EPS
Escola Politècnica
UdG Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Industrial. Pla 1994

Títol: Disseny i fabricació del frontal d'un monoplaça de competició en fibra de carboni

Document: MEMÒRIA

Alumne: Marc Casas Bosch

Director/Tutor: Jordi Renart / Josep Vicens
Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial
Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): juny / 2007

ÍNDEX:

1. INTRODUCCIÓ 3
1.1. Antecedents 3
1.2. Objecte 3
1.3. Especificacions i abast 4
1.4. Peticionari 4
2. VISTA GENERAL DEL PFC 5
3. OBTENCIÓ DE LA GEOMETRIA 8
3.1. Estudi d'alternatives 8
3.2. Modelat del frontal 8
3.3. Modelat de l'aleró 10
4. MALLAT DEL FRONTAL 14
5. MATERIALS COMPOSITS I LAMINATE MODELER 15
5.1. Introducció 15
5.1.1. Formats comercials dels materials compòsits 15
5.1.2. Tècniques de fabricació dels materials compòsits 16
5.2. Adaptabilitat dels teixits i patrons 18
5.3. Conceptes importants del Laminate Modeler 20
5.3.1. El "draping" 21
5.3.2 Passos a seguir en Laminate Modeler 25
6. LAMINAT DEL MODEL 29
7. CÀRREGUES CONSIDERADES 35
7.1. Degudes als esforços aerodinàmics 35
7.2. Degudes als esforços creats al elevar el vehicle (manteniment, transport,..) 41
7.3. Aquelles que intervenen en cas d'impacte frontal. Accions futures 42
8. RESUM DEL PRESSUPOST 43
9. CONCLUSIONS 44
10. RELACIÓ DE DOCUMENTS 47
11. BIBLIOGRAFIA 48
12. GLOSSARI 49

ANNEX A: TECNIQUES PER A LA DIGITALITZACIÓ 52

A.1. Braç digitalitzador amb/sense contacte 52

A.2. 'Llapis' digitalitzador 53

A.3. Fotogrametria 54

A.4. A partir de vistes ortogonals 57

A.5. Valoracions econòmiques 58

ANNEX B: MODELAT DEL FRONTAL AMB RHINOCEROS 3D 59

ANNEX C: MALLAT DEL FRONTAL AMB MSC.PATRAN 64

ANNEX D: LAMINAT DEL FRONTAL AMB EL MSC.LAMINATE MODELER 73

ANNEX E: CALCUL AERODINAMIC DE L'ALERÓ AMB EL CFDESIGN 83

ANNEX F. ANALISIS DEL FRONTAL AMB MSC.MARC 89

F.1. Considerant un material isotròpic 89

F.1.1 Preparació del model 89

F.1.2. Càlcul amb les càrregues aerodinàmiques 91

F.1.3. Càlcul amb les càrregues del pes 98

F.2. Considerant un laminat i considerant un sandwitch 100

ANNEX G. RESULTATS 101

G.1. Introducció 101

G.2. Desplaçament 104

G.2.1 Càrrega aerodinàmica 105

G.2.2. Càrrega deguda al pes del vehicle 112

G.3. Tensió 114

G.3.1. Material isotròpic 114

G.3.2. Material laminat 117

G.3.3. Material sandwitch 119

G.4. Deformació elàstica 122

G.4.1. Material isotròpic 122

G.4.2. Material laminat 125

G.4.3. Material sandwitch 128

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Tradicionalment, els materials emprats en els diferents components d'un vehicle han estat acers, aluminis, plàstics, etc. En alguns sectors punters, com el de la competició o l'aeronàutic, l'ús de materials compòsits està molt estès. Això es deu a la seva excel·lent relació entre pes i resistència.

Tot i que en alguns pocs casos els components de material compòsit es calculen per elements finits, la producció està molt deslligada d'aquest procés de disseny. I en la pràctica, en comptes de calcular el component es fa un assaig amb el component en el laboratori fins que aquest trenca. D'aquesta manera, utilitzant el mètode de prova i error es decideix si el tipus, orientació, i nombre de capes de teixit és suficient. A més, el patronatge i col·locació del teixit en el motllo és una tasca molt artesanal, on l'experiència de l'operari és qui mana a l'hora de col·locar els teixits per tal que s'adaptin a la geometria de la peça.

Per altra banda, el grup de recerca de materials compòsits AMADE de la Universitat de Girona disposa d'un software capaç de fer el càlcul per elements finits de materials compòsits i també de dissenyar el patronatge.

1.2. Objecte

Industrialització d'una peça de material compòsit tenint en compte consideracions de resistència estructural i en especial, el posterior procés de fabricació. Al ser un procediment innovador i la primera vegada que s'utilitza en el grup de recerca, s'elaborarà un mètode que posteriorment servirà de referència en el futur.

1.3. Especificacions i abast

- Obtenció de la geometria de la peça a partir de fotografies i un software de modelat 3D.

- Mallat de la peça amb elements de quatre nodes el més regulars possible.

- Determinar la magnitud de les càrregues a les que està sotmès el frontal: les aerodinàmiques i les degudes al pes del vehicle. Per tal de satisfer el reglament tècnic de competició també es considera l'impacte frontal.

- Per determinar les càrregues aerodinàmiques que l'aleró davanter crea sobre el frontal es fa un assaig aerodinàmic amb un software CFD. En la simulació es suposa una velocitat del vehicle rectilínia i uniforme de 300Km/h.

- Per determinar les càrregues degudes al pes del vehicle es considera que té un pes de 800Kg i el centre de gravetat està centrat longitudinalment i transversalment.

- Dimensionar la peça per tal de suportar les càrregues anteriors.

- Disseny del patronatge, per tal que en el moment de fer el laminat, les diferents capes de teixit s'adaptin adequadament al motllo.

-Millora

1.4. Peticionari

El present projecte es porta a terme a petició del grup de recerca i transferència tecnològica AMADE. El grup de recerca pertany al departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de la Universitat de Girona.

2. VISTA GENERAL DEL PFC

Degut a la quantitat de software utilitzat i a la no linealitat del projecte, s'ha considerat oportú abans de començar a entrar en matèria, tenir una visió general dels passos que s'han seguit fins arribar a les conclusions finals.

S'ha partit del frontal d'un monoplaça de competició del equip Pons Racing. Per poder-lo veure s'ha anat al taller de TR Composites, que és una empresa que es dedica a la fabricació amb materials compòsits. Aquí s'han fet les fotografies del frontal des de les diferents vistes. La peça que s'ha utilitzat és la que es mostra a la Figura 1.

Figura 1. Component que es pretén industrialitzar, i vista un cop muntat en el vehicle.

L'objectiu ha estat partint de la geometria del frontal existent, seguir tot el procés com si aquest frontal s'hagués d'industrialitzar i produir en sèrie.

Per una banda, s'ha realitzat el modelat de l'aleró del monoplaça en el túnel de vent utilitzant el programa Rhinoceros3D. Per fer aquest modelat s'ha utilitzat unes fotografies extretes de la pàgina Web de Pons Racing, que és l'equip al qual pertany aquest monoplaça. Amb aquest model s'han fet els càlculs aerodinàmics amb un software CFD, i s'han obtingut unes forces resultants. Per poder fer aquests càlculs només s'ha necessitat la geometria de la peça ja que el mallat de l'aleró el genera automàticament el software.

Per altre banda, a partir de les fotografies del frontal fetes al taller s'ha realitzat el modelat del frontal. També amb Rhinoceros3D. Aquest ha estat el més important ja que és el que s'ha utilitzat en el càlcul per elements finits. Seguidament s'ha fet el mallat del frontal amb MSC.Patran. Posteriorment aquest mallat s'ha exportat al software que fa de motor de càlcul (MSC.Marc) per fer uns primers càlculs considerant que és un material isotròpic. L'objectiu d'aquest càlcul ha estat tenir una idea del que li succeeix a la peça i com s'ha de fer el

patronatge. Finalment s'ha comparat aquests resultats amb els del material compòsit que es volia simular per veure si aquestes simplificacions són fiables.

En el la Figura 2 s'observa un diagrama simplificat de les diferents etapes del projecte.

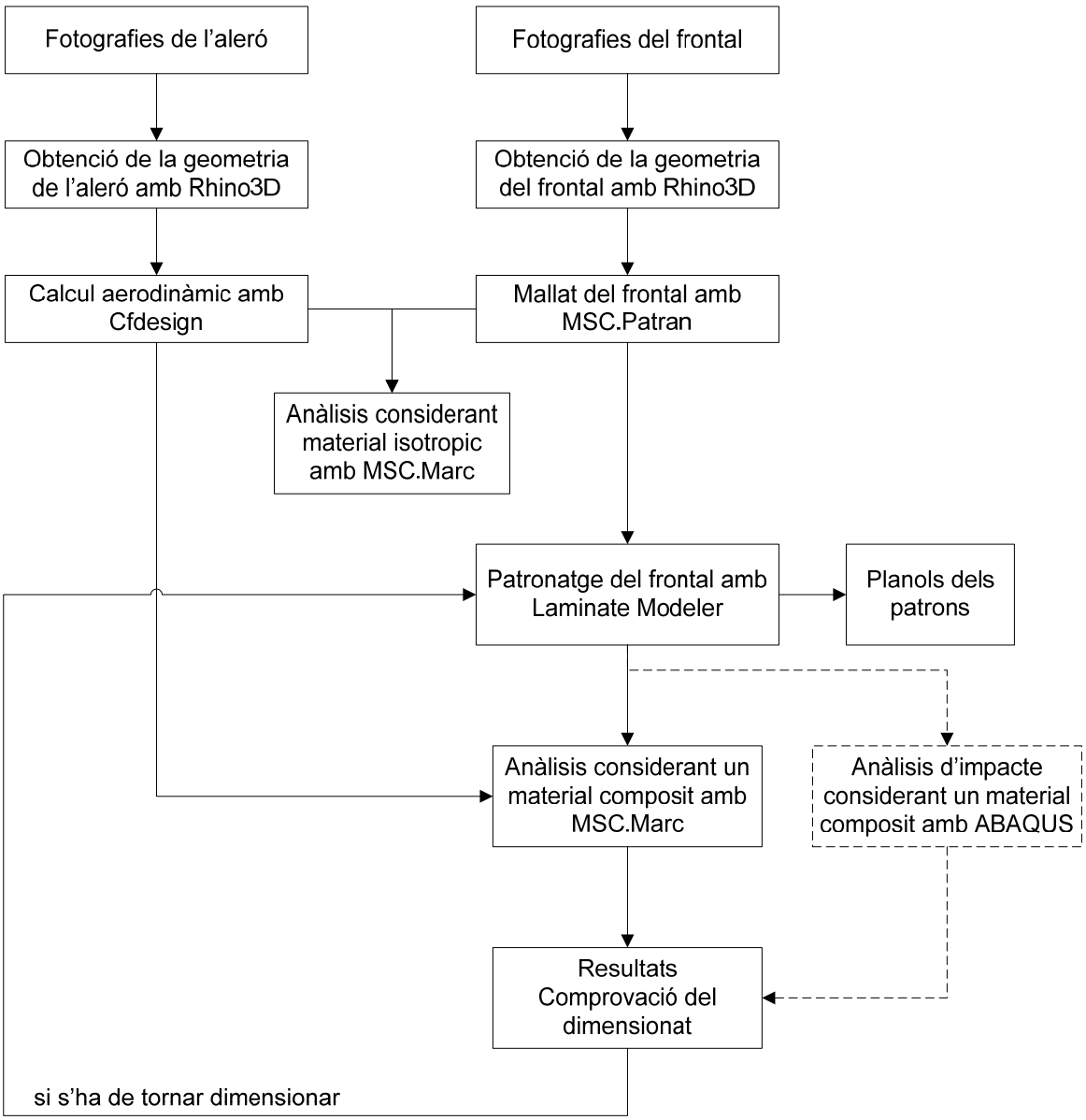


Figura 2. Diagrama dels passos seguits per elaborar del projecte.

El mallat del frontal ha servit també per poder definir com es volen col·locar les capes de material compòsit. Això s'ha fet amb un mòdul del propi programa MSC.Patran anomenat MSC.LaminateModeler. En funció de com s'hagi col·locat el teixit i del nombre de capes en cada zona del frontal el MSC.Patran ha generat les propietats físiques i mecàniques per cada element del mallat. En aquest punt s'ha passat l'arxiu al motor de càlcul MSC.Marc i

s'ha aplicat les càrregues considerades. En aquest càlcul ja s'ha considerat que el frontal està fet de material compòsit.

Alhora, el laminat definit amb el Laminate Modeler, s'exportarà al programa de càlcul ABAQUS per fer un predimensionat per anàlisi d'impacte. Aquest punt s'ha pensat com una acció futura tal com s'ha exposat en el capítol corresponent.

Així, si els esforços aplicats al frontal haguessin estat massa elevats (sigui en el MSC.Marc o en l'ABAQUS), es tornaria a definir el laminat per corregir el problema. Un cop s'ha verificat que la resistència és suficient, s'ha exportat tots els plànols dels patrons a AutoCAD des del Laminate Modeler.

Si la peça s'hagués de fabricar s' imprimirien en paper tots els patrons obtinguts a escala real. Es retallarien i s'utilitzarien a mode de plantilla per llavors poder retallar correctament els patrons de fibra de carboni. Així doncs, no farien falta plànols acotats. En el "DOCUMENT NUMERO 2: PLÀNOLS" s'han inclòs tots els patrons a escala, i s'han indicant només les cotes totals. Aquestes cotes servirien per determinar la quantitat de material necessari.

3. OBTENCIÓ DE LA GEOMETRIA

Tal com s'ha dit, la peça que s'ha estudiat és el frontal d'un monoplaça fabricat amb fibra de carboni que pertany a l'equip Pons Racing. Amb el frontal s'han fet càlculs estructurals i simulacions de laminat per software. Per tant ha estat necessari disposar de la geometria en suport informàtic. L'aleró ha estat necessari pel càlcul aerodinàmic ja que lògicament hi té una gran influència. Així doncs, també ha estat necessari disposar de la geometria de l'aleró. Malauradament, TR Composites no disposava de cap model 3D d'aquestes peces, i s'ha digitalitzat la geometria a partir de la peça real.

3.1. Estudi d'alternatives

Per resoldre el problema de la digitalització de la geometria s'ha portat a terme una recerca de les tècniques que s'utilitzen actualment. Bàsicament s'ha buscat en pagines web especialitzades les diferents opcions que existien, i posteriorment s'ha contactat amb algun fabricant per acabar de concretar millor les característiques de l'equip. Les tècniques que s'han considerat són: els braços digitalitzadors, la fotogrametria, i el dibuix amb software de modelat 3D. En l' "ANNEX A:TECNIQUES PER A LA DIGITALITZACIÓ" s'ha fet una descripció totes aquestes tècniques. Finalment s'ha optat per la opció de modelat 3D tal com s'ha exposat en les valoracions econòmiques.

3.2. Modelat del frontal

El Rhino és el programa que s'ha utilitzat per fer el modelat a partir de les fotografies. Disposa d'una funció anomenada "Bitmap de fondo" que permet col·locar fotografies o imatges en el fons de cadascuna de les vistes ortogonals.

