

ÍNDEX

1. Introducció.....	3
1.1. Antecedents	3
1.2. Objecte.....	5
1.3. Abast.....	6
2. Geometria bàsica d'un teixit	7
2.1. Descripció de la geometria bàsica i el volum representatiu	7
2.2. Centre de coordenades de la geometria bàsica.....	10
2.3. Paràmetres de la geometria bàsica.....	11
3. Definició de la geometria matemàticament	13
3.1 Equació trigonomètrica	13
3.2 Descripció del procés.....	13
3.2.1 Mètode de resolució de les equacions frontals i posteriors.....	14
3.2.2 Mètode de resolució de les equacions final de passada.....	17
3.3 Nomenclatura de les equacions.....	21
3.4 Llistat de les equacions obtingudes	22
4. Orientació de les fibres.....	32
4.1 Estudi de les orientacions	32
4.2 Funció de la corba d'orientacions.....	34
5. Creació del model tridimensional	37
5.1 Geometria bàsica	37
5.2 Orientacions.....	39
6. Modelització per elements finits	42
6.1 Tipus d'element finit	43
6.2 Fracció de volum del RVE.....	44
6.3 Propietats elàstiques dels constituents	46
6.4 Propietats elàstiques dels compostos.....	49
6.5 Condicions de contorn	51
6.5.1 Introducció	51
6.5.2 Representació gràfica de les condicions de contorn.....	53
6.5.2 Equacions de les condicions de contorn.....	55
7. Propietats elàstiques del teixit.....	59
7.1 Obtenció de les propietats elàstiques	59

8. Estudi dels resultats	62
8.1 Comparativa de les propietats elàstiques	62
8.2 Anàlisi d'un material nou	66
8.3 Anàlisi de tensions	67
9. Conclusions.....	73
10. Relació de documents.....	74
11. Bibliografia	75
ANNEX A. Descripció dels materials compostos	77
A.1 Classificació dels materials compostos	78
A.1.1 Tipus de fibres.....	79
A.1.2 Tipus de matrius.....	80
ANNEX B. Estudis sobre modelització de teixits.....	83
ANNEX C. Codi informàtic	87
C.1 Codi de discretització de la geometria i representació gràfica.....	87
C.2 Codi generador d'arxius de sortida per els elements finits	94

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Abans de començar a desenvolupar el projecte, es farà una breu introducció sobre els materials compostos. La raó per la qual s'ha decidit començar a parlar sobre aquest tipus de materials, és senzillament perquè els teixits de fibra pertanyen a la família dels materials compostos.

De forma molt genèrica, un material compost queda definit per la unió de dos o més elements distingibles físicament. L'avantatge més significatiu dels materials compostos, és la possibilitat d'obtenir una peça final amb propietats combinades de diferents famílies de materials. Existeixen combinacions de metalls, ceràmiques i plàstics. Aquestes barreges de propietats, també es poden trobar a la naturalesa sense manipulació humana, dos exemples molt clars són els ossos i la fusta.

Podem trobar aquests materials en aplicacions d'aeronàutica, automoció, embarcacions i objectes que requereixen unes bones propietats mecàniques amb un baix pes. La utilització dels material compostos podria semblar adequada per moltes altres aplicacions però tenen un punt feble, el seu cost. Els factors que encareixen els material compostos són la matèria prima, la dificultat de fabricació i el seu disseny.

En el desenvolupament d'un material compost, s'han de tenir en compte els components que el formaran, però també la manera en que es disposaran sobre la peça. Existeixen moltes maneres d'unir els components d'un material compost, però en aquest projecte només en tractarem una en específic. Concretament, aquest treball parlarà dels compostos que fan servir la forma de sandvitx.

La figura 1.1 representa esquemàticament un compost que utilitza la forma esmentada anteriorment. Per definir un material d'aquestes característiques només farà falta parlar de dues zones, el nucli a la part central i la pell o teixit a l'exterior. Aquest projecte es centrarà en l'estudi de la part que queda amb contacte a l'exterior.

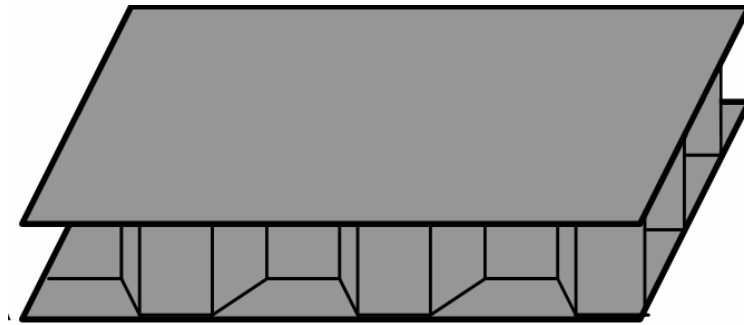


Fig.1.1 Material compost en forma de sandvitx

La pell o teixit està formada per dos elements diferents, la fibra i la matriu. La fibra aporta les propietats de resistència mecànica. La matriu actua com a protecció dels atacs químics ambientals i uneix totes les fibres per formar un únic teixit o pell. Cal aclarir, que la fibra és un conjunt de fils microscòpics alineats i la matriu és una resina que les envolta. Un sol fil de fibra té una resistència baixa, però la unió de tots ells amb l'ajuda de la matriu forma un material que té molt bones propietats.

Arribats aquest punt, podem començar a imaginar la infinitat de possibilitats que hi ha quan es crea un teixit. Es podrà modificar la composició química de les matrius, la ordenació de les fibres, el material de les fibres, l'apilament de diferents teixits... Per tant, aquest estudi es centrarà en un tipus de teixit o pell que és molt freqüent en els materials compostos amb forma de sandvitx. Per entendre quina disposició tenen les fibres que s'estudiaran, podem pensar en el teixit de la roba que es mostra a la figura 1.2.

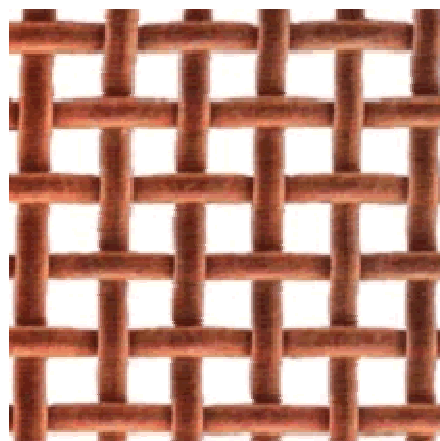


Fig.1.2 Teixit pla

Observant la orientació de les fibres, es pot intuir que les propietats dels materials que utilitzen un teixit pla presentaran excel·lents propietats en les

direccions ortogonals de les fibres i molt baixes en la direcció perpendicular al pla. Per aquesta raó, és molt interessant fer un estudi detallat del comportament entre fibres.

Abans de seguir endavant amb el projecte, cal aclarir que aquest treball és una ampliació d'un projecte que ja existeix. Es va començar a desenvolupar l'any 2007 per Sílvia Castellano Garriga.

1.2. Objecte

La intenció d'aquest projecte és desenvolupar un programa prou robust per analitzar numèricament el comportament de les fibres teixides. Es tindrà en compte com la configuració del teixit (ondulació, trama, orientació) afecta a les propietats macroscòpiques del material. Els resultats de les propietats es compararan amb les que es van obtenir en el projecte que ampliem i afegirem un anàlisi de ruptura per conèixer les zones crítiques de les fibres.

Per aconseguir els resultats numèrics, buscarem primerament la geometria de les fibres mitjançant microfotografies (figura 1.3).

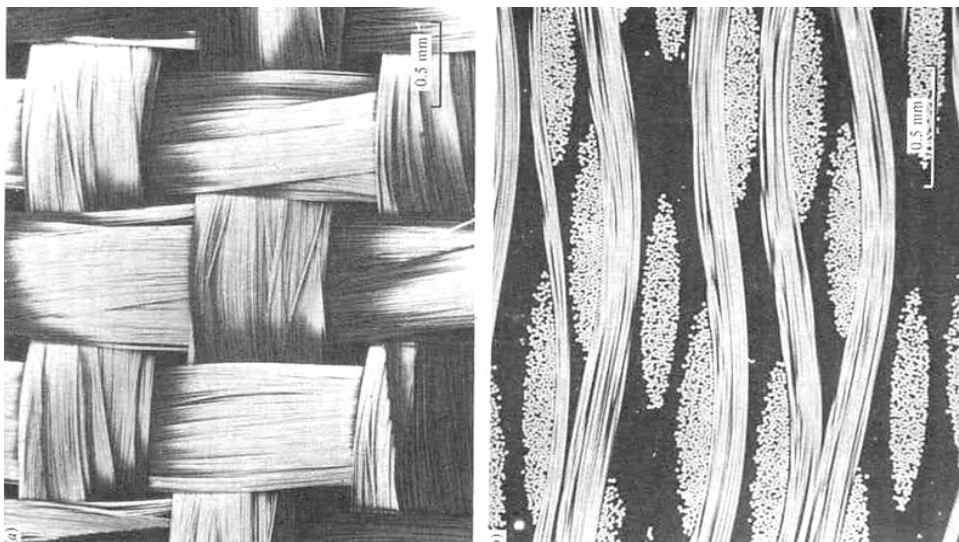


Fig.1.3 Microfotografia de fibres

El següent pas serà definir amb l'ajuda de programes informàtics i funcions matemàtiques la forma observada en les microfotografies. En aquest segon pas

s'hauran de posar les funcions adequadament parametritzades per aconseguir unes equacions que podran definir qualsevol teixit amb una disposició igual a la esmentada anteriorment.

Els programes necessaris per realitzar aquesta tasca són: el Maple per trobar les equacions que descriuen les corbes, el Matlab per fer la programació i discretització dels punts necessària per representar el nostre teixit.

Un cop coneguda tota la geometria, s'implementaran aquestes dades en un programa d'elements finits que simularà el comportament real del teixit. El procés que s'explica podrà repetir-se per totes les fibres que es vulguin estudiar sempre i quan tinguem la seva microfotografia. Per fer aquest últim pas farem servir el programa Ansys.

1.3. Abast

La finalitat d'aquest projecte és millorar el coneixement de les propietats elàstiques i de fractura dels teixits de fibres amb resines. Per aconseguir els resultats farem servir el mètode dels elements finits.

Escollirem diferents fibres i resines que tinguin les característiques geomètriques esmentades en els antecedents. Seguidament, s'obtidran les seves microfotografies. Es buscaran les funcions matemàtiques amb ajuda del programa Maple. Un cop definida tota la geometria de cada una de les fibres que s'estudien, introduïrem les funcions en el programa Matlab. Obtindrem la discretització de les equacions. Finalment, farem servir el programa Ansys per cada tipus de fibra i extraurem els resultats de les propietats elàstiques i de ruptura.

2. GEOMETRIA BÀSICA D'UN TEIXIT

2.1. Descripció de la geometria bàsica i el volum representatiu

Per fer la representació del teixit amb elements finits es partirà d'una porció petita del teixit. Aquest volum l'anomenarem geometria bàsica i es repartirà per totes bandes per obtenir el RVE (Element Representatiu del Volum). La simplificació explicada és viable perquè el teixit repeteix en totes direccions la mateixa geometria. A la figura 2.1.1 hi ha un requadre negre que representa la geometria bàsica.

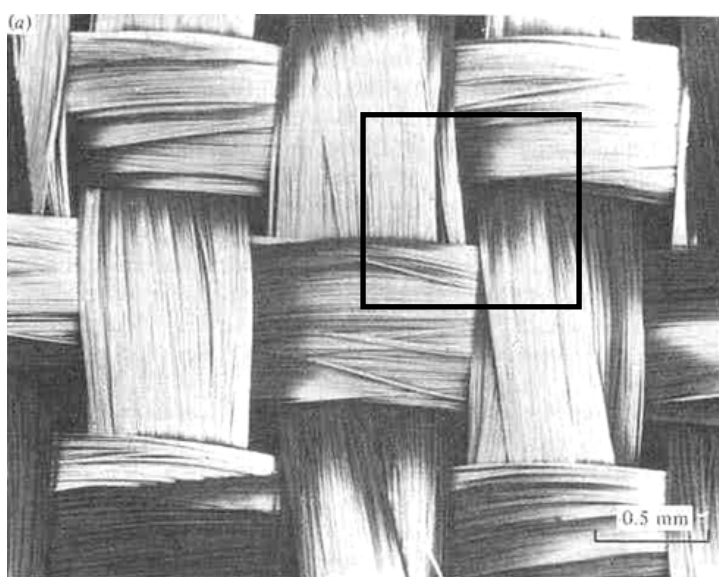


Fig. 2.1.1 Microfotografia de la geometria bàsica

Per obtenir una geometria bàsica que defineixi exactament el teixit, també s'haurà de tenir present la forma en que estan apilades les diferents làmines de teixit. Per el problema que s'estudia en aquest treball, només existeixen dues possibilitats. Aquestes opcions son: l'apilament o laminat en iso-fase i out-of-fase. (Figura 2.1.2)

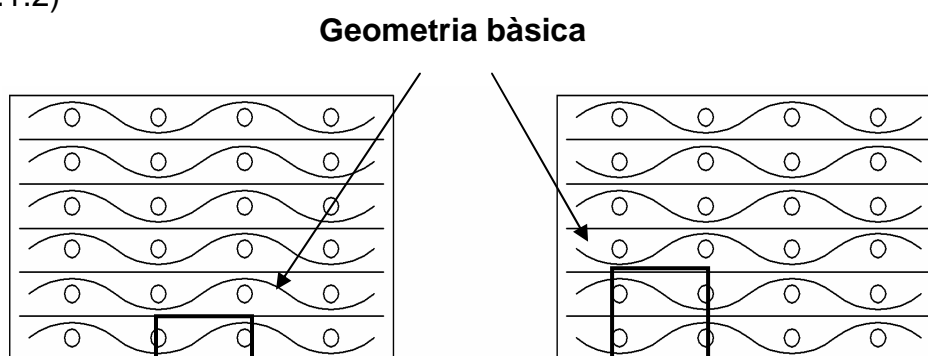


Figura 2.1.2 Apilament de làmines teixides en iso-fase (esquerra) i en out-of-fase (dreta)

Per cada un dels dos laminats es seleccionarà un volum diferent. En el cas del iso-fase, la porció serà molt més petit perquè la lamina superior és exactament igual a la inferior. Per altra banda, el laminat en fora-de-fase necessita el doble de gruix per definir la seva forma. La diferència que hi ha entre cada una de les opcions es pot apreciar a la figura 2.1.3.

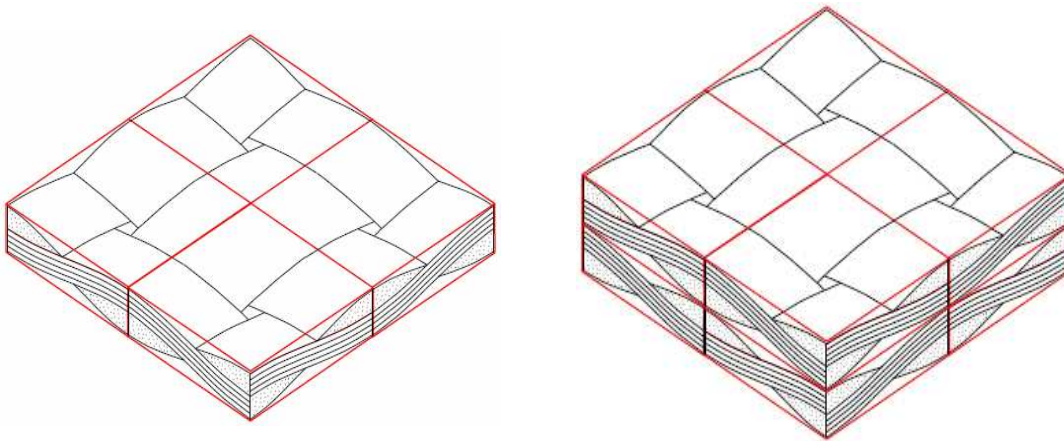


Figura 2.1.3 Elements Representatius del Volum (RVE)

Les dues figures superiors ensenyen els dos elements representatius dels volums (RVE). A l'esquerra s'observa el dibuix en iso-fase i a la dreta el fora-de-fase. Si ens fixem en cada un dels dibuixos, apareixen unes línies vermelles que formen quadrats. Un sol requadre representa la geometria bàsica que nosaltres estudiarem. Per acabar d'explicar aquests dos dibuixos, quan parlem de iso-fase necessitarem quatre cops la geometria bàsica i si parlem de fora-de-fase llavors farem servir el doble, vuit geometries bàsiques perquè necessitem el pla inferior i superior al mateix temps.

Distingim aquets dos volums perquè la geometria bàsica és molt més fàcil d'estudiar per nosaltres i el RVE és necessari per fer l'anàlisi per elements finits. Per tant, el projecte que es presenta es pot dividir en dues parts segons les geometries que hem explicat. La primera part del projecte, tractarà l'estudi de les corbes que formen la geometria bàsica i la segona part l'anàlisi per elements finits fent ús del RVE.

Un cop entès el significat de les geometries, podem començar a introduir la nomenclatura que es farà servir per descriure la geometria bàsica. Figura 2.1.4.

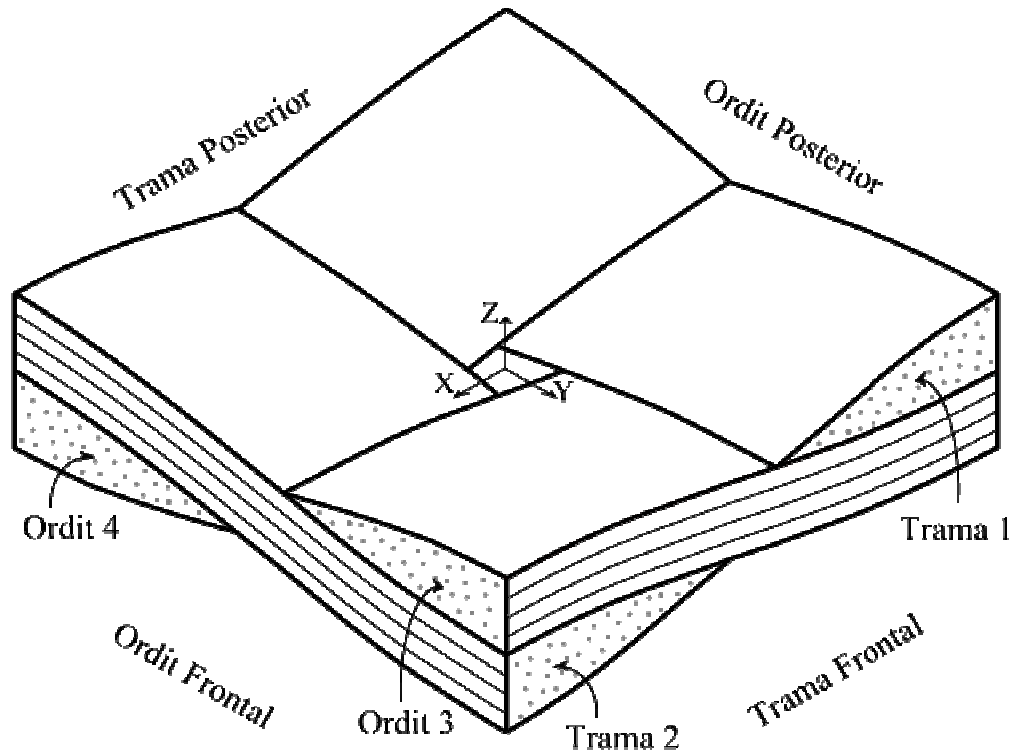


Figura 2.1.4 Nomenclatura de la geometria bàsica

A la figura superior, s'observa que està dividida en quatre parts. El frontal i el posterior i per altre banda, els fils orientats en 'x' i en 'y'. Cal fixar-se també que els fils orientats en 'x' es denominen ORDIT i els que queden en 'y' TRAMA. Per acabar, s'assigna un numero per cada un dels quatre fils per controlar en tot moment quin fil s'estudia.

2.2. Centre de coordenades de la geometria bàsica

Per entendre millor la resolució del problema matemàtic, parlarem en aquest apartat del lloc on es situa l'origen de coordenades. Mirar figura (2.2.1)

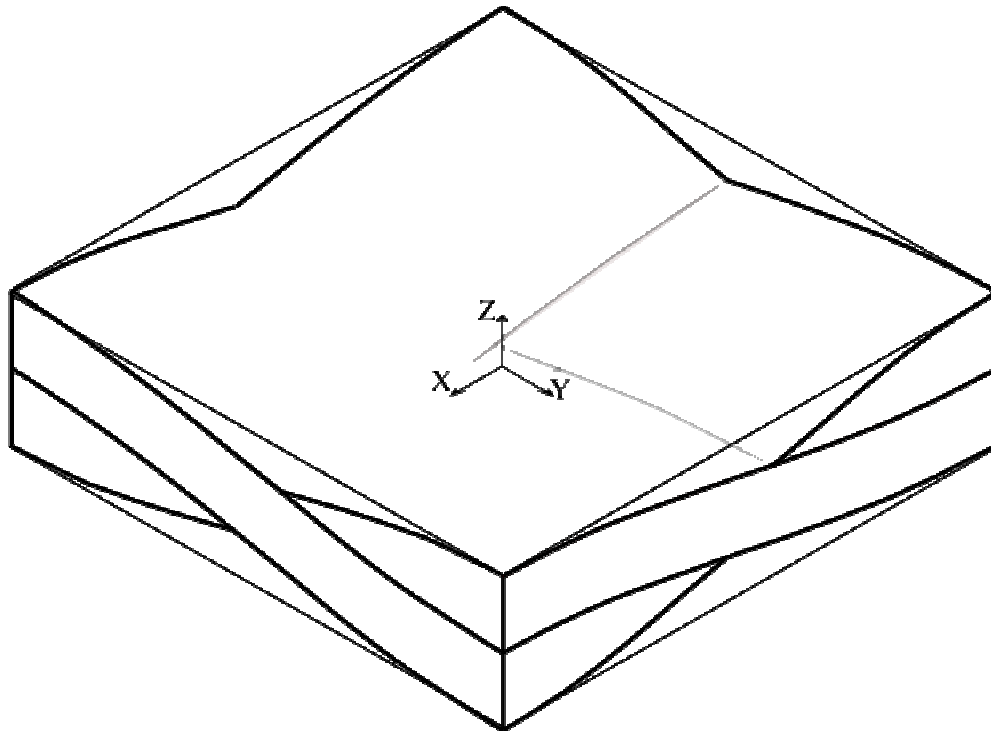


Figura 2.2.1 Situació de l'origen de coordenades

L'origen de coordenades es trobarà centrat al volum. L'eix de les 'x' estarà a la meitat del volum representatiu igual que l'eix de les 'y' i també el de les 'z'. D'aquesta manera si ens movem per els eixos, veurem que la distància recorreguda en sentit positiu és la mateixa que es troba en sentit negatiu per cada un dels tres eixos.

S'ha escollit aquesta situació de l'origen de coordenades per millorar la comprensió de les equacions que es presentaran més endavant. Com que la peça és en certa manera simètrica respecte la posició dels eixos, en molts casos les equacions variaran per un signe o un paràmetre.

2.3. Paràmetres de la geometria bàsica

En aquest apartat s'explicaran els paràmetres que s'han fet servir per definir la geometria bàsica. A la figura 2.3.1 es poden apreciar les lletres que defineixen la geometria. Val a dir que totes les mides que es faran servir s'obtidran a partir de les microfotografies que ja hem vist anteriorment.

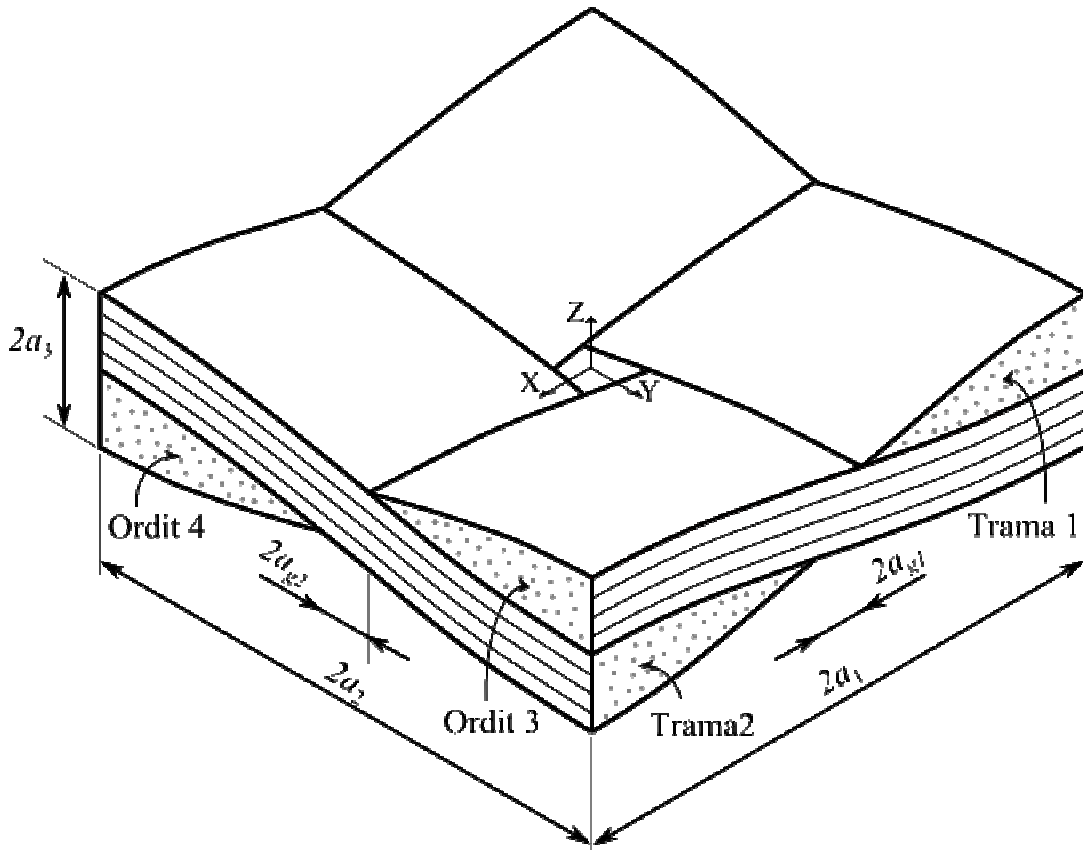


Figura 2.3.1 Paràmetres del volum

Observant la figura, veiem tres zones diferenciades que coincideixen amb els eixos de coordenades. S'han fet servir els subíndex 1, 2 i 3 per diferenciar els eixos x , y i z . Per altre banda, trobarem la lletra 'a' que defineix la meitat de la longitud total del volum per cada eix. Trobarem també la lletra 'a' seguida de dos subíndex 'g' i '1' o '2' segons el pla que defineixi. Aquest últim paràmetre marca la meitat de la distància que hi ha entre les dues puntes que queden al seccionar els fils perpendicularment. Mirant la figura superior s'entendrà millor la nomenclatura.

Per últim, parlarem dels 4 fils de fibra que defineixen la geometria. Com es pot apreciar a la figura 2.3.1. a la hora de definir la geometria, direm que està formada per: dos fils en trama i dos en ordit. Així que les trames 1 i 2 són aquelles en que les fibres aniran en direcció de les 'y' i els ordits 3 i 4 són els que aniran en direcció de les 'x'.

3. DEFINICIÓ DE LA GEOMETRIA MATEMATICAMENT

3.1 Equació trigonomètrica

Per trobar la geometria dels 4 fils necessitarem una equació matemàtica. L'equació que s'ha escollit és una funció trigonomètrica amb 4 paràmetres diferents: A, B, C i D. Mirar equació (1).

$$z(x) = A \sin(Bx + C) + D \quad (\text{Eq.1})$$

Tot seguit, s'explicarà la funció que tenen cada un dels paràmetres a dins de l'equació (1). El paràmetre A defineix l'amplitud de la sinusoide, B representa la freqüència de l'ona, C es un factor corrector i D servirà per ajustar el desfasament de la sinusoide. Les unitats que tenen cada un dels paràmetres son: A i D en unitats de mil·límetres (*mm*), B representa el període i per aquesta raó s'expressa en mil·límetres a la menys un (mm^{-1}) i per últim, C és un angle i s'implementarà en radians (*rad*).

El paràmetre D es troba dins del interval $[0; a_3/2]$, si recordem els factors que defineixen la geometria, la lletra ' a_3 ' representava la meitat de l'alçada del nostre volum representatiu.

3.2 Descripció del procés

Per definir la geometria bàsica començarem plantejant el problema en dues dimensions. Seguidament, s'afegirà la tercera dimensió aplicant restriccions sobre les equacions que ja coneixem. Per acabar, s'obtindrà la geometria representativa combinant totes les equacions i definint el seu domini.

Estudiarem el pla XZ i el pla YZ frontals per separat. Com ja s'ha vist en les figures, la geometria de cada pla és en certa manera simètrics i per tant, les seves equacions seran molt similars. Un cop conegudes totes les equacions que defineixen els dos plans frontals, podrem obtenir per semblança els plans posteriors.

Definits els quatre plans exteriors només quedaran per estudiar els interiors. L'experiència d'altres projectes ens diu que necessitarem quatre seccions més per definir el volum. Les seccions que farem servir seran les de final de passada, per tant, hi haurà dues seccions afegides per el pla XZ i dues més per el pla YZ. A la figura 3.2.1 es poden apreciar dues de les quatre seccions interiors que es faran servir.

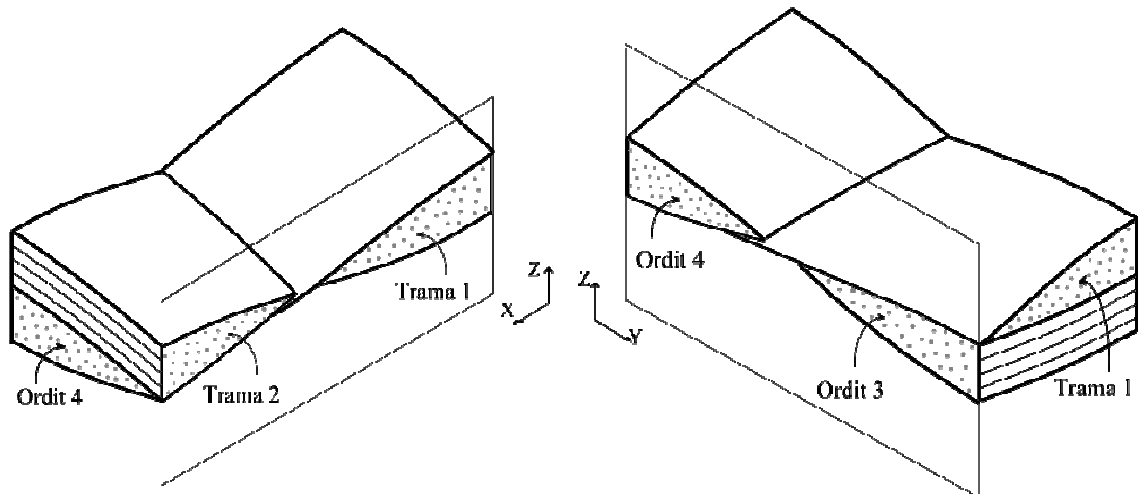


Figura 3.2.1 Seccions final de passada XZ i YZ.

