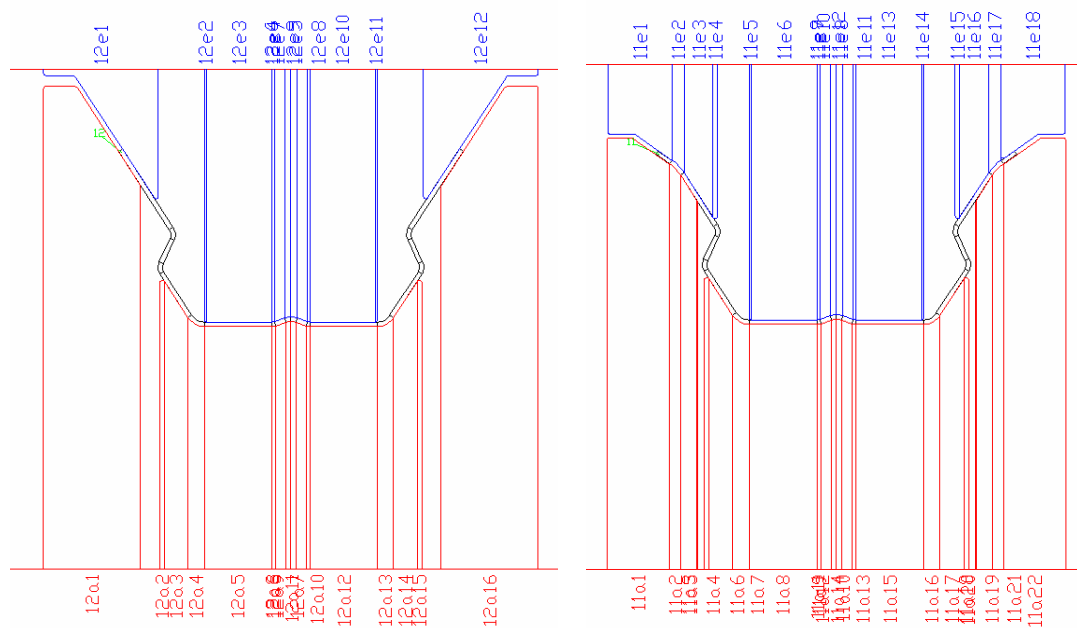


Fig. C.41. Rodets etapa 11 (esquerra) i etapa 12 (dreta)



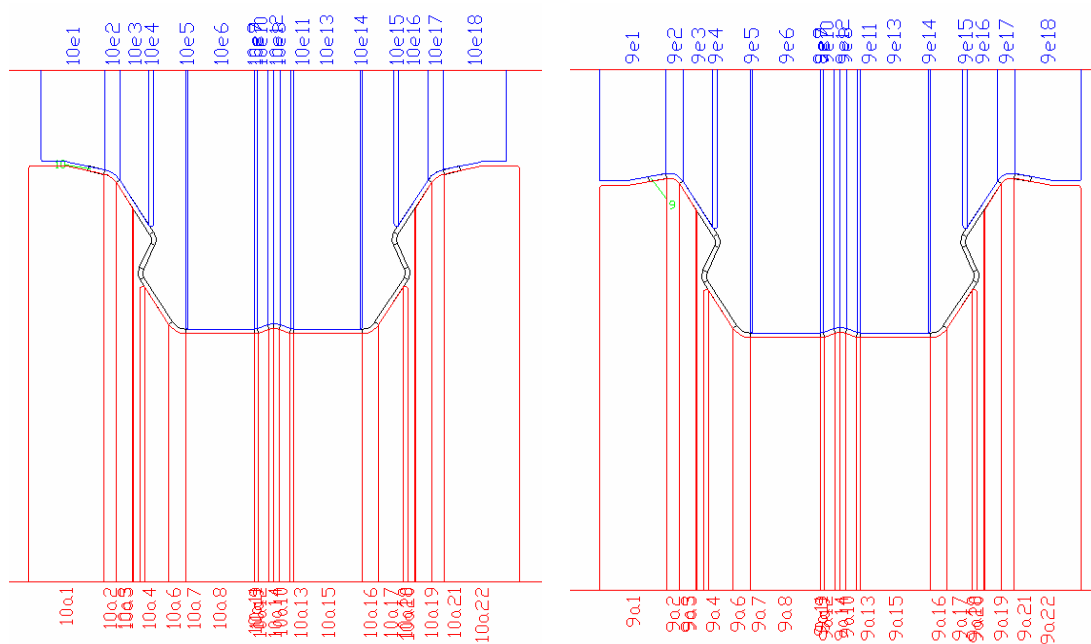


Fig. C.42. Rodets etapa 13 (esquerra) i etapa 14 (dreta)