Per modelar el frontal s'ha utilitzat tres fotografies. En el Rhino s'han col·locat en les vistes superior, frontal, i dreta. Aquestes es poden veure en la Figura 3. Però abans de començar amb el Rhino, amb el Photoshop s'ha retallat les imatges arran de peça. D'aquesta manera les mides de la peça i de la imatge són les mateixes. Tot i que no és necessari, en la Figura 3 també es pot apreciar com el fons de les fotografies s'ha canviat pel color gris. Amb aquest canvi s'ha pretès poder treballar més còmodament ja que el gris és també el color de fons per defecte del Rhino.

(a)

(c)

(b)

Figura 3. Fotografies que s'utilitzaran en el Rhino. (a): vista frontal. (b): vista superior. (c): vista dreta.

La Figura 3 també serveix per il·lustrar els petits errors de geometria que tindrà el model respecte la peça real. L'objecte s'ha fotografiat de manera centrada i perpendicular a cada cara. Amb tot i això, en la vista frontal (Figura 3a) hi ha zones de l'objecte ubicades a diferents distàncies respecte de l'objectiu. La càmera fotogràfica simula la profunditat produint un efecte de reducció dimensional i distorsió angular. En la vista frontal la protuberància inferior està més lluny que el pla de les lletres 'elf'. Aquesta apareix en la fotografia lleugerament més petita del que és en realitat i desplaçada cap a la dreta, ja que en aquest cas el punt de fuga de la imatge està centrat en la fotografia. Aquestes imprecisions es podrien evitar amb les altres metodologies estudiades en l' "ANNEX A", però s'han assumit ja que no afecta a la finalitat del projecte.

S'ha mesurat el frontal en el taller de TR Composites, i les mides obtingudes són: 808 mm de longitud per la vista frontal, 428 mm d'alçada i 318 mm d'amplada per la vista dreta. Es pot observar la correspondència d'aquestes mesures amb la geometria en la Figura 4.

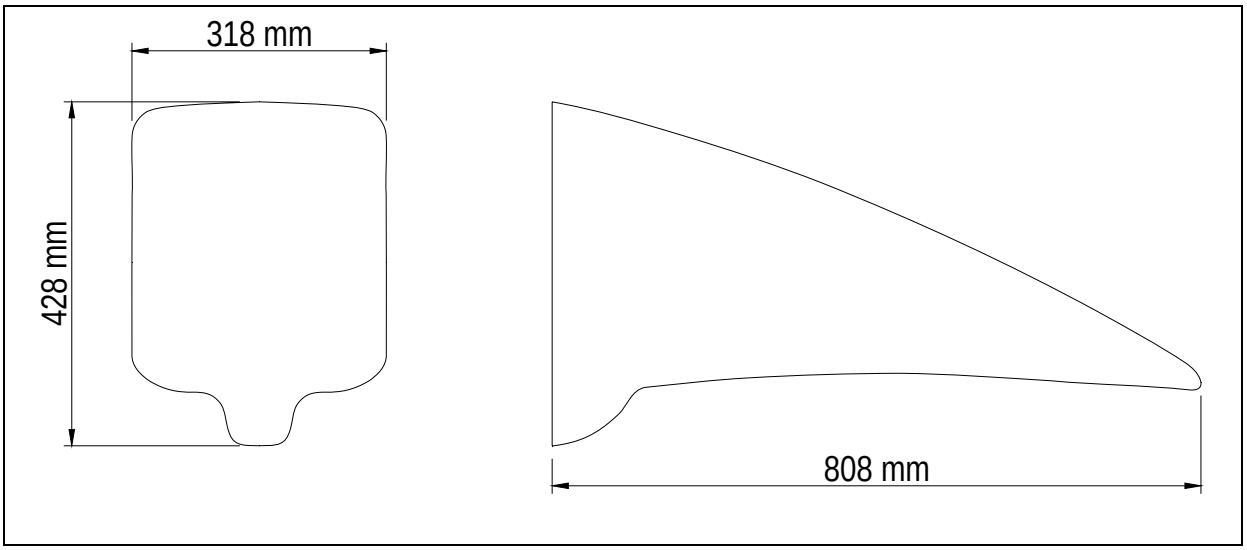


Figura 4. Mesures preses en els tallers de TR Composites.

A continuació s'ha fet un escalat de les imatges. Degut a la naturalesa de les fotografies, la vista de la Figura 3 (c) és la que té més precisió dimensional ja que tot el contorn de la peça està en el mateix pla perpendicular a la càmera. Es comprova que les mides de la imatge compleixen la relació 318/428 que s'ha mesurat, en cas contrari s'ajusta amb el Photoshop. Les vistes superior i frontal també s'han ajustat perquè compleixin les relacions 808/318 i 808/428 respectivament.

En aquest punt les imatges de fons per al Rhinoceros ja estan preparades i es pot procedir al modelat del frontal tal com es descriu en l' "ANNEX B: MODELAT DEL FRONTAL AMB RHINOCEROS 3D".

Un cop acabat el model, des del Rhino s'ha exportat en format IGES per poder-lo obrir posteriorment amb un programa d'elements finits, el MSC.Patran.

3.3. Modelat de l'aleró

La finalitat del modelat d'aquesta peça no ha estat estudiar la seva fabricació amb materials compòsits. Però per estudiar les càrregues aerodinàmiques que es transmeten al frontal ha esta necessari fer el modelat. Aquí el modelat s'ha complicat pel fet de no disposar de l'aleró que concordava exactament amb el frontal estudiat.

Primerament s'ha valorat la possibilitat d'utilitzar les fotografies d'un aleró accidentat que hi havia a les instal·lacions de TR Composites. Aquest es pot veure a la Figura 5. Però al no disposar dels laterals de l'aleró, finalment el modelat s'ha basat en les fotografies i dibuixos

de la web de Pons Racing. També es pot observar que la curvatura de la part central de l'aleró de la Figura 5 (a) és lleugerament diferent de la del aleró de la Figura 7 (a). Aquestes ultimes vistes són de la Web de Pons Racing amb la dificultat afegida que no són completament ortogonals.

Figura 5. Fotografies de l'aleró de mostra.

Figura 6. Vista general de l'aleró muntat en el monoplaça

(a)

(b)

(c)

Figura 7. Fotografies de l'aleró de la Web de Pons Racing. (a):vista frontal. (b): vista superior. (c): vista dreta.

Així doncs, a partir de les imatges de la Figura 7 s'ha modelat l'aleró amb el Rhinoceros.

Com que el model té un pla de simetria, per estalviar temps de càlcul amb el software CFD, només s'ha fet la simulació de la meitat de la geometria. El modelat de l'aleró es pot observar en la Figura 8. A més, amb les condicions de simetria s'afavoreix la convergència dels resultats en el programa de càlcul.

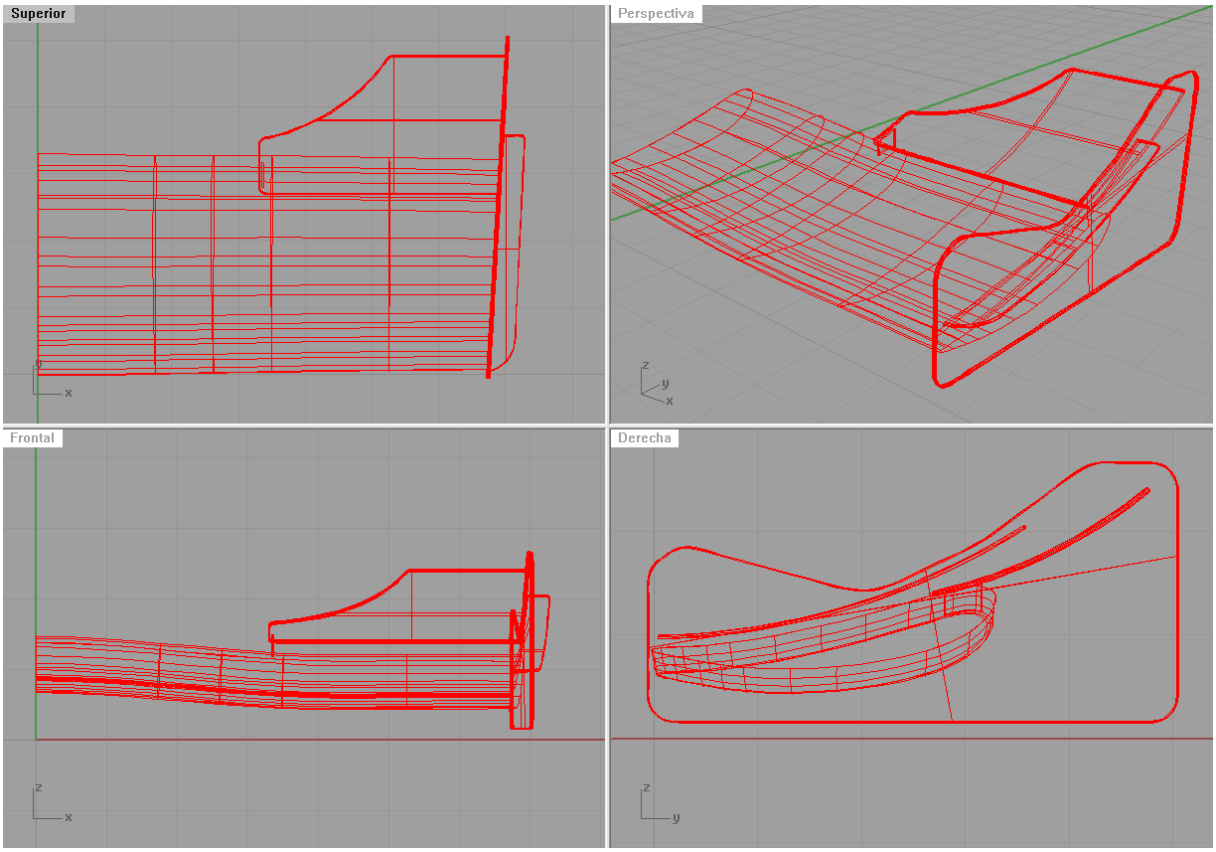


Figura 8. Modelat de l'aleró amb el Rhino.

Per al CFD és necessari dibuixar també el túnel de vent. En general, és aconsellable que per la part de davant del model, el túnel de vent tingui una longitud igual o superior a dues vegades la longitud de la peça, i per darrera del model, el túnel de vent tingui una longitud igual o superior a cinc vegades la longitud de la peça.

Tal com s'observa en la Figura 9, el model de Rhinoceros serà una superfície tancada i buida per dins.

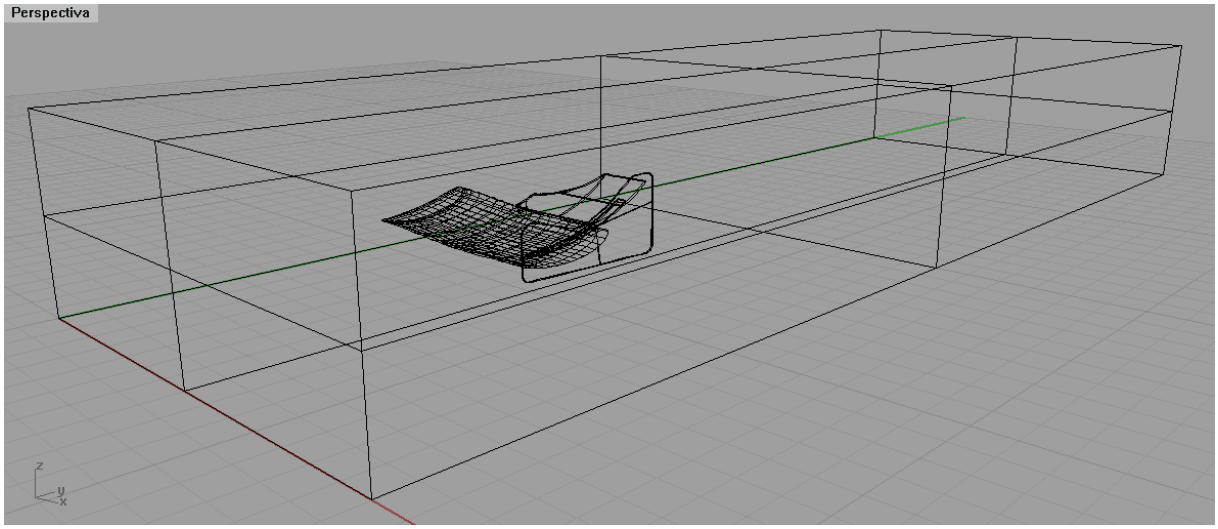


Figura 9. Túnel de vent amb el programa de modelat Rhinoceros 3D.

4. MALLAT DEL FRONTAL

S'ha mallat el frontal amb el software MSC.Patran, tal com es descriu en l' "ANNEX C: MALLAT DEL FRONTAL AMB MSC.PATRAN" per posteriorment poder-lo processar amb el MSC Marc.

El mallat del frontal s'ha fet amb elements quadrilàteres. Però els elements triangulars es generen molt més fàcilment quan la distorsió o curvatura de la superfície és gran. Al tenir un pla de simetria només s'ha fet el mallat de la meitat de la peça. En la Figura 10 es mostra el primer mallat que es va fer però que no s'ha utilitzat i el mallat final amb molts més elements. En les zones més critiques del segon mallat s'ha anat dividint element per element.