Podríem arribar a pensar que les seccions que passen per l'origen de coordenades són igual d'importantes que les de final de passada, però si ens fixem a la figura 3.2.1 veiem que les fibres queden una mica aixecades. Així que si volem unes funcions que determinin amb més correcció la geometria ens interessarà tenir en compte la zona final de passada.

3.2.1 Mètode de resolució de les equacions frontals i posteriors

Com ja s'ha dit a l'apartat anterior, per determinar les funcions el primer pas serà buscar-les en el pla XZ i en el pla YZ, que són molt similars. Per aconseguir el nostre objectiu ens ajudarem de les microfotografies, les cotes que s'han mesurat sobre la foto i els croquis del volum representatiu que hem anat veient en els apartats anteriors. La única diferència que tenim respecte dels dibuixos anteriors, és que en aquest apartat treballarem en dues dimensions i no pas en les tres que estem acostumats. Cal tenir especial cura a la hora de mirar la posició del eixos perquè els dibuixos semblen invertits. Aquest efecte es degut als eixos que s'han

escollit per plasmar les dues dimensions. Mirar el dibuix esquemàtic que surt a continuació. Figura 3.2.1.1.

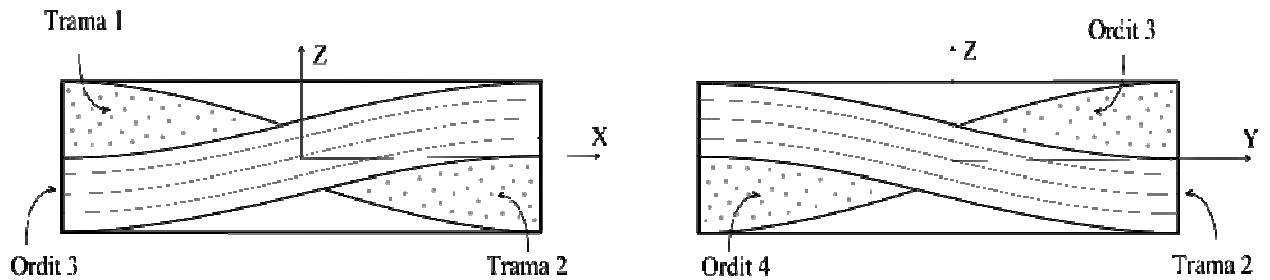


Figura 3.2.1.1 Eixos de treball per les seccions frontal

Un cop visualitzades les figures amb la posició dels eixos en dues dimensions, ens podem centrar en l'obtenció de les diferents equacions.

La primera equació que estudiarem serà la que queda representada en negreta a la figura 3.2.1.2. Per ser més exactes en passos anteriors l'hem anomenat ordit 3. Mes endavant, la nomenclatura que agafarà aquesta equació serà z_{3l}^i , el significat d'aquesta nomenclatura s'explicarà a l'apartat 3.3.

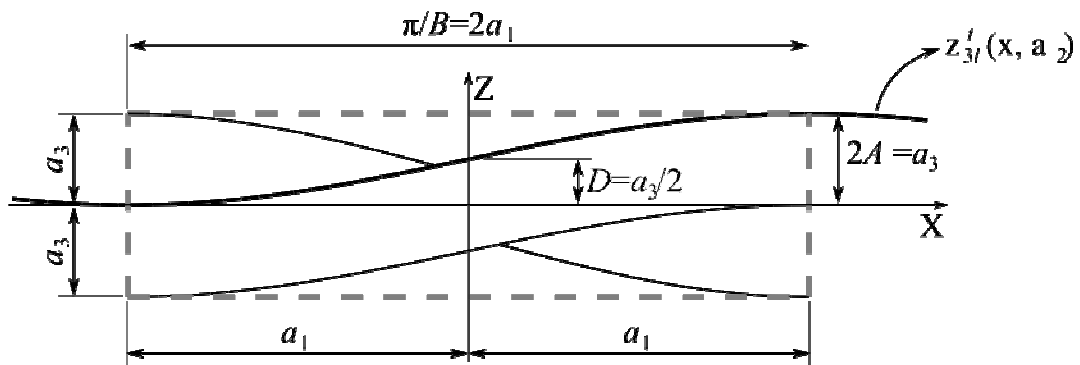


Figura 3.2.1.2 Secció frontal del pla ZX

Un cop localitzada la sinusoide que s'estudia, es definiran els seus paràmetres. Quan estudiem la cara frontal XZ, cal tenir present que la secció perpendicular a l'eix 'y' està situada a la posició ($y = a_2$). A la figura 3.2.1.1 s'observa que el recorregut de la corba està dintre del interval $[-a_1; a_1]$. L'amplitud de la ona queda definida per el paràmetre A, en el dibuix s'aprecia que $A = a_3/2$. Com ja hem dit, B representa la freqüència de la ona i en el nostre cas veiem que $B = \pi/2a_1$. El paràmetre C que serveix per corregir l'ona, en aquest cas serà igual a zero. Per acabar definint

aquesta corba, només ens queda el paràmetre D que introdueix el desfasament de la corba. El valor que pren D és $a_3/2$. Si ens fixem en la corba que defineix la part inferior de l'ordit 3, podem apreciar que és paral·lela a la que hem estudiat prèviament. La única variació que té, és el factor de desfasament, per tant, en aquest cas A , B i C tenen els mateixos valors i $D = -a_3/2$. Arribats aquest punt podem dir que les equacions de l'ordit 3 en el pla XZ frontal ja estan definides.

Definides les corbes de l'ordit 3, ja podem començar a tractar les dues funcions que ens queden pendents. En aquest cas, estarem parlant de la funció que defineix el superior de la trama 1 i la funció que defineix l'inferior de la trama 2. Les funcions inferior trama 1 i superior trama 2 ja s'han solucionat quan s'estava tractant l'ordit 3. Per visualitzar quines funcions es tractaran, es pot mirar les línies en negreta de la figura 3.2.1.3.

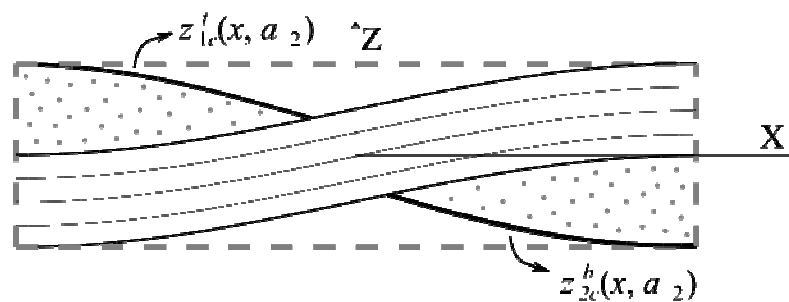


Figura 3.2.1.3 Corbes trama 1 superior i trama 2 inferior

Visualitzades les corbes que s'estudiaran, a continuació determinarem els paràmetres i el mètode utilitzat per obtenir-les. Per tenir una orientació, cal mirar la figura 3.2.1.4. Aquesta figura representa els paràmetres necessaris per obtenir la trama 1 superior (z'_{1c}).

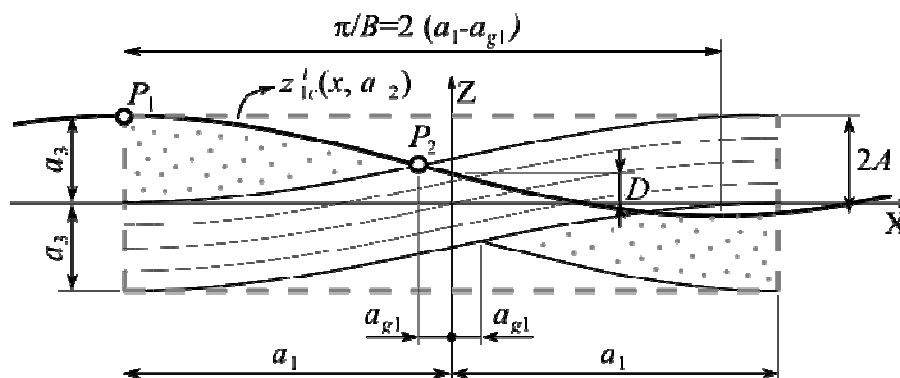


Figura 3.2.1.4 definició dels paràmetres de la trama 1 superior

Per la determinació de les dues corbes restants el procés serà una mica més laboriós. Tot i així, només ens centrarem en buscar la corba dibuixada en negreta a la figura 3.2.1.4. La segona corba que ens queda, la podrem deduir com ja hem fet abans amb l'ordit 3 o repetint el procés que tot seguit explicarem.

Ens trobem en el mateix pla XZ a la coordenada ($y = a_2$). El domini de la corba en qüestió està dins del interval $[-a_1; -a_{g1}]$. L'amplitud de la corba és A i el seu valor és $(a_3/2) \cdot [1 + \sin(\pi \cdot a_{g1}/2 \cdot a_1)]$, aquest resultat s'obté del domini i el pla en que es treballa. El valor que tindrà el paràmetre B , factor que defineix el període, és igual a $\pi/(2 \cdot a_1 - 2 \cdot a_{g1})$. Finalment, per determinar els valors de C i D caldrà imposar dues restriccions que s'anomenen P_1 i P_2 . Com es pot veure a la figura 3.2.1.4 el primer punt es situa a la part superior esquerra i el segon punt a l'encreuament amb l'ordit 3. Per tant, les coordenades del primer punt seran $x = -a_1$ i $z = a_3$. El segon punt tindrà per coordenades $x = -a_{g1}$ i per trobar el valor de les ordenades (z) substituïrem a l'equació de l'ordit 3 superior $x = -a_{g1}$.

En aquest moments es coneix amb exactitud la geometria de tota la cara frontal del pla XZ. Per determinar les equacions posteriors del pla XZ situat a l'alçada ($y = -a_2$) caldrà repetir el procés explicat anteriorment. Finalment, per conèixer les equacions del pla YZ, tant sols s'hauran de fer uns petits canvis en les equacions del pla XZ. Aquest canvis són els següents: canviar totes les x per y ($x \rightarrow y$) i substituir els subíndex 1 per 2 ($1 \rightarrow 2$).

3.2.2 Mètode de resolució de les equacions final de passada

Com ja s'ha dit en passos previs necessitarem definir les equacions final de passada per poder acabar de determinar la geometria completa. Les seccions que s'estudiaran passaran per les següents coordenades: en el pla XZ, farem dos talls quan $y = \pm a_{g2}$ i per el pla YZ quan $x = \pm a_{g1}$.

Tot i així en aquest apartat només tractarem una de les quatre seccions necessàries, ja que totes tenen el mateix mètode de resolució i podem trobar per semblança la resta d'equacions.

A la figura 3.2.1 s'ha vist de forma aproximada la geometria que tenen les seccions finals de passada. Val a dir que en aquests talls seran necessàries 5 funcions per determinar les sinusoides. Si es mira la figura 3.2.2.1 veurem quin aspecte té una secció final de passada.

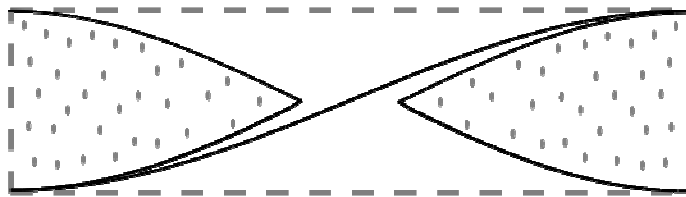


Figura 3.2.2.1 Secció final de passada

Un cop vista la secció final de passada es pot comprovar que no necessitarem cap altre tipus de funció que la utilitzada en els altres casos. La determinació de la geometria seguirà dues parts diferenciades. Per una banda, es buscarà la sinusoide que descriu un semiperíode i per l'altre, es resoldrà les quatre equacions que tanquen les seccions amb punts.

La primera corba és fàcil de trobar si coneixem les equacions frontals i posteriors. Els paràmetres B i C tindran els mateixos valors que l'ordit o la trama a qui pertanyin. El següent pas, serà determinar els paràmetres A i D. El factor corrector D s'obté imposant la condició que passa per $z=0$. Per acabar amb aquesta equació, l'amplitud A s'obté igualant dues funcions que coincideixen en el mateix punt. Per entendre amb més claredat aquesta última restricció, mirem la figura 3.2.2.2. En aquesta figura hi ha dos cercles vermells amb unes fletxes que indiquen el punt on s'han d'igualar dues equacions per tal d'obtenir el paràmetre A. En el cas de la figura, les funcions que es necessiten són: per una banda la trama 2 inferior en el pla YZ i per l'altre, l'equació de la qual busquem el paràmetre A que està marcada en vermell en el pla XZ. Les coordenades del punt que s'està

estudiant son $x = a_1; y = -a_{g2}$ la coordenada 'z' no es pot saber directament es farà servir la corba trama 2 inferior en el pla ZY i el punt $y = -a_{g2}$.

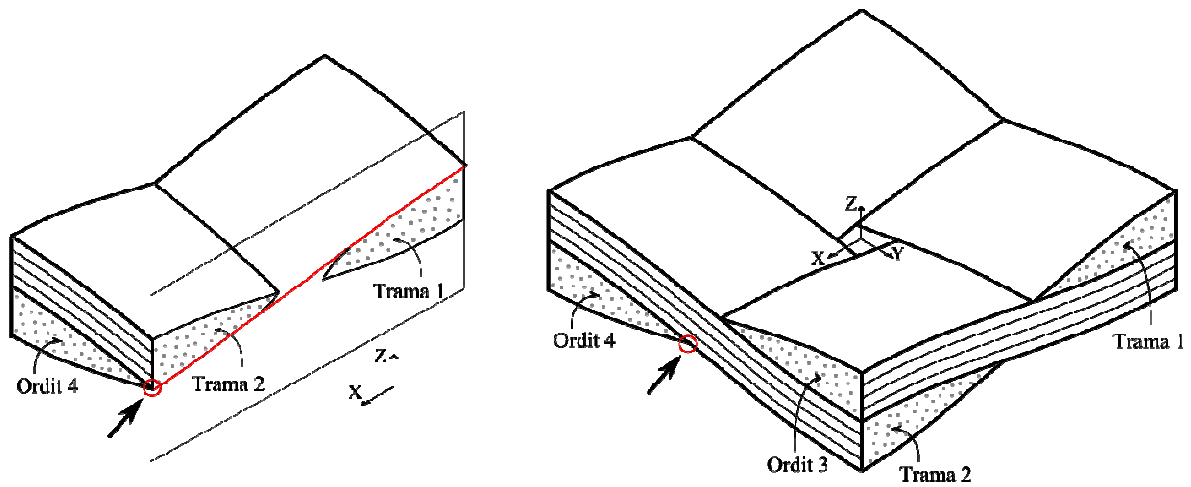


Figura 3.2.2.2 Secció final de passada amb la corba central vermella

Conegut el mètode d'obtenció de la corba central ens podem centrar en les quatre equacions que ens queden per estudiar. Per començar a tractar aquest problema ens ajudarem de la figura 3.2.2.3.

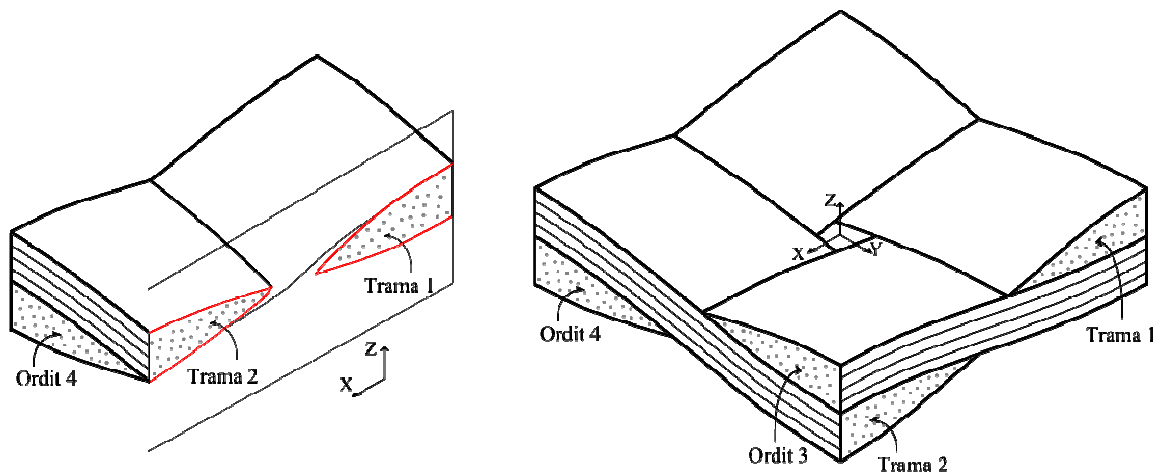


Figura 3.2.2.3 Secció final de passada amb corbes de trama 1 i 2 en vermell

Per aconseguir una millor comprensió de la resolució del problema, en aquest apartat es tractarà una sola corba de les quatre que surten fent una secció final de passada. Tot seguit, marcarem a la figura 3.2.2.4 la corba que estudiarem i els factors necessaris per la seva resolució.

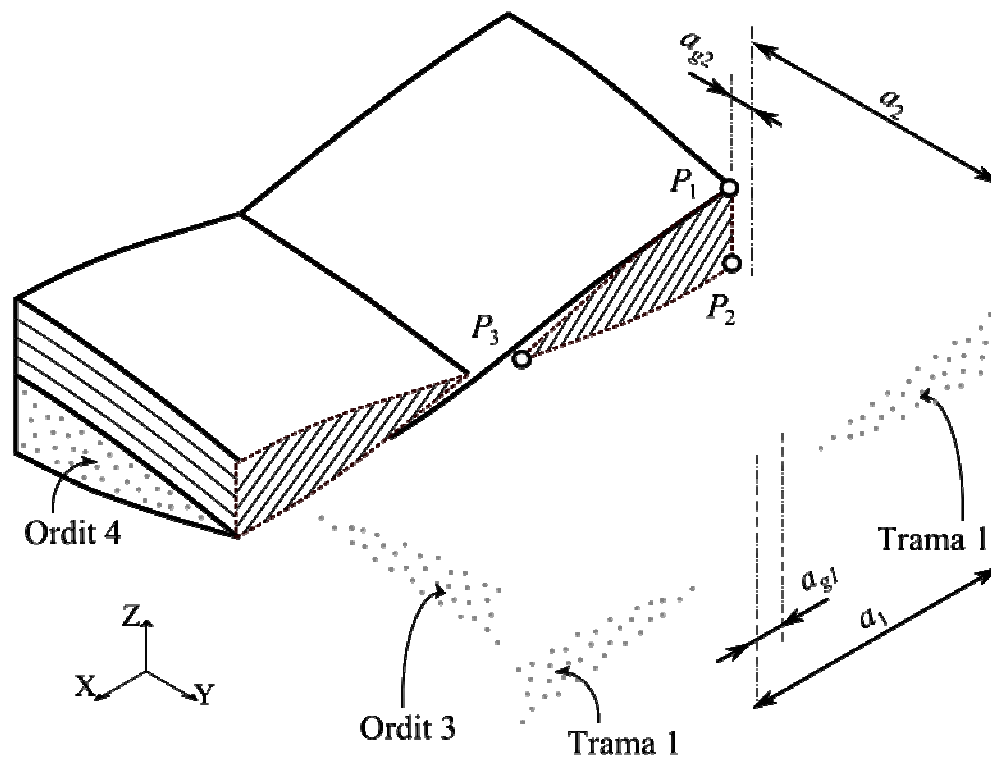


Fig. 3.2.2.4 Secció final de passada amb cotes i punts necessàries per la seva resolució

Observant la figura superior s'aprecien tres punts (P_1 , P_2 i P_3) que són els necessaris per determinar dues de les quatre funcions de la secció final de passada. En el nostre cas només caldrà mirar els punts P_1 i P_3 , perquè es farà l'estudi de la corba trama 1 superior a la secció final de passada en el pla XZ . Un cop coneguda l'equació que es busca, determinarem el mètode de resolució. Com sempre hi ha quatre paràmetres per determinar A , B , C i D . Per als paràmetres B i C es suposen coneguts i es força el seu valor. Per tant, B pren el valor $\pi/(2 \cdot a_1 - 2 \cdot a_{g1})$ i el factor corrector C serà $\pi \cdot (2 \cdot a_1 - a_{g1}) / 2 \cdot (a_1 - a_{g1})$. Els valors de B i C no s'han agafat a l'atzar, sinó que s'han fet servir les equacions frontals i posteriors que ja es coneixen. Per acabar la resolució de la corba, s'han determinat els paràmetres A i D . Per conèixer aquests dos factors es necessitaran els punts P_1 i P_3 . Per aconseguir el nostre objectiu s'han igualat dos parelles d'equacions en els punts P_1 i P_2 . Per el cas particular que s'està explicant, les coordenades de P_1 són $x = -a_1$ $y = -a_{g2}$ i les del P_2 a $x = -a_{g1}$ $y = -a_{g2}$. Substituint aquestes coordenades a les funcions dels plans frontals i posterior que ja es coneixen s'obtidran els valors de la coordenada z . Un cop conegudes les posicions de P_1 i P_3 , es podran igualar les dues parelles

de funcions de les quals, dues ja en coneixem tots els factors A, B, C, D i les altres dos resten per conèixer A i D. Si s'ha fet bé el procés explicat, en aquest moment només cal resoldre el sistema de dues equacions amb dues incògnites de les quals s'extrauran els valors de A i D.

Per conèixer les tres equacions que resten d'aquesta secció, només s'haurà de repetir el mètode desenvolupat anteriorment per cada una d'elles. Finalment, si es coneix tota una secció final de passada, es pot arribar a deduir el valor de la resta d'equacions per semblança.

S'ha fet alguna comprovació per estar segurs que el mètode escollit és prou realista. La forma per comparar la realitat amb el model es limita en buscar l'àrea que tenen diferents plans. Aquesta comprovació ens ha portat a un resultat molt satisfactori. La desviació que hi ha entre les dues geometries no supera en cap moment el 0.5%, per tant, no cal retocar cap equació. Es considera que una desviació tant petita no farà fluctuar els resultats de la simulació per elements finits.

3.3 Nomenclatura de les equacions

La resolució de les equacions en el pla, ens ha fet veure que es necessiten moltes funcions per definir el volum complet. Per evitar errors o equivocacions s'ha buscat una nomenclatura d'identificació per cada una de les equacions.

El primer que farem per explicar la nomenclatura escollida, serà visualitzar quina forma té. La figura 3.3.1 intenta representar la nomenclatura per diferenciar les equacions.

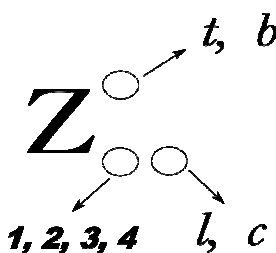


Fig. 3.3.1 Nomenclatura de les equacions

Un cop visualitzada la figura de la pagina anterior, ja es pot començar a explicar cada un dels paràmetres. La primera lletra que tenim és la 'z' majúscula, com que totes les equacions que estudiem determinen la posició de la 'z' en funció de la 'x' o la 'y' segons el pla, és comprensible haver decidit començar per aquesta lletra.

El subíndex que queda a dalt ens determina si estem parlant de la funció superior o inferior. S'ha decidit posar la 't' (top) per el superior i la 'b' (bottom) per inferior.

Per altre banda tenim el primer subíndex inferior que es determina amb un numero. Si ens fixem els números van del 1 al 4. Com era d'esperar aquest subíndex ens dirà quin ordit o trama s'està descrivint.

Finalment, tenim la 'l' (longitudinal seccion) o 'c' (cross seccion). Aquest dos paràmetres ens diuen si s'està parlant de les fibres que han quedat paral·leles al pla de tall o per el contrari, si son les que han quedat perpendiculars a la direcció de les fibres.

Com ja s'ha pogut comprovar, la nomenclatura està en anglès. Existeixen dues raons per les quals s'ha mantingut la nomenclatura en anglès. La primera raó, és per el simple fet que els primers treballs que es varen començar a desenvolupar sobre aquest tema eren amb anglès. La segona raó, és per intentar mantenir els paràmetres que es feien servir en el treball que ampliem. Tornar a crear noves variables provocaria molts errors..

3.4 Llistat de les equacions obtingudes

En aquest apartat podrem veure totes les equacions que es necessiten per poder representar la geometria bàsica i algunes representacions gràfiques obtingudes a traves del programa matlab.

Per poder entendre i comparar les diferents equacions s'ha decidit posar els paràmetres en taules. Les taules que s'aniran veient representaran les equacions amb aquest ordre: frontal XZ, frontal YZ, posterior XZ, posterior YZ, final de passada frontal XZ, final de passada posterior XZ, final de passada frontal YZ i final de passada posterior YZ. El numero de taules necessàries seran vuit. A la part superior de cada taula es posarà la coordenada 'x' o 'y' per saber quina secció s'està descrivint. Les taules inclouen a la part esquerra, la nomenclatura que s'ha explicat a l'apartat anterior i a la part superior els paràmetres A, B, C i D. En definitiva, quan es vulgui la funció representativa de cada corba s'hauran de posar els paràmetres corresponents a l'equació (1).

Aquest apartat també inclou algunes de les representacions gràfiques que s'han obtingut amb l'ajuda del programa matlab. Com ja hem anat repetint al llarg del projecte, no serà necessari fer totes les representacions gràfiques, ja que la resta de dibuixos són iguals als quatre que apareixeran. Els gràfics representaran les seccions dels dos plans frontals i els dos finals de passada frontals de la geometria bàsica. Cada una de les representacions queda definida per la taula de paràmetres que té a la part superior.

Pla XZ frontal ($y = a_2$)

	A	B	C	D
Z_{3l}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0	$\frac{a_3}{2}$
Z_{3l}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{2c}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{2c}^b	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2 \cdot a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{1c}^t	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2 \cdot a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{1c}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0	$\frac{a_3}{2}$

Taula 3.4.1 Pla XZ frontal ($y = a_2$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right)$$

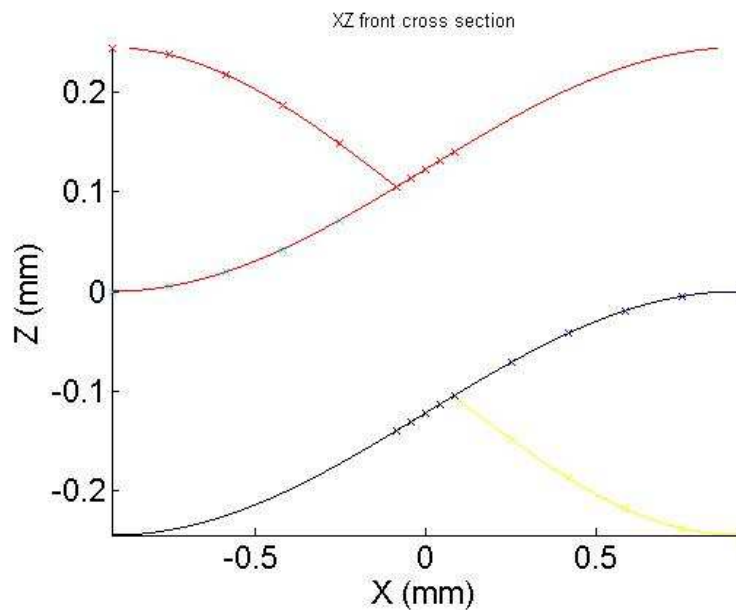


Figura 3.4.1 Representació gràfica pla XZ frontal

Pla YZ frontal ($x = a_1$)

	A	B	C	D
Z_{2l}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0	$\frac{a_3}{2}$
Z_{2l}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{4c}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{4c}^b	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{\pi(2 \cdot a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{3c}^t	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{\pi(2 \cdot a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{3c}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0	$\frac{a_3}{2}$

Taula 3.4.2 Pla YZ frontal ($x = a_1$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

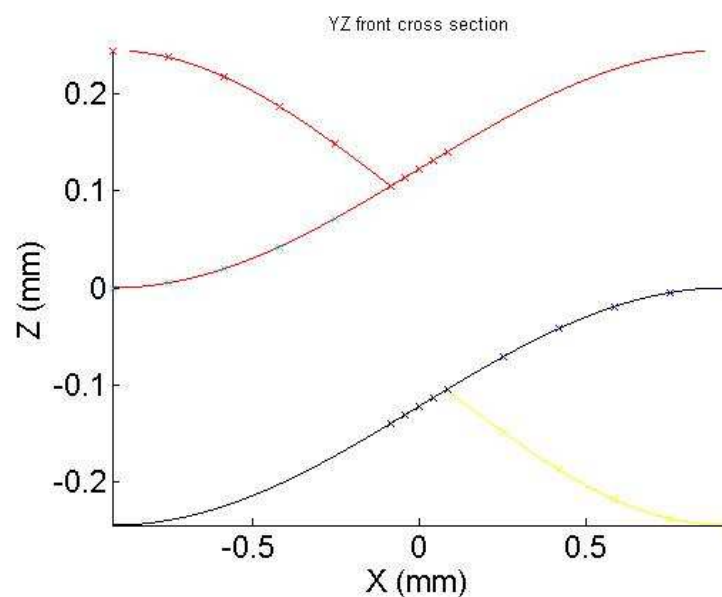


Figura 3.4.2 Representació gràfica Pla YZ frontal

Pla XZ posterior ($y = -a_2$)

	A	B	C	D
Z_{4l}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π	$\frac{a_3}{2}$
Z_{4l}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{1c}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{1c}^b	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2 \cdot a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{2c}^t	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2 \cdot a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{2c}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π	$\frac{a_3}{2}$

Taula 3.4.3 Pla XZ posterior ($y = -a_2$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right)$$

Pla YZ posterior ($x = -a_1$)

	A	B	C	D
Z_{1l}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π	$\frac{a_3}{2}$
Z_{1l}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{3c}^t	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π	$-\frac{a_3}{2}$
Z_{3c}^b	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{\pi(2 \cdot a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{4c}^t	$\frac{a_3}{2}(1+s_1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{\pi(2 \cdot a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{a_3}{2}(1-s_1)$
Z_{4c}^b	$\frac{a_3}{2}$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π	$\frac{a_3}{2}$

Taula 3.4.4 Pla YZ posterior ($x = -a_1$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

Pla XZ final de passada frontal ($y = a_{g2}$)