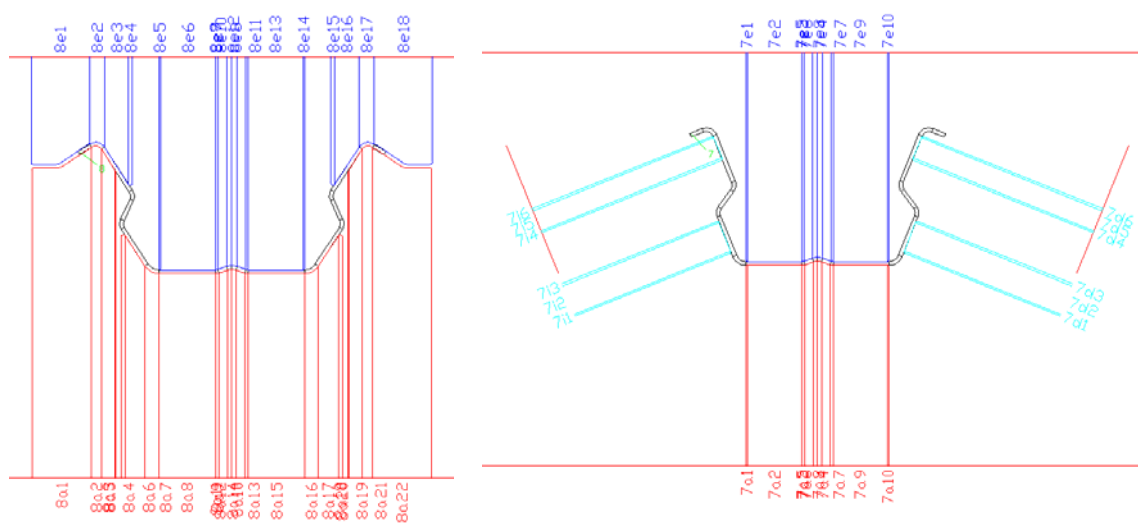


Fig. C.43. Rodets etapa 15 (esquerra) i etapa 16 (dreta)



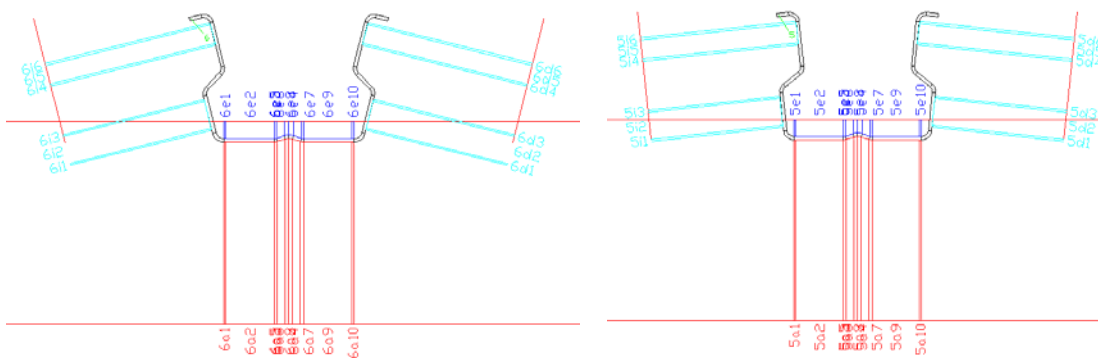


Fig. C.44. Rodets etapa 17 (esquerra) i etapa 18 (dreta)

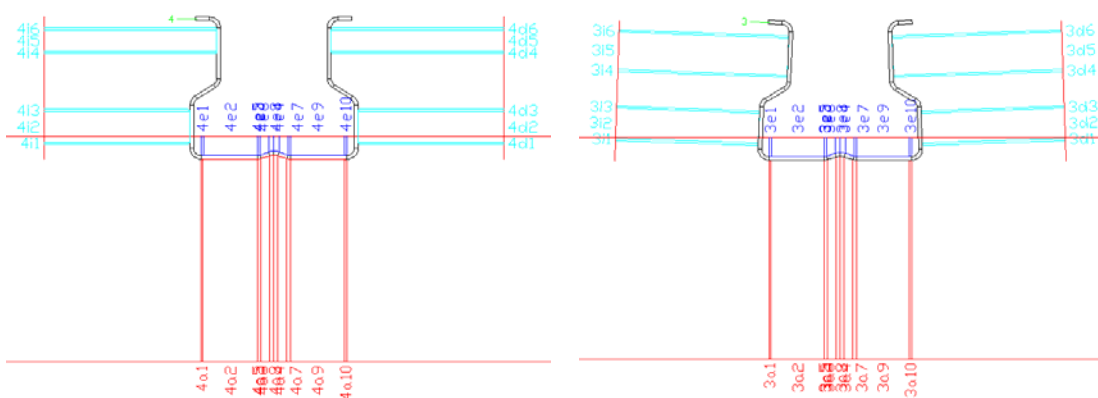


Fig. C.45. Rodets etapa 19 (esquerra) i etapa 20 (dreta)