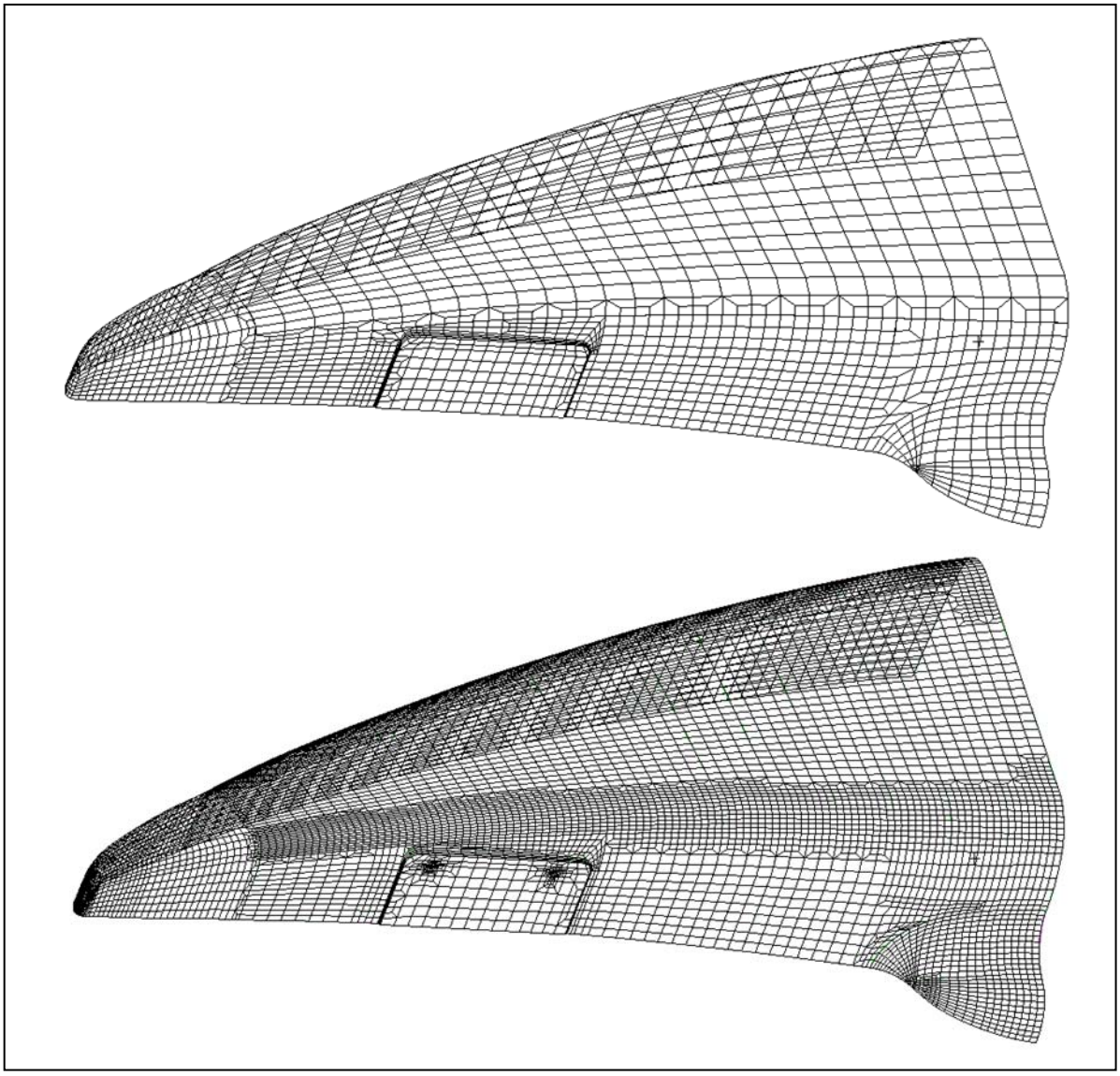


Figura 10. Mallat del frontal.

5. MATERIALS COMPOSITS I LAMINATE MODELER

5.1. Introducció

Els materials compòsits estan formats per un mix de dos o més constituents, oferint d'aquesta manera unes propietats que poden ser significativament millors que els materials homogenis. Materials d'aquest tipus poden ser fibra de carboni en matriu d'epoxi, molt utilitzats en la industria aeroespacial, o fibra de vidre en matriu de poliester àmpliament aplicats en la industria marina i d'automoció.

Físicament, els materials compòsits es comporten a nivell microscòpic com dos constituents separats. Mentre que a nivell macroscòpic es comporten com un de sol. Això els diferencia d'altres mescles d'elements com pot ser un aliatge.

Una característica que els fa diferents és la seva anisotropia. Això és degut a que en la direcció de les fibres les propietats mecàniques són molt millors que en la resta de direccions. D'aquí bé la importància de la orientació de les fibres o teixit en una peça feta de material compòsit.

5.1.1. Formats comercials dels materials compòsits

Els filaments que serviran per fabricar el material compòsit es comercialitzen en diferents formats:

Unidireccional: és un feix de fibres continu que es troba en una bobina. Per exemple, un feix de fibra de carboni conté entre 500 i 100.000 filaments. Les estructures fabricades a partir de fibres unidireccionals tenen una gran proporció de fibres, i per tant unes millors propietats mecàniques teòriques. També estan caracteritzades per una alta anisotropia. Per exemple, la resistència pot ser deu vegades major en la direcció de les fibres comparat amb la direcció ortogonal.

Teixits: forma tèxtil constituïda per metxes que han estat teixides o cosides. En la industria tèxtil, a l'hora de confeccionar el teixit, els fils longitudinals és coneixen com a ordit i els transversals com a trama. Aquests teixits poden estar formats per un únic tipus de material o poden ser híbrids, per exemple carboni-aramida. En quant a la tipologia de teixits es diferencien pel gruix del feix amb que estan fets i per la manera en que s'han tramat. En la Figura 11 es poden observar uns exemples.

(a) (b) (c)

Figura 11. (a): teixit 1x1. (b): teixit 2x2. (b): teixit 4x4.

Preimpregnats o prepregs: Són fibres o teixits que ja estan impregnats de resina a la qual se li a afegit el enduridor. Estan a punt per moldejar i s'han de guardar en cambra frigorífica.

(a) (b)

Figura 12. (a): fibres unidireccionals preimpregnades. (b): teixit preimpregnat.

5.1.2. Tècniques de fabricació dels materials compòsits

Moldeig en moll: Les fibres s'apliquen sobre el motllo en forma de teixit i s'impregnen manualment amb la resina. S'utilitza per fer grans estructures com per exemple el casc d'un vaixell. És un procés ràpid, però que dóna variacions de qualitat. No es pot controlar la relació entre quantitat fibra i resina, això fa que les propietats finals variïn d'un punt a un altre de l'estructura.

Moldeig amb preimpregnats: En aquest procés, les metxes o els teixits estan impregnats amb una quantitat controlada de resina abans d'aplicar-los sobre el motlle. S'utilitza per fer components d'alta qualitat, per exemple per l'industria aeroespacial. Requereixen d'un

procés de curat en autoclau sota altes temperatures i pressions. Requereix mà d'obra especialitzada ja que només es poden automatitzar estructures molt simples.

Premsa: En aquest cas les capes de preimpregnat són pressionades entre les dues parts d'un motlle en una pensa, i curades sota compressió. S'utilitza per fabricar petites quantitats de components d'alta qualitat com cascos de motocicleta o quadres de bicicleta. Degut a les característiques del motlle, les toleràncies dimensionals i les propietats mecàniques resultants són molt bones.

Moldeig per transferència de resina RTM: Acrònim de Resin Transfer Moulding. És un procés de motlle tancat a baixa pressió, que permet obtenir peces de material compost de moltes mides i complexitat. Es diferencia d'altres processos de moldeig en que el reforç sec i la resina es mesclen dins el motlle per formar la peça de material compost. El reforç (fibra) normalment és una preforma que es col·loca dins la cavitat del motlle, aquest es tanca, i llavors es bombeja la resina dins el motlle per impregnar la fibra. Finalment es produeix el curat. El RTM només és rentable per un nombre de peces entre 500 i 50.000 a l'any per la industria automobilística on es requereix baix cost i gran volum de producció. O entre 50 i 5.000 peces a l'any per a la industria aeronàutica on es requereix alt rendiment i petit volum.

Moldeig per injecció SRIM: Acrònim de Structural Reaction Injection Moulding. És una tècnica molt similar al RTM però utilitzant resines de major reactivitat i pressions d'injecció majors. Això encareix l'equip i està dirigit a produccions més elevades que el RTM. Mentre que per al RTM el temps de cicle és de l'ordre de minuts, per SRIM és mesura en segons.

Enrotllament filamentari: En aquest mètode, les metxes impregnades amb resina són enrotllades a grans velocitats i de manera precisa sobre un mandril que rota al voltant del seu eix de gir. Les estructures que poden ser fabricades per aquesta tècnica són necessariament de revolució, amb simetria cilíndrica, esfèrica o cònica, tot i que existeixen altres formes que poden ser enrotllades sempre que no tinguin zones còncaves amb curvatures entrants on el reforç no podria ser posicionat. El diàmetre i la longitud d'aquestes estructures poden variar molt, des d'un màstil per una embarcació de windsurf, fins una pala d'un aerogenerador eòlic.

En el cas que tractem, el frontal del monoplaça s'ha construït a base de teixit preimpregnat. Aquest teixit s'ha col·locat manualment en un motllo i llavors ha passat el procés de curat dins autoclau.

5.2. Adaptabilitat dels teixits i patrons

Exceptuant el cas de l'enrotllament filamentari, per la resta de tècniques és necessari retallar el teixit a mida abans de col·locar-lo en el motlle. Això significa col·locar retalls de teixit de dues dimensions en superfícies que tenen tres dimensions. Si la superfície és corba, llavors la forma i mida del retall de teixit que és necessari no es pot mesurar directament. En aquest cas un software de simulació pot ajudar per generar els patrons de les capes abans d'aplicar-les a la superfície real.

Per tal de distingir els tipus de superfícies i per tant si el teixit es podrà adaptar més o menys fàcilment, introduirem el concepte de "curvatura Gaussiana". La curvatura Gaussiana és un número real que mesura la curvatura en cada punt de la superfície. Aquest valor és el producte de les curvatures en les direccions principals en un punt qualsevol de la superfície. Una curvatura Gaussiana positiva significa que localment té forma de cúpula, amb les curvatures en la mateixa direcció respecte una superfície normal. En canvi, una curvatura Gaussiana negativa implica una superfície tipus sella de muntar, amb curvatures en direccions oposades. Finalment, una curvatura Gaussiana zero és quant la curvatura en una de les direccions principals és zero. Això es pot observar en la Figura 10. Les curvatures de l'hiperboloide (a) en les seves direccions principals són de signe contrari i fan que la curvatura Gaussiana sigui negativa. En el cas del cilindre (b) en la direcció vertical no existeix curvatura i per tant, qualsevol punt del cilindre té una curvatura Gaussiana zero. En el cas de l'el·lipsoide (c), les curvatures en les direccions principals de qualsevol punt tenen el mateix signe i fan que la curvatura Gaussiana sigui positiva.

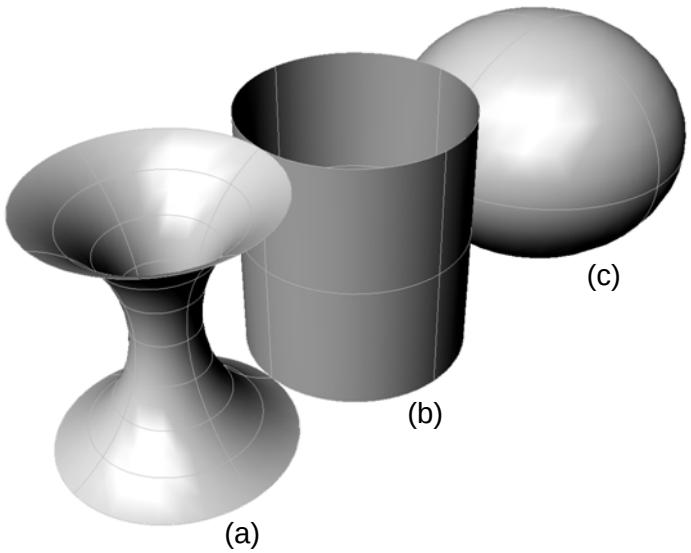


Figura 13. Curvatura gaussiana. (a): hiperboloide, curvatura gaussiana negativa. (b): cilindre, curvatura gaussiana zero. (c): el·lipsoide, curvatura gaussiana positiva.

Sovint les superfícies tenen diferent curvatura en diferents punts. Per exemple un torus té curvatura Gaussiana negativa en la cara interior i positiva en l'exterior. Un exemple curiós és l'esfera que té curvatura Gaussiana positiva i del mateix valor en qualsevol punt.

Així, la curvatura Gaussiana ens servirà per dividir les superfícies en dos grans grups:

-**Superfícies amb curvatura Gaussiana igual a zero**, també conegudes com a superfícies de **simple curvatura**. Es caracteritzen per ser abatibles (o desplegables) en el pla, com és el cas d'un cilindre o una lamina ondulada.

-**Superfícies amb curvatura Gaussiana diferent de zero**, també conegudes com a superfícies de **doble curvatura**. Es caracteritzen per no ser abatibles en el pla. Un exemple és l'hiperboloide.

D'aquesta manera, a l'hora de col·locar el teixit sobre la superfície o motllo, si aquest té una curvatura Gaussiana igual a zero no hi haurà cap problema d'adaptabilitat. Per contra, amb superfícies amb curvatura Gaussiana diferent de zero s'obligarà al teixit a deformar-se en el seu propi pla.

En la Figura 14 es compara el cilindre (a), que és una figura abatible en el pla amb una no abatible (b), i es pot observar com es deforma el teixit en cada cas. Tot i que aquest últim tipus de superfícies són més difícils de fabricar que les planes o abatibles, la seva forma els dona una gran rigidesa i resistència.

En quant a la deformabilitat dels teixits, cal dir que en la direcció de les fibres normalment són molt poc deformables degut a l'elevada resistència dels materials que estan fetes. Per tant, si es té un teixit on les fibres de la trama formen 90º respecte les fibres de l'ordit, en les direccions 0º i 90º serà molt poc deformable. En canvi, serà molt deformable a 45º respecte l'ordit i la trama. Això es pot intuir observant la Figura 11(b). Aquesta direcció es coneix com direcció de biaix, o simplement "biaix". Aquests tipus de teixits a 0-90 tenen dos biaixos, un perpendicular respecte l'altre. Això facilita l'adaptabilitat del teixit al motllo. Aquesta característica és coneguda des del 1920, en el que la dissenyadora de moda Madeleine Vionnet, també coneguda com "reina del tall al biaix" l'utilitza per accentuar les corbes i facilitar la deformabilitat del teixit.

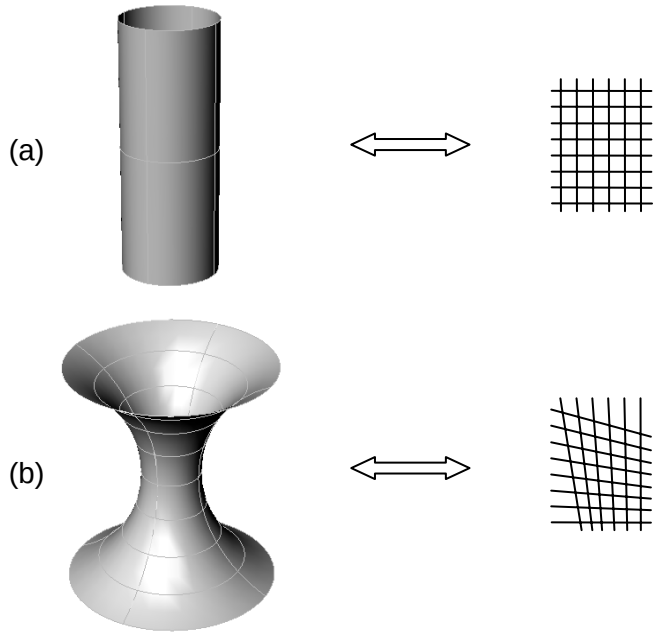


Figura 14. Deformació del teixit en (a): superfície abatible en el pla. (b): superfície amb doble curvatura.

Per tant, els patrons necessaris per les superfícies de simple curvatura podran ser tant grans com es vulgui amb les úniques limitacions de mida del propi fabricant del teixit.

En canvi, en les superfícies de doble curvatura es corre el risc que quedin plecs i arrugues si no es fa un disseny encertat dels patrons a utilitzar.

5.3. Conceptes importants del Laminate Modeler

El procés de desenvolupament d'una peça laminada consisteix en les fases de disseny, anàlisis i fabricació. Per al cas dels materials compòsits, aquestes fases estan intrínsecament lligades i s'han de tenir en compte simultàniament si es vol fabricar l'estructura de manera econòmica. Per això, els principis de l'enginyeria concurrent tenen especial importància en el desenvolupament d'estructures de material compòsit.