	A	B	C	D
Z_{3l}	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0	0
Z_{2c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{2c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{1c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{1c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$

Taula 3.4.5 Pla XZ final de passada frontal ($y = a_{g2}$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right) ; \quad s_2 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

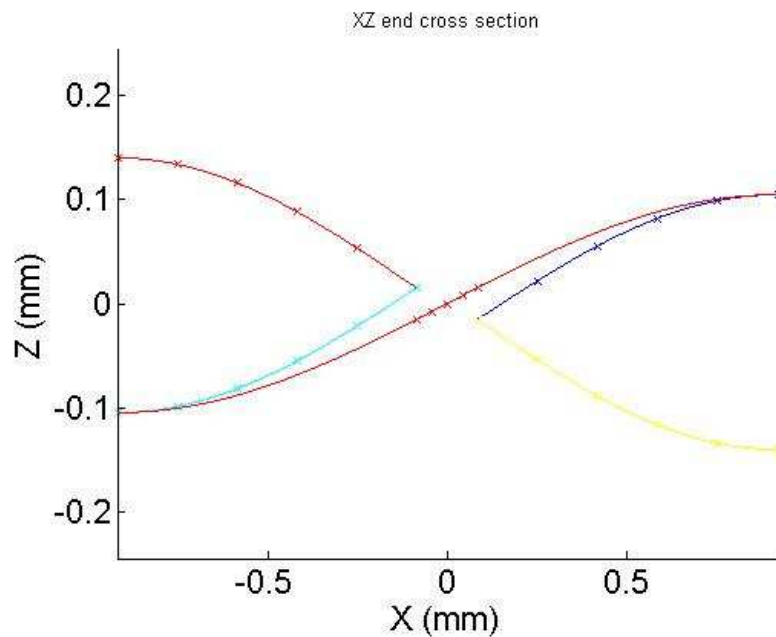


Figura 3.4.3 Representació gràfica pla XZ final de passada frontal

Pla YZ final de passada frontal ($x = a_{g1}$)

	A	B	C	D
Z_{2l}	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0	0
Z_{4c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{\pi(2a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{4c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{\pi(2a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{3c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{\pi(2a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{3c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_2 - a_{g2})}$	$\frac{\pi(2a_2 - a_{g2})}{2(a_2 - a_{g2})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$

Taula 3.4.6 Pla YZ final de passada frontal ($x = a_{g1}$)

$$s_2 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right) ; \quad s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

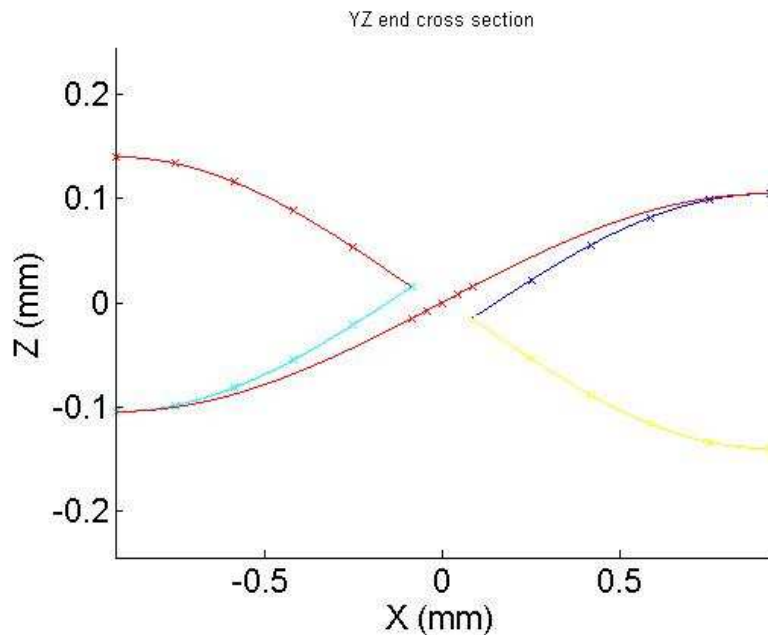


Figura 3.4.4 Representació gràfica pla YZ final de passada frontal

Pla XZ final de passada posterior ($y = -a_{g2}$)

	A	B	C	D
Z_{4l}	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π	0
Z_{1c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{1c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{2c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{2c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$

Taula 3.4.7 Pla XZ final de passada posterior ($y = -a_{g2}$)

$$s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right) ; \quad s_2 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

Pla YZ final de passada posterior ($x = -a_{g1}$)

	A	B	C	D
Z_{1l}	$\frac{a_3}{2}(1-s_1)$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π	0
Z_{3c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{3c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{4c}^t	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 + 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$
Z_{4c}^b	$\frac{a_3}{2}(s_1 \cdot s_2 - 1)$	$\frac{\pi}{2(a_1 - a_{g1})}$	$\frac{\pi(2a_1 - a_{g1})}{2(a_1 - a_{g1})}$	$-\frac{a_3}{2}(s_1 - 1)s_2$

Taula 3.4.8 Pla YZ final de passada posterior ($x = -a_{g1}$)

$$s_2 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g1}}{a_1}\right) ; \quad s_1 = \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\pi \cdot a_{g2}}{a_2}\right)$$

4. ORIENTACIÓ DE LES FIBRES

4.1 Estudi de les orientacions

Abans de començar a tractar el tema de les orientacions, si s'ha mirat l'índex, podem apreciar que surt repetit dues vegades. S'ha decidit repetir aquest apartat per diferenciar les feines que ha aportat al projecte. El primer cop que apareix el tema, es fa l'estudi de les equacions necessàries per descriure les orientacions. El segon cop que apareix, es parla d'implementació de les equacions en el programa d'elements finits. Per dir-ho d'una forma senzilla, el primer cop serà en dues dimensions i el segon en tres.

Quan es parla de la direcció del material, ens referim a quina orientació tenen els fils en cada punt de la seva trajectòria. Ens interessa tenir controlada la orientació, per fer entendre al programa d'elements finits com estan treballant les diferents fibres i aconseguir uns resultats correctes.

En aquest apartat, parlarem del mètode que es feia servir en el projecte que ampliem i seguidament de la nova estratègia que millorarà la anterior.

Per parlar del mètode que es feia servir en el projecte anterior, cal explicar abans, que cada una de les funcions que defineix la trajectòria del fil, està dividida per tres trams. La raó per la qual es divideixen les funcions per trams, és per facilitar la programació amb Matlab. Si mirem la figura 4.1.1 entendrem el concepte.

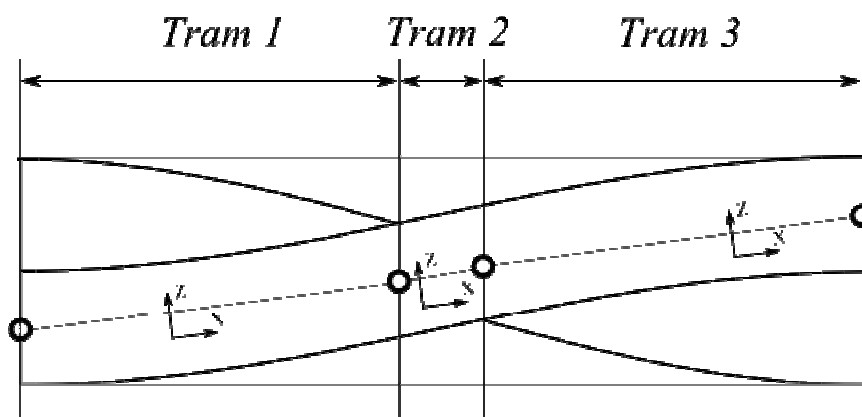


Figura 4.1.1 Divisió per trams d'una secció frontal

El mètode escollit per el projecte que ampliïm, era aproximat i seguia els següents passos: buscar el punt inicial i el punt final de cada tram que s'estudiés, representar una línia mitjançant els dos punts i assumir la direcció del fil igual a la línia que formessin els dos punts. Per tant, en un pla o fil de fibra existien tres direccions diferents, una per cada tram. Analitzant la figura 4.1.1 podem entendre que les orientacions dels fils no estan definides correctament. Tots els trams tenen la mateixa orientació aproximadament, i per tant, no es té en compte la curvatura exacte que descriuen les fibres.

Després d'explicar el mètode antic i veure la representació gràfica, es pot entendre perquè s'ha buscat fer un canvi en aquesta part de la programació i veure els canvis que adopten els resultats.

La solució que vol implementar aquest projecte, és donar amb exactitud la orientació dels fils. Per aconseguir el nostre objectiu, s'ha decidit fer ús de les derivades. Si refresquem la memòria, quan derivem una funció de la qual coneixem el seu recorregut o trajectòria, s'obté una segona funció que determinarà el pendent en cada punt. Així que, fent servir les derivades podrem conèixer amb exactitud l'orientació de cada tram en cada punt que decidim estudiar. Mirem la figura 4.1.2.

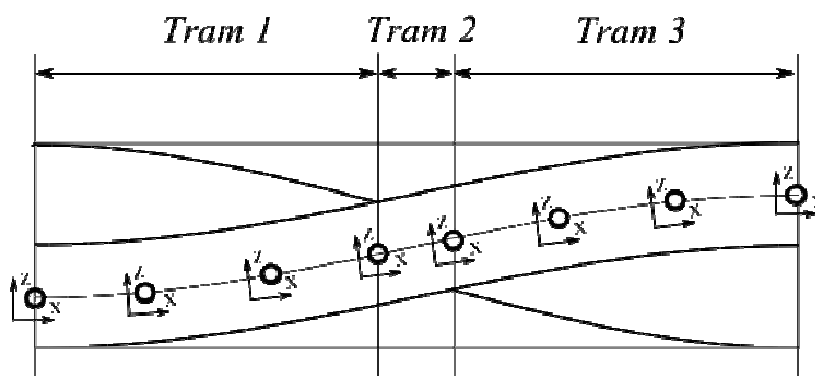


Figura 4.1.2 Orientacions amb la derivada

Si comparem els dos mètodes, veiem clarament que l'antic ens limitava a tres orientacions, una per cada tram. La solució de les derivades ens deixarà decidir el nombre d'orientacions que vulguem per cada tram. La figura superior ho exemplifica.

4.2 Funció de la corba d'orientacions

Un cop entesa la solució adoptada per determinar les orientacions de les fibres, només ens queda determinar el valor numèric de la derivada.

En un primer moment es va fer un estudi amb vuit derivades. Aquestes eren les que sortien dels plans frontals, posteriors i finals de passada. Com ja es preveia coneixent la geometria que estudiem, únicament es van trobar dues derivades diferents. Totes les derivades de final de passada eren iguals i totes les frontals i posteriors també. La única diferència que es va trobar era el seu factor de desfasament. A banda d'aquest fet que demostrava que la nostra geometria estava ben definida, es va prendre la decisió de gràfica les dues derivades per veure quina diferència tenien i si la seva forma era coherent.

A la figura 4.2.1 es poden veure les dues gràfiques que surten de les derivades. La gràfica que arriba als dotze graus ve determinada per els plans frontals i posteriors. La segona i última gràfica que assoleix els deu graus aproximadament, representa els plans final de passada.

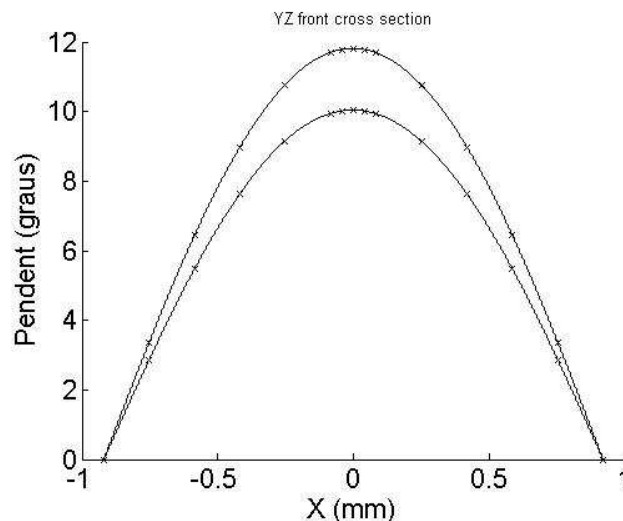


Fig. 4.2.1 Representació gràfica dels pendents

El resultat de la representació gràfica son dues paràboles amb dos màxims o dos mínims segons el pla que s'estudia. També es pot veure al gràfic que les

paràboles parteixen de la posició $x = -0.95$ i tornen a trobar el zero a la posició $x = 0.95$. Aquests resultats són correctes perquè la representació gràfica es va fer amb una geometria bàsica que tenia per domini els valors que s'han dit. Per acabar de justificar que la gràfica que es visualitza determina les orientacions amb correcció, es pot mirar el dibuix de la geometria bàsica i comparar els pendents que ens surten representats. La funció que determina la trajectòria del fil surt d'una posició horitzontal i va augmentant el seu pendent fins que arriba a la posició $x = 0$, quan passa el centre de la peça el pendent decreix fins que torna a trobar la posició horitzontal.

Un cop comprovades les corbes d'orientació es va pensar en simplificar el problema. Mirant la diferència que hi ha entre la representació gràfica dels dos pendents, es van pensar dues possibles vies per determinar les orientacions que s'explicaran en els següents paràgrafs.

La primera via que es va pensar, era fer una regressió lineal entre els dos pendents durant la distància que separava el frontal de la fibra amb el seu final de passada.

La segona opció, era deixar de banda la funció derivada de final de passada (a la figura 4.1.1 paràbola petita) i simplificar el problema. Així que en aquest segon cas es suposaria que el fil de fibra té la mateixa orientació per totes les possibles seccions que hi ha entre el tall longitudinal i el final de passada.

Finalment, es va decidir simplificar el problema i definir la orientació igual per a totes les seccions. La decisió es va prendre veient la diferència de dos graus que apareix al gràfic. Per tant, només ens farà falta una sola derivada, ja que les altres seccions longitudinals tenen el mateix resultat.

Tota la geometria és simètrica en certa manera, per això quan trobem la primera derivada només haurem de variar els eixos i el període segons el pla que s'estudia. Si mirem l'equació (2), a la pagina següent, entendrem com queda la derivada de l'equació (1) utilitzada anteriorment per definir la geometria.

$$z(x) = A \cdot \cos(B \cdot x + C) \cdot B \quad (\text{Eq.2})$$

Analitzant aquesta equació veurem que no varia excessivament de la primera que s'havia explicat. Cal recordar que el paràmetre C ens servia per ajustar la fase de la sinusoide. Aquest factor ens serà de gran utilitat a la hora de trobar l'equació del segon pla YZ, és l'únic factor que varia entre totes les equacions d'orientacions. A continuació, es posaran els resultats de les equacions d'orientacions que s'ha obtingut mitjançant el programa MAPLE. A la taula 4.1.2. posarem els paràmetres de les diferents equacions.

	A	B	C
Pla XZ Frontal	$a_3 \cdot \pi$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	0
Pla XZ Posterior	$a_3 \cdot \pi$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_1}$	π
Pla YZ Frontal	$a_3 \cdot \pi$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	0
Pla YZ Posterior	$a_3 \cdot \pi$	$\frac{\pi}{2 \cdot a_2}$	π

Taula 4.1.2 Paràmetres de les equacions d'orientació

5. CREACIÓ DEL MODEL TRIDIMENSIONAL

La creació del model tridimensional es realitzarà amb el programa ANSYS com ja s'havia introduït al principi del treball. Per fer aquest procés, no serà suficient inserir les equacions que hem trobat amb el MAPLE a l'apartat 3, és necessari fer una preparació perquè el programa d'elements finits entengui el que li demanem. Cal ser conscients que una funció matemàtica té infinits punts i els elements finits necessiten un nombre concret de punts per poder fer la representació gràfica. Aquest procés es dividirà en dues parts, per una banda parlarem de la geometria i per l'altre de les orientacions.

5.1 Geometria bàsica

El procés d'adaptació de les corbes per el programa d'elements finits es realitzarà amb el MATLAB. El programa tractarà cada una de les funcions que s'ha trobat i les simplificarà en 5 o 6 punts segons el tram de la corba. Els punts que trobem els anomenarem punts claus (*keypoints* en anglès). Els punts claus s'exportaran al programa ANSYS. El programa d'elements finits farà la unió dels punts claus de cada corba amb funcions d'interpolació cúbica (*spline*). El procés que s'ha explicat s'haurà de repetir per totes les seccions que s'han analitzat.

En aquest moment el programa d'elements finits ens mostrarà una geometria semblant a la figura 5.1.1.

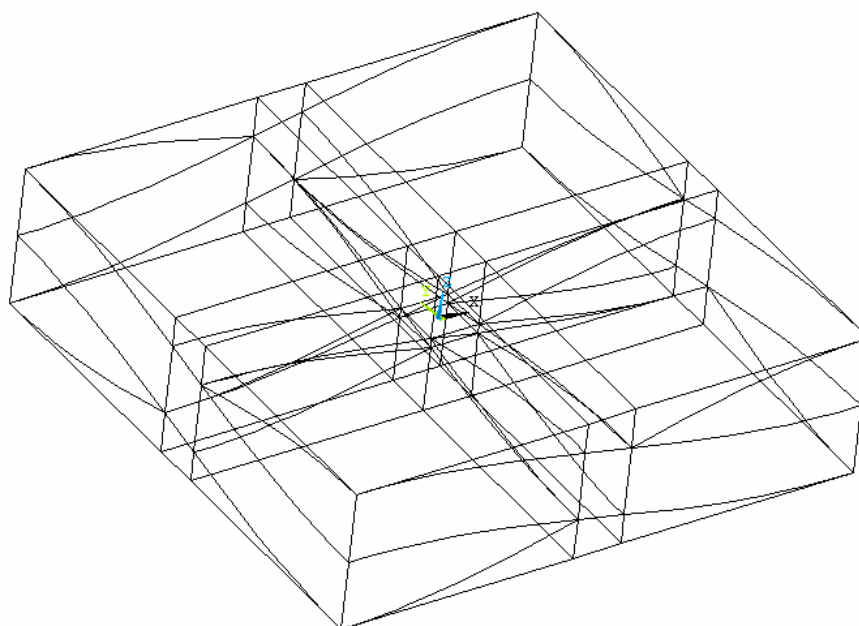


Fig. 5.1.1 Representació de la geometria amb ANSYS i corbes *spline*

Un cop simplifiquem les corbes originals amb corbes *spline*, caldrà definir les superfícies i finalment els diferents volums. En aquesta geometria bàsica, existeixen cinc volums diferents que es formen amb les línies i superfícies que hem comentat. Els quatre primers volums representen les dues trames amb els dos ordits i el cinquè volum representarà la matriu que envolta les fibres.

El programa d'elements finits necessita que li definim els diferents volums mitjançant els *keypoints*. El mateix programa ANSYS incorpora unes eines que faciliten l'obtenció de les superfícies i els volums fent ús de les línies *spline* i els seus respectius punts clau. El problema d'utilitzar aquestes eines, és que el procés esdevé manual i per tant, molt laboriós si s'estudien diferents geometries. Per aquesta raó, s'ha decidit allargar la programació que ens fa el tractament dels punts claus amb les línies *spline*. Per tant, l'arxiu MATLAB no només farà la simplificació de les corbes en punts, sinó que també buscarà les superfícies i els volums de la geometria bàsica.

La idea d'aquest projecte és analitzar les propietats de diferents fibres introduint únicament les mides obtingudes a partir de les microfotografies. Per això, s'ha decidit fer la rutina que hem explicat i així automatitzar tot el procés. Si mirem la figura 5.1.2 es podran veure representades algunes de les superfícies necessàries per definir els volums de la nostra geometria bàsica.

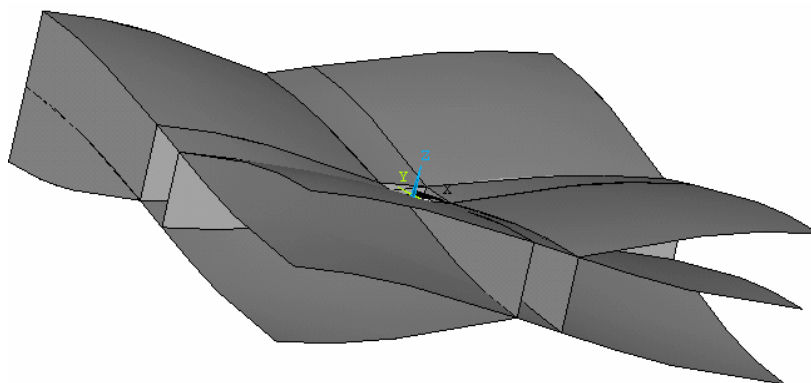


Fig. 5.1.2 Representació de les superfícies que formen el RVE

Després de tractar totes les dades mitjançant el programa MATLAB, s'extraurà del mateix programa un arxiu compatible amb ANSYS. L'arxiu que rebrà el

programa d'elements finits conté tots els punts clau, les corbes, les superfícies i els volums de totes les seccions que s'han tractat amb anterioritat. Totes les dades que rebrà l'ANSYS estan en un arxiu de text.

Quan el programa d'elements finits processa les dades de l'arxiu de text, reproduirà uns volums semblants a la figura 5.1.3. El dibuix de l'esquerra representa els volums de les fibres amb la matriu i el de la dreta només ensenya els volums de les fibres.

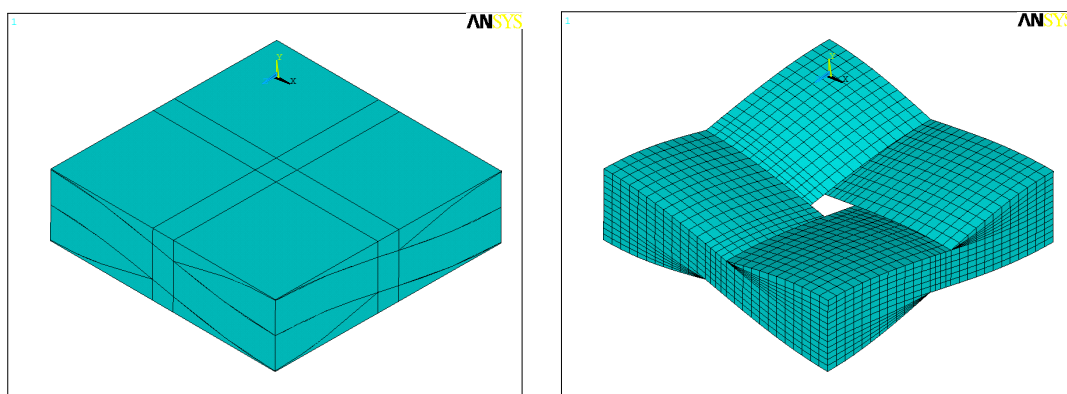


Fig. 5.1.3 Volums que defineixen la geometria bàsica amb ANSYS

Cal recordar que en apartats anteriors s'ha parlat de la divisió per trams de cada corba. Per programar la rutina de MATLAB també s'ha fet servir aquesta divisió de dades, per aquesta raó quan mirem cada un dels fils de la figura superior esquerra, veiem que estan dividits per diferents trams. Un tram o ordit està format per tres volums diferents.

5.2 Orientacions

Com ja s'ha dit a l'apartat 4, les orientacions apareixen dos cops en aquest projecte. El primer cop que es tracta aquest tema s'ha parlat de la simplificació del problema i de l'obtenció de l'equació que defineix les orientacions. En aquesta segona part es parlarà sobre la implementació en el programa d'elements finits.

Si recordem el que es feia en el projecte anterior quan es tractaven les orientacions, era donar una orientació per cada tram. D'aquesta manera s'obtenien

tres orientacions per cada fil de fibra. La modificació que incorpora aquest projecte, farà que per cada fil de fibra es pugui escollir un nombre d'orientacions il·limitat.

Per implementar les orientacions en el programa d'elements finits, es fa un tractament de dades amb el MATLAB semblant al de les corbes, superfícies i volums. El primer pas que es fa és introduir la derivada que hem tractat abans. Després s'escullen el nombre d'orientacions que definiria cada fil, s'ha decidit que més de quatre orientacions per tram seria exagerat. Finalment, es fa la implementació de les orientacions fent servir una ordre ANSYS anomenada "CSYS".

Un dels problemes que ens varem trobar quan buscàvem les orientacions va ser col·locar els eixos correctament. Quan es defineixen les orientacions amb ANSYS no és suficient dividir la derivada en els quatre punts que decidim, també s'haurà de controlar com queden representats els eixos de coordenades en cada punt. Per aquesta raó, segons el pla que s'estigués definit s'hauria de rotar els eixos "x" o "y", de tal manera que l'eix "x" sempre es situes paral·lel a la fibra. Per entendre millor aquest concepte mirem la figura 5.2.1.

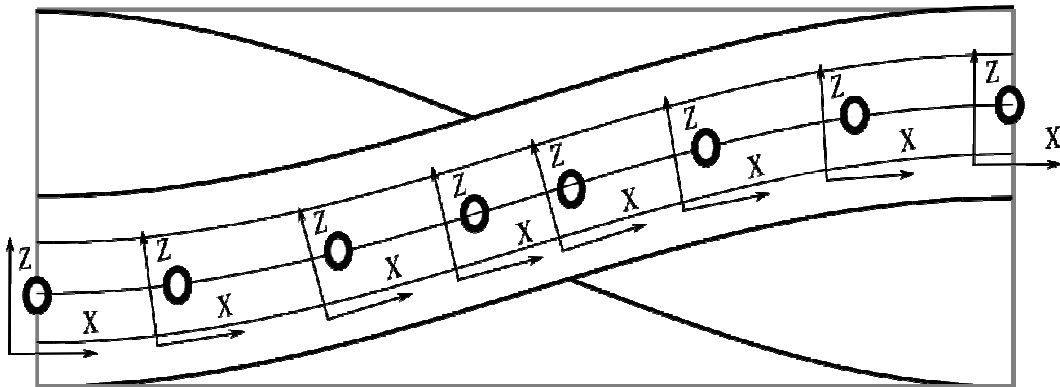


Figura 5.2.1 Orientacions d'un fil de fibra

La figura superior representa les orientacions que té un fil de fibra en tot el seu domini. Si ens fixem hi ha un seguit d'eixos de coordenades que segueixen la inclinació de la fibra. No es pot determinar el pla que s'està visualitzant perquè quan es tracta d'orientacions sempre veurem els eixos "x" i "z".

Per acabar d'explicar aquest apartat, podem visualitzar com queden definides les orientacions amb el programa ANSYS. Figura 5.2.2. Aquest dibuix és un element representatiu del volum (RVE) d'un sola l'amina sense la part de resina que tapa les fibres.

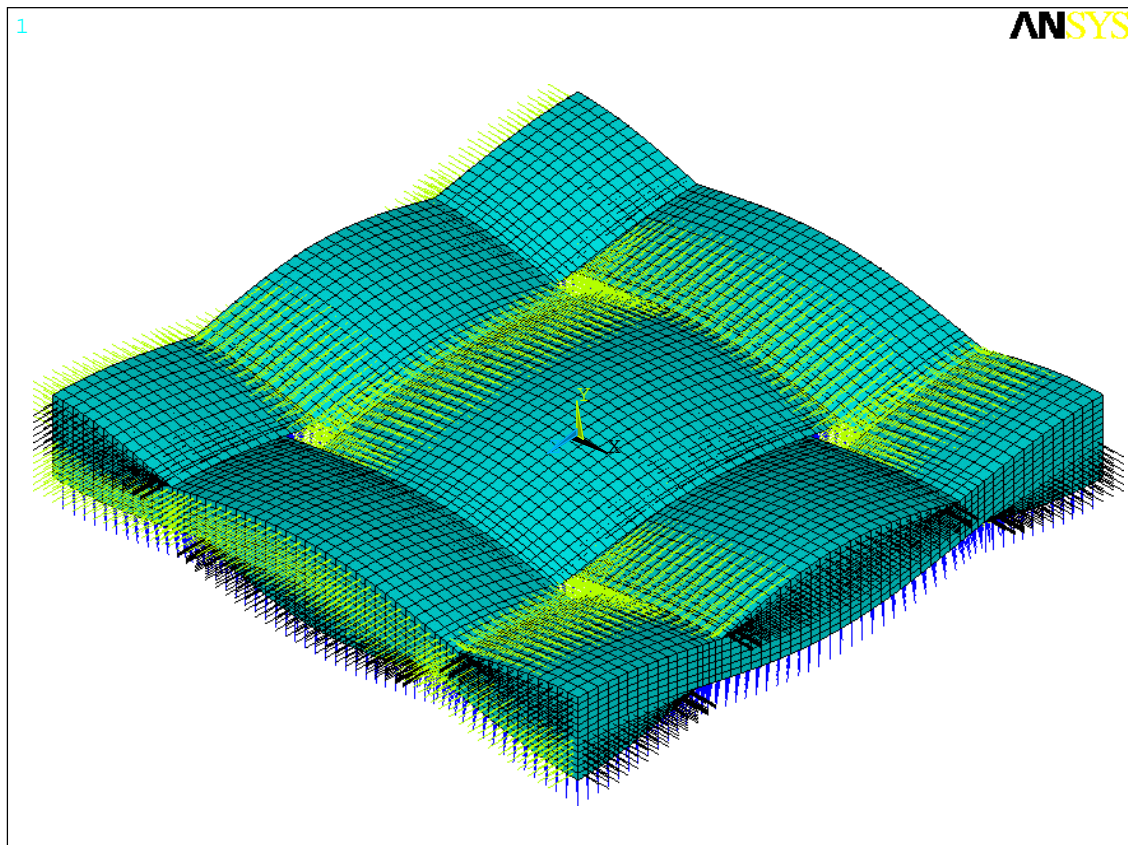


Figura 5.2.2 Orientacions del RVE en iso-fase

6. MODELITZACIÓ PER ELEMENTS FINITS

La modelització per elements finits es realitzarà amb el programa ANSYS com ja hem dit en passos previs. Aquest programa efectua els càlculs mitjançant el mètode dels elements finits. El mètode citat, fa una aproximació dels problemes continus o reals, de tal forma que:

- El continu es divideix en un nombre finit de parts o “elements” mitjançant els “nodes”. Un node consisteix en un punt característic d’un element i conté uns paràmetres associats que especifiquen el seu comportament. Una altre funció que tenen els nodes és la unió entre elements adjacents.

- El conjunt de tots els elements amb els seus nodes formen la geometria aproximada del model continu que s’estudia. El bloc que s’obté s’anomenarà mallat.

- La unió dels diferents elements creen un sistema complex d’equacions. La resolució del sistema es farà seguint les regles dels problemes discrets.

- Les incògnites que apareixen en forma de funció matemàtica s’implementaran a cada node. Per tant, cada node tindrà una equació característica que definirà el seu comportament.

- El comportament de cada element estarà regit per les equacions que tenen els nodes que el formen. Per resoldre el sistema, es faran servir les funcions d’interpolació o funcions de forma.