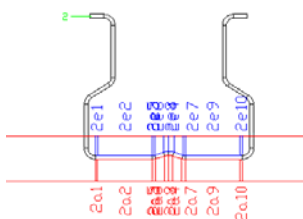


Fig. C.46. Rodets etapa 21 i 22



### C.5.2 Resultats de la simulació

A continuació es presenten els resultats de la simulació amb COPRA no mostrats a la memòria, és a dir, la tensió normal en x, en y i en z, tot i que aquesta sí que hi és present, però amb un gràfic de diferent forma (fig C.47 – C.49)

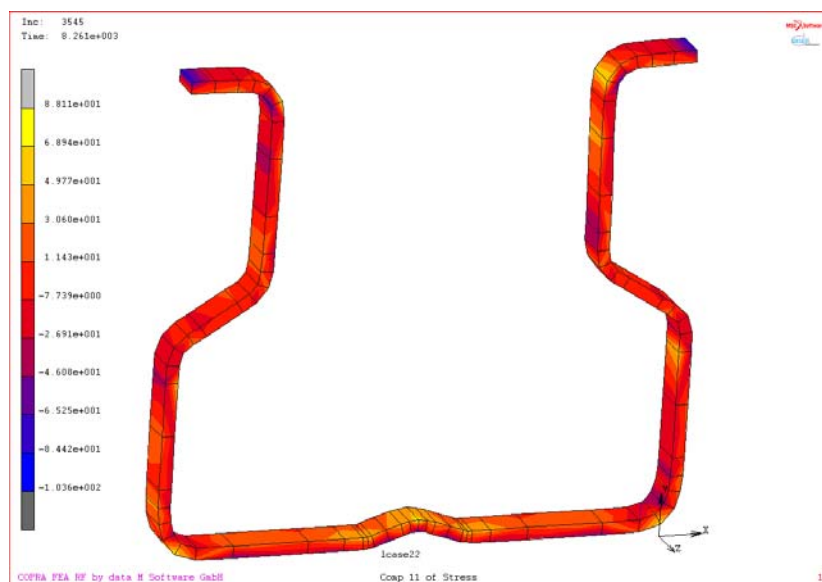


Fig. C.47.  $S_x$

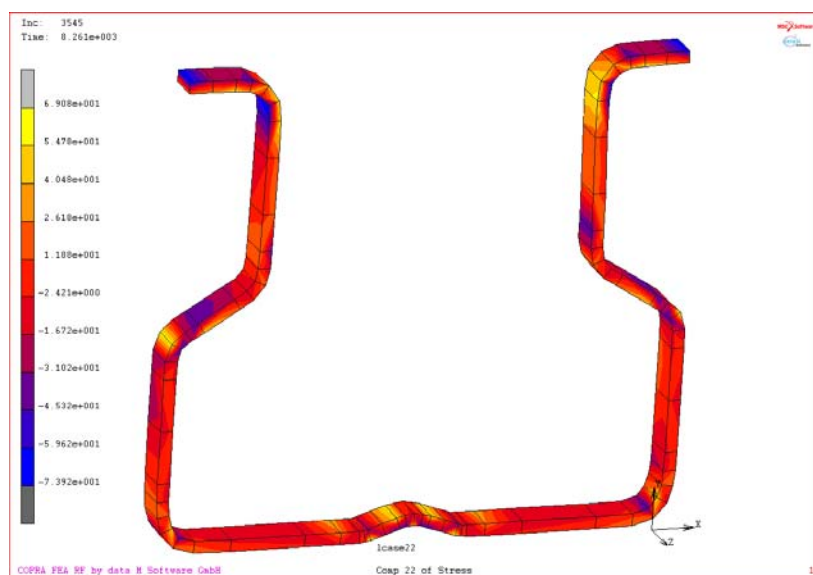


Fig. C.48.  $S_y$



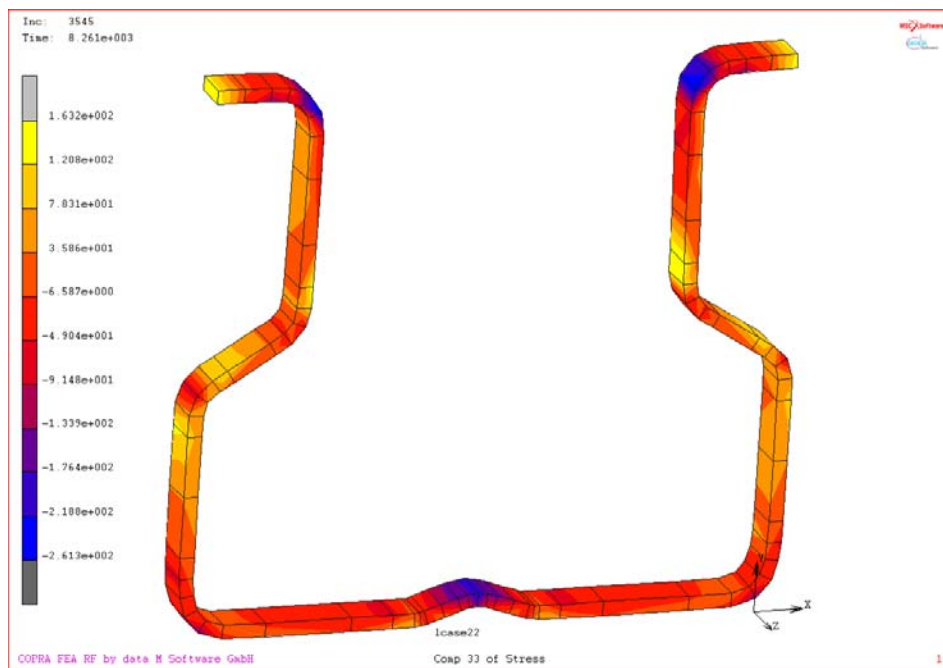


Fig. C.49. Sz





## Annex D. Estudi d'impacte ambiental

El projecte realitzat ha consistit bàsicament en la realització d'activitats de programació en MATLAB i de simulacions amb COPRA. Per tant, el impacte ambiental que es s'ha produït és baix. El impacte generat però es pot classificar en dos grup, energètic i material.

El impacte energètic es conseqüència de les simulacions realitzades per ordinador. Cal tenir present que el pc ha estat en funcionament pràcticament les 24 hores del dia durant la realització del projecte, ja que les simulacions per elements finits tenen una durada de l'ordre de dies. Tot i això un ordinador té una potència d'uns 300 W, per tant el consum energètic tampoc ha estat excessivament elevat.

Pel que fa al impacte material, cal tenir en compte bàsicament el paper utilitzat durant el projecte, però aquest es un material perfectament reciclable i per tant no presenta cap problema.

Per últim, s'ha de tenir present que gràcies a estudis com aquest han de permetre poder realitzar millors simulacions dels puntals a vinclament per tal de calcular la resistència a compressió que presenten. Si s'aconseguissin realitzar dons millors simulacions, més acurades i menys arbitràries que les actuals, es podrien reduir el nombre d'assaigs experimentals que actualment es realitzant i per tant això si que suposaria una reducció important d'impacte ambiental, ja que no s'haurien de fabricar tants puntals per la realització dels assaigs, fet que comportaria menys material utilitzat i per tant menys cost alhora de processar les restes dels puntals assajats.