El MSC.Patran és un pre-processador d'elements finits que permet definir la malla, fer l'anàlisi per elements finits, i el fer el postprocés. Disposa d'una sèrie de mòduls opcionals per fer diferents tasques. El Laminate Modeler és un d'aquests mòduls, serveix per fer patronatges.

El Laminate Modeler és un mòdul de patronatge que ajuda en el disseny, anàlisis, i fabricació d'estructures de material compòsit. Primer es defineixen les característiques del

material que s'utilitzarà i l'àrea de la superfície que ocuparà cada patró. El programa simula com el teixit s'adapta a la geometria utilitzant diferents materials i processos de fabricació. En el cas de superfícies de doble curvatura, això és de gran ajuda ja que mostra els graus de deformació del teixit. Per tant, es pot saber quin tipus de teixit aplicar per no tenir arrugues. O en el cas de no poder canviar el tipus de teixit, es pot retallar el patró de manera diferent perquè s'adapti correctament. Finalment, el software té en compte tant la deformació com els canvis d'orientació del teixit degut a la curvatura de la superfície. I amb això, genera automàticament les propietats i materials per els elements finits per posteriorment poder fer l'avaluació de l'estructura.

Una altre utilitat que té el Laminate Modeler és la de generar els plànols dels patrons. Aquests serviran tant per la fabricació com per conèixer la quantitat de material que es necessitarà.

Del Laminate Modeler cal comentar alguns problemes que es presenten i que s'han de tenir en compte. Les simulacions per superfícies amb doble curvatura són complexes, ja que utilitzen gran quantitat de no linealitats geomètriques i de material. Com a conseqüència no existeix una única solució en el procés d'aplicació del teixit. El resultat depèn en gran mesura del punt on es comença l'aplicació, la direcció en que segueix l'aplicació del teixit sobre la superfície, i les pròpies propietats del material. A més, si hi ha superposició de capes, la fricció entre elles complica el càlcul.

5.3.1. El "draping"

La col·locació del teixit per cobrir la superfície i la manera en que aquest s'adapta en angles es coneix com a "draping". Per estudiar aquest problema el Laminate Modeler ens permet considerar dos nivells de draping:

- Draping local: reflecteix el comportament d'un element de material infinitesimal aplicat a una superfície corba.

- Draping global: considera com els elements de material es col·loquen sobre la superfície, i depèn del procés de fabricació utilitzat.

En els models de draping local es considera una superfície amb curvatura Gaussiana diferent de zero. El material s'ha de deformar en el seu propi pla per conformar la superfície.

Per al càlcul del draping local es poden utilitzar dos algorismes diferents: El scissor draping, i el slide draping. En el cas del scissor draping el teixit es deforma com si es tractés d'un quadrilàter articulat, tal com es pot observar en la Figura 15. Les longituds dels costats es mantenen constants i la figura resultant és un rombe. Aquest tipus de deformació és característica dels teixits tramats.

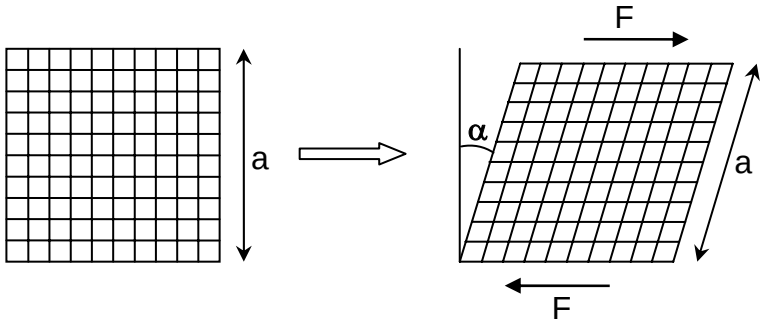


Figura 15. Scissor draping

En el slide draping els dos costats oposats patinen un respecte l'altre i de manera paral·lela. La separació entre aquests dos costats es manté constant. Aquest tipus de deformació es pot observar a la Figura 16. És la deformació característica de metxes adjacents, formant un material unidireccional.

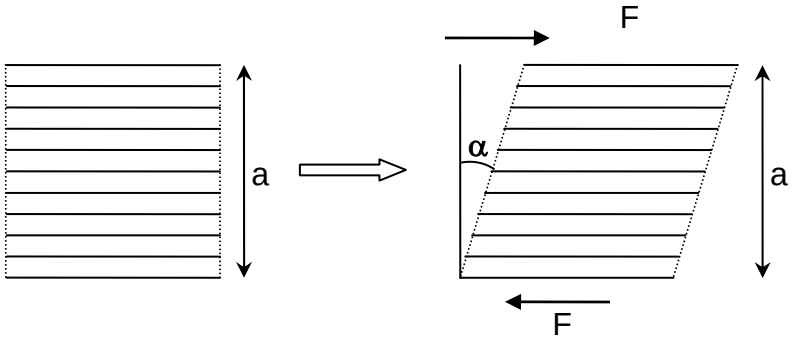


Figura 16. Slide draping

Quan s'utilitzen els dos algorismes per aplicar un material compost sobre la mateixa superfície, s'observa que el scissor draping s'adapta molt més fàcilment a la curvatura que el slide draping. Aquest fet és compatible amb l'experiència en la fabricació en la qual els prepregs tramats s'adapten millor a superfícies corbes que els prepregs unidireccionals.

El segon nivell de draping és el draping global. Aquests models afecten a la manera en que apliquem el teixit en una superfície real de curvatura Gaussiana diferent de zero. És

important que aquests models siguin reproduïbles i reflecteixin si la curvatura realment es pot fabricar en una situació de producció. Per tant, el global draping s'ha d'entendre com la manera en que s'aplicarà el teixit i es fabricarà, i no com una propietat del material.

A continuació s'enumeren els tres algorismes disponibles per al draping global i els casos en que és aconsellable utilitzar-los segons les proves que s'ha fet:

- El geodèsic, en el qual es dibuixen els eixos principals des del punt d'aplicació al llarg dels camins geodèsics. Aquestes línies són sempre rectes respecte la superfície. Aquest algoritme és el més natural i apropiat per la majoria de laminats, tot i que per superfícies molt corbades té una gran dependència del punt d'aplicació i s'ha d'utilitzar amb cura.

- El Pla, en el qual els eixos principals queden definits per la intersecció dels plans de l'ordit (i trama pel scissor draping) amb la superfície. Aquest mètode és apropiat quant la superfície té alguna simetria.

- El d'Energia, el qual és apropiat en superfícies molt corbades i on per tant les toleràncies de fabricació són grans. Aquí l'aplicació del teixit comença al punt d'aplicació i segueix en la direcció on l'energia necessària per deformar el teixit sigui mínima.

En el draping pla de la Figura 18 s'observa que en el punt d'aplicació les fibres estan completament alineades amb la reference direction (vector de color verd) i en la seva direcció perpendicular. A causa d'aquestes dues restriccions el teixit supera els 30º de deformació.

El draping geodèsic de la Figura 17 les fibres tenen una mica més de llibertat que en el cas anterior arribant el teixit a una deformació màxima de -11,3º i +24,7º.

El draping de mínima energia és el menys restrictiu de tots. El patró que en resulta també té una forma més irregular. Les deformacions màximes han estat de -26,1º i +5,5º. Canviant el punt d'aplicació possiblement es compensarien els dos valors de deformació positiva i negativa podent aconseguir dos valors per sota dels ±15º o ±20º.

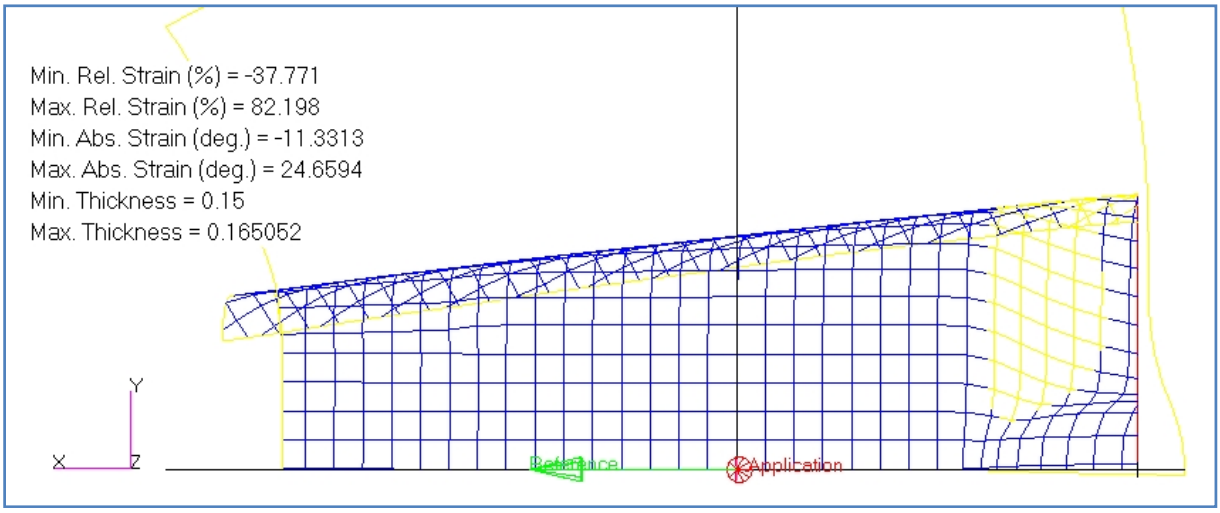


Figura 17. Draping global 'geodèsic'.

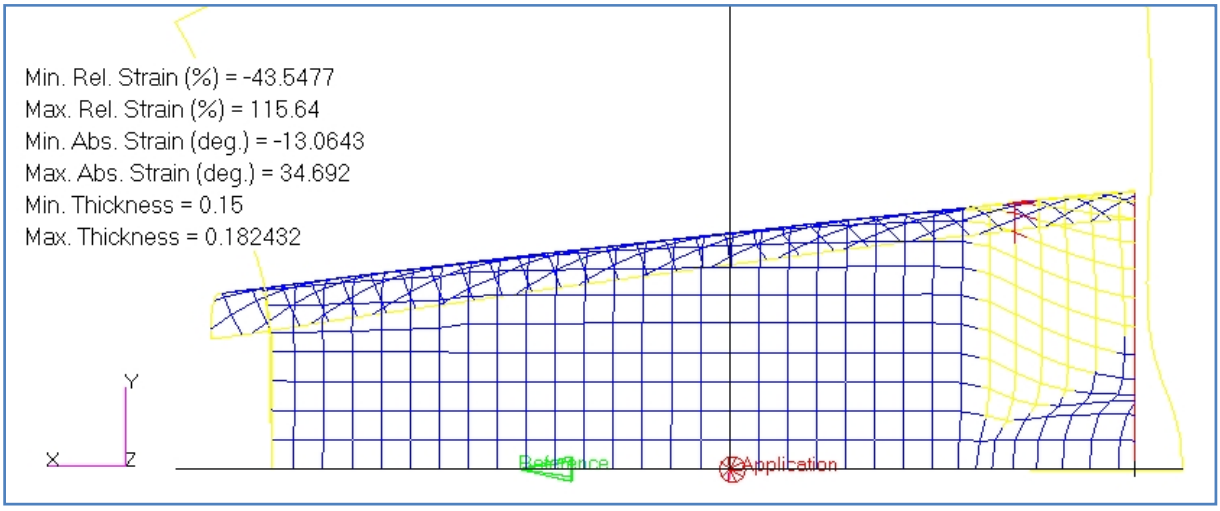


Figura 18. Draping global 'pla'.

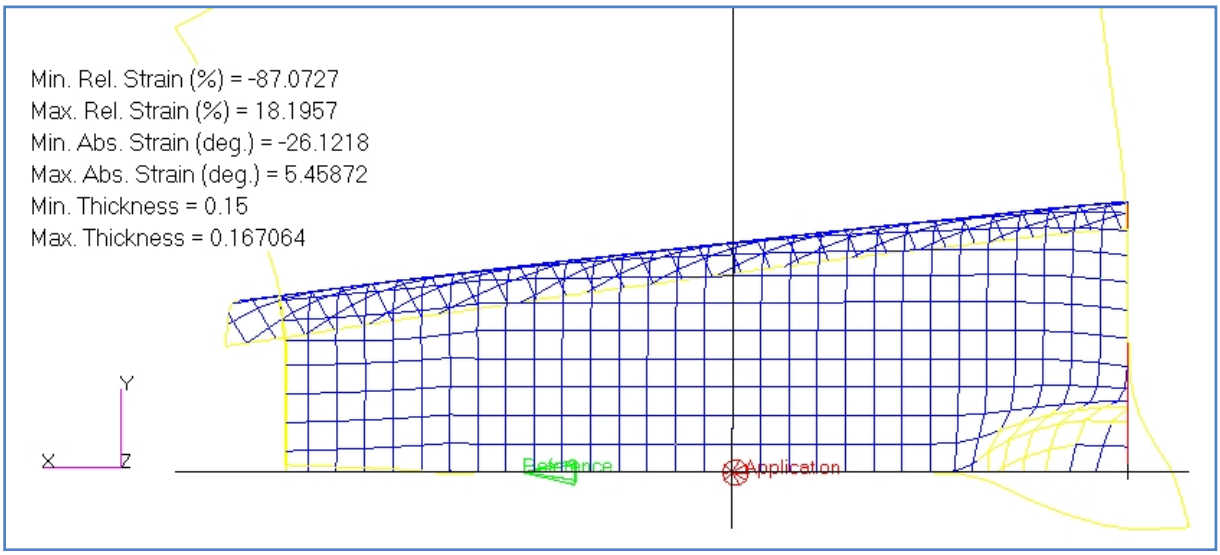


Figura 19. Draping global 'energia'.

5.3.2 Passos a seguir en Laminate Modeler

Per crear un laminat amb el MSC.LaminateModeler bàsicament calen 3 passos:

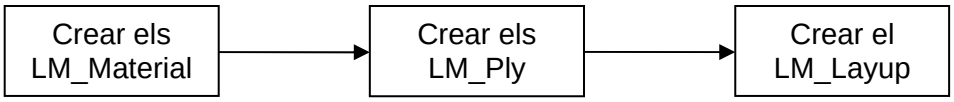


Figura 20. Passos Laminate Modeler

A continuació es descriuran els diferents paràmetres que s'han de definir en cada pas.

Create LM_Material: seran els tipus de material compost que s'utilitzaran. Cal definir les seves propietats així com el local draping.

- LM_Material Name: el nom que se li donarà.

- Type: cal triar quin algoritme de local draping es vol fer servir, el scissor draping o el slide draping explicats anteriorment.

- Analysis Material: El material definit anteriorment en el MSC.Patran que se s'utilitzarà. Aquí hi ha el mòdul elàstic, el mòdul de Poisson,...

- Thickness: definirem el gruix de la capa de material compost.

- Maximum Strain (deg): la deformació màxima que podrà tenir el teixit, en graus. Aquest angle és la "α" de la Figura 12 i Figura 13.

- Warp/Weft Angle (deg): és l'angle en graus que formen les fibres abans d'aplicar-les al motllo. Per tant, és l'angle entre l'ordit i la trama. Normalment serà de 90º.