Per tant, el mètode dels elements finits es basa en la transformació d’un cos continu a un model discret aproximat. Així que, es podrà conèixer de forma aproximada el comportament de les fibres amb forma de teixit pla fent els passos que s’han explicat.

6.1 Tipus d'element finit

Com ja s'ha introduït a l'apartat anterior, necessitarem definir el volum representatiu de fibra mitjançant elements i nodes. Cal saber, que existeixen molts tipus d'elements i que cada un d'ells serveix per simular diferents estats.

En el cas que estem estudiant en tres dimensions, s'ha optat per utilitzar l'element en forma de cub. El programa d'elements finits ANSYS reconeix aquest tipus d'elements amb el nom de "SOLID95". Aquest element té forma hexaèdrica. Cada un dels vuit nodes que formen l'element tenen tres graus de llibertat U_x , U_y i U_z . Amb els elements i nodes que s'han seleccionat es podrà representar la forma complexa del teixit pla. A la figura 6.1.1 podem veure quina forma té un element SOLID95.

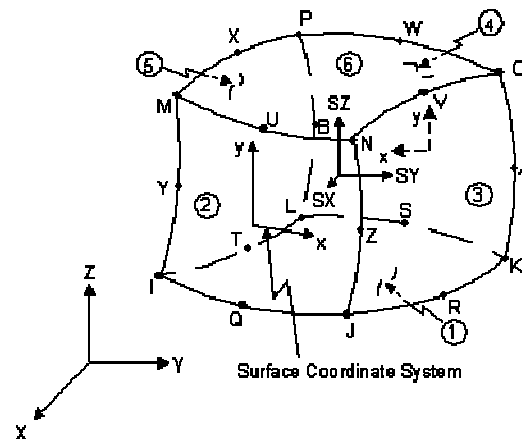


Fig. 6.1.1. Graus de llibertat d'un element SOLID95

Finalment, la figura 6.1.2 que apareix a la següent pàgina, representa el teixit de fibra amb resina mitjançant els elements SOLID95. Si descrivim breument la figura, es pot apreciar que està formada per un conjunt de cubs petits que representen els diferents elements. La unió de tots ells formen el mallat de la geometria. El mallat que apareix en aquesta figura és de gran densitat.

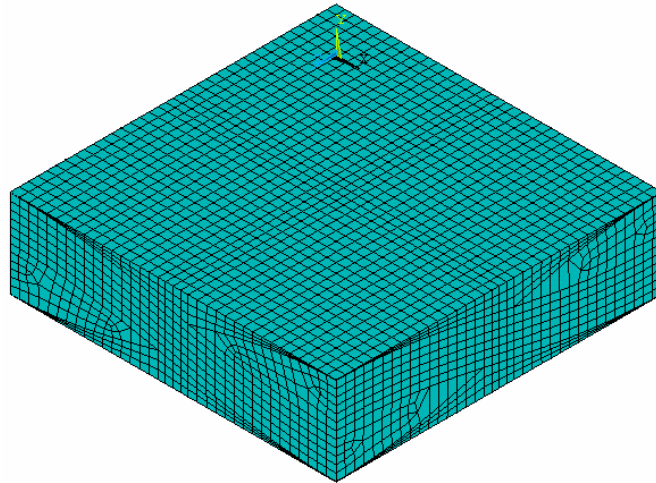


Fig. 6.1.2 Mallat del RVE

Un concepte interessant sobre el mallat que cal aclarir, és que la quantitat de cubs (element SOLID95), es a dir, la densitat de la malla influeix en el temps de càlcul i en la precisió de la solució. En alguns casos fins i tot, es decideix donar diferents densitats de malla per una mateixa peça. Si les disminucions de les densitats de malla es fan per una persona experimentada amb la simulacions per elements finits, es poden aconseguir els mateixos resultats reduint el temps de càlcul de forma sorprenent.

6.2 Fracció de volum del RVE

Per poder fer els càlculs de les propietats elàstiques i de ruptura de les fibres que volem analitzar, ens cal conèixer una dada molt important. Estem parlant del volum que ocupa un element que es troba en mig de les fibres i la resina. Cal tenir present que entre les fibres hi ha certa quantitat de resina. Aquesta resina serveix per unir totes les microfibras i així repartir els esforços entre totes elles. Per aquesta raó, donarem importància a la metodologia per trobar els diferents volums.

Per resoldre els volums no es faran servir valors numèrics ja que es vol fer un estudi de diferents fibres i resines. Per aquesta raó, es posaran totes les equacions parametritzades i al final ensenyarem a través d'una taula els resultats obtingut.

Els valors reals necessaris per la resolució dels volums, es podran conèixer experimentalment a través de diferents mètodes, com per exemple: el d'ignició

perduda (ASTM D2854), el de digestió àcida (ASTM 3171) o per l'extracció de solvent (ASTM C613).

Abans de començar amb la resolució del problema, explicarem la nomenclatura que es farà servir:

V_{rve} = volum total del RVE

V_y = volum total dels feixos

V_{bm} = volum de resina total

V_f = volum de resina continguda en els feixos de fibra

També es faran servir dos factors C_f i C_f' . La relació que hi ha entre els dos és la inversa i la manera de trobar-los s'explicarà al llarg d'aquest apartat.

El volum total ocupat per el RVE surt dels paràmetres que ens defineixen la geometria bàsica (a_1, a_2, a_3) o de la suma entre el volum total dels feixos (V_y) i el volum de resina total (V_{bm}). Per tant tenim:

$$V_{rve} = V_y + V_{bm} = 8 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \quad (\text{Eq.3})$$

Es farà servir el factor C_f' per obtenir una relació entre el volum de resina en els feixos de fibra (V_f) i el volum total dels feixos (V_y).

$$V_f = V_y \cdot C_f' \quad (\text{Eq.4})$$

De la mateixa manera que s'ha trobat el factor C_f' , també es pot trobar un paràmetre C_f que relaciona el volum total del RVE (V_{rve}) i el volum de resina en els feixos de fibra (V_f).

$$V_f = V_{rve} \cdot C_f \quad (\text{Eq.5})$$

Finalment, combinant les equacions (4) i (5) s'obté l'equació (6) que ens determinarà el factor (Cf') necessari per trobar les propietats elàstiques i de ruptura del teixit que es vulgui estudiar.

$$Cf' = Cf \frac{Vrve}{Vy} \quad (\text{Eq.6})$$

A la taula 6.2.1, apareixen els valors de Cf' que s'han obtingut mitjançant les equacions que hem presentat en aquest apartat. Els dos tipus de teixits que s'analitzaran en aquest treball són: fibra de carboni AS4-D amb una matriu de vinilester i fibra de vidre amb la matriu de resina epoxi. Cal aclarir que els valors necessaris per determinar els dos paràmetres Cf' s'han extret de treballs que buscaven el mateix objectiu que el nostre, millorar el coneixement de les fibres teixides.

	Cf'
fibra de carboni AS4-D amb vinilester	0.822
fibra de vidre amb epoxi	0.697

Taula 6.2.1 Valors del factor Cf'

6.3 Propietats elàstiques dels constituents

Les propietats elàstiques del material és un dels altres paràmetres que cal introduir en el programa d'elements finits per obtenir els resultats. El projecte que s'està desenvolupant a part de modificar la manera d'orientar les fibres, també vol fer una comparativa de diferents fibres que existeixen en el mercat. La intensió d'aquest apartat és ensenyar les diferents característiques necessàries per poder analitzar les fibres teixides. En aquest cas es parlarà de teixit de carboni AS4/vinilester i de la fibra de vidre/epoxi.

El nostre volum representatiu en tots els tipus de fibres estarà compost per dos material diferent. Els materials que el componen són: la matriu per una banda i

la fibra per l'altre. El primer que farem en aquest apartat és parlar de les matrius i finalment, acabarem parlant de les fibres.

La primera matriu que es descriurà en aquest apartat està feta de vinilester. Aquest tipus de resina és molt resistent a la corrosió, als àcids, suporta altes temperatures, té bon comportament a la fatiga i també fa un bon aïllament tèrmic i elèctric. Per marcar les propietats elàstiques de la matriu en qüestió, es considerarà que té un comportament isotròpic, és a dir, que les propietats del material són les mateixes en totes les direccions. Per tant, a la hora de definir el material només caldran dues propietats: el mòdul d'elasticitat (E_m) i el coeficient de Poisson (ν_m). Feta aquesta introducció, si mirem la taula 6.3.1 veurem els valors que ens donen els fabricants que produeixen aquest tipus de resina.

Matriu de Vinilester	
Mòdul elàstic (E_m)	3.4 [GPa]
Coeficient de Poisson (ν_m)	0.35 [adimensional]

Taula 6.3.1 Propietats de la matriu de vinilester

La segona matriu que es farà servir, està composta de resina epoxi o poliepoxid. En general les propietats que tenen aquestes resines, són similars a les del vinilester incrementant una mica més els seus valors límits. Per això, les resines epoxi són més cares i només es troben en els materials compostos de major qualitat. Una característica interessant d'aquesta resina, és que no necessita cap mena de forn per curar-se, simplement amb la temperatura ambient i un agent catalitzador es solidifica. Finalment, el comportament d'aquesta matriu també es pot considerar isotròpic i per tant, només faran falta dos paràmetres per definir-la. A la taula 6.3.2 veurem reflectits aquest dos paràmetres.

Matriu Epoxi	
Mòdul elàstic (E_m)	3.12 [GPa]
Coeficient de Poisson (ν_m)	0.38 [adimensional]

Taula 6.3.2 Propietats de la matriu d'epoxi

Un cop especificades les propietats que defineixen les dues matrius, cal parlar de les dues fibres que es combinaran amb les resines. Es tractaran les fibres de carboni AS4-D i les fibres de vidre.

Considerarem que les fibres de carboni tenen un comportament isotròpic longitudinal, és a dir, que en el sentit de la fibra tindrà unes propietats determinades i en l'altre canviaran. Per un material amb aquest comportament es necessitaran tres paràmetres diferents. Les característiques que el definiran són: dos mòduls elàstics i un coeficient de Poisson. La taula 6.3.2 recull les dades que ens facilita el fabricant de fibres.

Fibres de carboni AS4-D	
Mòdul elàstic (E_{11})	221.0 [GPa]
Mòdul elàstic (E_{22})	16.6 [GPa]
Coefficient de Poisson (ν_{12})	0.26 [adimensional]

Taula 6.3.3 Propietats de la fibra de carboni AS4-D

Finalment, presentarem les propietats de la fibra de vidre a la taula 6.3.4. El comportament d'aquest tipus de fibres, es considera isotròpic. Si ens fixem en els seus dos mòduls elàstics podem apreciar que tenen el mateix valor. Per tant, el seu comportament és el mateix en totes les direccions.

Fibres de vidre	
Mòdul elàstic (E_{11})	72.3 [GPa]
Mòdul elàstic (E_{22})	72.3 [GPa]
Coefficient de Poisson (ν_{12})	0.26 [adimensional]

Taula 6.3.4 Propietats de la fibra de vidre

Per acabar aquest apartat, si comparem les propietats de les fibres de carboni i les de vidre, observarem una gran diferència amb els valors del mòdul elàstic. La direcció 1.1 de la fibra de carboni aguanta esforços tres vegades més grans que la mateixa direcció amb la fibra de vidre. Interpretant els dos valors, s'arriba a la

conclusió que la fibra de carboni és més adequada quan coneixem la direcció de les forces que patirà el material compost. També cal dir que el mètode d'obtenció de la fibra de carboni, és molt més car que la de vidre.

6.4 Propietats elàstiques dels compostos

Un cop recopilades les propietats dels quatre materials que formen els nostres dos volums representatius, carboni amb vinilester i vidre amb epoxi, s'han de trobar quines característiques agafaran quan estiguin treballant junts.

Per determinar les propietats elàstiques dels dos compostos, es podrà utilitzar la formulació micromecànica, mitjançant els valor Cf' que s'han tractat a l'aparat 6.2. El comportament de cada un dels compostos, ve marcat per set paràmetres diferents que són: dos mòduls elàstics, dos coeficients de poisson, dos mòdul de young i el volum de fibra en un feix V_f . Tots els paràmetres citats s'obtenen amb un programa que s'ha escrit amb el mateix MATLAB.

Al llarg d'aquest apartat es presentaran dues taules que mostraran les característiques necessàries per definir els dos materials compostos. La primera taula descriu el compòsit carboni/vinilester i la segona el vidre/epoxi.

La taula 6.4.1 recopila les dades del compòsit carboni/vinilester.

Material compost de fibra de carboni AS4-D amb matriu de vinilester	
Mòdul elàstic (E_{11})	171.8 [GPa]
Mòdul elàstic (E_{22})	24.23 [GPa]
Coefficient de Poisson (ν_{12})	0.324 [adimensional]
Coefficient de Poisson (ν_{23})	0.415 [adimensional]
Mòdul de Young (G_{12})	9.076 [GPa]
Mòdul de Young (G_{23})	8.051 [GPa]
Volum de fibra en un feix (V_f)	0.6196 [mm ³]

Taula 6.4.1 Propietats de la fibra de carboni AS4-D amb vinilester

La taula 6.4.2 recopila les dades del compost vidre/epoxi.

Material compost de fibra de vidre amb epoxi	
Mòdul elàstic (E_{11})	51.352 [GPa]
Mòdul elàstic (E_{22})	15.04 [GPa]
Coefficient de Poisson (ν_{12})	0.262 [adimensional]
Coefficient de Poisson (ν_{23})	0.437 [adimensional]
Mòdul de Young (G_{12})	5.342 [GPa]
Mòdul de Young (G_{23})	5.232 [GPa]
Volum de fibra en un feix (V_f)	0.6196 [mm ³]

Taula 6.4.2 Propietats de la fibra de vidre amb epoxi

Ens interessa deixar clar quin és el significat dels subíndex que apareixen al costat de les propietats per millorar la comprensió de les taules. El numero 1 determina la direcció del fil i els valors 2, 3 defineixen dos eixos perpendiculars a 1. Per tant, dos números consecutius defineixen un pla del treball.

Finalment, s'assignaran les propietats que apareixen a les taules superiors depenent de quin element s'estigui estudiant. Cal aclarir, que el procés explicat s'haurà de repetir des del principi per totes les composicions que es vulguin estudiar. Per acabar aquest apartat, s'ensenyarà la figura del volum representatiu amb els dos elements diferenciats. La matriu apareix amb el color turquesa i la combinació de matriu i fibra amb violeta. Mirar figura 6.3.4.

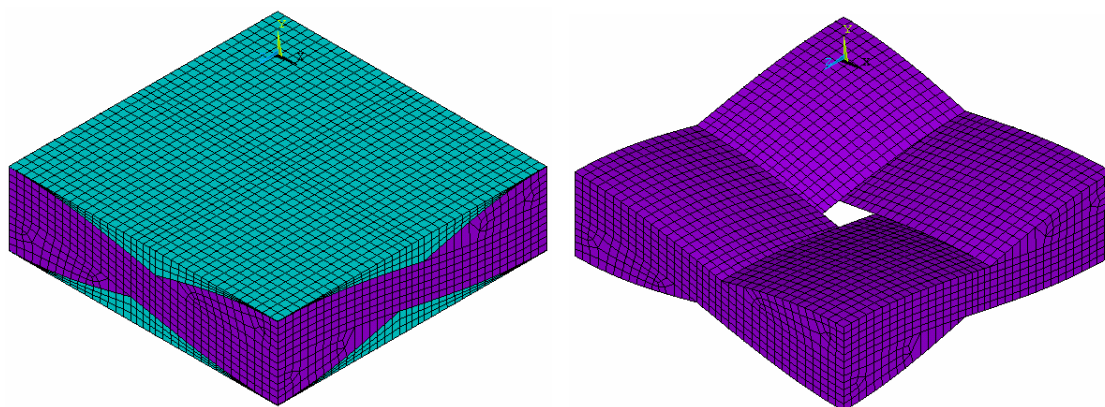


Figura 6.3.4 Elements del volum representatiu.

6.5 Condicions de contorn

6.5.1 Introducció

Les condicions de periodicitat o de contorn (*constrain equation* en anglès, CE) també es un dels factors necessaris per obtenir els resultats de la simulació per elements finits. Per entendre més clarament el concepte que s'estudia en aquest apartat, podríem dir que s'imposaran les condicions límits de la geometria.

La informació que inclou aquest apartat ens serà útil per tots els material compostos que es vulguin analitzar. Per tant, en aquest apartat es tractarà el cas genèric per qualsevol material compost amb geometria similar a la que s'ha anat tractant durant el projecte. Ens interessa perdre una mica de temps programant aquesta part, per aconseguir més endavant un programa que només depengui de les mesures inicials de les microfotografies.

Els anàlisis que es presentaran en aquest projecte, es poden dividir en dos casos diferents. El primer dels dos és un anàlisi en el pla i el segon serà un anàlisi tridimensional. Per entendre més clarament el concepte podem observar la figura 6.5.1.1.

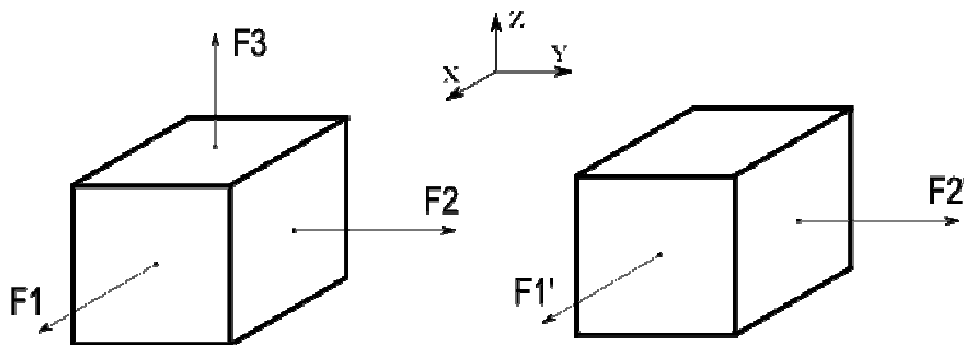


Figura 6.5.1.1 Esquema dels anàlisis en el pla i tridimensional

A la figura superior es veuen dos cubs diferenciats únicament per el nombre de forces aplicades. El cub de l'esquerra vol representar un anàlisi tridimensional i el de la dreta simplement un anàlisi en el pla. Cal diferenciar aquest dos tipus d'anàlisi perquè les condicions de contorn seran diferent per cada un dels dos. Si ens

avancem una mica als fets, quan es fa un anàlisi tridimensional s'han de definir les condicions límits en els tres eixos "x", "y" i "z", per altra banda quan es busca fer el bidimensional només caldrà concretar dos dels tres eixos "x" i "y". Aquesta diferència obliga a definir més condicions de periodicitat per el cas tridimensional amb l'avantatge de poder afegir una força a l'eix de les "z" i obtenir un anàlisi amb resultats que aportin més informació.

Al principi del projecte hem dit que els material compostos amb forma de teixit pla, tenen un comportament pèssim a l'eix "z". Aquest fet venia provocat per la falta de fibres orientades en aquest sentit. Per tant, els fabricants coneixedors de les baixes prestacions, no acostumen a utilitzar estats tridimensionals amb materials compostos. Tenint en compte aquesta informació seran molt més interessants els estats bidimensionals que els tridimensionals.

Per acabar aquesta introducció, parlarem de la geometria bàsica i de l'element representatiu de volum (RVE). La geometria bàsica ha estat molt útil per superar tots els problemes de representació gràfica que hem anat trobant al llarg del projecte. Com ja s'havia dit, l'anàlisi per elements finits necessitarà un volum més gran que la geometria bàsica per poder fer els càlculs. Així que a partir d'ara deixarem de banda la geometria bàsica per començar a parlar sobre RVE. Si mirem la representació gràfica (figura 6.5.1.2) i l'explicació que segueix, es podrà acabar d'entendre la necessitat de diferenciar els dos volums.

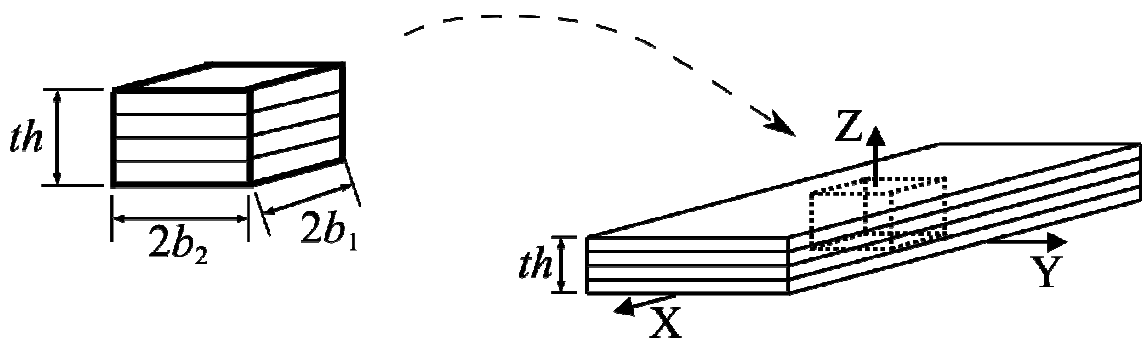


Figura 6.5.1.2 Element representatiu de volum a partir de la geometria bàsica

A la figura superior es veuen dos dibuixos diferent. El dibuix de l'esquerra vol representar una geometria bàsica amb diferents làmines o capes de teixit,

concretament es poden contar quatre làmines. Per altra banda, a la part dreta de la figura 6.5.1.2 s'aprecia un volum molt més gran que s'obté a partir del primer dibuix que hem comentat. Aquest volum s'anomena RVE. Si parem una mica més d'atenció es podrà notar que tenen el mateix nombre de capes. En definitiva el volum de la dreta serà el que farem servir fins al final del projecte per calcular els resultats amb ANSYS.

La diferència que trobem entre una geometria bàsica i un RVE representat amb ANSYS, es pot apreciar a la figura 6.5.1.3. A l'esquerra tenim una geometria bàsica d'una làmina i a la dreta un RVE amb el mateix nombre de làmines, format per quatre geometries bàsiques.

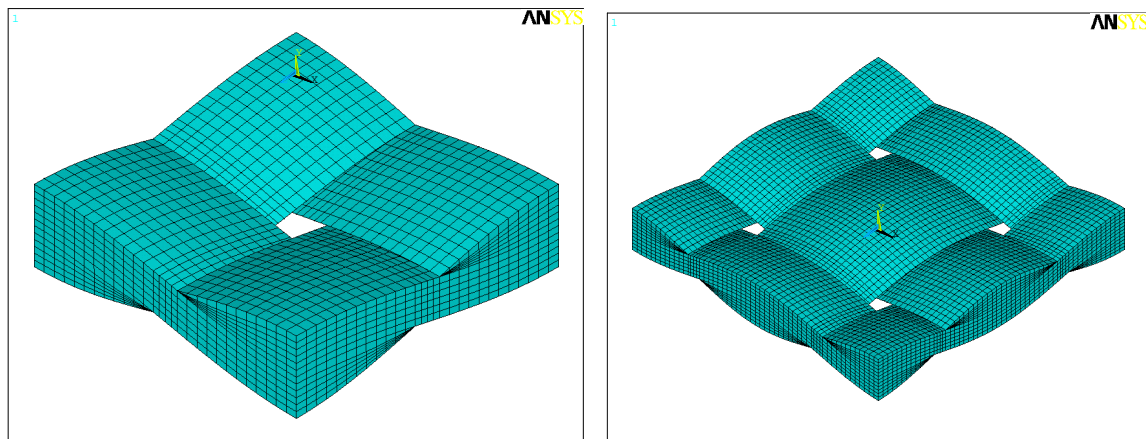


Figura 6.5.1.3 Geometria bàsica i RVE amb ANSYS

6.5.2 Representació gràfica de les condicions de contorn

Per entendre amb més claredat el concepte de les condicions de contorn, s'ha decidit afegir aquest apartat amb dibuixos i explicacions. El primer que es farà serà presentar l'estat bidimensional i seguidament el tridimensional.

Per definir les condicions de contorn d'un estat bidimensional només caldran quatre restriccions. Per una banda l'eix "x" i "y" equivalents als plans ZY i ZX, i per l'altre dos cantells formats per aquests dos plans.

El cas que s'està estudiant en el pla, és molt més simple que el segon que veurem a l'espai. La raó per la qual hi ha variació, és simplement l'eix "z". Com ja hem dit a la introducció d'aquest apartat, les fibres teixides que s'analitzen tenen propietats pèssimes en el sentit de les "z", tant és així que considerarem en aquest cas que no efectua cap mena de resistència als esforços. En definitiva l'eix "z" que coincideix amb el pla XY, quedarà lliure de restriccions quan parlem d'estats bidimensionals. Per entendre de forma visual el concepte que hem explicat, podem mirar la figura 6.5.2.1 amb el paràgraf que segueix.

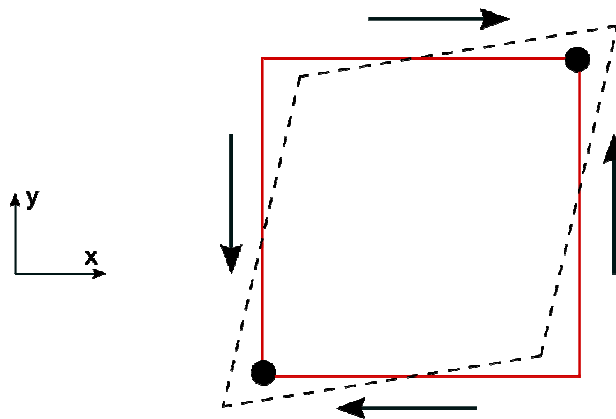


Figura 6.5.2.1 Condicions de contorn per l'estat bidimensional

La figura superior conté fletxes i punts negres. Dues fletxes oposades representen les condicions de contorn dels plans i els dos punts són les dels cantells. Explicat de forma senzilla, si coneixem els desplaçaments de dos plans i dos cantells oposats, podrem determinar amb exactitud el comportament del teixit en el pla.

Un cop definit el comportament del teixit de fibra en el pla, es podrà començar a tractar l'últim estat que és a l'espai. La diferència que trobarem en aquest segon cas, és la consideració que el teixit pla pot oposar certa resistència a l'eix "z". Aquest canvi de plantejament farà complicar el problema i per tant, s'hauran d'afegir restriccions a la geometria.

El nombre de condicions necessàries per poder fer l'anàlisi tridimensional seran sis. Les tres primeres condicions seran les que es refereixen als tres eixos de treball "x", "y" i "z" que coincideixen amb els plans YZ, XZ i XY. Les últimes tres

restriccions quedaran aplicades als tres cantells que es formen amb l'encreuament dels plans. Per entendre de forma gràfica el concepte explicat, es pot mirar la figura 6.5.2.2 amb l'explicació que segueix.

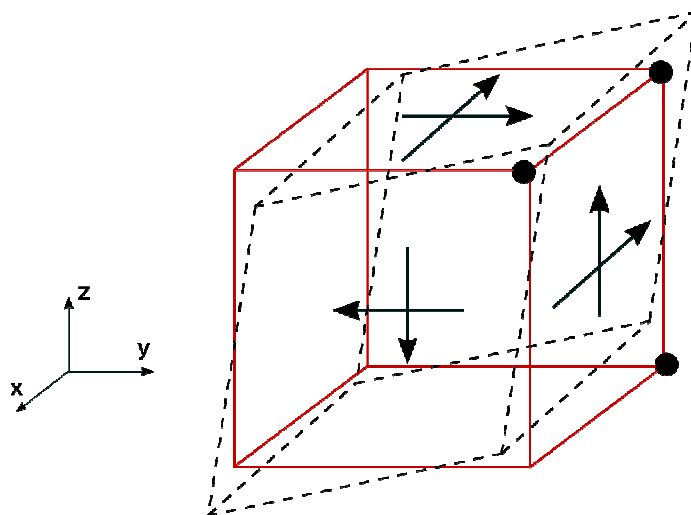


Figura 6.5.2.2 Condicions de contorn per l'estat tridimensional

De la mateixa manera que s'ha esquematitzat el desplaçament en el pla ara es repeteix per l'espai. L'esquema superior conté fletxes i punts. Tres fletxes amb direccions diferents indiquen les condicions de contorn dels plans i els tres punts representen les altres tres que pertanyen als cantells.

6.5.2 Equacions de les condicions de contorn

En aquest apartat es podran veure totes les equacions que delimiten el comportament del teixit pla. Primerament veurem les equacions de contorn necessàries per fer l'estudi en el pla (anàlisi bidimensional) i seguidament, les que fan referència a l'espai (anàlisi tridimensional). Totes les equacions quedaran parametritzades amb la mateixa nomenclatura que ens ha servit per descriure la geometria bàsica.

Abans d'exposar les equacions dels dos tipus d'anàlisi, cal explicar els termes que es faran servir per definir els plans i els cantells. En passos anteriors quan es va descriure la geometria bàsica, també es feia servir aquesta nomenclatura. Si refresquem la memòria els subíndexs que apareixen al costat de les lletres, fan

referència als eixos. Per tant, els números 1, 2 i 3 substituiran als eixos x, y i z. A partir d'aquesta nova nomenclatura es podrà fer referència als plans si apareixen dos números consecutius a la part inferior de la lletra. Per altra banda, trobem la lletra “ ϵ ” que defineix el desplaçament unitari.

Un cop introduït l'ordre que seguirà aquest apartat i la nomenclatura que s'hi trobarà, començarem a descriure les condicions de contorn per l'anàlisi bidimensional.

En aquestes altures del treball, ja es pot tenir clar que dues làmines juntes de teixit pla no aporten pràcticament resistència a l'eix de les “z”. Tant és així, que la resistència en aquesta direcció es considera zero ($\sigma_z = 0$) i per tant, les restriccions en aquesta direcció hauran de mantenir-se lliures.

Condicions de contorn que s'aplicaran al tots els plans en els punts: $x_1=a_1$ fins $x_1=-a_1$ i $x_2= +a_2$ fins $x_2= -a_2$

$$\begin{aligned} u_1(a_1, x_2, x_3) - u_1(-a_1, x_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{11} &= 0 \\ u_2(a_1, x_2, x_3) - u_2(-a_1, x_2, x_3) - 2a_2\epsilon_{21} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.7})$$

$$\begin{aligned} u_1(x_1, a_2, x_3) - u_1(x_1, -a_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{12} &= 0 \\ u_2(x_1, a_2, x_3) - u_2(x_1, -a_2, x_3) - 2a_2\epsilon_{22} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.8})$$

Condicions de contorn que s'aplicaran al tots els cantells en els punts : $x_1=a_1$ fins $x_1=-a_1$ i $x_2= +a_2$ fins $x_2= -a_2$

$$\begin{aligned} u_1(a_1, a_2, x_3) - u_1(-a_1, -a_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{11} - 2a_2\epsilon_{12} &= 0 \\ u_2(a_1, a_2, x_3) - u_2(-a_1, -a_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{21} - 2a_2\epsilon_{22} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.9})$$

$$\begin{aligned} u_1(a_1, -a_2, x_3) - u_1(-a_1, a_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{21} + 2a_2\epsilon_{12} &= 0 \\ u_2(a_1, -a_2, x_3) - u_2(-a_1, a_2, x_3) - 2a_1\epsilon_{21} + 2a_2\epsilon_{22} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.10})$$

Mitjançant les equacions (7) (8) per els plans i (9) (10) per els cantells, s'han definit les condicions de contorn per l'estat bidimensional. Tot seguit farem el mateix procés per l'estat tridimensional. Les equacions (11) (12) per els plans i (13) (14) per els cantells.