D'altra banda un millor coneixement de les tensions residuals generades durant la fabricació de puntals i la seva influència en el seu comportament en servei, servirà per millorar tant la fabricació com la resistència dels puntals; i en definitiva permetrà un millor aprofitament del material i el corresponen estalvi en material, en pes, en energia emprada en el procés de fabricació i en el transport i muntatge de les prestatgeries.





## Annex E. Pressupost

El pressupost del projecte es pot dividir en dos grans parts, la facturació d'hores de treball (taula E.1), el cost de les llicències (taula E.2) i el cost de l'ordinador (taula E.3).

Descripció	Quantitat (h)	Preu unitari (€/h)	Preu (€)
Documentació i consulta	200	24	4800
Desenvolupament dels models teòrics	300	24	7200
Programació Matlab	300	24	7200
Simulacions amb COPRA	500	24	12000
Dedicació per part del Director del projecte	200	40	8000
<b>TOTAL</b>			<b>39200</b>

Taula. E.1. Cost del treball intel·lectual

Descripció	Temps (any)	Coefficient d'utilització	Preu unitari (€/any)	Preu (€)
Llicència MATLAB	1	0,3	2500	750
Llicència AUTOCAD	1	0,2	3000	600
Llicència COPRA	1	1	2000	2000
<b>TOTAL</b>				<b>3350</b>

Taula. E.2. Cost de les llicències

Descripció	Quantitat (unitats)	Coefficient d'utilització	Preu unitari (€/any)	Preu (€)
Ordinador	1	1	400	400
Impressions en blanc i negre	150	1	0,0545	8,17
Impressions a color	150	1	0,0174	2,61
<b>TOTAL</b>				<b>410,78</b>

Taula. E.2. Cost del ordinador

A continuació (taula E.4) es realitza la suma de les dos parts per tal d'obtenir el pressupost final del cost del projecte, que ascendeix a 42960,78 euros.



Resum del pressupost	Preu (€)
Cost treball intel·lectual	39200
Cost de les llicències	3350
Cost del ordinador	410,78
TOTAL	42960,78

---

Taula. E.4. Cost total del projecte