Create LM_Ply: seran les àrees de la superfície on s'aplicarà cada patró. Cal definir la manera com s'aplicarà el patró així com el global draping.

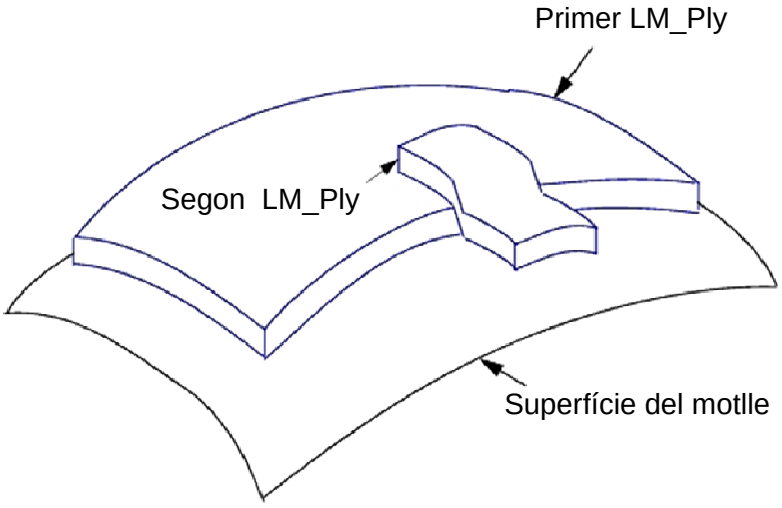


Figura 21. Col.locació dels Ply o patrons sobre el motlle. Solapament de Plys

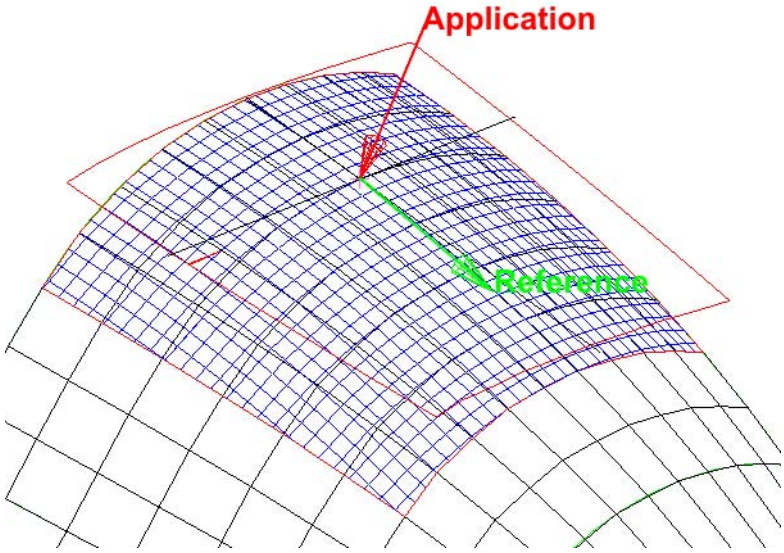


Figura 22. Definició d'un Ply en el Laminate Modeler

- LM_Ply Name: El nom que se li vulgui donar al patró actual.

- Select LM_Material: De quin LM_Material estarà fet el patró actual.

- Select Area: Seleccionar l'àrea que defineix l'extensió del patró. Podem utilitzar superfícies o elements (shell elements).

- Start point: Cal seleccionar el node per on es començarà a aplicar el teixit. És el primer punt del teixit que entra en contacte amb el motllo durant el procés de fabricació. Com que la deformació del teixit augmentarà a mesura que un s'allunyi del start point, és millor començar el draping prop del centre de la regió per minimitzar la deformació del teixit.

- Aplication direction: Vector aplicat al start point i que defineix el costat de la superfície on s'aplica el ply. Les estructures de material compost es solen fabricar amb motlles. El ply es pot aplicar per fora d'un motlle mascle o per dins un motlle femella. Aquest vector generalment serà normal a la superfície.

- Reference direction: Vector que es projecte sobre la superfície i defineix la direcció inicial en que s'aplicarà el teixit sobre la superfície. La direcció del teixit anirà canviant a mesura que s'allunya del start point si la superfície és corbada.

- Reference angle: Angle que l'ordit del teixit rota respecte la reference direction. La rotació és en sentit antihorari vist des de la aplication direction.

- Additional Controls...: Permet seleccionar l'algorisme de draping global que es vol utilitzar. Per defecte hi figura el de mínima energia.

Create LM_Layup: defineix l'ordre i la manera en que es col·locaran els LM_Ply.

- LM_Layup Name: el nom que se li vol donar al Layup.

- Layup Definition...: Es definiran la seqüència de patrons que s'anirà col·locant. Amb la opció Angle Offset es pot variar el Reference Angle definit anteriorment en el LM_Ply.

- Select Element Type...: cal definir el tipus d'elements finits que s'utilitzarà. En aquest cas les opcions depèn del Analysis Code que se li hagi donat al MSC.Patran. En el cas del MSC.Marc la opció que cal triar és "2D_Elements (75,22) – q4/t3, q8/t6".

- Tolerance Definition...: Com que el teixit s'anirà deformant i canviant d'orientació, canviaran les seves propietats ja que no és un material isotròpic. Cal definir les toleràncies d'angle i de variació de gruix per les quals en el càlcul es considerarà com si fos el mateix material o un material diferent.

6. LAMINAT DEL MODEL

En el cas del frontal del monoplaça, s'ha considerat que el frontal es fabricarà amb teixit de fibra de carboni preimpregnat. L'angle que tindrà entre l'ordit i la trama serà de 90º ja que és el més habitual. En quant a la deformació del teixit, per la deformació que permetien les mostres de que es disposava en el taller s'ha decidit fixar en un angle màxim de 30º. Cal dir que per defecte el Laminate Modeler i té un angle de deformació de 60º. Per tant els 30º es una situació força conservadora. Al tractar-se d'un tramat, l'algorisme utilitzat ha estat el "scissor draping".

Primer s'ha fet un model amb quatre capes de fibra de carboni amb un gruix de 0.15mm cadascuna. Aquest ha servit per fer un primer dimensionat. Per que hi hagi una bona transmissió dels esforços, s'ha considerat que els diferents patrons tindrien un solapament d'uns 10 cm entre ells, tal com es mostra en la Figura 23.

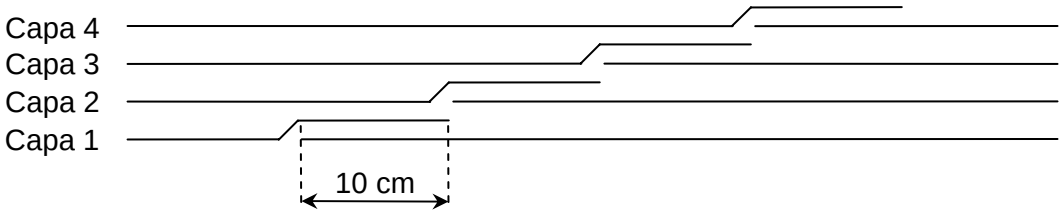


Figura 23. Solapament dels patrons.

S'ha procurat complir aquesta distancia de solapament, excepte per la zona de la punta del frontal, on la curvatura és molt gran i era molt complicat fer gaires patrons diferents i que tots s'adaptessin be. En aquesta zona el solapament ha estat menor i ha coincidit en el mateix lloc en les quatre capes. D'aquesta manera es veurà com això repercuteix en el gruix en aquestes zones i si a més afecta a la resistència.

Aquestes quatre capes, un cop distribuïdes en la superfície del frontal han quedat tal com es pot observar en la Figura 24.

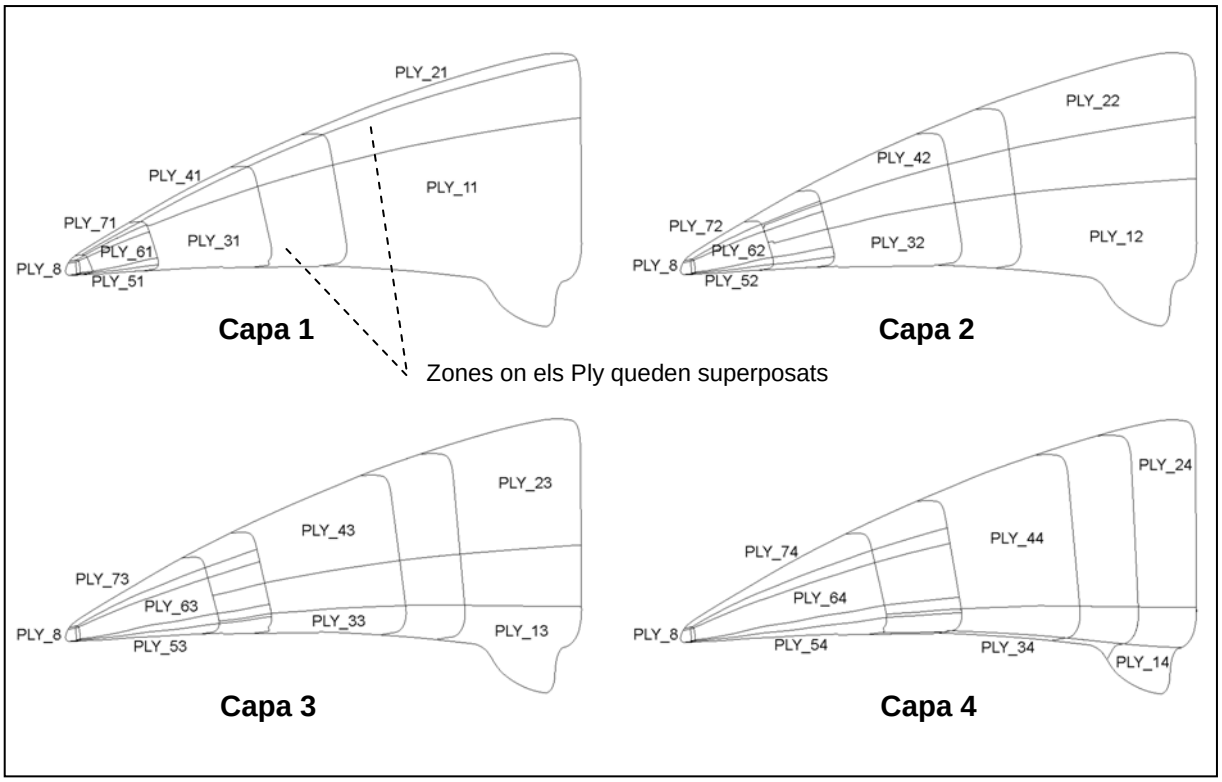


Figura 24. Distribució dels patrons en les quatre capes.

El procediment que s'ha seguit amb el MSC.LaminateModeler per fer el patronatge es pot consultar en l' "ANNEX D: LAMINAT DEL FRONTAL AMB EL MSC.LAMINATE MODELER".

Per entendre millor com s'han repartit els Plys de la Figura 24 en la superfície del frontal s'han dibuixat per separat en les Figures 25, 26, i 27.

Capa 1:

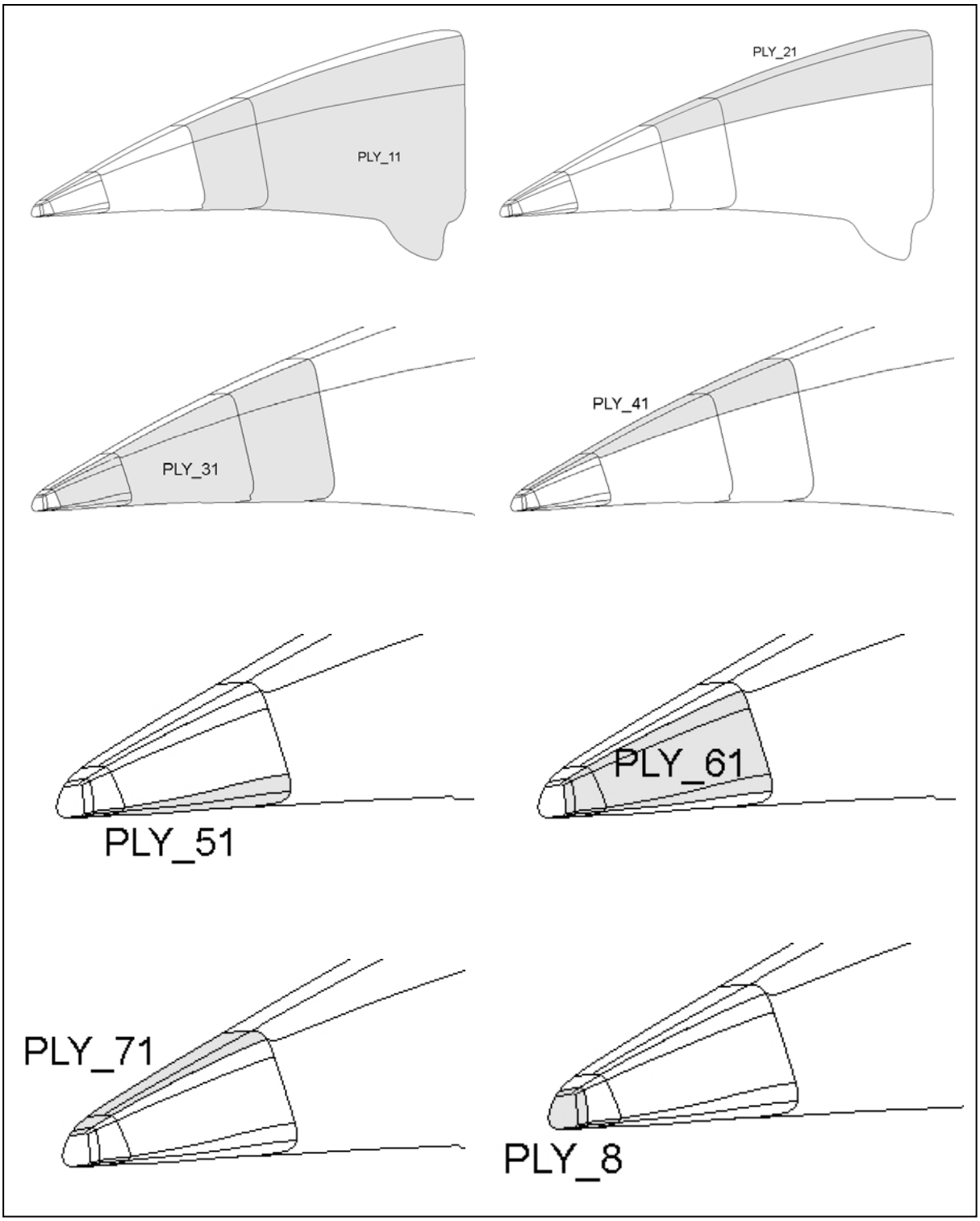


Figura 25. Distribució dels patrons de la capa 1.