Condicions de contorn que s'aplicaran al tots els plans en els punts: $x_1=a_1$ fins $x_1=-a_1$ i $x_2=+a_2$ fins $x_2=-a_2$:

$$\begin{aligned} u_1(a_1, x_2, x_3) - u_1(-a_1, x_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{11} &= 0 \\ u_2(a_1, x_2, x_3) - u_2(-a_1, x_2, x_3) - 2a_2 \varepsilon_{21} &= 0 \\ u_3(a_1, x_2, x_3) - u_3(-a_1, x_2, x_3) - 2a_3 \varepsilon_{31} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.11})$$

$$\begin{aligned} u_1(x_1, a_2, x_3) - u_1(x_1, -a_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{12} &= 0 \\ u_2(x_1, a_2, x_3) - u_2(x_1, -a_2, x_3) - 2a_2 \varepsilon_{22} &= 0 \\ u_3(x_1, a_2, x_3) - u_3(x_1, -a_2, x_3) - 2a_3 \varepsilon_{32} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.12})$$

Condicions de contorn que s'aplicaran al tots els cantells en els punts : $x_1=a_1$ fins $x_1=-a_1$ i $x_2=+a_2$ fins $x_2=-a_2$:

$$\begin{aligned} u_1(a_1, a_2, x_3) - u_1(-a_1, -a_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{11} - 2a_2 \varepsilon_{12} &= 0 \\ u_2(a_1, a_2, x_3) - u_2(-a_1, -a_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{21} - 2a_2 \varepsilon_{22} &= 0 \\ u_3(a_1, a_2, x_3) - u_3(-a_1, -a_2, x_3) - 2a_3 \varepsilon_{31} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.13})$$

$$\begin{aligned} u_1(a_1, -a_2, x_3) - u_1(-a_1, a_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{21} + 2a_2 \varepsilon_{12} &= 0 \\ u_2(a_1, -a_2, x_3) - u_2(-a_1, a_2, x_3) - 2a_1 \varepsilon_{21} + 2a_2 \varepsilon_{22} &= 0 \\ u_3(a_1, -a_2, x_3) - u_3(-a_1, a_2, x_3) - 2a_3 \varepsilon_{32} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Eq.14})$$

Els paràmetres $2a_1$, $2a_2$ i a_3 són les dimensions totals de la geometria bàsica. Totes les mides estan definides en el sistema de coordenades centrar a la geometria.

La diferència que trobem entre les equacions del pla i les equacions de l'espai, és simplement la tercera equació. La raó per la qual no apareix en els grups (7) (8) (9) i (10) és perquè l'equació resultant dona zero.

Totes les condicions de periodicitat s'aplicaran amb ANSYS a través d'una macro a cada un dels nodes, cares i cantells periòdics. A la pràctica, si es volgués aplicar aquestes condicions manualment seria una feina inviable, és per aquesta raó que s'ha programat aquesta tasca a través de l'ANSYS.

Finalment, per veure com queden representades les condicions de contorn amb ANSYS, només cal mirar la figura 6.5.2.3.

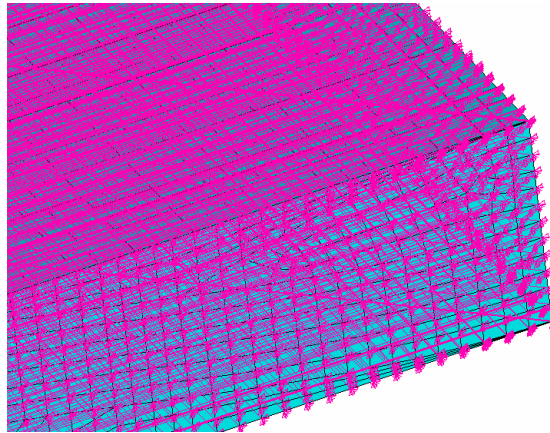


Figura 6.5.2.3 Cantell del RVE amb les respectives condicions de contorn per cada element i node

7. PROPIETATS ELÀSTIQUES DEL TEIXIT

L'estudi que es presenta es concentra en modelar a través dels elements finits varis teixits de fibra amb resines diferents. Es vol aconseguir determinar el comportament elàstic utilitzant el programa ANSYS.

Els valors del mòdul elàstic es poden aconseguir per dues vies diferents. La primera seria imposant la tensió mitja (iso-tensió) i la segona amb la deformació mitja (iso-deformació). En el nostre cas, per determinar els valors del mòdul elàstic s'hauran de fer servir les deformacions mitges, ja que les equacions de periodicitat s'han posat en funció de les deformacions "ε".

7.1 Obtenció de les propietats elàstiques

Abans de començar a tractar aquest apartat, cal dir que totes les equacions que s'aniran veient ens serviran per cada una de les diferents fibres que s'analitzaran.

L'equació que relaciona les deformacions amb les tensions obtingudes és:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xyz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xyz} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.15})$$

La forma expandida de l'equació (15) surt:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

El següent pas serà buscar la matriu de rigideses. Aquesta matriu relaciona els desplaçaments amb els esforços que pateix la peça a cada un dels nodes de la peça que s'estudia. Per aconseguir la matriu, s'aplicaran tres casos de càrrega diferents imposant una sola deformació coneguda i unitària. Els resultats de les tres equacions apareixen a la pàgina següent.

Imposant una deformació normal unitària a la direcció 1 s'obté:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.16})$$

on,

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \bar{Q}_{11} \\ \sigma_{22} &= \bar{Q}_{12} \\ \sigma_{12} &= \bar{Q}_{16} \end{aligned}$$

Imposant una deformació normal unitària a la direcció 2 s'obté:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.17})$$

on,

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \bar{Q}_{12} \\ \sigma_{22} &= \bar{Q}_{22} \\ \sigma_{12} &= \bar{Q}_{26} \end{aligned}$$

Imposant una deformació normal unitària a la direcció 12 s'obté:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.18})$$

on,

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \bar{Q}_{16} \\ \sigma_{22} &= \bar{Q}_{26} \\ \sigma_{12} &= \bar{Q}_{66} \end{aligned}$$

Com es pot veure de les equacions (16), (17) i (18) surten prou equacions per determinar els cinc valors de la matriu de rigidesa (15).

Per determinar les tensions equivalents que pateix el nostre model (teixit pla), s'imposaran les tres deformacions unitàries mitjançant les condicions de contorn. Un cop aplicades totes les deformacions a cada un dels elements, es farà una mitja dels resultats obtinguts per determinar de forma aproximada les tensions en el model.

L'últim pas que ens queda per determinar les propietats elàstiques del nostre teixit, és buscar la matriu de flexibilitats i combinar-la amb la matriu que incorpora el comportament d'un material ortotròpic.

Fent la inversa de la matriu de rigidesa es pot obtenir la matriu de flexibilitat $[S] = [C]^{-1}$

$$\begin{aligned} [\varepsilon_{xyz}] &= [\bar{S}] [\sigma_{xyz}] \\ [\bar{S}] &= \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{Eq.19})$$

Substituint la matriu $[S]$ per la matriu coneguda d'altres estudis que incorpora les constants d'enginyeria per un material amb comportament ortotròpic, s'obté la Eq.20.

$$[\bar{S}] = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.20})$$

Finalment, aïllant termes de la matriu de flexibilitats que ens ha resultat combinant (19) i (20), es podran conèixer els valors de les propietats elàstiques del nostre teixit. Els factors que extraurem d'aquesta matriu, apareixen a continuació i són: dos mòduls elàstics, un coeficient de Poisson i un mòdul de Young.

$$\begin{aligned} E_1 &= 1/S_{11} & \nu_{12} &= -S_{12}E_1 \\ E_2 &= 1/S_{22} & G_{12} &= 1/S_{66} \end{aligned}$$

8. ESTUDI DELS RESULTATS

La finalitat d'aquest projecte, és modificar i ampliar un estudi sobre fibres teixides. Per comprovar si les modificacions que s'han fet en el projecte antic han afectat als resultats, hem decidit comparar els resultats de les propietats elàstiques (carboni/vinilester) amb taules. Per altra banda, s'ha incorporat un nou anàlisi de les propietats elàstiques amb un material diferent (vidre/epoxi). Finalment, per acabar de completar el projecte s'ha decidit fer un anàlisi de tensions per les fibres.

L'ordre d'execució de les tres tasques que s'han citat, seguirà aquest ordre: la comparativa de resultats antics i nous, després es buscaran els resultats del teixit amb un material diferent i finalment l'anàlisi de tensions de les fibres.

8.1 Comparativa de les propietats elàstiques

Per saber si els canvis efectuats en el projecte antic han provocat modificacions en les propietats de la fibra de carboni amb vinilester, s'ha decidit fer una comparativa de resultats mitjançant un seguit de taules i gràfics.

Les taules que es veuran, estan diferenciades per dos tipus de laminats. La primera taula serà el laminat en fase (iso-fase) i la segona amb fora de fase (out-of-phase). La informació que s'ha descrit es troba a les taules 8.1.1 i 8.1.2.

Propietats elàstiques	Anàlisi bidimensional (1 capa)		Anàlisi bidimensional (2 capes)		Anàlisi bidimensional (4 capes)		Anàlisi bidimensional (6 capes)		Anàlisi tridimensional (1 capa)	
	Vell	Nou	Vell	Nou	Vell	Nou	Vell	Nou	Vell	Nou
E_x [GPa]	36.90	41.75	38.93	41.75	39.80	41.75	40.11	41.75	40.76	41.91
E_y [GPa]	36.90	41.74	38.93	41.74	39.79	41.73	40.10	41.74	40.75	41.91
G_{xy} [GPa]	4.82	4.81	4.83	4.81	4.83	4.81	4.83	4.81	4.83	4.81
ν_{xy}	0.18	0.27	0.14	0.27	0.13	0.27	0.13	0.27	0.12	0.27

Taula 8.1.1 Comparativa de resultats en iso-fase

Propietats elàstiques	Anàlisi bidimensional (2 capes)		Anàlisi bidimensional (4 capes)		Anàlisi bidimensional (6 capes)		Anàlisi tridimensional (2 capa)	
	Vell	Nou	Vell	Nou	Vell	Nou	Vell	Nou
E_x [GPa]	40.70	46.47	40.77	47.32	40.83	47.65	41.02	50.17
E_y [GPa]	40.70	46.47	40.77	47.32	40.83	47.65	41.01	50.17
G_{xy} [GPa]	4.83	4.81	4.83	4.81	4.83	4.81	4.83	4.81
ν_{xy}	0.10	0.19	0.10	0.18	0.10	0.17	0.10	0.13

Taula 8.1.2 Comparativa de resultats en out-of-fase

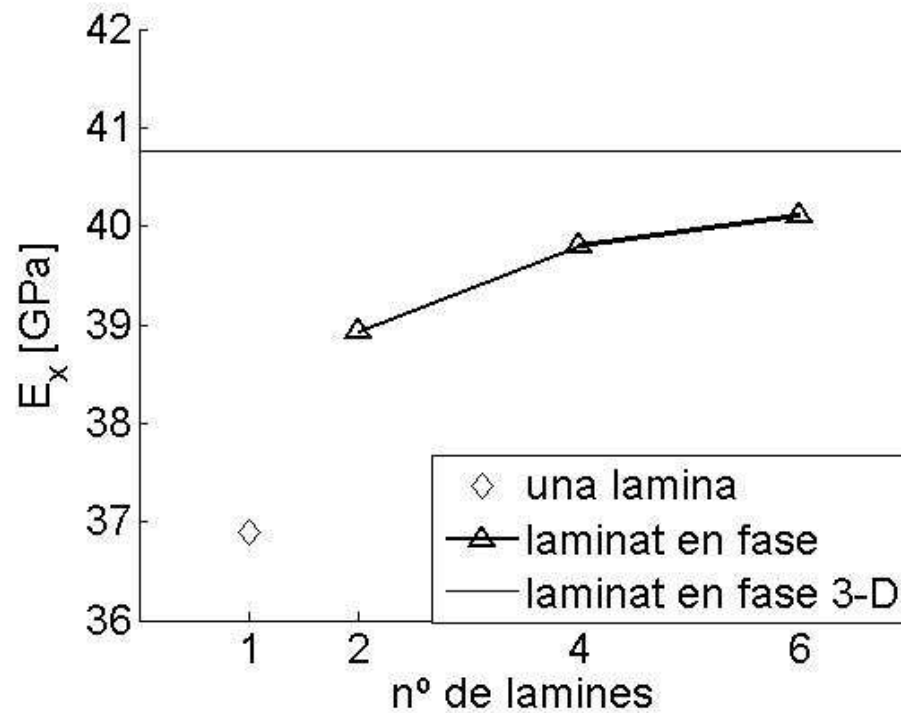
Tot seguit explicarem com interpretar la informació que es troba a les taules. En primer lloc, a la part superior de cada taula s'especifica si l'anàlisi és en el pla o a l'espai, just a sota del tipus d'anàlisi es pot veure amb parèntesis quantes capes de teixit s'han fet servir per trobar els resultats. Una mica més a baix dels parèntesis trobem dues seccions, una amb lletra normal i l'altre amb negreta, s'ha fet servir la negreta per ressaltar els resultats nous. Finalment, a la part esquerra de la taula trobem la referència dels resultats.

Comparant els resultats que apareixen en negreta a les dues taules superiors, podem notar dues diferències. La primera és que els resultats de les propietats elàstiques s'han incrementat molt respecte els valors antics. La segona diferència que trobem, és que els valors nous de les propietats es mantenen força a partir de les dues capes quan parlem de laminat amb fora de fase.

Hem decidit fer servir uns gràfics per representar els resultats dels mòduls elàstics en funció del nombre de capes. Mitjançant aquest gràfics, intentarem veure alguna modificació que no haguem notat a les taules.

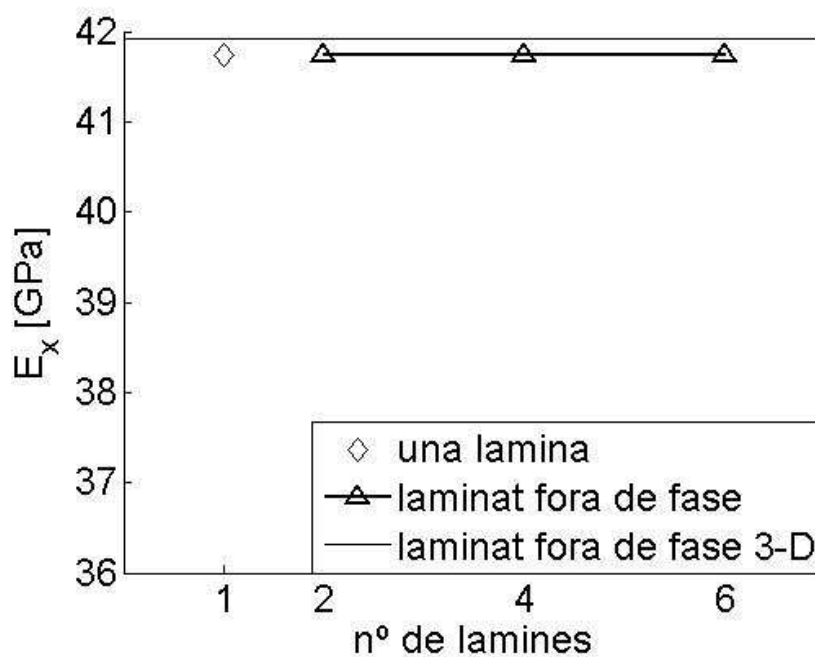
En els següents passos es podran veure 4 gràfics diferents. Primer es mostraran els dos gràfics que representen els laminats en fase i seguidament els que representen els laminat en fora de fase.

El gràfic 8.1.1 representa els mòduls elàstics en funció dels laminats en fase del projecte vell.



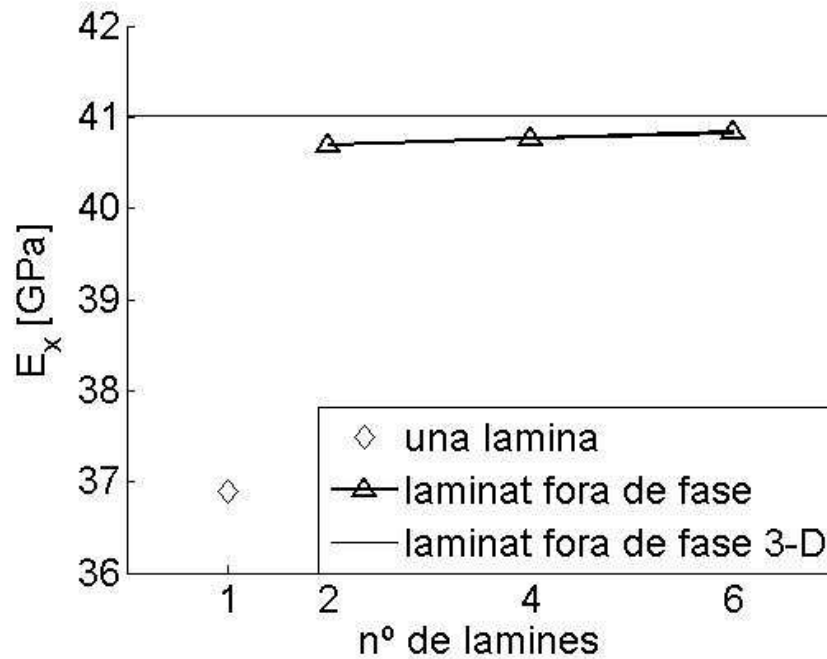
Gràfic 8.1.1 mòdul elàstic en funció del laminat vell

El gràfic 8.1.2 representa els mòduls elàstics en funció dels laminats en fase del projecte nou.



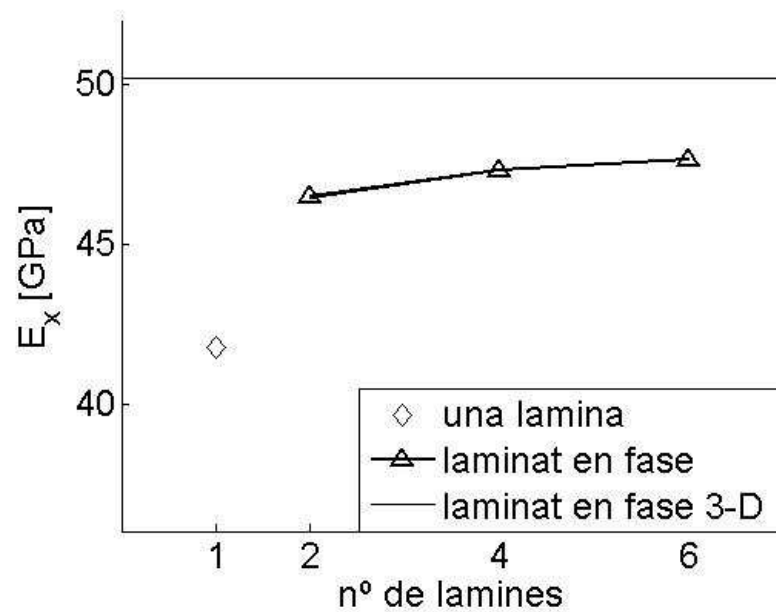
Gràfic 8.1.2 mòdul elàstic en funció del laminat nou

El gràfic 8.1.3 representa els mòduls elàstics en funció dels laminats en fora de fase del projecte vell.



Gràfic 8.1.3 mòdul elàstic en funció del laminat vell

El gràfic 8.1.4 representa els mòduls elàstics en funció dels laminats en fora de fase del projecte nou.



Gràfic 8.1.4 mòdul elàstic en funció del laminat nou

Comparant els gràfics 8.1.1 amb el 8.1.2 i el 8.1.3 amb el 8.1.4 es tornen a comprovar les dues conclusions que s'havien extret de les taules. La primera és que els mòduls elàstics per el model nou, són molt superiors i la segona deia que a partir de dos laminats es mantenen les propietats.

Gràcies als resultats que s'han extret de les taules i les representacions gràfiques, podem dir que la modificació que varem fer sobre les orientacions de les fibres, han causat molts canvis. Segons el model antic, les fibres tenien un mòdul elàstic molt inferior al que hem trobat ara. Per tant, la manera d'orientar les fibres quan parlem d'elements finits pot modificar dràsticament els resultats.

8.2 Anàlisi d'un material nou

El material que es farà servir en aquest cas és la fibra de vidre amb resina epoxi. Per aconseguir els resultats que apareixen a la taula 8.2.1 s'ha aprofitat la geometria que hem obtingut en el pas previ, les úniques modificacions que incorpora aquest anàlisi són les propietats dels dos elements que formen el material compost.

Els casos que s'han comprovat són els següents: estat bidimensional amb una capa iso-fase i dues capes out-of-fase i finalment l'estat tridimensional amb dues capes iso-fase i out-of-fase. Els resultats obtinguts es poden apreciar a la taula que apareix tot seguit.

Propietats elàstiques	Anàlisi bidimensional (1 capa)	Anàlisi bidimensional (2 capes)	Anàlisi tridimensional (1 capa)	Anàlisi tridimensional (2 capes)
	Iso-fase	Out-of-fase	Iso-fase	Out-of-fase
E_x [GPa]	174.33	183.11	174.75	187.84
E_y [GPa]	174.32	183.11	174.74	187.83
G_{xy} [GPa]	3.13	3.13	3.13	3.13
ν_{xy}	0.21	0.17	0.21	0.15

Taula 8.2.1 Propietats elàstiques de la fibra de vidre amb resina epoxi

Com es pot veure a la taula 8.2.1 les propietats elàstiques són molt superiors a les que han sortit amb el primer material que era fibra de carboni amb resina de vinilester. Les variacions que s'aprecien es podien intuir si es miraven les característiques dels quatre materials per separat a l'apartat 6.3.

Per acabar aquest punt només ens queda dir que en un primer moment la intenció d'aquest apartat era comprovar les dades analítiques amb valors experimentals extrets d'un projecte que tractava les fibres de vidre amb resina epoxi. La raó per la qual no apareixen els valors experimentals a la taula de propietats és perquè la geometria que tenia aquest teixit pla donava errors a la hora de fer la discretització de la geometria. Per tant, s'ha comprovat que la rutina que hem desenvolupat pot fer variacions de materials però encara necessita un pas de depuració per poder simular altres geometries.

8.3 Anàlisi de tensions

Finalment, l'últim anàlisi que ens queda és comprovar l'estat de tensions de les fibres teixides en el pla. Val a dir que ens centrarem en l'estudi de les fibres i deixarem de banda el comportament de la matriu. S'ha decidit fer únicament les fibres perquè la matriu necessitaria un altre tipus de simulació per donar valors fiables.

El que es podrà veure en aquest apartat, és el comportament de les fibres quan estan sotmeses a esforços de tensió en els eixos "x", "y" i a tallant "xy". La informació que s'ha extret dels anàlisis amb variació del nombre de laminats, ordenacions de les capes i canvis de material és massa voluminosa; per aquesta raó s'ha pres la decisió de fer un recull dels anàlisis més significatius.

Primer de tot, s'ensenyaran les imatges que s'han extret del programa d'elements finits (Ansys) amb una explicació del que representen i finalment es plantejaran les conclusions. Els anàlisis de tensions es poden veure en les següents pàgines.

La figura 8.3.1 representa l'estat tridimensional sotmès a un esforç de tensió a l'eix de les x amb una làmina.

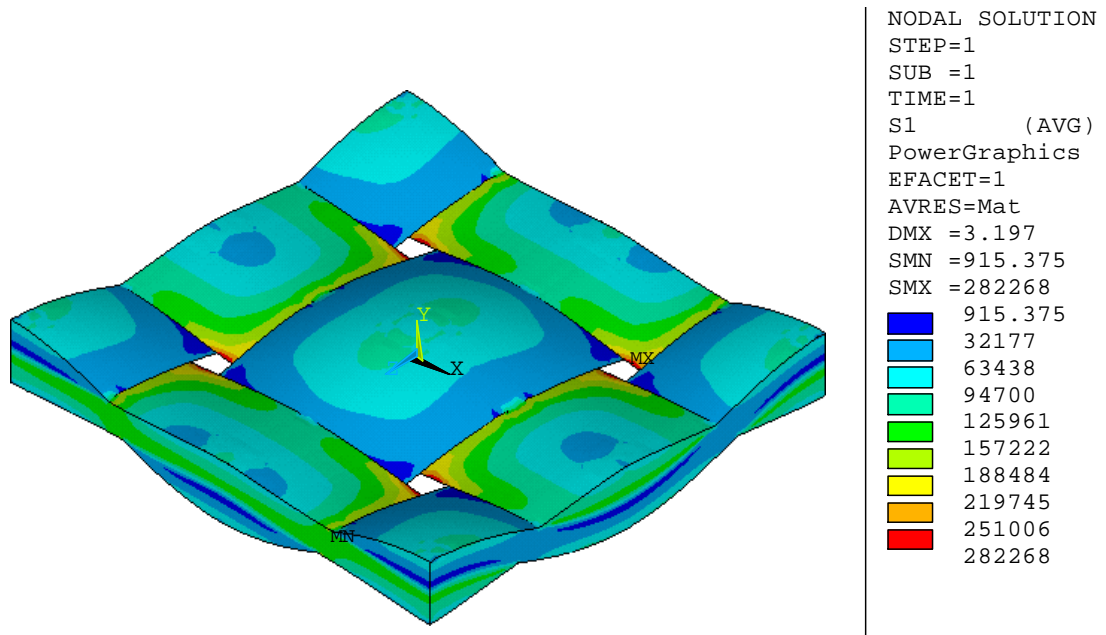


Figura 8.3.1 Estat tridimensional amb tensió a l'eix "x" en direcció de les fibres

La figura 8.3.2 representa l'estat tridimensional sotmès a un esforç de tensió a l'eix de les y amb una làmina.

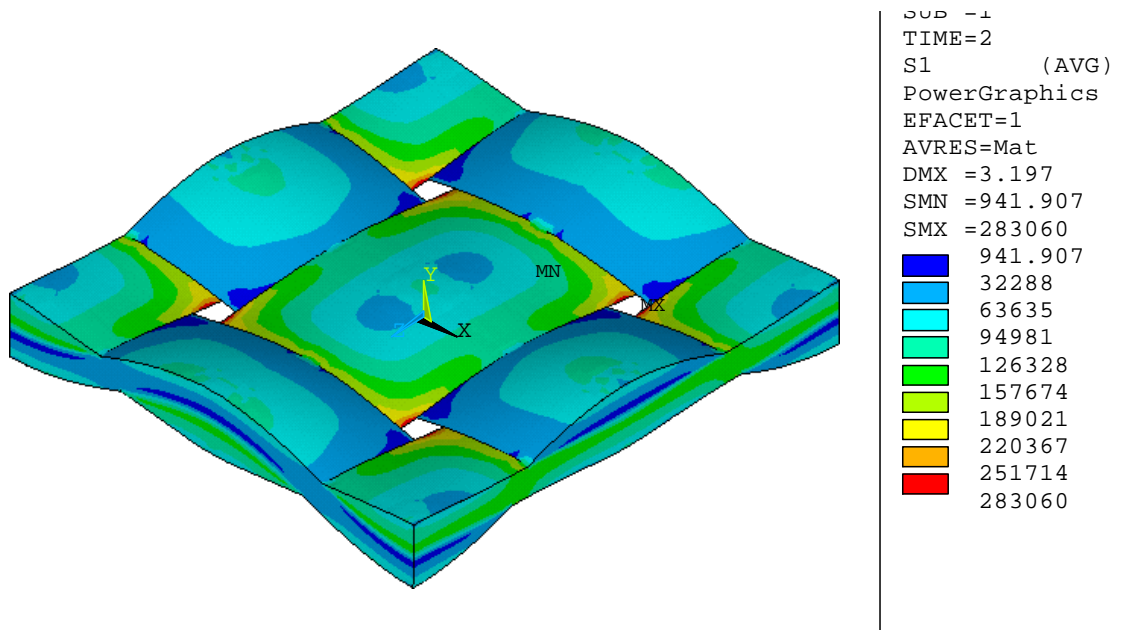


Figura 8.3.2 Estat tridimensional amb tensió a l'eix "y" en direcció de les fibres

La figura 8.3.3 representa l'estat tridimensional sotmès a tallant amb una làmina.

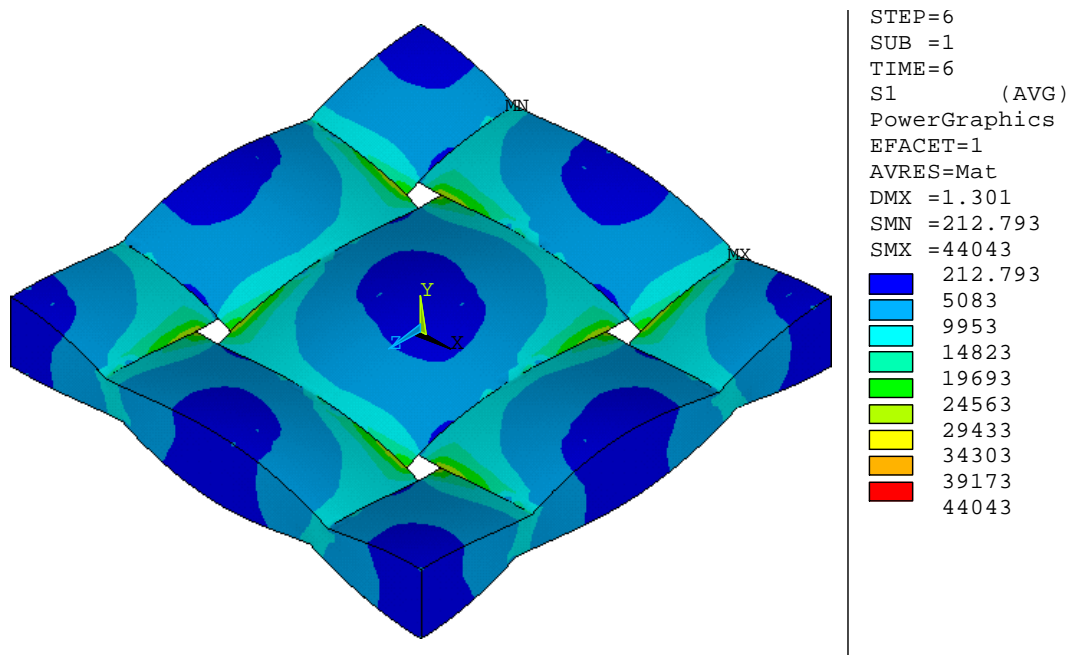


Figura 8.3.3 Estat tridimensional amb tallant en direcció de les fibres

La figura 8.3.4 representa l'estat tridimensional out-of-phase sotmès a un esforç de tensió a l'eix de les x amb dues làmines.