Capa 2:

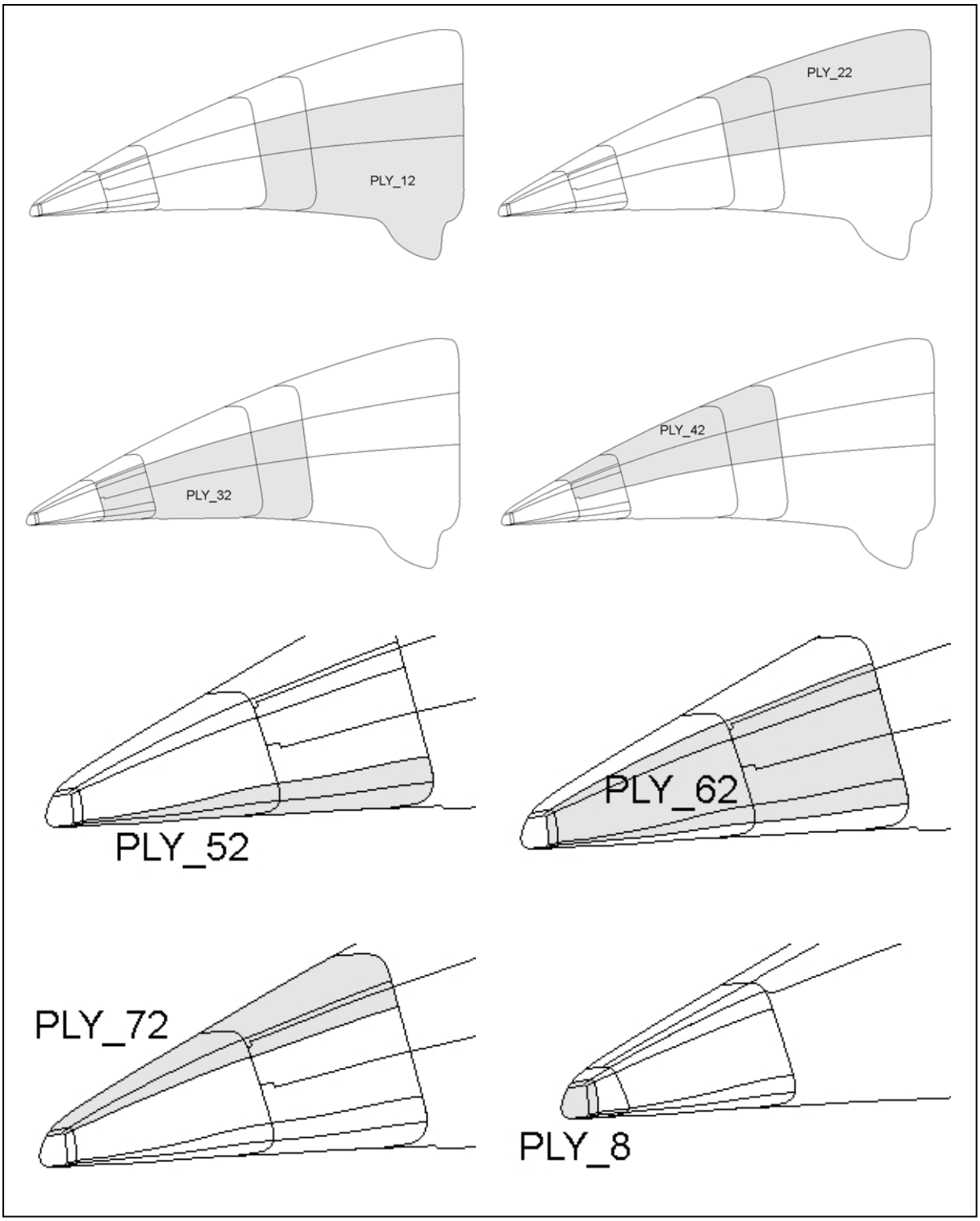


Figura 26. Distribució dels patrons de la capa 2.

Capa 3:

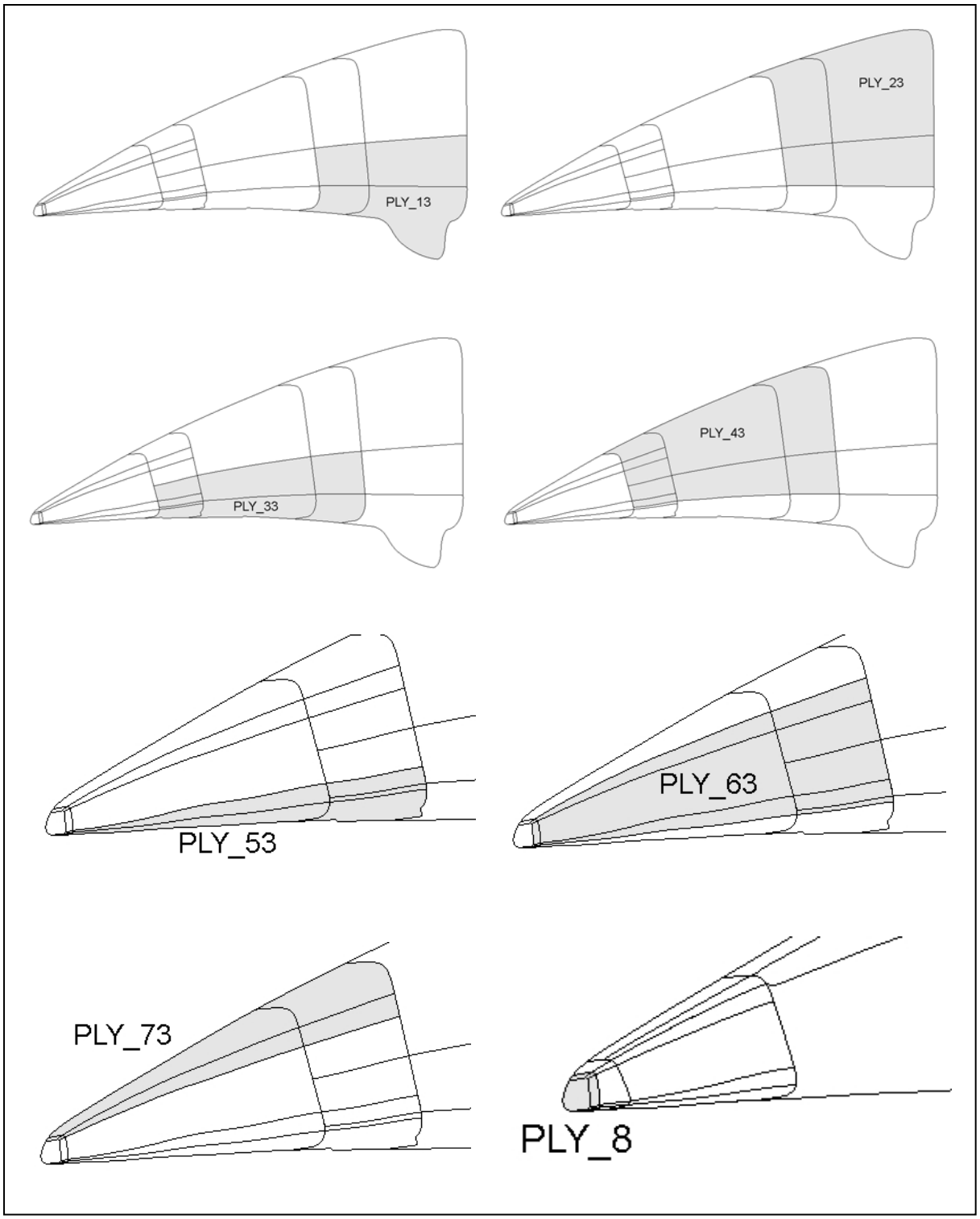


Figura 27. Distribució dels patrons de la capa 3.

Capa 4:

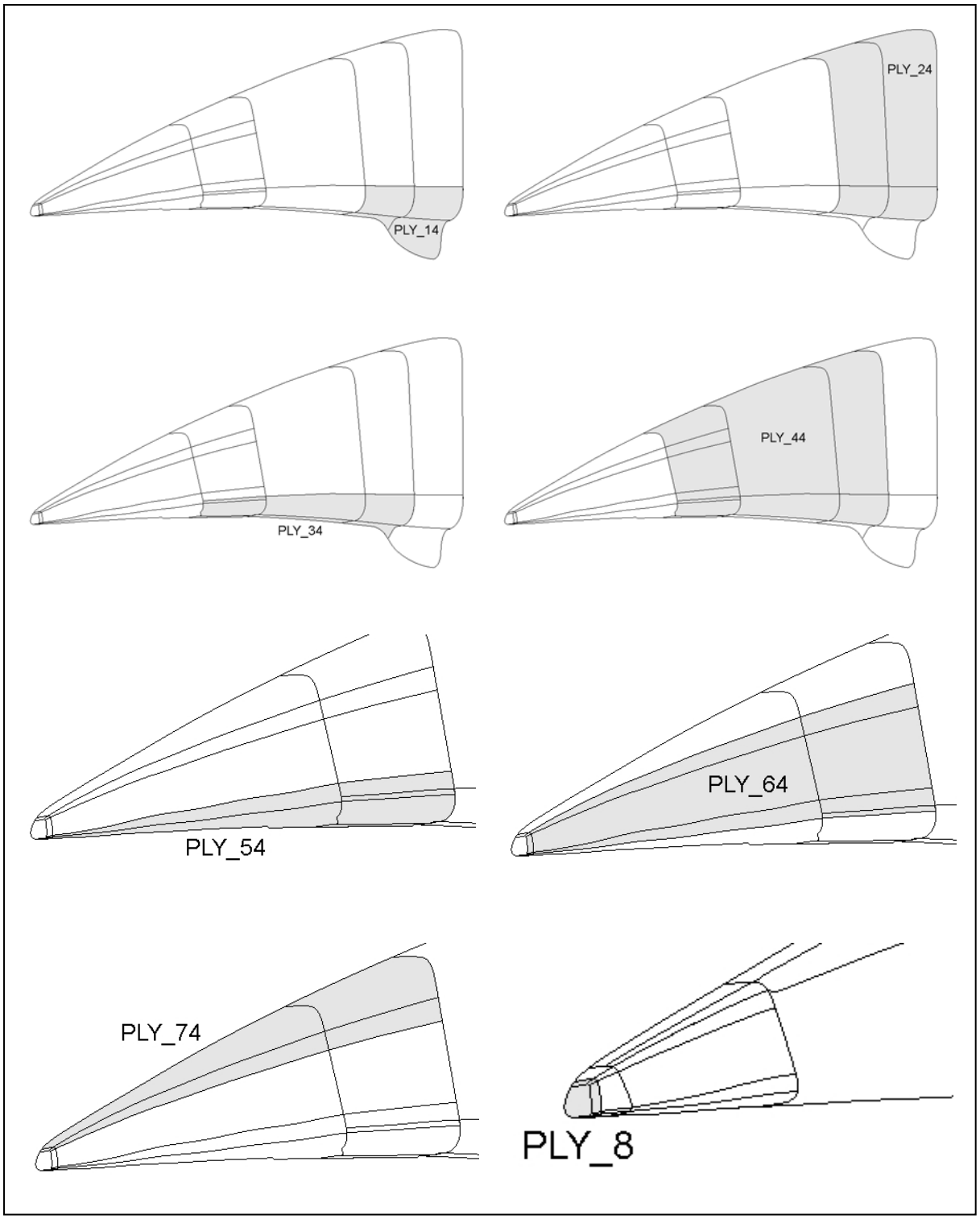


Figura 28. Distribució dels patrons de la capa 4.

7. CÀRREGUES CONSIDERADES

S'ha considerat que les sol·licitacions a que està sotmès el frontal d'un monoplaça bàsicament poden ser degudes a tres causes i s'enumeraran tot seguit.

Ha de suportar l'aleró davanter amb totes les càrregues aerodinàmiques que això comporta. Per entendre la magnitud d'aquestes càrregues, un vehicle de Fórmula 1 té tanta càrrega aerodinàmica que podria desplaçar-se de manera inversa (cap per vall) a velocitats superiors als 160 kilòmetres per hora. I una part important d'aquesta càrrega aerodinàmica és deguda als alerons.

En les parades a boxes el vehicle s'ha d'elevar per la part inferior de l'aleró, de manera que les rodes perdin el contacte amb el terra, i d'aquesta manera poder efectuar els canvis de pneumàtic i altres operacions de manteniment. L'aleró està subjectat al frontal amb quatre cargols. Aquesta càrrega també es produirà en el mateix punt que les aerodinàmiques però serà de sentit contrari.

Segons el reglament tècnic de competició, la carrosseria ha de complir uns requeriments en cas d'impacte. S'ha de fer un assaig d'impacte frontal a 14.0 metres per segon. La desacceleració màxima durant els primers 15 cm de deformació no pot superar els 5g, i no podrà superar 40g per la resta. L'habitacle del pilot haurà de mantenir-se indeformable.

7.1. Degudes als esforços aerodinàmics

En aquest apartat s'ha calculat les forces aerodinàmiques que es generen en l'aleró mitjançant un software CFD. Aquestes llavors es transmeten a la resta de l'estructura del vehicle.

S'han fet dues simplificacions del problema. La primera és que només s'ha estudiat l'aleró de forma aïllada, sense tenir en compte els altres elements del seu entorn (el frontal, les rodes,...). I la segona ha consistit en suposar que aquest es mou amb velocitat rectilínia i uniforme.

Per fer aquest estudi s'ha utilitzat un túnel de vent virtual. A dins del túnel l'objecte està immòbil mentre es força el pas del fluid pel seu voltant. El túnel de vent s'ha dimensionat segons els criteris dimensionals exposats anteriorment en l'apartat de modelat de l'aleró. El

model que s'utilitza és només la meitat simètrica de la peça tal com també s'ha comentat anteriorment.

Primer s'ha importat la geometria creada amb el Rhino3D en el CFdesign. Llavors s'ha fet el càlcul considerant que el vehicle es mou amb velocitat rectilínia i uniforme de 300Km/h. El procediment seguit per fer aquesta simulació es pot consultar a l' "ANNEX E: CALCUL AERODINAMIC AMB EL CFDESIGN"

En la Figura 29 s'ha fet un dibuix amb el Rhinoceros per mostrar en 3D la disposició en l'espai dels vectors resultants del estudi amb el CFD. En aquesta Figura s'observa la geometria completa així com els esforços de les dues meitats simètriques.

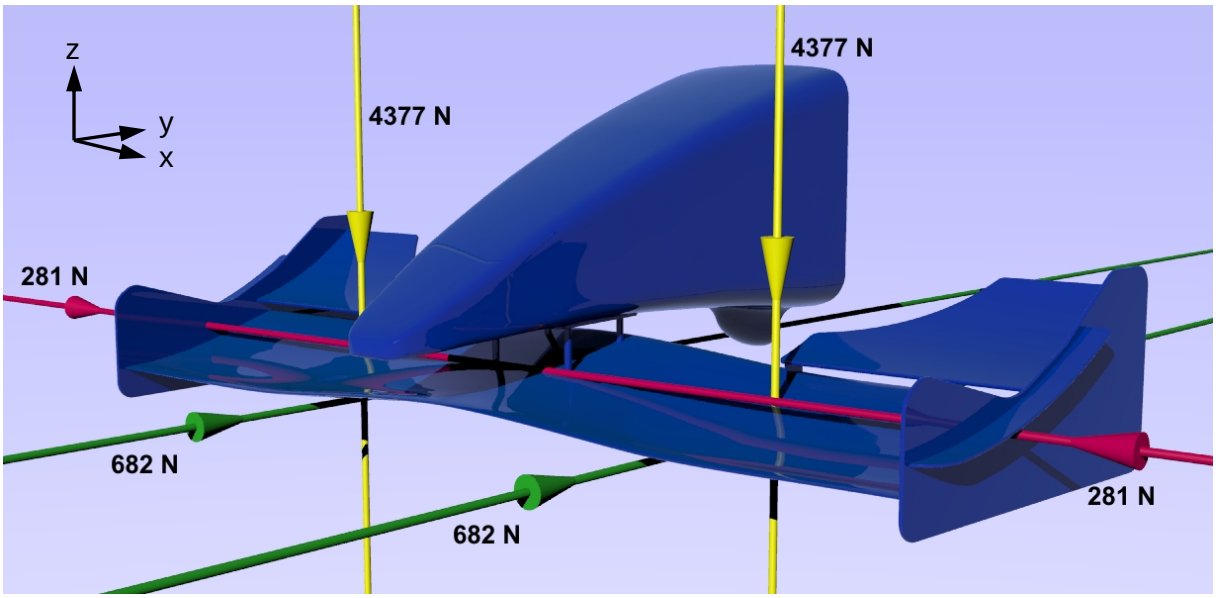


Figura 29. Punts d'aplicació de les tres components amb les respectives forces simètriques.

En la part inferior del frontal hi ha una placa d'alumini de forma rectangular amb quatre rosques on es fixen els espàrrecs que subjecta l'aleró. La placa es pot observar a la Figura 30. A efectes mecànics, aquesta unió no permet cap gir ni cap desplaçament, per tant es considerarà com un encastament. La platina d'alumini està embeguda en la fibra de carboni i és suficientment gruixuda com per considerar-la infinitament rígida. Com que no es pretén estudiar les deformacions de l'aleró també es considerarà infinitament rígid. D'aquesta manera es podrà calcular fàcilment les forces i moments que es creen en els punts d'unió de l'aleró amb el frontal.

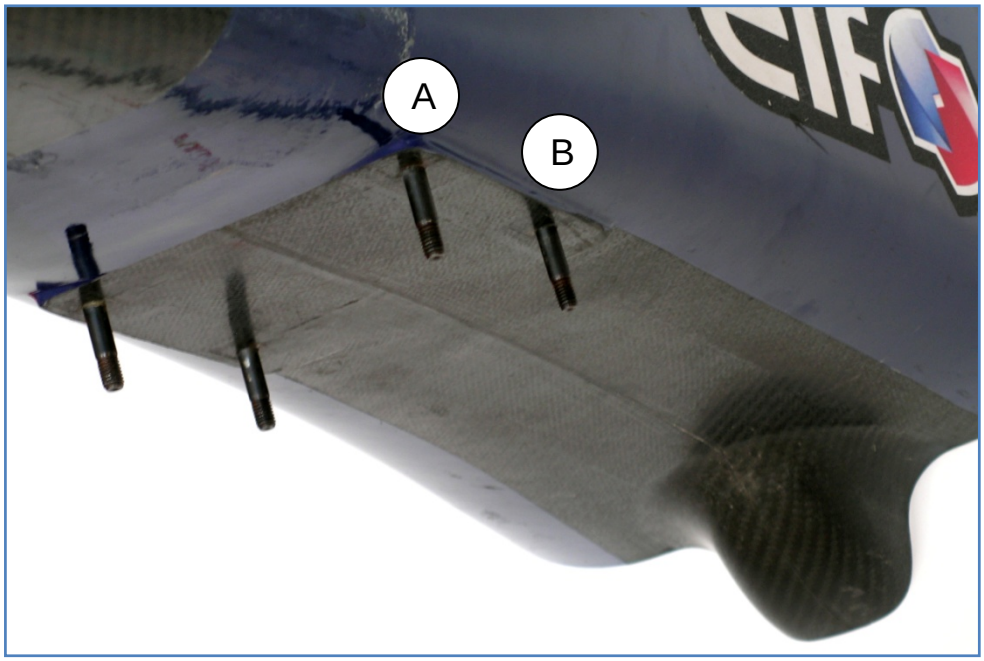


Figura 30. Placa amb els quatre cargols que serveix per fixar l'aleró.

Els resultats obtinguts estan referenciats a uns eixos i origen de coordenades mostrat a la Figura 68 de l' "ANNEX E". L'origen d'aquests eixos són coincidents amb un vèrtex del túnel de vent. Les forces resultants sobre l'aleró es poden observar en la Taula 1. Les coordenades en els mateixos eixos dels punts d'encastament A i B han servit per calcular els moments i es poden observar en la Taula 2.

Força (Newtons)	Coordenades (metres)
F_x = -281	(y,z) = (1.168, 0.110)
F_y = 682	(x,z) = (0.294, 0.041)
F_z = -4377	(x,y) = (0.369, 1.211)

Taula 1. Forces resultants sobre l'aleró.

Punt	Coordenades (metres)
A	(x,y,z) = (0.065, 1.282, 0.170)
B	(x,y,z) = (0.065, 1.177, 0.170)

Taula 2. Coordenades dels punts de fixació A i B.

Com que l'aleró és simètric, les dues forces en la direcció 'X' es cancel·len (Figura 29). El moment que creen aquestes dues forces tendeix a fletxar l'aleró però no afecta a la carcassa de fibra de carboni.

Les forces en la direcció 'Y' empenyen l'aleró en sentit positiu. Com que no es considera cap mena de deformació en aleró i fixacions, aquesta força es repartirà equitativament entre els encastaments. Cadascuna de les dues forces Fy crea un moment sobre l'eix 'Z', però al ser simètriques es cancel·len. Sobre l'eix 'X' si que creen un moment que s'haurà de considerar i que tendeix a fer girar l'aleró.

Les forces en la direcció 'Z' pressionen l'aleró contra el terra. Els moments que creen sobre l'eix 'Y' es cancel·len per simetria. Els moment que creen sobre l'eix 'X' s'hauran de tenir en compte ja que tendeix a fer girar l'aleró.

Per tant, les úniques forces que s'hauran de tenir en compte són Fy i Fz, aquestes només creen reaccions en el pla 'YZ' i moments respecte l'eix 'X'. Figura 31.

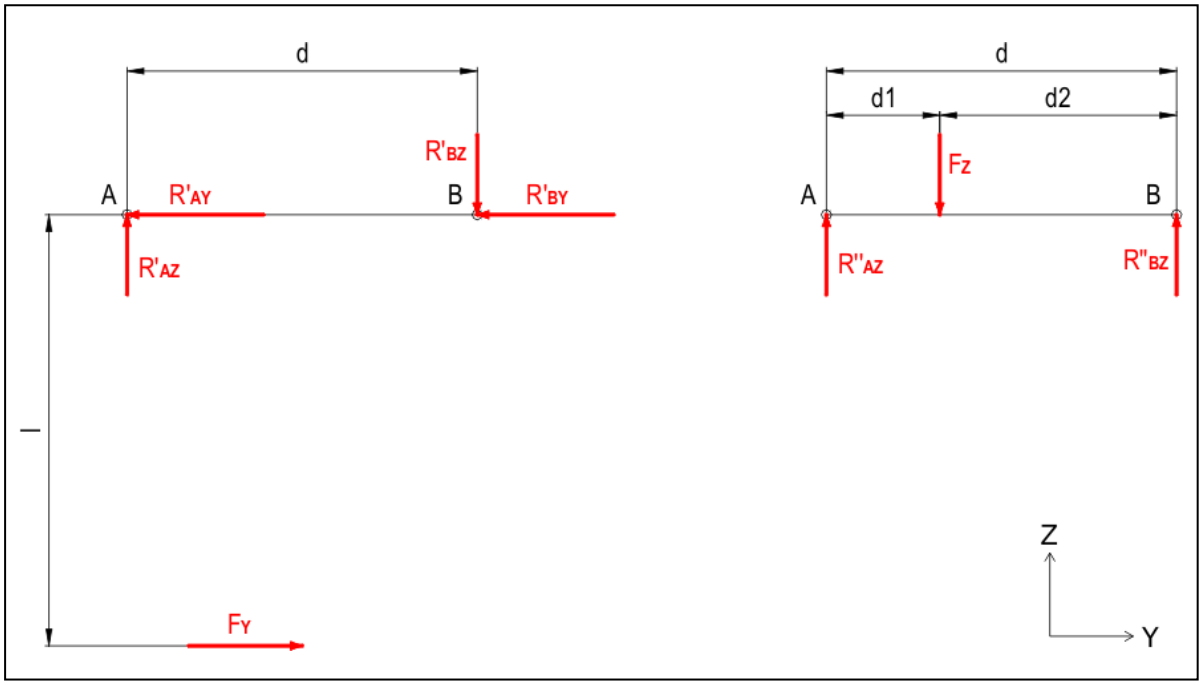


Figura 31. Reaccions en els punts d'encastament de l'aleró, causats per les forces Fy i Fz respectivament.

La reacció de Fy en la direcció horitzontal es repartirà equitativament entre els dos punts d'encastament. Fy està separat de la placa d'encastament i produeix un moment sobre els encastaments que serà compensat amb un parell de forces en la direcció 'Z'. Per calcular aquest parell de forces es farà sumatori de moments:

$$\sum M_A = 0$$
$$F_Y \cdot l - R'_{BZ} \cdot d = 0 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

$$\sum M_B = 0$$
$$F_Y \cdot l - R'_{AZ} \cdot d = 0 \qquad \text{(Eq. 2)}$$

El punt d'aplicació de la força Fz no està completament centrat entre els punts d'encastament A i B. Així, El moment que crea Fz provocarà que les reaccions de A i B no tinguin el mateix valor. Per calcular aquestes reaccions també es farà sumatori de moments:

$$\sum M_A = 0$$
$$-F_Z \cdot d_1 + R''_{BZ} \cdot d = 0 \qquad \text{(Eq. 3)}$$

$$\sum F_Y = 0$$
$$R''_{AZ} + R''_{BZ} - F_Z = 0 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

De la Eq. 1 s'aïlla R'_{BZ} i de la Eq. 2 R'_{AZ}. De la Eq. 3 s'aïlla R''_{BZ} i de la Eq. 4 R''_{AZ}. Un cop obtingudes les reaccions que crea Fy i Fz es poden sumar per conèixer la reacció total.

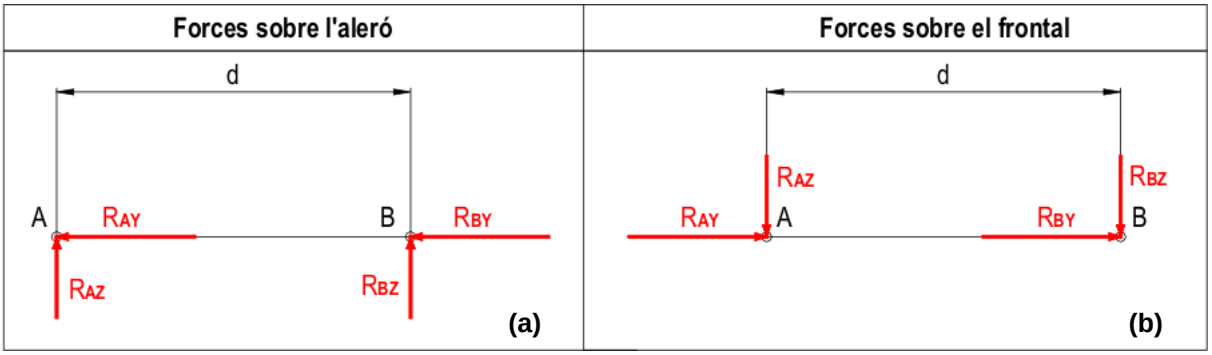


Figura 32. Suma de les reaccions creades per la força F_Y i F_Z.

Les forces de la Figura 31 i Figura 32(a) estan aplicades sobre l'aleró. Per tant, el frontal rebrà unes forces en la mateixa direcció però en sentit oposat. Si es sumen les reaccions que creen les forces Fy i Fz sobre l'aleró i es canvien de signe s'obtindran les forces que creen sobre el frontal , tal com es pot observar en la Figura 32(b).

	Força	Newtons
	FY	682
	FZ	4377
Reaccions degudes a FY	R'AY = R'BY	341
	R'AZ	838
	R'BZ	838
Reaccions degudes a FZ	R''AZ	2960
	R''BZ	1417
Total	RAY = RBY	341
	RAZ	3798
	RBZ	579

Taula 3. Valors de les Forces de les Figures 31 i 32.

Les tensions i deformacions del frontal causades per les càrregues aerodinàmiques es poden consultar en l' "ANEX G. RESULTATS".

7.2. Degudes als esforços creats al elevar el vehicle (manteniment, transport,..)

Un altre requisit del frontal és que els anclatges a l'aleró també han de suportar el pes del vehicle en diferents situacions, sigui per elevar el vehicle i carregar-lo en un tràiler, o en cursa elevar-lo per poder canviar una roda o fer-li altres tasques de manteniment.

Figura 33. Elevació del vehicle per la part inferior de l'aleró frontal

Se suposa un pes de 800 kg pel vehicle i que el centre de gravetat està centrat tant longitudinalment com transversalment respecte els dos eixos. Quan s'elevi el vehicle el frontal suportarà una càrrega de 400 kg. Si hi ha quatre punts d'anclatge suposaran 100 kg per cadascun.

Les tensions i deformacions del frontal causades per les càrregues del pes es poden consultar en l' "ANEX G. RESULTATS".

7.3. Aquelles que intervenen en cas d'impacte frontal. Accions futures

Per acabar de completar totes les hipòtesis de càrrega, en un futur s'hauria de fer un assaig d'impacte del model. El principal problema és que aquet tipus de simulacions són totalment noves per al grup de recerca de la universitat, i encara s'està treballant per tal de poder dur-les a terme. Per tant, tot i que es tenia l'intenció, i inclús s'ha preparat un model per poder fer l'assaig, el procediment no estava prou madur per incloure'l en la present memòria.

Tot i comptar amb ordinadors d'última generació, l'assaig d'impacte requereix de molt temps i capacitat de procés. S'ha vist que per poder arribar a un resultat amb un temps coherent cal un model molt més simplificat que l'actual. Així, s'hauria de fer un mallat nou del model, ja que actualment compta amb més de 9.000 elements. El model per l'assaig d'impacte hauria de ser de l'ordre de 100 elements.

8. RESUM DEL PRESSUPOST

La realització del treball ascendeix a 5990,00€ (cinc mil nou cents noranta euros).

Girona, 15 de juny de 2007

Marc Casas Bosch
El redactor

9. CONCLUSIONS

Al final de la realització d'aquest projecte s'han arribat a les següents conclusions:

Obtenció de la geometria

L'opció del modelat 3D és l'opció econòmicament més viable per aquest projecte. El modelat 3D permet obtenir la geometria d'una peça a partir de fotografies ortogonals amb una bona precisió.

Mallat

El mallat del model s'ha fet amb elements de quatre nodes per obtenir un mallat molt més regular que amb elements triangulars, i evitant problemes de patronatge. Per minimitzar el temps de càlcul i afavorir la convergència de resultats, s'ha utilitzat la meitat simètrica del frontal.