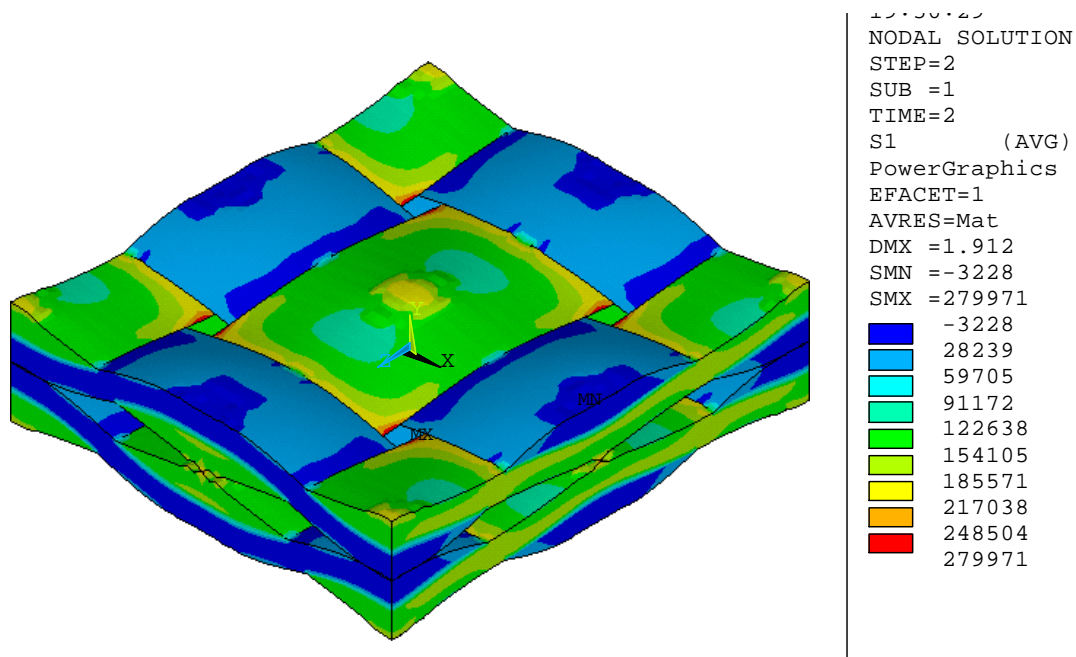


Figura 8.3.4 Estat tridimensional dues làmines amb tensió a l'eix "x" en direcció de les fibres

La figura 8.3.5 representa l'estat tridimensional out-of-phase sotmès a un esforç de tensió a l'eix de les y amb dues làmines.

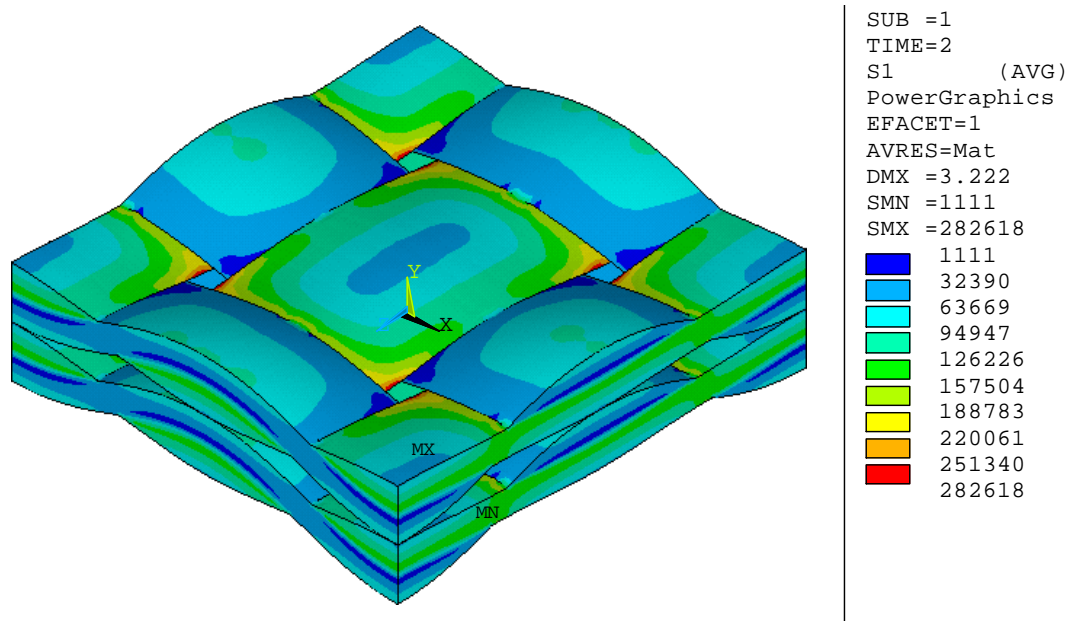


Figura 8.3.5 Estat tridimensional dues làmines amb tensió a l'eix "y" en direcció de les fibres

La figura 8.3.6 representa l'estat tridimensional out-of-phase sotmès a un esforç tallant amb dues làmines.

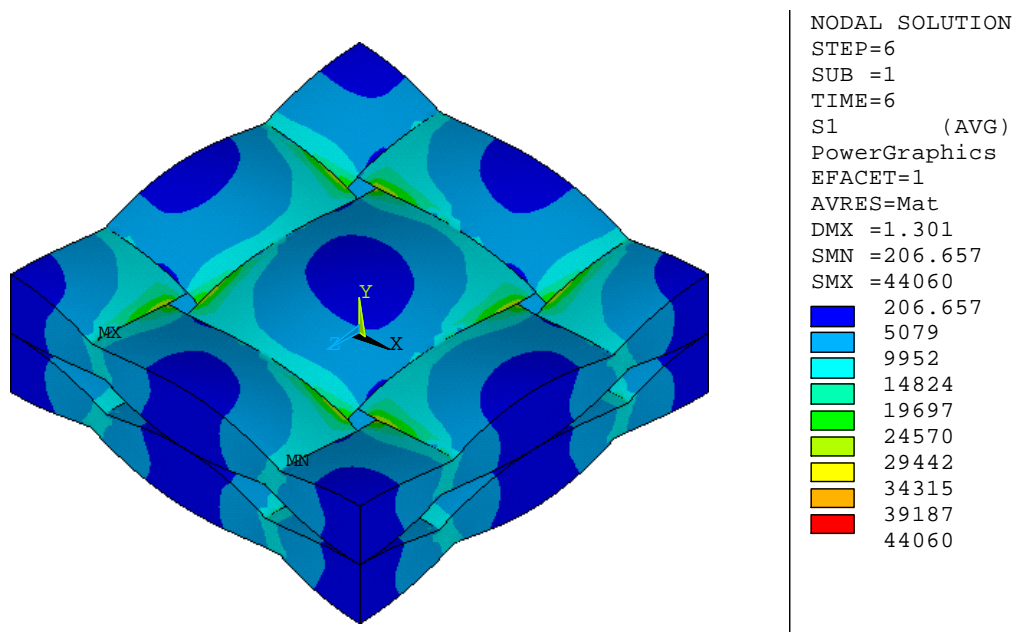


Figura 8.3.6 Estat tridimensional dues làmines amb tallant en direcció de les fibres

Abans d'analitzar els resultats de les figures, és necessari deixar clar com s'interpreten. Els valors que apareixen a la dreta de cada figura no tenen unitats per tant, ens podem guiar per els increments o els colors, és a dir, com més a prop del color vermell més pateix la zona pintada. Per contra si ens apropem a la zona blava les fibres queden més descarregades.

Un cop visualitzades les sis representacions i la manera d'estudiar-les es poden extreure les conclusions generals del comportament de les fibres en un teixit pla. Per una banda, quan es carrega el material compost amb tensions orientades a l'eix de les x i de les y, veiem que la ruptura és més provable al punt on creuen les fibres. Per altra banda, quan es carrega el teixit pla amb esforços tallants podem apreciar que les fibres queden molt poc carregades.

La conclusió que s'extreu d'aquest anàlisi, és que els materials compostos en forma de teixit pla de fibra pateixen molt més les tensions longitudinals que els tallants. Per altra banda es pot notar que quan s'incrementa el numero de capes en iso-fase i out-of-fase el material té més resistència.

Els resultats que s'han extret són molt satisfactoris perquè existeixen altres estudis que arribaven a les mateixes conclusions.

9. CONCLUSIONS

El projecte que s'ha desenvolupat a donat nous coneixements sobre el tractament per elements finits de teixits plans de fibra. Hem vist que les orientacions de les fibres poden modificar de manera significativa la resistència del teixit pla. També hem comprovat que el programa que utilitzem pot obtenir resultats correctes canviant les propietats de la fibra i la matriu. Finalment amb l'anàlisi de tensions s'han pogut veure els estats de càrrega i les zones crítiques de les fibres.

Cal dir però que no tots els nostres objectius s'han complert. Una de les idees que tenia aquest projecte era comparar valors experimentals amb els analítics que hem trobat. Per un problema amb la modelització de la geometria d'un model que ens proporcionava aquestes dades experimentals, no s'ha pogut finalitzar satisfactòriament aquest pas.

Finalment aquest projecte a donat idea a dues possibles vies d'investigació futures. Per una banda s'ha comprovat que el programa MATLAB en alguns casos no defineix correctament la geometria. Per tant, seria interessant depurar el programa que ja existeix o fins i tot, tornar-lo a escriure amb un nou plantejament considerant els problemes que ha provocat la programació antiga. Per altra banda, els anàlisis per elements finits són una eina útil per tenir una orientació sobre el comportament dels material compostos, però en cap cas es pot deixar de banda l'estudi experimental. Per tant, una segona ampliació del projecte que s'ha presentat, tractaria d'anàlisis experimentals de teixits plans de fibra amb laminats iso-fase i out-of-fase. Aquestes possibles ampliacions ajudarien a la creació d'un model prou depurat per simular el comportament real dels teixits plans de fibra.

Girona, 2 de setembre del 2008

Carles Vilà Grau

10. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document núm. 1 – Memòria

- Annex A. Descripció dels materials compostos
- Annex B. Estudis sobre modelització de teixits
- Annex C. Codi de generació de la geometria

Document núm. 2 – Annex de pressupost

11. BIBLIOGRAFIA

Llibres

[1] ARGÜELLES ALVAREZ, R. Fundamentos de elasticidad y su programación per elementos finitos; Ed, Bellisco, Madrid 1992.

[2] DEREK HULL, Materiales compuestos; Ed.Reverté, Barcelona 1987.

[3] FORNONS J.M. El metodo de los elementos finitos en la ingenireria de estructuras; Ed.Boixareu; Barcelona 1982.

Articles

[4] Hahn H.T., A Micromechanics Model for Thermo elastic Properties of Plain Weave Fabric Composites, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.116,(1994).

[5] Barbero E.J., Introduction to Coposite Materials Desingn, Taylor and Francis, Philadelphia,PA (1999).

[6] Huang Z.M.,The Mechanical Proprieties of Composites Reinforced with Woven and Braided Fabrics, Composites Science and Technology, Vol.60. (1999).

[7] Naik N.K., Prediction of On Axes Elastic Porperties of Plain Weave Fabric Composites, Composites Science and Technology,135-152, Vol.45. (1992).

[8] Vandeurzen Ph., Three Dimensional Micromechanics Analysis of Woven Fabric Composites:II. Elastic Analysis, Composites Science and Thecnology. Vol.56. (1996).

[9] Scida D.,A Micromechanics Model for 3D Elastility and Failure of Woven Fiber Composite Materials, Composites Science and Technology, Vol.59 (1999).

[10] Chou T.W. An Analytical and Experimental Study of Strength and Failure Behaviour of Plain Weave Composites, Journal of Composite Materials, Vol.32 (1998).

Pàgines webs

[11] Asociación Espanyola de Materiales Compuestos.(<http://www.AEMAC.es>, 29 gener 2007)

[12] BARBERO, E.J. Finite Element Modelling of Plain Weave Fabrics from Photomicrograph Measurements (<http://www.sciencedirect.com>, 2 octubre 2006)

[13] BARBERO, E.J. Micromechanics of fabric reinforced composites with periodic microstructure (<http://www.sciencedirect.com>, 2 octubre 2006)

[14] SUBODH K.M. Micromechanics for Particulate Reinforced composites (<http://www.aeronauticspaceadministration.org> , 20 gener 2007)

[15] Materiales compuestos reforzados con fibras (<http://www.udc.es/cim/matcom.htm> , 15 febrer 2007)

[16] Materiales compuestos, Wikipedeia (http://es.wikipedia.org/wiki/Materiales_compuestos , 30 juny 2008)

Projecte

[17] Sílvia Castellano Garriga. *Obtenció propietats equivalents de compostos teixits*. Girona, 20 de juny del 2007.

ANNEX A. DESCRIPCIÓ DELS MATERIALS COMPOSTOS

Un material es pot considerar que pertany a la família dels materials compostos quan compleix els següents requisits: estigui format per dos o més elements distingibles físicament, que es puguin separar mecànicament, presenti diferents fases químiques insolubles entre elles i finalment, les propietats mecàniques siguin superiors a la suma dels elements que el formen.

Quan es vol definir un material compost, normalment es parla de dos elements: la matriu que principalment aporta propietats químiques, físiques, transmet l'esforç a l'agent reforçant i es continua; i l'agent reforçant que aporta les propietats mecàniques i no té caràcter continu.

Els materials compostos sorgeixen per la necessitat d'obtenir objectes amb combinacions de propietats de diferents famílies. Les famílies que es poden trobar són: ceràmiques, plàstics i metalls. Per exemple, a la indústria del transport es necessita un tipus de material que sigui lleuger, rígid, resistent als impactes, a la corrosió i al desgast. Totes aquestes propietats no es troben fàcilment unides en una mateixa família.

Existeixen materials que no han rebut cap manipulació humana i que també es poden considerar a dins de la família dels materials compostos. Un exemple molt clar és la fusta que es fa servir per la indústria nàutica. La matriu seria la cel·lulosa i l'agent reforçant la fusta pròpiament dita.

Per acabar aquesta petita introducció, cal aclarir que l'obtenció dels materials compostos amb manipulació humana no és gens barata. Les raons per les quals s'encareix el seu preu són: la seva fabricació i la incompatibilitat entre famílies. Aquest fet ens ajuda a entendre perquè no es troba en la majoria d'objectes quotidians.

A.1 Classificació dels materials compostos

Un cop feta la introducció dels materials compostos, es parlarà d'una de les possibles classificacions que es fan amb aquesta família. La manera que es classificarà en aquest projecte serà en funció del seu reforç.

1-Reforçats amb partícules. Les partícules poden tenir una gran varietat geomètrica però solen tenir aproximadament les mateixes dimensions en totes les direccions, propietats que es diferencia amb les fibres. El reforç és més efectiu quan les partícules tenen una mida més petita i homogèniament distribuïdes al interior de la matriu. Les propietats mecàniques milloren incrementant el contingut de partícules. S'ha de vigilar quan s'incrementa la quantitat de partícules per evitar la saturació del combinat, matriu partícules.

Dintre d'aquesta classificació hi ha una altre subdivisió. Aquesta segona divisió està diferenciada per la grandària de les partícules. Quan les partícules tenen un diàmetre petit de 10 a 250 nm o quan els diàmetres són superiors a 250 nm. El primer cas s'endureix molt el material i es bloqueja el moviment de dislocació. El segon cas no es bloqueja el moviment de dislocació. Un exemple quotidià és el ciment on les partícules són la sorra o la grava en una matriu ceràmica composta per silicats i aluminosilicats.

2- Reforçats amb fibres. Aquesta forma és la que s'estudia en aquest projecte. La fase consta de fibres, fils o cilindres de diàmetres micromil·limètrics i longituds aproximadament d'un mil·límetre. Per tant, tenen longituds majors que els seus diàmetres. Mentre que el mòdul d'elasticitat no canvia amb la grandària del material, degut a les forces d'unió entre àtoms, la resistència si que varia amb la forma de la mostra. Les fibres menors presenten millors prestacions perquè es disminueix la probabilitat de trobar defectes. Encara que per raons de cost i salut es limita a un micròmetre el diàmetre, ja que poden originar partícules en suspensió que són perjudicials per la salut. De forma general, les matrius solen ser de resina epoxi o polièster. Les propietats varien segons l'ordenació de les fibres al interior del material: ordenades uniaxialment, parcialment ordenades i desordenades (MAT).

Aquest compostos aconseguixen més resistència a la fatiga, millor rigidesa i una bona relació pes/resistència. Totes les propietats esmentades s'aconsegueixen a partir d'unes fibres que són molt fràgils però estan recobertes d'una matriu que compensa amb propietats toves i dúctils. La matriu transmet la força a les fibres. La resistència pot mantenir-se a temperatures ambientals o elevades.

3-Estructures laminars o sandvitx. Normalment estan formats per un nucli i dues capes, una per cada banda. Tot i així, es poden trobar combinacions de més d'un nucli i capes de materials diferents apilades. Els materials compostos amb aquesta forma poden tenir molt bones propietats de resistència a la corrosió o abrasió, alta resistència i baix pes.

En general el compost és aquell material format per fibres situades dins d'una matriu o resina que manté les fibres unides i distribueix els esforços. Les fibres aguanten la major part de les càrregues mentre que la matriu es responsabilitza de la tolerància als cops, els atacs químics i la resistència a la fatiga.

A.1.1 Tipus de fibres

En aquest apartat es parlarà de les fibres de carboni, de vidre, de les orgàniques i finalment les de carbur de silici i les d'alúmina amb aluminosilicat. En cada apartat es definirà el mètode de fabricació i es destacarà alguna de les seves propietats mecàniques.

A - Fibres de carboni: són sòlids que presenten una morfologia fibrosa en forma de filaments amb un mínim d'un 94% en pes de carboni. Les fibres de carboni s'obtenen per carbonització (1200-1400°C) de fibres orgàniques naturals, sintètiques o procedents de precursors orgànics. La resistència a tracció varia segons l'orientació de les fibres i les esquerdes produïdes en el procés de fabricació. Les fibres són fràgils i es recuperen elàsticament quan es sotmeten a esforços inferiors als de trencament. El factor que s'ha de controlar quan els materials compostos contenen carboni és la fragilitat, per tant s'han d'evitar els impactes.

B - Fibres de vidre: normalment les composicions es basen en òxids de silici amb adicions de calci, bor, sodi, ferro i alumini. Les fibres de vidre es fabriquen fonent els materials en un dipòsit. El vidre flueix i per acció mecànica s'estira i surten les fibres per els orificis i s'enrotllen en tambors. La resistència al trencament de les fibres depèn del procés d'obtenció del vidre. Degut a l'estructura tridimensional del vidre les propietats són isotròpiques, és a dir, manté les mateixes propietats en totes les direccions.

C - Fibres orgàniques: aquest grup de fibres es basa en l'alta resistència i rigidesa. Les fibres orgàniques més conegudes són les que provenen d'una poliamida aromàtica anomenada Kevlar®. Aquestes fibres es fabriquen mitjançant processos d'extrusió i filat mantenint la fibra amb un dissolvent a una temperatura determinada fins que es produeix l'extrusió d'aquest dissolvent i s'evapora. El seu defecte és la baixa resistència a compressió axial.

D - Fibres de carbur de silici: presenten una estructura similar a la del diamant, amb una gran resistència i rigidesa. Per obtenir aquest material es necessiten sorres o quars amb una gran puresa i "coke" de petroli fusionat en un forn elèctric. La temperatura que ha d'assolir el forn ha de ser al voltant dels 2000°C. No és d'estranyar que aquest material tingui un cost molt elevat.

E - Fibres d'alúmina amb aluminosilicat provenen dels òxids d'alumini. Tenen bones propietats de resistència a altes temperatures, elevada duresa, fan un correcte aïllament tèrmic. El seu procés de fabricació a grans trets, es basa en un mètode anomenat Bayer. Es necessitaran pressions i temperatures elevades, per tant aquest tipus de fibra tampoc serà barata.

A.1.2 Tipus de matrius

En aquest apartat es trobaran els diferents tipus de resines o matrius que es poden trobar al mercat. Trobarem per una banda informació sobre: resines termostables i termoplàstiques, per altre banda també es parlarà de matrius metàl·liques i ceràmiques.

A – Resines termostables: Les resines es solidifiquen amb un agent catalitzador i algunes, necessiten una aportació de calor mitjançant forns. Segons les temperatures que es facin servir durant el procés de curat, es podran variar les propietats de la resina. Normalment aquest tipus de resines, acostumen a tenir un comportament isotròpic. La seva principal propietat és que mantenen les seves característiques de resistència amb increments de temperatura. El seu desavantatge és que són fràgils. Finalment, per classificar les resines segons les seves propietats es podria dir que, la resina epoxi queda a dalt de la classificació i la resina de poliester es troba en el nivell més baix.

B – Resines de termoplàstics: Aquestes resines no es trobaran mai treballant en llocs en els que hi hagi altes temperatures. La raó per la qual no poden estar amb altes temperatures, és perquè passen d'estat sòlid a líquid amb molta facilitat. Podrem trobar aquestes resines amb comportaments anisotròpics, és a dir que tenen propietats diferents segons l'eix de treball. Aquestes resines es diferencien de les primeres per la seva gran ductilitat. Les seves propietats varien segons la temperatura i la velocitat de deformació.

C – Matrius metàl·liques: Les matrius d'aquest tipus es troben amb aliatges que incorporen titani (Ti), alumini (Al) i magnesi (Mg). Els materials metàl·lics acostumen a tenir un comportament dúctil i isotròpic. Per poder modificar les propietats d'aquestes matrius es poden variar les quantitats de material i els tractaments tèrmics.

D – Matrius ceràmiques: en aquest apartat, es citaran algunes de les matrius ceràmiques que existeixen en el mercat. S'ha decidit escollir les més freqüents per evitar una classificació massa extensa.

Vítries: formades per borosilcats i aluminosilcats. La seva utilització és freqüent perquè el mètode de fabricació és relativament fàcil i per tant, el seu cost s'abarateix en comparació als altres.

Ceràmiques convencionals: formades per SiC, Al₂O₃, Si₃N₄ i ZrO₂. La seva estructura incorpora grans amb orientacions aleatòries. Es fan servir aquests tipus de matrius per aconseguir incrementar la tenacitat i la capacitat de dissipació del compost.

Formigó: és el material més utilitzat per la indústria de la construcció. Les raons per les quals és tant freqüent, són: la facilitat d'adaptació als motlles on es diposita abans del seu curat, el seu cost, l'alta duresa, la resistència i la facilitat de fabricació. Per contra també té uns desavantatges, que són: baixa resistència a la tracció, baixa ductilitat i el seu coeficient de dilatació. Per solucionar el seu pitjor problema que és la baixa resistència a tracció, es fan servir barres d'acer corrugat. Quan es troben aquest dos elements junts metall i formigó, s'obté el material compost més conegut, el formigó armat.

Quitrà: és un polímer termoplàstic que s'obté a partir de la destil·lació fraccionada del petroli. Es fa servir per la seva capacitat d'adhesió amb els neumàtics. Un dels llocs més freqüents on es pot trobar, és a la pavimentació de les carreteres.

ANNEX B. ESTUDIS SOBRE MODELITZACIÓ DE TEIXITS

En aquest annex es donarà a conèixer alguns estudis anteriors sobre modelització i anàlisi de materials compostos. Es dividirà la informació en dues parts, la primera tractarà sobre models analítics i la segona sobre models numèrics. Un cop introduïda la informació que aporta aquest annex, ens disposarem a presentar-la començant per els models analítics.

Els primers models de materials compostos que van aparèixer sobre teixits laminats, treballaven amb dues dimensions. Per tant, la ondulació provocada per l'encreuament de fibres no es considerava. Es van fer estudis sobre diferents làmines: en fase, fora de fase i fase aleatòria. La fase aleatòria no s'ha estudiat en aquest projecte. Les definicions de les geometries es van comprovar amb casos experimentals. Finalment, la forma que adopten les fibres es va reproduir mitjançant equacions sinusoïdals com s'ha vist en aquest projecte.

Ishikawa i Chou [10] van desenvolupar els tres models esmentats per predir les propietats elàstiques dels teixits laminat. Cap dels tres models va tenir en compte les ondulacions provocades per l'encreuament o solapament de fibres, però es suposava que les diferents làmines estaven apilades amb diferents direccions. Es va utilitzar aquest model per la fabricació de teixits de setí.

Huang [6] va crear un model micromecànic per predir les propietats elàstiques dels teixits compòsits. Aquest mètode analític es va utilitzar per molts estudis que van aparèixer a posteriori. Per predir les propietats del material, suposava que el model estava format per subelements. Cada subelement estava dividit per segments i part de matriu. Els elements varen agafar el rol de compostos unidireccionals. Finalment, per fer els càlculs de les propietats del material, Huang va assumir que el comportament a fatiga era el mateix per la matriu i els subelements.

Naik i Ganesh [7] desenvoluparen els models micromecànics de teixits en dues dimensions. Així van determinar les propietats elàstiques depenent de l'ordit, la trama i l'ondulació del teixit. En el cas de Slice Array Model (SAM), el volum

geomètric estava dividit en quatre llesques. Aquestes llesques s'idealitzaven per assumir que: la superior i la inferior representaven la matriu i les dues centrals feien la feina de les fibres. La forma que s'obtenia adoptava forma de sandvitx i es podia aconseguir una simetria perfecte entre les dues capes superiors i inferiors. Les propietats de cada làmina estaven calculades des de les capes individuals (considerant l'ondulació), que estaven utilitzades per calcular les constants elàstiques del volum geomètric.

Naik va desenvolupar un altre mètode l'Element Array Model (EAM). Aquest mètode incloïa dos models diferents. En un model, la secció estava realitzada en la direcció de l'ordit. Cada secció estava dividida en elements d'infinita espessor. Llavors les constants clàssiques de l'ordit i trama eren calculats per cada element (considerant l'ondulació de l'angle). L'espessor de l'element es calculava amb la teoria clàssica de laminat. El gruix del volum geomètric s'aconseguia fent la suma de les diferents làmines que formaven el model. En l'altre model, les seccions estaven realitzades en la direcció de la trama. Així, els elements en làmines eren assemblats emprant les mateixes condicions de tensió per aconseguir les làmines amb la mateixa rigidesa i les làmines eren assemblades tenint la mateixa condició per obtenir la rigidesa del volum geomètric.

Vandeurzen [8] va desenvolupar analíticament, models elàstics en dues dimensions en teixits "híbrids". Tres grups de paràmetres geomètrics estaven identificats per descriure la geometria en dues dimensions. El primer grup conté la geometria amb el número, diàmetre i espais de les fibres. El segon grup és anomenat "grup de mesura", conté les quantitats que poden ser obtingudes per un microscopi i càlculs com espessor, empaquetament, i altres. El tercer grup s'anomena "grup de càlcul" i conté els paràmetres que poden ser calculats del primer i segon grup. L'anàlisi geomètric va ser emprat per aplicacions de Microsoft Excel anomenat TEXCOMP. El model treballa per predir el model elàstic però la predicció del model pla no és bo.

Hahn i Pandey [4] van desenvolupar un model analític per predir les propietats elàstiques dels compòsits. Les funcions matemàtiques descriuen els perfils i les geometries proporcionades en detall. La secció transversal i l'ondulació es van tenir

en compte de forma sinusoidal. De forma addicional, la forma d'ondulació determina la secció transversal de forma perpendicular. El volum d'una fracció de buit va ser considerat mentre es calculava el volum de fracció de fibres, el qual va ser negligit per investigadors previs. La tensió per igual condició va ser utilitzada per calcular la rigidesa de la matriu dels teixits. Primer, la rigidesa dels components en material d'un sistema coordinat va ser calculat utilitzant equacions micromecàniques. Llavors la rigidesa total va ser obtinguda per promig de la rigidesa de la matriu sobre el seu espessor.

Scida [9] va desenvolupar un model analític anomenat MESOTEX (MEchanical Simulation Of TEXTiles) basat en la laminació clàssica teòrica (CLT) per predir en tres dimensions les propietats elàstiques i resistència dels teixits compòsits. Les propietats van ser calculades per procés de discretització de la matriu en la cel·la unitària com han fet prèviament els investigadors anteriors. Mentrestant les solucions semblaven molt lluny de simplificar les distribucions d'esforç i tensió. La descripció geomètrica de la cel·la unitària amb matrius, és l'aspecte més important en l'anàlisi d'elements finits dels teixits reforçats compòsits. Els models matemàtics s'han desenvolupat per descriure la geometria d'una cel·la unitària.

Averill desenvolupà un model analític i numèric simplificat per predir les propietats elàstiques dels teixits. La cel·la unitària va ser discretitzada en paquets d'elements, amb un element a través de l'espessor de la cel·la. El volum de fracció i d'inclinació van se calculats basant-se en la unitat de la cel·la geomètrica. Les propietats de rigidesa de cada element van ser calculades des de la fracció de volum de la fibra, orientació de les fibres, fibres i propietats de matrius utilitzant el model teòric. Aquestes propietats van ser com un *input* cap al model d'element finit i totes les propietats de les cel·les van ser obtingudes aplicant necessàries condicions límit. El model és simple en el sentit que no cal un model en tres dimensions. Així doncs, un petit nombre d'elements és requerit per el model i així el temps computacional és petit. El model produeix bons resultats per els valors de rigidesa excepte per mòduls entre làmines G_{13} .

Blackletter va desenvolupar un model d'elements finits en tres dimensions. El programa que va utilitzant era el PATRAN. Elements hexaèdrics es van emprar per generar la malla. Els feixos es van modelar com materials compòsits unidireccionals. Les seves propietats van ser calculades emprant dues dimensions generalitzant la tensió a l'anàlisi micromecànica. El model idealitza la geometria.

Collegal i Shridharan desenvoluparen dues formes d'elements finits per fabricar. La primera forma és similar a l'element finit anterior on la geometria representativa conté els feixos i la matriu. Per fer el mallat utilitzaven elements en tres dimensions. La segona forma és diferent dels models actuals. El model consisteix en laminar els elements representats en tres dimensions representant la matriu en forma de sandvitx entre feixos. Així, la unitat de la cel·la consisteix en quatre elements laminats representant l'ordit i la trama dels feixos. Les variacions de l'espessor són incorporades en les làmines dels elements. Les respostes elàstiques dels dos models corresponen amb les dades experimentals.

Un dels estudis més acurats i actuals dels diferents models breument introduïts, és el model realitzat per Barbero [12]. Aquests estudis són molt més amplis i són els estudis en els quals s'ha basat el projecte i l'estudi mitjançant les seves dades.

La geometria bàsica del volum de l'element va ser desenvolupat utilitzant paràmetres geomètrics mesurats per CERL (Construction Engineering Research Lab.). La geometria bàsica consisteix en quatre feixos entrelligats (en disposició de teixit pla) envoltats per la matriu (de propietats isotròpiques). Així hi ha quatre geometries representant els feixos. Dues d'elles representen dues meitats dels feixos en la direcció x (feixos ordit) mentre que les altres dues representen dues meitats de feixos en la direcció y (feixos trama). Cada feix es modela com un compòsit unidireccional amb propietats ortotròpiques.

ANNEX C. CODI INFORMÀTIC

C.1 Codi de discretització de la geometria i representació gràfica

El codi que es mostrarà a continuació és el que s'ha fet servir per la discretització de la geometria i la representació dels gràfics amb el programa Matlab.

```

clear all;
close all;

% // -----
% // Define constants
% // -----
escala=1e-3; % en mm
a{1}=920*escala;
a{2}=920*escala; %//1.5;
a3=(250-5)*escala;
%ag{1}=170*escala;
%ag{2}=170*escala; %//1.5;
ag{1}=85*escala;
ag{2}=85*escala; %//1.5;

tole=1e-1*escala; % resolucio punts de les funcions
tolo=5*escala;

repre_grafica = 0; %// 0= no representar, 1= si representar, , 2= si representar per fer
croquis

% //// nomenclatura funcions
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3, nomes tram 1
% //          top_f2=2, bot_f2=4, nomes tram 3
% //          top_w4=5, seccio 1 i 2
% //          bot_w4=6, seccio 1

itram_in=[1,3,1,3,1,1];
itram_fi=[1,3,1,3,3,3];
n_secc=[6,5,4,5,6];
n1=6;n2=5; n_tram=[n1,n2,n1];
n_tram_ori=[3,3,4]; % del tram1 busquem 3 orientacions, del tram2 busquem 3 orientacions, del
tram3 busquem 4 orientacions

% divisions de la geometria per punts amb intervals de "tole"
for ipla=1:2
    xt{ipla,1}=[-a{ipla}:tole:-ag{ipla}];xt{ipla,2}=[-
ag{ipla}:tole:ag{ipla}];xt{ipla,3}=[ag{ipla}:tole:a{ipla}];
    x_tot{ipla} = [-a{ipla}*1.4:tole:a{ipla}*1.4];
    [nr_x{ipla},nc_x{ipla}]=size(x_tot{ipla});
    for itram=1:3
        [nr_xt{ipla,itram},nc_xt{ipla,itram}]=size(xt{ipla,itram});
    end
end

% x_tot = [xt{1} xt{2} xt{3}];

% //Definim la funció en el punt com:
% //Variable Pla "ipla":Pla XZ=1; pla YZ=2
% //Variable secció del pla: secció front=1; secció meitat pla =2; secció mitja pla =3;
% //Funció a la que pertany "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3, top_f2=2, bot_f2=4, top_w4=5,
bot_w4=6
%           1,1      1,2      2,1      2,2      4,1
4,2
% //Variable Tram "itram":Tram=1 funció va del 1 fins valor 1; Tram=2 funció va del valor1
fins valor 2; Tram=3 funció va del valor 2 a nc
% //Variable número "ik" és el valor que adquireix en cada tram. El seu número depèn en quina
posició es troba de la partició en 6 parts; és a dir i=1...6
%
% // -----

```

```

% // EQUACIONS SECCIÓ FRONTAL PLA XZ
% // -----
slxz=sin((pi*ag{1})/(2*a{1}));

% //Constants z_xflt (1,1,1) = top_f1=1 = top_Z_1cros
A(1,1,1)=(a3/2)*(1+slxz);
B(1,1,1)=pi/(2*(a{1}-ag{1}));
C(1,1,1)=(pi*2*a{1}-pi*ag{1})/(2*a{1}-2*ag{1});
D(1,1,1)=(a3/2)*(1-slxz);
% //Constants z_xflb (1,1,3) = bot_f1f = top_w4f (antic bot1)= bot_Z_1cros
A(1,1,3)=a3/2;
B(1,1,3)=pi/(2*a{1});
C(1,1,3)=0;
D(1,1,3)=(a3/2);
% //Constants z_xf4t (1,1,5) = bot_f1f = top_w4f (antic bot1)= top_Z_3long
A(1,1,5)=a3/2;
B(1,1,5)=pi/(2*a{1});
C(1,1,5)=0;
D(1,1,5)=(a3/2);
% //Constants z_xf2t (1,1,2) =top_f2f= bot_w4f (antic top 2) = top_Z_2cros
A(1,1,2)=a3/2;
B(1,1,2)=pi/(2*a{1});
C(1,1,2)=0;
D(1,1,2)=(-a3/2);
% //Constants z_xf4b (1,1,6) =top_f2f= bot_w4f (antic top 2) = bot_Z_3long
A(1,1,6)=a3/2;
B(1,1,6)=pi/(2*a{1});
C(1,1,6)=0;
D(1,1,6)=(-a3/2);
% //Constants z_xf2b (1,1,4) =bot_f2f (antic bot2) = bot_Z_2cros
A(1,1,4)=(a3/2)*(1+slxz);
B(1,1,4)=pi/(2*a{1}-2*ag{1});
C(1,1,4)=-((pi*2*a{1}-pi*ag{1})/(2*a{1}-2*ag{1}));
D(1,1,4)=-((a3/2)*(1-slxz));

% //-----
% //CÀLCUL EQUACIONS SECCIÓ FRONTAL PLA YZ
% //-----
slyz=sin((pi*ag{2})/(2*a{2}));

% //Constants z_yflt (2,1,1) = top_f1=1 = top_Z_3cros
A(2,1,1)=(a3/2)*(1+slyz);
B(2,1,1)=pi/(2*(a{2}-ag{2}));
C(2,1,1)=(pi*2*a{2}-pi*ag{2})/(2*a{2}-2*ag{2});
D(2,1,1)=(a3/2)*(1-slyz);
% //Constants z_yflb (2,1,3) = bot_f1f = top_w4f (antic bot1)= bot_Z_3cros
A(2,1,3)=a3/2;
B(2,1,3)=pi/(2*a{2});
C(2,1,3)=0;
D(2,1,3)=(a3/2);
% //Constants z_yf4t (2,1,5) = bot_f1f = top_w4f (antic bot1)= top_Z_2long
A(2,1,5)=a3/2;
B(2,1,5)=pi/(2*a{2});
C(2,1,5)=0;
D(2,1,5)=(a3/2);
% //Constants z_yf2t (2,1,2) =top_f2f= bot_w4f (antic top 2) = top_Z_4cros
A(2,1,2)=a3/2;
B(2,1,2)=pi/(2*a{2});
C(2,1,2)=0;
D(2,1,2)=(-a3/2);
% //Constants z_yf4b (2,1,6) =top_f2f= bot_w4f (antic top 2) = bot_Z_2long
A(2,1,6)=a3/2;
B(2,1,6)=pi/(2*a{2});
C(2,1,6)=0;
D(2,1,6)=(-a3/2);
% //Constants z_yf2b (1,1,4) =bot_f2f (antic bot2) = bot_Z_4cros
A(2,1,4)=(a3/2)*(1+slyz);
B(2,1,4)=pi/(2*a{2}-2*ag{2});
C(2,1,4)=-((pi*2*a{2}-pi*ag{2})/(2*a{2}-2*ag{2}));
D(2,1,4)=-((a3/2)*(1-slyz));

% // -----
% // EQUACIONS SECCIÓ FINAL PASSADA PLA XZ i YZ
% // -----

```



```

%paràmetres necessaris (s1 i s2) per automatitzar la resolucio de les equacions
%final de passada XZ i YZ
for ipla=1:2
    if ipla==1
        ipla_p=2;
        s2=sin((pi*ag{1})/(2*a{1}));
        s1=sin((pi*ag{2})/(2*a{2}));
    else
        ipla_p=1;
        s1=sin((pi*ag{1})/(2*a{1}));
        s2=sin((pi*ag{2})/(2*a{2}));
    end

% //Constant z_xelt (ipla,2,1) = top_flp (antic top1)          = top_Z_1
A(ipla,2,1)=(a3/2)*(s1*s2+1);
B(ipla,2,1)=pi/(2*a{ipla_p}-2*ag{ipla_p});
C(ipla,2,1)=(pi/2)*((2*a{ipla_p}-ag{ipla_p})/(a{ipla_p}-ag{ipla_p}));
D(ipla,2,1)=-(a3/2)*(s1-1)*s2;
% //Constant z_xelb (ipla,2,3) =bot_flp (antic bot1)          = bot_Z_1
A(ipla,2,3)=(a3/2)*(s1*s2-1);
B(ipla,2,3)=pi/(2*a{ipla_p}-2*ag{ipla_p});
C(ipla,2,3)=(pi/2)*((2*a{ipla_p}-ag{ipla_p})/(a{ipla_p}-ag{ipla_p}));
D(ipla,2,3)=-(a3/2)*(s1-1)*s2;
% //Constant z_xe4t (ipla,2,5) = top_w4p = bot_w4p (antic top2) ja que D=0
A(ipla,2,5)=(a3/2)*(1-s1);
B(ipla,2,5)=pi/(2*a{ipla_p});
C(ipla,2,5)=0;
D(ipla,2,5)=0;
% //Constant z_xe4b (ipla,2,6) = top_w4p = bot_w4p (antic top2) ja que D=0
A(ipla,2,6)=(a3/2)*(1-s1);
B(ipla,2,6)=pi/(2*a{ipla_p});
C(ipla,2,6)=0;
D(ipla,2,6)=0;
% //Constant z_xe4t (ipla,2,2) =top_f2f (antic top2)          = top_Z_2
A(ipla,2,2)=(a3/2)*(s1*s2-1);
B(ipla,2,2)=pi/(2*a{ipla_p}-2*ag{ipla_p});
C(ipla,2,2)=-((pi/2)*((2*a{ipla_p}-ag{ipla_p})/(a{ipla_p}-ag{ipla_p})));
D(ipla,2,2)=(a3/2)*(s1-1)*s2;
% //Constant z_xe2b (ipla,2,4) =bot_f2f (antic bot 2)          = bot_Z_2
A(ipla,2,4)=(a3/2)*(s1*s2+1);
B(ipla,2,4)=pi/(2*a{ipla_p}-2*ag{ipla_p});
C(ipla,2,4)=-((pi/2)*((2*a{ipla_p}-ag{ipla_p})/(a{ipla_p}-ag{ipla_p})));
D(ipla,2,4)=(a3/2)*(s1-1)*s2;
end

%-----
%% paràmetres derivades pla XZ i pla YZ
%-----

%paràmetres Pla XZ(1) i YZ(2) de les derivades frontals que son les matixes
%que les de final de passada

for ipla=1:2
Ad(ipla,1,1)=(a3*pi)/(4*a{1});
Bd(ipla,1,1)=pi/(2*a{1});
Cd(ipla,1,1)=0;
end

% //Define equations RVE
for ipla=1:2
    if ipla==1
        ipla_p=2;
    else
        ipla_p=1;
    end
    for isecc=1:2
        if isecc==1
            xy_constant = -a{ipla_p};
        elseif isecc ==2
            xy_constant = -ag{ipla_p}; %/2;
        elseif isecc ==3
            xy_constant = 0;
        end
        for ifunc=1:n_secc(isecc)
% Funcions en tot el domini

```

```

        x_{ipla,isecc,ifunc}=x_tot{ipla};
        y_{ipla,isecc,ifunc}=xy_constant*ones(1,nc_x{ipla}); %x_tot./x_tot;

z_{ipla,isecc,ifunc}=(A(ipla,isecc,ifunc)*sin(B(ipla,isecc,ifunc).*x_tot{ipla})+C(ipla,isecc,ifunc))+D(ipla,isecc,ifunc));

% Funcions on estan definides
    if (itram_in(ifunc)==1)&(itram_fi(ifunc)==1)
        x_tram=xt{ipla,1};
    elseif (itram_in(ifunc)==3)&(itram_fi(ifunc)==3)
        x_tram=xt{ipla,3};
    else
        x_tram=[xt{ipla,1} xt{ipla,2} xt{ipla,3}];
    end
    [nr_xtt,nc_xtt]=size(x_tram);
    x{ipla,isecc,ifunc}=x_tram;
    y{ipla,isecc,ifunc}=xy_constant*ones(1,nc_xtt); %*x_tram./x_tram;

z{ipla,isecc,ifunc}=(A(ipla,isecc,ifunc)*sin(B(ipla,isecc,ifunc).*x_tram+C(ipla,isecc,ifunc))+D(ipla,isecc,ifunc));

        if ifunc==6 % pendent
            %
pendent_t{ipla,isecc,itram}=(Ad(ipla,1,1)*cos(Bd(ipla,1,1).*xt{ipla,1}+Cd(ipla,1,1))*Bd(ipla,1,1));

            pendent{ipla,isecc}=(Ad(ipla,1,1)*cos(Bd(ipla,1,1).*x_tram+Cd(ipla,1,1)));
            graus{ipla,isecc}=(atan2(pendent{ipla,isecc},1)*180)/pi; % el pendent passat a
graus

            if ipla==1
                th_xy{ipla,isecc}=0*ones(1,nc_xtt);
                th_zy{ipla,isecc}=0*ones(1,nc_xtt); % no s'ha de girar mai
                th_zx{ipla,isecc}=-graus{ipla,isecc};% rotacions respecte y les
orientacions en aquest eix es funció de pendent_t
            else % ipla ==2
                th_xy{ipla,isecc}=90*ones(1,nc_xtt);
                th_zy{ipla,isecc}=0*ones(1,nc_xtt); % no s'ha de girar mai
                th_zx{ipla,isecc}=-graus{ipla,isecc};% rotacions respecte y les
orientacions en aquest eix es funció de pendent_t
            end
        end

% Funcions per cada tram
    for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
        x_t{ipla,isecc,ifunc,itram}=xt{ipla,itram};
        y_t{ipla,isecc,ifunc,itram}=xy_constant*ones(1,nc_xt{ipla,itram});

z_t{ipla,isecc,ifunc,itram}=(A(ipla,isecc,ifunc)*sin(B(ipla,isecc,ifunc).*x_t{ipla,itram})+C(ipla,isecc,ifunc))+D(ipla,isecc,ifunc));

        if ifunc==6 % pendent
            %
pendent_t{ipla,isecc,itram}=(Ad(ipla,1,1)*cos(Bd(ipla,1,1).*x_t{ipla,1}+Cd(ipla,1,1))*Bd(ipla,1,1));

pendent_t{ipla,isecc,itram}=(Ad(ipla,1,1)*cos(Bd(ipla,1,1).*x_t{ipla,itram}+Cd(ipla,1,1)));
            graus_t{ipla,isecc,itram}=(atan2(pendent_t{ipla,isecc,itram},1)*180)/pi; % el
pendent passat a graus
            if ipla==1
                th_xy_t{ipla,isecc,itram}=0*ones(1,nc_xt{ipla,itram});
                th_zy_t{ipla,isecc,itram}=0*ones(1,nc_xt{ipla,itram}); % no s'ha de girar
mai
                th_zx_t{ipla,isecc,itram}=-graus_t{ipla,isecc,itram};% rotacions respecte
y les orientacions en aquest eix es funció de pendent_t
            else % ipla ==2
                th_xy_t{ipla,isecc,itram}=90*ones(1,nc_xt{ipla,itram});
                th_zy_t{ipla,isecc,itram}=0*ones(1,nc_xt{ipla,itram}); % no s'ha de girar
mai
                th_zx_t{ipla,isecc,itram}=-graus_t{ipla,isecc,itram};% rotacions respecte
y les orientacions en aquest eix es funció de pendent_t
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

end
% //Càlcul del valor de divisions en parts
for ipla=1:2
for isecc=1:2
for ifunc=1:n_secc(isecc)
    for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
        zd(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=z_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(1);
        xd(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=x_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(1);
        yd(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=y_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(1);

zd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=z_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
xd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=x_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
yd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=y_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(nc_xt{ipla,itram});

        if ifunc==6 % pendent
            z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=zd(ipla,isecc,ifunc,itram,1);
            x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=xd(ipla,isecc,ifunc,itram,1);
            y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=yd(ipla,isecc,ifunc,itram,1);

z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=zd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram));
x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=xd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram));
y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=yd(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram));

            pendent_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=pendent_t{ipla,isecc,itram}(1);
pendent_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=pendent_t{ipla,isecc,itram}(nc_xt{ipla,itram});

            graus_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=graus_t{ipla,isecc,itram}(1); % el
pendent passat a graus

graus_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=graus_t{ipla,isecc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
% el pendent passat a graus

            th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=th_xy_t{ipla,isecc,itram}(1);
            th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=th_zy_t{ipla,isecc,itram}(1);
            th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,1)=th_zx_t{ipla,isecc,itram}(1);

th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=th_xy_t{ipla,isecc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=th_zy_t{ipla,isecc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,n_tram(itram))=th_zx_t{ipla,isecc,itram}(nc_xt{ipla,itram});
        end

        for i=2:(n_tram(itram)-1)

zd(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=z_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1));

xd(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=x_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1));

yd(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=y_t{ipla,isecc,ifunc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1));

            if ifunc==6 % pendent
                z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=zd(ipla,isecc,ifunc,itram,i);
                x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=xd(ipla,isecc,ifunc,itram,i);
                y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=yd(ipla,isecc,ifunc,itram,i);

pendent_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=pendent_t{ipla,isecc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1));

graus_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=graus_t{ipla,isecc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1)); % el pendent passat a graus

th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=th_xy_t{ipla,isecc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram(itram)-1))*(i-1));

```

```

th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=th_zy_t{ipla,isecc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram
(itram)-1))*(i-1));

th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,i)=th_zx_t{ipla,isecc,itram}(int16(nc_xt{ipla,itram}/(n_tram
(itram)-1))*(i-1));
    end
end
end
end

% // -----
% // Representacions grafiques
% // -----
% representacions grafiques per fer els croquis
if (repre_grafica ==2)
for ipla=1:2
    if ipla==1
        title_ipla='XZ';
    else
        title_ipla='YZ';
    end
    for isecc=1:2
        figure1 = figure;
        if isecc==1
            title_isecc='front';
        else
            title_isecc='end';
        end
        title([title_ipla,'ipla', title_isecc,' cross section']);
        hold on;
        % //// nomenclatura funcions
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3,   nomes tram 1
% //          top_f2=2, bot_f2=4,   nomes tram 3
% //          top_w4=5,             seccio 1 i 2
% //          bot_w4=6,             seccio 1
        plot(x_{ipla,isecc,1},z_{ipla,isecc,1},'k')

        plot(x{ipla,isecc,2},z{ipla,isecc,2})
        plot(x{ipla,isecc,3},z{ipla,isecc,3})
        plot(x{ipla,isecc,4},z{ipla,isecc,4})
        plot(x{ipla,isecc,6},z{ipla,isecc,6})
        plot(x_{ipla,isecc,5},z_{ipla,isecc,5},'k')
%plot2d(x', [bot1' top1' bot2' top2'] ,rect=[-a{1},-
a3,a{1},a3],style=[color("blue"),color("red"),color("black"),color("green")])
        plot([-a{ipla},a{ipla}],[a3,a3],'--k','LineWidth',.8)
        plot([-a{ipla},a{ipla}],[-a3,-a3],'--k','LineWidth',.8)
        plot([-a{ipla},-a{ipla}],[-a3,a3],'--k','LineWidth',.8)
        plot([a{ipla},a{ipla}],[a3,a3],'--k','LineWidth',.8)
        plot([-a{ipla}*1.4,a{ipla}*1.4],[0,0],'k','LineWidth',.8)
        plot([0,0],[-a3*1.6 a3*1.6],'k','LineWidth',.8)
        hold off
        xlabel('X (mm)','FontSize',16);ylabel('Z (mm)','FontSize',16);
        %legend('\sigma_{yz}','\sigma_z','Location','SouthWest');legend('boxoff');
        axis([-a{ipla}*1.4 a{ipla}*1.4 -a3*1.6 a3*1.6]);axis equal;
% //legend(['top1' 'bot1' 'top2' 'bot2'],3);
        set(gca,'FontSize',16);
        saveas(figure1,['Fig5_5'],'eps');
        saveas(figure1,['Fig5_5'],'ai');
    end
end
end
end

% representacions grafiques frontals i finals de passada
if (repre_grafica ==1)
for ipla=1:2
    if ipla==1
        title_ipla='XZ';
    else
        title_ipla='YZ';
    end
    for isecc=1:2
        figure1 = figure;

```

```

        if isecc==1
            title_isecc='front';
        else
            title_isecc='end';
        end
        title([title_ipla, ' ', title_isecc, ' cross section']);
        hold on;
        plot(x{ipla,isecc,1},z{ipla,isecc,1}) % blava
        for i=1:n_tram(1)
            x_plot(i)=xd(ipla,isecc,1,1,i);
            z_plot(i)=zd(ipla,isecc,1,1,i);
        end
        plot(x_plot,z_plot,'x')

        plot(x{ipla,isecc,2},z{ipla,isecc,2},'r') % vermella
        for i=1:n_tram(3)
            x_plot(i)=xd(ipla,isecc,2,3,i);
            z_plot(i)=zd(ipla,isecc,2,3,i);
        end
        plot(x_plot,z_plot,'xr')

        plot(x{ipla,isecc,3},z{ipla,isecc,3},'c')
        for i=1:n_tram(1)
            x_plot(i)=xd(ipla,isecc,3,1,i);
            z_plot(i)=zd(ipla,isecc,3,1,i);
        end
        plot(x_plot,z_plot,'xc')

        plot(x{ipla,isecc,4},z{ipla,isecc,4},'y')
        for i=1:n_tram(3)
            x_plot(i)=xd(ipla,isecc,4,3,i);
            z_plot(i)=zd(ipla,isecc,4,3,i);
        end
        plot(x_plot,z_plot,'xy')

        plot(x{ipla,isecc,5},z{ipla,isecc,5},'g')
        for i=1:n_tram(2)
            xx_plot(i)=xd(ipla,isecc,5,2,i);
            zx_plot(i)=zd(ipla,isecc,5,2,i);
        end
        plot(xx_plot,zx_plot,'xg')

        plot(x{ipla,isecc,6},z{ipla,isecc,6},'k')
        for i=1:n_tram(2)
            xx_plot(i)=xd(ipla,isecc,6,2,i);
            zx_plot(i)=zd(ipla,isecc,6,2,i);
        end
        plot(xx_plot,zx_plot,'xk')

        hold off
        %%plot([0,1],[0,0],'k','LineWidth',.8)
        xlabel('X (mm)','FontSize',16);ylabel('Z (mm)','FontSize',16);
        %legend('\sigma_{yz}','\sigma_z','Location','SouthWest');legend('boxoff');
        axis([-a{ipla} a{ipla} -a3 a3])
        set(gca,'FontSize',16);
    end
end
end
% Representació gràfica de les pendents
if (repre_grafica ==1)
    for ipla=1:2
        if ipla==1
            title_ipla='XZ';
        else
            title_ipla='YZ';
        end
        for isecc=1:1
            figure1 = figure;
            if isecc==1
                title_isecc='front';
            else
                title_isecc='end';
            end
            title([title_ipla, ' ', title_isecc, ' cross section']);
            hold on;

```

```

        plot(x{ipla,isecc,6},pendent{ipla,isecc},'k')

    for itram=1:3
        for i=1:n_tram(itram)
            xx_plot(i)=x_coor(ipla,isecc,6,itram,i);
            zx_plot(i)=pendent_coor(ipla,isecc,6,itram,i);
        end
        plot(xx_plot,zx_plot,'xk')
    end

    hold off
    %plot([0,1],[0,0],'k','LineWidth',.8)
    xlabel('X (mm)','FontSize',16);ylabel('Pendent (-)','FontSize',16);
    %legend('\sigma_{yz}','\sigma_{z}','Location','SouthWest');legend('boxoff');
    % axis([-a{ipla} a{ipla} -a3 a3])
    set(gca,'FontSize',16);
end
end
for ipla=1:2
    if ipla==1
        title_ipla='XZ';
    else
        title_ipla='YZ';
    end
    for isecc=1:1
        figure1 = figure;
        if isecc==1
            title_isecc='front';
        else
            title_isecc='end';
        end
        title([title_ipla,' ', title_isecc,' cross section']);
        hold on;
        plot(x{ipla,isecc,6},graus{ipla,isecc},'k')

    for itram=1:3
        for i=1:n_tram(itram)
            xx_plot(i)=x_coor(ipla,isecc,6,itram,i);
            zx_plot(i)=graus_coor(ipla,isecc,6,itram,i);
        end
        plot(xx_plot,zx_plot,'xk')
    end

    hold off
    %plot([0,1],[0,0],'k','LineWidth',.8)
    xlabel('X (mm)','FontSize',16);ylabel('Pendent (graus)','FontSize',16);
    %legend('\sigma_{yz}','\sigma_{z}','Location','SouthWest');legend('boxoff');
    %axis([-a{ipla} a{ipla} -a3 a3])
    set(gca,'FontSize',16);
end
end
end
end

```

C.2 Codi generador d'arxius de sortida per els elements finits

El codi que es mostrarà a continuació dona tots els arxius necessaris perquè el programa d'elements finits faci la representació gràfica. Els arxius contenen la informació dels punts per representar la geometria, el mallat, les propietats elàstiques de la fibra i la matriu i les orientacions de les fibres.

```

% // -----
% // Fitxers de sortida de resultats
% // -----
%
% u=mopen('C:/solid_cerl.mac','w') //open the result file
u = fopen('solid_cerl.mac','w');

% // discretització del mallat
fprintf(u,'dnle = %i \n',12) %//16; // amplada semifeix
fprintf(u,'dnlc = %i \n',4) %//4; // ag
fprintf(u,'dn2 = %i \n',6) %dn2 = 4; %//6; // gruix del feix
fprintf(u,'dn2m = %i \n',4) %dn2m = 2; %//3; // gruix de la matriu sobre el feix

% //Càlcul del valor de divisions en parts
ipla_ini=1;
ipla_fi=2;
% nomesmitat=1; // 1 si només exportar la mitat
%
% // GENERAR ALTRES SECCIONS, generar les coordenades dels punts claus.
%
% // Coordenades dels punts de les funcions
for ipla=1:2
    for isecc=1:2
        for ifunc=1:n_secc(isecc)
            for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
                for ik=1:n_tram(itram)
                    if (ipla==1)
                        if (isecc==1)
                            x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=-yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                            x_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            y_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=+yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            z_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                            if (ifunc==6)
                                x_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                y_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=-y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                z_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                                x_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                y_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=+y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                z_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                                th_xy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                th_zy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                th_zx_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                                th_xy_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=
th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                th_zy_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=
th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                                th_zx_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= -
th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            end

                        else % // isecc==2
                            x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=-yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

                            x_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)=-xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            y_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)=+yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            z_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                        end
                    else % // ipla=2
                        if (isecc==1)
                            x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=+xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                            z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

x_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
y_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
z_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

if (ifunc==6)
  x_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  y_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=+x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  z_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

  x_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-y_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  y_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=-x_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  z_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= z_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

  th_xy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  th_zy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  th_zx_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=
th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

  th_xy_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=
th_xy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  th_zy_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)=
th_zy_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  th_zx_coor_k(ipla,isecc+4,ifunc,itram,ik)= -
th_zx_coor(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
end

else % // isecc==2
  x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)=+xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);

  x_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)=-yd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  y_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)=-xd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
  z_k(ipla,isecc+2,ifunc,itram,ik)= zd(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
end
end
end
end
end
end
end

% // Coordenades dels plans superiors (ifunc=8) i pla inferior (ifunc=7)
for ipla=1:2
  for isecc=[1,2,4,5]
    for ifunc=5
      for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
        for ik=[1,n_tram(itram)]
          x_k(ipla,isecc,8,itram,ik)= x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
          y_k(ipla,isecc,8,itram,ik)= y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
          z_k(ipla,isecc,8,itram,ik)= a3+tolo;

          x_k(ipla,isecc,7,itram,ik)=x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
          y_k(ipla,isecc,7,itram,ik)=y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik);
          z_k(ipla,isecc,7,itram,ik)=-a3-tolo;
        end
      end
    end
  end
end
end

%
% // KEY POINTS que defineixen totes les funcions
% // -----
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3,   nomes tram 1
% //           top_f2=2, bot_f2=4,   nomes tram 3
% //           top_w4=5,              tots els trams, nomes seccio 1 i 2
% //           bot_w4=6,              tots els trams, nomes seccio 1
for ipla=1:2
  for isecc=[1,2,4,5]
    for ifunc=1:n_secc(isecc)
      for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
        fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Funcio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,ifunc,itram)
        for ik=1:n_tram(itram)
          iref = 10000*ipla+1000*isecc+100*ifunc+10*itram+ik;

```



```

        if (ik==n_tram(itram)) %           // no escriure tots els kp dels extrem final
            kwrite=0;
        elseif ((isecc==1)|(isecc==5)&(ik==1)&(itram==3)&(ifunc==4)) % // no escriure el
primer punt de les línies interiors del tram 1 de ifunc=5
            kwrite=0;
        elseif ((isecc==2)|(isecc==4)&(ik==1)&(itram==1)&(ifunc==5)) % // no escriure el
primer punt de les línies interiors del tram 1 de ifunc=5
            kwrite=0;
        elseif ((isecc==2)|(isecc==4)&(ik==1)&(ifunc~=5)) % // no escriure el primer punt
de les línies interiors de la resta de funcions
            kwrite=0;
        else
            kwrite=1;
        end
        if ((isecc==1)|(isecc==5)&((ifunc==2)|(ifunc==3))) %
            kwrite=0;
        end
        if (kwrite==1) %
            fprintf(u,'k, %i , %16.13f , %16.13f , %16.13f
\n',iref,x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,it
ram,ik))
        end
    end
end
end
end
end
end
end
%
% // KEY POINTS dels plans superiors (ifunc=8) i pla inferior (ifunc=7)
fprintf(u,'! KEY POINTS dels plans superiors (ifunc=8) i pla inferior (ifunc=7) -- %i \n',1)
for ipla=1:2
    for isecc=[1,2,4,5]
        for ifunc=[8,7]
            itram=2;
            if (ipla==1)|((ipla==2)&((isecc==1)|(isecc==5)))
                fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Funcio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,ifunc,itram)
                for ik=[1,n_tram(itram)]
                    iref = 10000*ipla+1000*isecc+100*ifunc+10*itram+ik;
                    fprintf(u,'k, %i , %16.13f , %16.13f , %16.13f
\n',iref,x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,it
ram,ik))
                end
            end
            itram = 1;ik=1;
            if ((isecc==1)|(isecc==5))
                iref = 10000*ipla+1000*isecc+100*ifunc+10*itram+ik;
                fprintf(u,'k, %i , %16.13f , %16.13f , %16.13f
\n',iref,x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,it
ram,ik))
            end
        end
    end
end
end
% // LINES
% // -----
%
% ////línies dels plans superiors i inferiors
fprintf(u,'! línies dels plans superiors i inferiors -- %i \n',1)
for ipla=1:2
    for isecc=[1,2,4,5]
        for ifunc=[8,7]
            for itram=1:3
                fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Funcio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,ifunc,itram)
                ik = 1;
                fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f , %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                ik = n_tram(itram);
                fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f , %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                if itram==2
                    fprintf(u,'l,iref1,iref2,dnlc ! -- %i \n',1)
                %
                dnl=dnlc;
            else

```

```

        fprintf(u,'l,iref1,iref2,dnle ! -- %i \n',1)
%       dn1=dnle;
        end
        end
        end
        end
end

% ///// línies de les cantonades exteriors
fprintf(u,'! línies de les cantonades exteriors -- %i \n',1)
for ipla=1:2
    for isecc=[1,5]
        for itram=1:3
            fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,itram)
            ik=1;
            ifunc=5;
            fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
            ifunc=6;
            fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
            fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn2 ! -- %i \n',1)
            if itram==1
                ifunc=7;
                fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                fprintf(u,'l,iref3,iref2,dn2m ! -- %i \n',1)
                elseif itram==2
                    for ik=[1,n_tram(itram)]
                        ifunc=6;
                        fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                        ifunc=7;
                        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                        fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn2m ! -- %i \n',1)
                        ifunc=5;
                        fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                        ifunc=8;
                        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                        fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn2m ! -- %i \n',1)
                        end
                        elseif itram==3
                            ik=n_tram(itram);
                            ifunc=5;
                            fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                            ifunc=6;
                            fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                            fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn2 ! -- %i \n',1)
                            ifunc=8;
                            fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                            fprintf(u,'l,iref3,iref1,dn2m ! -- %i \n',1)
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

% ///// línies de les cantonades interiors
fprintf(u,'! línies de les cantonades interiors -- %i \n',1)
for ipla=1:2

```

```

for isecc=[2,4]
    fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,itram)
    ik=1;ifunc=5;itram=2;
    fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
    ik=6;ifunc=1;itram=1;
    fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
    ik=6;ifunc=8;itram=1;
    fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
    ik=6;ifunc=7;itram=1;
    fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

    fprintf(u,'l,iref1,iref2,%i \n',l)
    fprintf(u,'l,iref2,iref3,dn2m ! -- %i \n',l)
    fprintf(u,'l,iref1,iref4,dn2m ! -- %i \n',l)
end
end

% ///// línies que falten al mig
fprintf(u,'! línies que falten al mig -- %i \n',l)
for ipla=1:2
    for isecc=[2,4]
        fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,itram)
        ik=1;ifunc=5;itram=2;
        fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        ik=1;ifunc=2;itram=3;
        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn1c ! -- %i \n',l)

        ik=5;ifunc=5;itram=2;
        fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        ik=6;ifunc=1;itram=1;
        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        fprintf(u,'l,iref1,iref2,dn1c ! -- %i \n',l)
    end
end

% //// funcions
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3,   nomes tram 1
% //           top_f2=2, bot_f2=4,   nomes tram 3
% //           top_w4=5,             tots els trams, nomes seccio 1 i 2
% //           bot_w4=6,             tots els trams, nomes seccio 1
%
fprintf(u,'! funcions -- %i \n',l)
for ipla=1:2
    for isecc=[1,2,4,5]
        for ifunc=1:n_secc(isecc)
            for itram=itram_in(ifunc):itram_fi(ifunc)
                fprintf(u,'! Pla %i, Seccio %i, Funcio %i, Tram %i \n',ipla,isecc,ifunc,itram)
                kwrite=1;
                if ((isecc==1)|(isecc==5))&((ifunc==2)|(ifunc==3))
                    kwrite=0;
                end
                if (kwrite==1)
                    for ik=1:n_tram(itram)
                        if ik==1
                            fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
                        elseif ik==2

```

```

        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        elseif ik==3
        fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        elseif ik==4
        fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        elseif ik==5
        fprintf(u,'iref5=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        elseif ik==6
        fprintf(u,'iref6=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        end
    end
    if n_tram(itram)==6
        fprintf(u,'bsplin,iref1,iref2,iref3,iref4,iref5,iref6 \n')
        fprintf(u,'LESIZE,all,,dnle !--%i',1);
    elseif n_tram(itram)==5
        fprintf(u,'bsplin,iref1,iref2,iref3,iref4,iref5 \n')
        fprintf(u,'LESIZE,all,,dnlc !--%i',1);
    end
end
end
end
end
end

% //mfprintf(u,'/pnum,kp,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'lplot ! -- %i \n',1)
%
% ////////////////////////////////// AREAS////////
% //AREAS dels yarns
for ipla=1:2
    for iarea=1:6
        if iarea==1
            ifuncA=5;ifuncB=5; %// top del primer feix
            iseccA=2;iseccB=1;
        elseif iarea==2
            ifuncA=5;ifuncB=6; %// bot del primer feix
            iseccA=2;iseccB=1;
        elseif iarea==3
            ifuncA=5;ifuncB=6; %// frontal del primer feix
            iseccA=1;iseccB=1;
        elseif iarea==4
            ifuncA=5;ifuncB=5; %// top del segon feix
            iseccA=4;iseccB=5;
        elseif iarea==5
            ifuncA=5;ifuncB=6; %// bot del segon feix
            iseccA=4;iseccB=5;
        elseif iarea==6
            ifuncA=5;ifuncB=6; %// frontal del segon feix
            iseccA=5;iseccB=5;
        end
        for itram=1:3
            fprintf(u,'KSEL,all \n')
            isecc=iseccA;ifunc=ifuncA;ik=1;
            fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
            isecc=iseccA;ifunc=ifuncA;ik=n_tram(itram);
            fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

            isecc=iseccB;ifunc=ifuncB;ik=1;
            fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
            isecc=iseccB;ifunc=ifuncB;ik=n_tram(itram);

```

```

fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref3 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref2 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline4, LINE, 0, num,max \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3,iline4 \n')
end
end
end

fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)
%
% // PAS 2 -----
fprintf(u,'! PAS 2 ----- %i \n',2)
% /// "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3, nomes tram 1
% /// top_f2=2, bot_f2=4, nomes tram 3
% /// top_w4=5, tots els trams, nomes seccio 1 i 2
% /// bot_w4=6, tots els trams, nomes seccio 1
for ipla=1:2 % /// generació de les arees verticals que tanquen els yarns

for iyarn=1:2
if iyarn==1
ifuncA=5;ifuncB=6;ifuncC=5;
iseccA=1;iseccB=1;iseccC=2;
else
ifuncA=5;ifuncB=6;ifuncC=5;
iseccA=5;iseccB=5;iseccC=4;
end
for iarea=1:4
if iarea==1
itram=1;ik=1;
elseif iarea==2
itram=1;ik=n_tram(itram);
elseif iarea==3
itram=3;ik=1;
elseif iarea==4
itram=3;ik=n_tram(itram);
end
fprintf(u,'KSEL,all \n')
ifunc=ifuncA;isecc=iseccA;
fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifuncB;isecc=iseccB;
fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifuncC;isecc=iseccC;

```

```

fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3 \n')
end
end
end

fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'! PAS 3 ----- %i \n',3)
% // PAS 3 -----
for ipla=1:2 % //// generació de les arees horitzantals al final de les interfícies entre
yarns
for iyarn=1:4
if iyarn==1
iseccA=4;iseccB=2;iseccC=4;iseccD=2;
ifuncA=4;ifuncB=5;ifuncC=4;ifuncD=5;
itramA=3;itramB=2;itramC=3;itramD=1;
ikA=1;ikB=1;ikC=6;ikD=1;
elseif iyarn==2
iseccA=4;iseccB=2;iseccC=4;iseccD=2;
ifuncA=1;ifuncB=5;ifuncC=1;ifuncD=5;
itramA=1;itramB=2;itramC=1;itramD=3;
ikA=6;ikB=5;ikC=1;ikD=6;
elseif iyarn==3
iseccA=2;iseccB=4;iseccC=2;iseccD=4;
ifuncA=4;ifuncB=5;ifuncC=4;ifuncD=5;
itramA=3;itramB=2;itramC=3;itramD=1;
ikA=1;ikB=1;ikC=6;ikD=1;
elseif iyarn==4
iseccA=2;iseccB=4;iseccC=2;iseccD=4;
ifuncA=1;ifuncB=5;ifuncC=1;ifuncD=5;
itramA=1;itramB=2;itramC=1;itramD=3;
ikA=6;ikB=5;ikC=1; ikD=6;
end
fprintf(u,'KSEL,all \n')
ik=ikA;ifunc=ifuncA;itram=itramA;isecc=iseccA;
fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ik=ikB;ifunc=ifuncB;itram=itramB;isecc=iseccB;
fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ik=ikC;ifunc=ifuncC;itram=itramC;isecc=iseccC;
fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ik=ikD;ifunc=ifuncD;itram=itramD;isecc=iseccD;
fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))

```

```

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline4, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3,iline4 \n')
end
end

fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'! PAS 4 ----- %i \n',4)
% // PAS 4a -----
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3,   nomes tram 1
% //           top_f2=2, bot_f2=4,   nomes tram 3
% //           top_w4=5,           tots els trams, nomes seccio 1 i 2
% //           bot_w4=6,           tots els trams, nomes seccio 1
for ipla=1:2 % //// generació de les arees verticals que tanquen interfícies entre yarns
  for iyarn=1:4
    if iyarn==1
      iseccA=1;iseccB=2;iseccC=2;
      ifuncA=5;ifuncB=5;ifuncC=1;
      itramA=2;itramB=2;itramC=1;
      ikA=1;ikB=1;ikC=6;
    elseif iyarn==2
      iseccA=1;iseccB=2;iseccC=2;
      ifuncA=6;ifuncB=5;ifuncC=2;
      itramA=2;itramB=2;itramC=3;
      ikA=5;ikB=5;ikC=1;
    elseif iyarn==3
      iseccA=5;iseccB=4;iseccC=4;
      ifuncA=5;ifuncB=5;ifuncC=1;
      itramA=2;itramB=2;itramC=1;
      ikA=1;ikB=1;ikC=6;
    elseif iyarn==4
      iseccA=5;iseccB=4;iseccC=4;
      ifuncA=6;ifuncB=5;ifuncC=2;
      itramA=3;itramB=3;itramC=3;
      ikA=1;ikB=1;ikC=1;
    end
    fprintf(u,'KSEL,all \n')
    ik=ikA;ifunc=ifuncA;itram=itramA;isecc=iseccA;
    fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
    ik=ikB;ifunc=ifuncB;itram=itramB;isecc=iseccB;
    fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
    ik=ikC;ifunc=ifuncC;itram=itramC;isecc=iseccC;

```

```

    fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

    fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
    fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
    fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
    fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
    fprintf(u,'KSEL,all \n')

    fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
    fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3 \n')
    fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
    fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
    fprintf(u,'KSEL,all \n')

    fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
    fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
    fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
    fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
    fprintf(u,'KSEL,all \n')

    fprintf(u,'LSEL,all \n')
    fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3 \n')

end
end
%
% // PAS 4b -----
for ipla=1:2 % //// generació de les arees verticals que tanquen interfícies entre yarns
    for iyarn=1:4
        if iyarn==1
            iseccA=4;iseccB=2;iseccC=2;
            ifuncA=2;ifuncB=5;ifuncC=1;
            itramA=3;itramB=2;itramC=1;
            ikA=1;ikB=1;ikC=6;
        elseif iyarn==2
            iseccA=4;iseccB=2;iseccC=2;
            ifuncA=1;ifuncB=5;ifuncC=2;
            itramA=1;itramB=2;itramC=3;
            ikA=6;ikB=5;ikC=1;
        elseif iyarn==3
            iseccA=2;iseccB=4;iseccC=4;
            ifuncA=2;ifuncB=5;ifuncC=1;
            itramA=3;itramB=2;itramC=1;
            ikA=1;ikB=1;ikC=6;
        elseif iyarn==4
            iseccA=2;iseccB=4;iseccC=4;
            ifuncA=1;ifuncB=5;ifuncC=2;
            itramA=1;itramB=3;itramC=3;
            ikA=6;ikB=1;ikC=1;
        end
        fprintf(u,'KSEL,all \n')
        ik=ikA;ifunc=ifuncA;itram=itramA;isecc=iseccA;
        fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        ik=ikB;ifunc=ifuncB;itram=itramB;isecc=iseccB;
        fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
        ik=ikC;ifunc=ifuncC;itram=itramC;isecc=iseccC;
        fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f, %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

        fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
        fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
        fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
        fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
        fprintf(u,'KSEL,all \n')

        fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
        fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3 \n')
        fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
        fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')

```



```

fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3 \n')

end
end
fprintf(u,'ASEL,S, , ,53,76 \n')
fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'! PAS 5 ----- %i \n',5)
% // // PAS 5 -----
% // dues arees que tanquen el volumet central
fprintf(u,'AL,%i,%i,%i,%i \n',101,103,105,107)
fprintf(u,'AL,%i,%i,%i,%i \n',102,104,106,108)

fprintf(u,'ASEL,S, , ,77,78 \n')
fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'! PAS 6 ----- %i \n',6)
% // // PAS 6 -----
for ipla=1:2 % // generacio de les arees plans superiors (ifunc=8) i pla inferior
(ifunc=7)
  for iarea=1:4
    if iarea==1
      ifuncA=8;ifuncB=8; %// top del primer feix
      iseccA=2;iseccB=1;
    elseif iarea==2
      ifuncA=7;ifuncB=7; %// bot del primer feix
      iseccA=2;iseccB=1;
    elseif iarea==3
      ifuncA=8;ifuncB=8; %// top del segon feix
      iseccA=4;iseccB=5;
    elseif iarea==4
      ifuncA=7;ifuncB=7; %// bot del segon feix
      iseccA=4;iseccB=5;
    end
    if ipla==1
      itramstart=1;itramfinal=3;
    else
      itramstart=2;itramfinal=2;
    end
    for itram=itramstart:itramfinal
      fprintf(u,'KSEL,all \n')
      isecc=iseccA;ifunc=ifuncA;ik=1;
      fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
      isecc=iseccA;ifunc=ifuncA;ik=n_tram(itram);
      fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

      isecc=iseccB;ifunc=ifuncB;ik=1;
      fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
      isecc=iseccB;ifunc=ifuncB;ik=n_tram(itram);
      fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))

      fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
      fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')

```

```

fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline4, LINE, 0, num,max \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3,iline4 \n')
    end
end
end

% // dues arees que tanquen el volumet central
fprintf(u,'AL,%i,%i,%i,%i \n',35,17,41,11)
fprintf(u,'AL,%i,%i,%i,%i \n',32,14,38,8)

fprintf(u,'ASEL,S, , ,79,96 \n')
fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'! PAS 7 ----- %i \n',7)
% // PAS 7a -----
% // "ifunc": top_f1=1, bot_f1=3,   nomes tram 1
% //           top_f2=2, bot_f2=4,   nomes tram 3
% //           top_w4=5,             tots els trams, nomes seccio 1 i 2
% //           bot_w4=6,             tots els trams, nomes seccio 1
for ipla=1:2 % /// generació de les arees verticals que tanquen la matriu (arees de fora)
    for iarea=1:2
        for isecc=[1,5]
            if iarea==1
                ifunc1=7;isecc1=isecc;itram1=1;ik1=1;
                ifunc2=7;isecc2=isecc;itram2=1;ik2=n_tram(itram2);
                ifunc3=6;isecc3=isecc;itram3=1;ik3=n_tram(itram3);
                ifunc3b=6;isecc3b=isecc;itram3b=1;ik3b=1;
                ifunc4=7;isecc4=isecc;itram4=2;ik4=n_tram(itram4);
                ifunc5=4;isecc5=isecc;itram5=3;ik5=1;
                ifunc5b=4;isecc5b=isecc;itram5b=3;ik5b=n_tram(itram5b);
                ifunc6=7;isecc6=isecc;itram6=3;ik6=n_tram(itram6);
            elseif iarea==2
                ifunc1=8;isecc1=isecc;itram1=1;ik1=1;
                ifunc2=8;isecc2=isecc;itram2=1;ik2=n_tram(itram2);
                ifunc3=1;isecc3=isecc;itram3=1;ik3=n_tram(itram3);
                ifunc3b=1;isecc3b=isecc;itram3b=1;ik3b=1;
                ifunc4=8;isecc4=isecc;itram4=2;ik4=n_tram(itram4);
                ifunc5=5;isecc5=isecc;itram5=2;ik5=n_tram(itram5);
                ifunc5b=5;isecc5b=isecc;itram5b=3;ik5b=n_tram(itram5b);
                ifunc6=8;isecc6=isecc;itram6=3;ik6=n_tram(itram6);
            end
        end
    end

    fprintf(u,'KSEL,all \n')
    ifunc=ifunc1;isecc=isecc1;itram=itram1;ik=ik1;
    fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
    ifunc=ifunc2;isecc=isecc2;itram=itram2;ik=ik2;
    fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
    ifunc=ifunc3;isecc=isecc3;itram=itram3;ik=ik3;

```

```

fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifunc3b;isecc=isecc3b;itram=itram3b;ik=ik3b;
fprintf(u,'iref3b=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifunc4;isecc=isecc4;itram=itram4;ik=ik4;
fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifunc5;isecc=isecc5;itram=itram5;ik=ik5;
fprintf(u,'iref5=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifunc5b;isecc=isecc5b;itram=itram5b;ik=ik5b;
fprintf(u,'iref5b=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
ifunc=ifunc6;isecc=isecc6;itram=itram6;ik=ik6;
fprintf(u,'iref6=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,i
k))
fprintf(u,'KSEL,S , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref3b \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref3b \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3b, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref2 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline4, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline5, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref4 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline6, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref4 \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref6 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline7, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S , ,iref5b \n')
fprintf(u,'KSEL,A , ,iref6 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline8, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

```

```

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref5b \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline5b, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3,iline3b \n')
fprintf(u,'AL,iline3,iline4,iline5,iline6 \n')
fprintf(u,'AL,iline6,iline7,iline8,iline5b \n')
end
end
end

% /// PAS 7b -----
for ipla=1:2 % /// generació de les arees verticals que tanquen la matriu (arees de dins)

for iarea=1:2
for isecc=[2,4]
if iarea==1
ifunc1=7;isecc1=isecc_;itram1=1;ik1=1;
ifunc2=7;isecc2=isecc_;itram2=1;ik2=n_tram(itram2);
ifunc3=5;isecc3=isecc_;itram3=1;ik3=n_tram(itram3);
ifunc3b=5;isecc3b=isecc_;itram3b=1;ik3b=1;
ifunc4=7;isecc4=isecc_;itram4=2;ik4=n_tram(itram4);
ifunc5=4;isecc5=isecc_;itram5=3;ik5=1; %// abans ifun5=2
ifunc6=7;isecc6=isecc_;itram6=3;ik6=n_tram(itram6);
ifunc5b=4;isecc5b=isecc_;itram5b=3;ik5b=n_tram(itram5b);
elseif iarea==2
ifunc1=8;isecc1=isecc_;itram1=1;ik1=1;
ifunc2=8;isecc2=isecc_;itram2=1;ik2=n_tram(itram2);
ifunc3=1;isecc3=isecc_;itram3=1;ik3=n_tram(itram3);
ifunc3b=1;isecc3b=isecc_;itram3b=1;ik3b=1;
ifunc4=8;isecc4=isecc_;itram4=2;ik4=n_tram(itram4);
ifunc5=5;isecc5=isecc_;itram5=2;ik5=n_tram(itram5);
ifunc6=8;isecc6=isecc_;itram6=3;ik6=n_tram(itram6);
ifunc5b=5;isecc5b=isecc_;itram5b=3;ik5b=n_tram(itram5b);
end

fprintf(u,'KSEL,all \n')
ifunc=ifunc1;isecc=isecc1;itram=itram1;ik=ik1;
fprintf(u,'iref1=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc2;isecc=isecc2;itram=itram2;ik=ik2;
fprintf(u,'iref2=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc3;isecc=isecc3;itram=itram3;ik=ik3;
fprintf(u,'iref3=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc4;isecc=isecc4;itram=itram4;ik=ik4;
fprintf(u,'iref4=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc5;isecc=isecc5;itram=itram5;ik=ik5;
fprintf(u,'iref5=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc6;isecc=isecc6;itram=itram6;ik=ik6;
fprintf(u,'iref6=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc3b;isecc=isecc3b;itram=itram3b;ik=ik3b;
fprintf(u,'iref3b=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))
ifunc=ifunc5b;isecc=isecc5b;itram=itram5b;ik=ik5b;
fprintf(u,'iref5b=kp(%16.13f , %16.13f, %16.13f)
\n',x_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik))

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')

```

```

fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline1, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref1 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3b \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline2, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref3b \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline3b, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref2 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline4, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref3 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline5, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline6, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref4 \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref6 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline7, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref5b \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref6 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline8, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'KSEL,S, , ,iref5b \n')
fprintf(u,'KSEL,A, , ,iref5 \n')
fprintf(u,'LSLK,S,1 \n')
fprintf(u,'*GET,iline5b, LINE, 0, num,max \n')
fprintf(u,'KSEL,all \n')

fprintf(u,'LSEL,all \n')
fprintf(u,'AL,iline1,iline2,iline3,iline3b \n')
fprintf(u,'AL,iline3,iline4,iline5,iline6 \n')
fprintf(u,'AL,iline6,iline7,iline8,iline5b \n')
    end
    end
end

fprintf(u,'ASEL,S, , ,97,144 \n')
fprintf(u,'/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'/pnum,area,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aplot ! -- %i \n',1)

% //// PAS 7b
% -----
fprintf(u,'! Sistemes de coordenades pel material dels yarns----- %i \n',1)

```

```

fprintf(u, '*get,old_cs,active,0,csys \n')
for ipla=1:2
    for iyarn=1:2          % els 2 dos yarns de cada pla
        if iyarn==1
            ifuncA=6;iseccA=1;
        elseif iyarn==2
            ifuncA=6;iseccA=1+4;
        end
        for itram=1:3
            isecc=iseccA;ifunc=ifuncA;

for ik=1:n_tram(itram)
numCS=ipla*1000+iyarn*100+itram*10+ik;

fprintf(u, 'CLOCAL,%i,%i,%16.13f,%16.13f,%16.13f,%16.13f,%16.13f,%16.13f \n', numCS,0,...

x_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),y_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),z_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),...

th_xy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),th_zy_coor_k(ipla,isecc,ifunc,itram,ik),th_zx_coor_k(i
ipla,isecc,ifunc,itram,ik))

fprintf(u, 'CSYS,old_cs \n')
end
    end
end
end

fprintf(u, 'allsel,all \n')

fclose(u) %//close the result file

u = fopen('volum_cerl.mac', 'w');

fprintf(u, 'ALLSEL,ALL ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VDEL,ALL ! -- %i \n',1)

fprintf(u, '! Creació de volums ----- ! -- %i \n',1)

fprintf(u, '!PAS 1 ---- volums dels feixos ! -- %i \n',1)
fprintf(u, '! del volum 1 al 12 ! -- %i \n',1)

fprintf(u, 'VA,1,4,7,37,38 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,2,5,8,38,39 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,3,6,9,39,40 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,10,13,16,41,42 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,11,14,17,42,43 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,12,15,18,43,44 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,19,22,25,45,46 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,20,23,26,46,47 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,21,24,27,47,48 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,28,31,34,49,50 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,29,32,35,50,51 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,30,33,36,51,52 ! -- %i \n',1)

fprintf(u, '/pnum,kp,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, '/pnum,line,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, '/pnum,area,0 ! -- %i \n',1)

fprintf(u, '/pnum,volume,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'vplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u, '!PAS 2 ---- Interfícies entre feixos ! -- %i \n',1)
fprintf(u, '! del 12 al 24 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,53,23,66,69 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,59,5,62,75 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,55,32,68,71 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,57,14,64,73 ! -- %i \n',1)

fprintf(u, 'VA,56,20,65,72 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,58,2,61,74 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,54,29,67,70 ! -- %i \n',1)
fprintf(u, 'VA,60,11,63,76 ! -- %i \n',1)

fprintf(u, 'VA,61,66,1,24 ! -- %i \n',1)

```

```

fprintf(u,'VA,62,67,6,28 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,63,68,10,33 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,64,65,19,15 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'!PAS 3 --- VOLUMET ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'! volum 25 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,78,74,70,76,72,77,75,71,73,69 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'!PAS 4 --- VOLUMS de la matriu ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'! volum 26 a 33 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,79,103,117,127,141,21 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,80,141,104,142,128,58 ! volum 27 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,81,142,105,118,129,3 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,93,143,129,119,130,54 ! volum 29 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,85,130,120,106,144,30 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,86,144,107,139,131,60 ! volum 31 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,87,139,108,115,132,12 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,91,116,127,132,140,56 ! volum 33 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'VA,95,134,125,137,122,77 ! volum 34 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'VA,82,111,121,135,97,4 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,92,110,121,126,134,53 ! volum 36 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,90,109,102,133,126,22 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,89,133,138,101,125,57 ! volum 38 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,88,124,138,100,114,13 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,94,137,124,113,123,55 ! volum 40 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,84,136,123,112,99,31 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VA,83,135,122,136,98,59 ! volum 42 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'VA,96,128,143,131,140,78 ! volum 43 mapped ! -- %i \n',1)

fclose(u) %//close the result file

u = fopen('malla_cerl.mac','w');

fprintf(u,'esize,10 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'type,3 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'amesh,1,6 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'amesh,10,15 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'amesh,19,24 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'amesh,28,33 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'amesh,53,60 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'r,%i,1 \n',1)
fprintf(u,'r,%i,1 \n',2)
fprintf(u,'r,%i,1 \n',3)
fprintf(u,'r,%i,1 \n',5)
fprintf(u,'r,%i,1 \n',6)

fprintf(u,'type,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'! Mallat dels feixos de fibres ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'mat,2 ! material dels feixos ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'real,2 ! ler feix ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'MSHKEY,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1113 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,1,1,4 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1123 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,2,2,5 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1133 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,3,3,6 ! -- %i \n',1)

csys,11
esel,s,real,,2
NSLE,s
!nset,R,loc,x,-a(1),(((a(1)-ag(1))/dnle)-a(1)
nset,R,loc,x,(((0.92)-0.085)/12)*1-0.92-0.01,(((0.92)-0.085)/12)*2-0.92+0.01
nplot
fprintf(u,'dnlc
eplot

```

```

fprintf(u,'real,3      ! 1er feix ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1213 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,4,10,13 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1223 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,5,11,14 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,1233 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,6,12,15 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'real,4      ! 1er feix ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2113 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,7,19,22 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2123 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,8,20,23 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2133 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,9,21,24 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'real,5      ! 1er feix ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2213 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,10,28,31 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2223 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,11,29,32 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,2233 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'VSWEEP,12,30,33 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'!aclear,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'!amesh,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESYS,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'! Mallat de la matriu ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'mat,1      ! material de la matriu ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'real,1      ! matriu ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,27 ! volum 27 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,29 ! volum 29 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,31 ! volum 31 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,33 ! volum 33 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'vmesh,36 ! volum 36 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,38 ! volum 38 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,40 ! volum 40 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,42 ! volum 42 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'vmesh,34 ! volum 34 mapped ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,43 ! volum 43 mapped ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'vmesh,26 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,28 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,30 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,32 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,35 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,37 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,39 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,41 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'*create,manual ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'asel,s,,arg1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ESLA,S ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'asel,s,,arg2 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'NSLA,S,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'n_elem= ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*get,num_element,elem,0,count ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'iwrite= ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'n_= ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'n_repeat= ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*dim,iwrite,,num_element ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*dim,n_,,num_element,9 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*dim,n_repeat,,num_element,9 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*do,i,1,num_element,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' iwrite(i)=1      ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'! n_elem is undefined; use lowest active element number when i=1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *if,i,ne,1,then ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' n_elem=elnext(n_elem) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *else ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *get,n_elem,elem,0,num,min ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *endif ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' ! get x,y,z locations of current node in active coord system ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *do,ii,1,4,1 ! -- %i \n',1)

```



```

fprintf(u,'    n_repeat(i,ii)=0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        n_(i,ii)=NELEM(n_elem,ii) ! Node number in position NPOS (1--20) of element
E. ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        x_=nx(n_(i,ii)) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        y_=ny(n_(i,ii)) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        z_=nz(n_(i,ii)) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        !    get closest node from component n_elem ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        pos_node=node(x_,y_,z_) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        n_(i,ii+4)=pos_node ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        *if,pos_node,ne,n_(i,ii),then ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'            diff_y=(y_-ny(pos_node)) ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'            *if,diff_y,lt,1e-3,then ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'                iwrite(i)=0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'            *endif ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        *else ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'            n_repeat(i,ii)=1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'        *endif ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *enddo ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*enddo ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'asel,s,,arg1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'asel,a,,arg2 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'NSLA,S,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*do,i,1,num_element,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *if,iwrite(i),eq,1,then ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'     *if,n_repeat(i,1),eq,1,then ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'         e,n_(i,2),n_(i,6),n_(i,5),n_(i,1),n_(i,3),n_(i,7),n_(i,8),n_(i,4) ! -- %i
\n',1)
fprintf(u,'     *else ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'         e,n_(i,1),n_(i,5),n_(i,6),n_(i,2),n_(i,4),n_(i,8),n_(i,7),n_(i,3) ! -- %i
\n',1)
fprintf(u,'     *endif ! -- %i \n',1)
fprintf(u,' *endif ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*enddo ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*end ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'/VIEW,1,1,1,1 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'kplot ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'*use>manual,53,23 ! vols 13, 14, 15 i 16 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,59,5 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,55,32 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,57,14 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'*use>manual,20,56 ! vols 17, 18, 19 i 20 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,2,58 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,29,54 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,11,60 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'*use>manual,1,24 ! vols 21, 22, 23 i 24 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,10,33 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,19,15 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'*use>manual,28,6 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'allsel,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'aclear,all ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'MSHKEY,0 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'MSHAPE,1,3d ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vmesh,25 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'!nummrg,all,0.12e-2 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'nummrg,nodes,1.1e-3 ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'nummrg,kp,1.1e-3 ! -- %i \n',1)

fprintf(u,'MODMSH,nocheck ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'vdel,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'ldel,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'kdel,all ! -- %i \n',1)
fprintf(u,'numcmp,all ! -- %i \n',1)

fclose(u) %//close the result file

```