Patronatge

Per fer el patronatge s'ha de tenir en compte el teixit que es farà servir. Així un teixit molt rígid no s'adaptarà correctament a una superfície amb molta curvatura. Ha de tenir un cert angle de deformació. Aquest angle de deformació "Maximum Strain" és una característica del material, i és el paràmetre més important a l'hora de fer el patronatge.

Si es vol simular la deformació d'un material de fibres tramades s'ha d'escollir l'algorisme "scissor draping". Si es vol simular la deformació d'un material de fibres unidireccionals s'ha d'escollir l'algorisme "slide draping".

S'ha vist que el procés de "draping" és molt sensible al punt on es comença a aplicar el teixit i a la direcció en que s'aplica. Per simular com es deforma el teixit en la fabricació de la peça existeixen els algorismes geodèsic, pla, i de mínima energia. Per evitar arrugues i grans canvis d'angle en el teixit el "draping" s'ha de començar per el centre del patró. L'algorisme que causa menor deformació al teixit és el de mínima energia.

CFD

En el software CFD utilitzat (CFdesign) és molt important el pas de malla. Si la malla és massa gran els resultats no convergeixen.

En l'estudi aerodinàmic de l'aleró a una velocitat rectilínia de 300Km/h s'ha trobat que la força vertical que l'empeny contra el terra és molt major que la força horitzontal que l'empeny cap endarrere.

Estats de càrrega

A l'hora d'aplicar càrregues puntuals o impedir el desplaçament en els punts de fixació, s'ha comprovat que és millor repartir la càrrega entre els nodes del mallat que ocupen l'àrea de fixació (per exemple l'àrea circular d'un cargol) que no en un sol node. Si s'aplica tota la força en un sol node es produeix una concentració de tensions molt elevada i els resultats no responen a la realitat.

S'ha estudiat com fer l'assaig d'impacte, però degut a la seva complexitat s'ha plantejat com una acció futura.

Laminat i conclusions finals

Per l'estat de càrregues aplicat, un laminat de quatre capes resulta insuficient i es superen les tensions i deformacions màximes admissibles. En una estructura sandwitch més semblant a la utilitzada en competició s'han obtingut uns resultats satisfactoris.

S'ha simulat el comportament d'un laminat utilitzant un material isotròpic. Però mentre que en el material isotròpic és de gruix constant, el gruix del laminat augmenta en algunes zones degut al solapament de capes. Així, el material isotròpic es desplaça i es deforma molt més que el laminat real. En canvi, degut a la variació de gruixos el material laminat té majors concentracions d'esforços que el material isotròpic. Per tant, la simulació del comportament d'un material laminat utilitzant un material isotròpic s'ha de fer amb cura per culpa d'aquestes singularitats del material laminat.

Quan es fa el patronatge pensant en la fabricació es numeren les capes per saber a quina pertany cada patró o "Ply". Per exemple, les quatre capes aplicades al primer laminat que s'ha fet, on cada capa té els seus solapaments per afavorir l'adherència entre els patrons. Quan es fa l'anàlisi, per cada element del mallat el MSC.Marc numera totes les capes de teixit que hi ha en realitat. El resultat és que un mateix patró o "Ply" pot estar dividit en diferents capes del MSC.Marc. Aquesta doble numeració fa que sigui molt laboriós relacionar les tensions o deformacions obtingudes en el MSC.Marc amb la capa i "Ply" que li correspon.

La metodologia de treball aplicada requereix de molt de temps d'execució. És una metodologia indicada en casos d'industrialització de grans series de peces, on l'aplicació d'aquest mètode pot suposar una optimització i estalvi de material.

Girona, 15 de juny de 2007

Marc Casas Bosch
El redactor

10. RELACIÓ DE DOCUMENTS

1 Memòria i Annexos

2 Plànols dels patrons

3 Pressupost

11. BIBLIOGRAFIA

Boulder Innovation Group, Inc. (http://www.boulderinnovators.com/index.html, 20 de setembre de 2006)

CAEsoft Homepage – Soft para el ingeniero (http://www.caesoft.es/, 20 de setembre de 2006)

CFD Software - Fluid Flow and Electronics Cooling Simulation - CFdesign (http://www.cfdesign.com/, 9 de novembre de 2006)

F.L. MATTHEWS AND R.D. RAWLINGS. Composite materials: Engineering and science. Woodhead Publishing Ltd. England. 1999.

FARO Spain S.L. (http://www.faro.com/default.aspx?ct=sp, 20 de setembre de 2006))

Laser Scanning – Reverse Engineering – Digital Modeling – 3D Scanning – 3D Measuring – 3D Modeling from Direct Dimensions, Inc. (http://www.directdimensions.com/, 20 de setembre de 2006)

Marc (http://www.mscsoftware.com/products/marc.cfm, 20 de setembre de 2006)

Modeling tools for designers (http://www.rhino3d.com/, 20 de setembre de 2006)

Patran (http://www.mscsoftware.com/products/patran.cfm, 20 de setembre de 2006)

Pons Racing official website. (http://www.ponsracing.com/, 12 d'octubre de 2006)

TR Composites (http://www.trcomposites.com/, 20 de setembre de 2006)

12. GLOSSARI

Anàlisi d'elements finits (en. Finite element analysis, FEA): És una tècnica de simulació per ordinador utilitzada en enginyeria. Utilitza una tècnica numèrica anomenada mètode d'elements finits (FEM). Consta de tres fases: el pre-procés (definició del model d'elements finits i condicions de contorn), l'anàlisi (solució del model d'elements finits), i post-procés (eines per visualitzar els resultats).

Anisotropia (en. anisotropy): Tendència d'un material a presentar una diferencia en el valor de les seves propietats en funció de la direcció en la que es mesuren.

Aramida (en. aramid): Fibres de poliamida aromàtica que tenen unes excel·lents propietats mecàniques y elèctriques a alta temperatura, juntament amb una elevada resistència.

Autoclau (en. autoclave): Recipient tancat en el que té lloc una reacció química completa o altres operacions sota pressió i calor.

Catalitzador (en. catalyst): Substancia que augmenta la velocitat de curat d'un compost quan se li afegeix una quantitat mínima comparada amb les quantitats dels reactius primaris.

Cicle de moldeig (en. molding cycle): Període de temps requerit per a completar la seqüència d'operacions necessàries per produir una peça.

Curat (en. cure): Enduriment d'una resina termostable per reacció química de condensació o adició que produeix la reticulació o entrecreuament de les seves cadenes, donant lloc a un producte que no canvia les seves propietats. Pot anar acompanyat per la adició d'agents d'entrecreuament, amb o sense adició de catalitzadors, amb o sense aplicació de calor i/o temperatura.

Impregnar (en. impregnate): En materials compostos, saturar el reforç amb la resina (mullar).

Isotropia (en. isotropy): Independència de les propietats mecàniques de la direcció en la que es mesuren.

Laminat (en. laminate): Producte fabricat per la unió de dues o més capes de material o materials. En el cas dels materials compostos, es refereix al sistema construït a partir de l'apilament o unió de capes de resina reforçades amb fibres.

Mandril (en. mandrel): Utillatge o nucli al voltant del qual s'enrotlla la fibra impregnada en resina per formar tubs, dipòsits,...

Materials Composits: S'entén per material compòsit aquell format per dos o més components, de manera que les propietats del material final siguin superiors a les dels components per separat. Aquests dos components els formen una matriu (de resina normalment) i un reforç (normalment fibra).

Matriu (en. matrix): Material de naturalesa polimèrica, metàl·lica o ceràmica en la que estan embeguts els reforços en un material compòsit

Motlle (en. mold): Cavitat en la qual es diposita el material de moldeig i es conforma.

NURBS: prové de l'acrònim anglès de la expressió Non Uniforms Rational B-Splines. Las NURBS, B-Splines racionals no uniformes, són representacions matemàtiques de geometria en 3D capaces de descriure qualsevol forma amb precisió, des de simples línies en 2D, cercles, arcs o corbes, fins els més complexes sòlids o superfícies orgàniques de forma lliure en 3D. Gràcies a la seva flexibilitat i precisió, es poden utilitzar models NURBS en qualsevol procés, des de la il·lustració i animació fins la fabricació.

Ordit (en. warp): Conjunt de fils paral·lels que van disposats en sentit longitudinal en els teixits, i que es creuen perpendicularment amb els filaments que formen la trama.

Ortotròpic (en. orthotropic): material que té tres plans perpendiculars entre si que tenen simetria elàstica.

Panell d'abella (en. honeycomb): Producte fabricat amb material en làmines impregnat de resina (paper, teixit de vidre) o escames de metalls en forma de celdes hexagonals. S'utilitza como a nucli en construccions sandwitch.

Preforma (en. preform): Reforç de fibra a la que se li dona una forma i gruix similars als de la peça final.

Preimpregnat (en. Prepeg): Presentació tèxtil impregnada de resina a la que se li ha afegit l'enduridor, a punt per el moldeig, i que s'ha d'emmagatzemar en cambra frigorífica.

Reforç (en. reinforcement): Material encarregat de donar un bon comportament mecànic als materials compostos.

Resina (en. resin): Material orgànic viscós, normalment d'alt pes molecular, que té una tendència al flux quan es sotmet a tensió.

Teixit (en. fabrics): Formes tèxtils constituïdes per l'entrecreuament ortogonal de dos sistemes paral·lels de fibres, ordit i trama.

Trama (en. weft): Conjunt de fils paral·lels que van disposats en sentit transversal en els teixits, i que es creuen perpendicularment amb els filaments que formen l'ordit.

ANNEX A: TECNIQUES PER A LA DIGITALITZACIÓ

A.1. Braç digitalitzador amb/sense contacte

El braç mesurador o digitalitzador és un instrument de maneig manual que proporciona les coordenades cartesianes dels punts mesurats respecte un sistema de referència fix. Es fabriquen a diferents escales en funció del objecte a mesurar, des de 0 metres fins a 35 metres. Les precisions aconseguides són molt elevades podent arribar a mil·lèsimes de mm. Aquests braços estan contrapesats internament per aconseguir una sustentació neutra i facilitar els moviments a l'usuari. Els de menors dimensions són lleugers i portàtils.

Quan es tracta d'objectes geomètrics de formes complexes, és millor capturar-los amb dispositius sense contacte. Aquests disposen d'un escàner laser que genera un núvol de punts. Aquests punts llavors es poden triangular per generar la superfície. És un sistema molt més ràpid, que permet capturar milers de punts per segon. A més, són transportables i les peces no s'han de traslladar.

Com a regla general, per tasques de prototipatge ràpid, enginyeria inversa, modelat 3D,... com és el cas que ens ocupa, el més adient és utilitzar un aparell que disposi d'escàner laser. Mentre que per tasques de metrologia, inspecció, calibració, alineament,... un sistema que funcioni per contacte pot ser suficient.

Molts d'aquests sistemes combinen les dues possibilitats i permeten prendre mesures amb o sense contacte. Així per exemple es pot fixar el sistema de coordenades d'una peça prenent punts per contacte i a continuació escanejar zones per laser.

Exemples de braços digitalitzadors són els que comercialitza l'empresa FARO i que es poden veure en la Figura 34. El Laser ScanArm és un capçal que es pot fixar a qualsevol braç articulat.

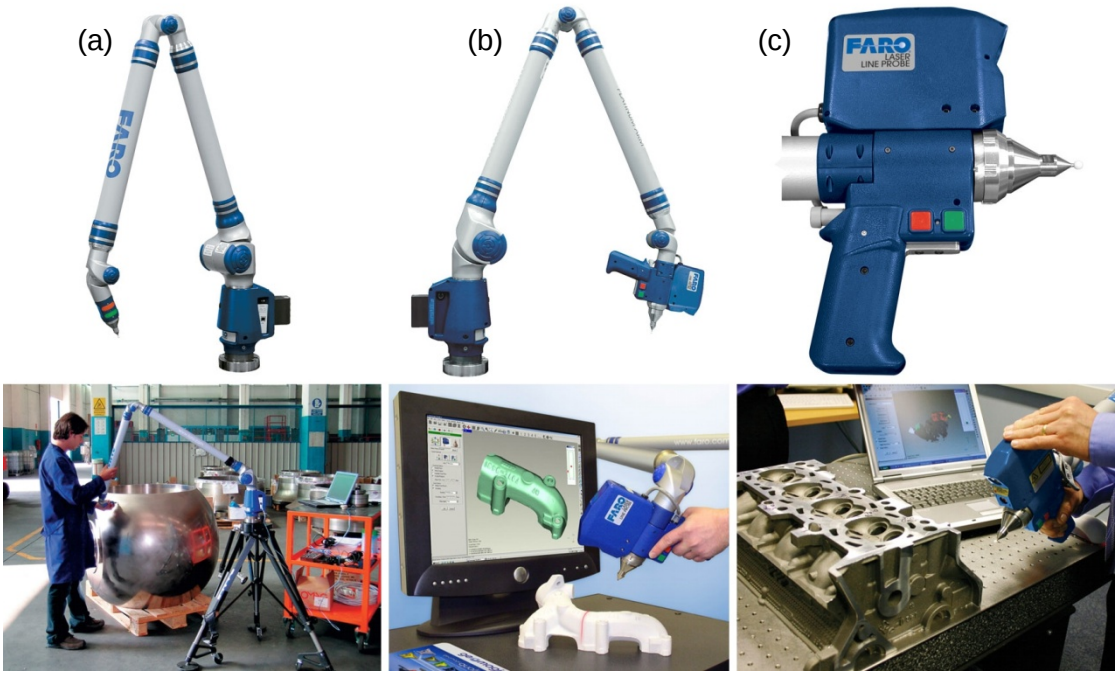


Figura 34. (a): Platinum FaroArm (amb contacte); (b): Laser ScanArm (amb/sense contacte); (c): Laser Line Probe (ideal sense contacte).

A.2. 'Llapis' digitalitzador

És un sistema de mesura per contacte però sense el braç articulat. S'anomena 3D Creator i el comercialitza l'empresa Boulder Innovation Group. Aquest aparell funciona a mode de "llapis" i sense cap braç mecànic que ens restringeixi els moviments i a més és inal·làmbric. L'aparell permet prendre mesures amb un error inferior a 0.2 mil·límetres.

Figura 35. 3D Creator: Aparell inal·làmbric que no restringeix els moviments.

A.3. Fotogrametria

Aquesta tècnica permet conèixer les dimensions i posició d'un objecte a partir de fotografies.

La fotogrametria s'utilitza en molts camps, des de les fotografies aèries utilitzades per fer els mapes topogràfics i digitals del terreny, passant per la supervisió de deformacions o patologies de construccions per arquitectes i enginyers civils, la documentació d'accidents de trànsit o escenes de crim per la policia, aplicacions en cirurgia plàstica, aixecament de restes arqueològiques,... En el camp de l'enginyeria la fotogrametria té aplicacions en enginyeria inversa (modelat de geometria CAD a partir de digitalització 3D), anàlisis d'elements finits, control de qualitat (comparació del objecte amb la seva geometria nominal),...

En la fotogrametria s'utilitzen diferents tipus de càmera que es poden dividir en tres grups:

Càmeres mètriques: tenen una geometria interna estable i precisa, i lents amb molt poca distorsió (el fabricant ens facilita un certificat de laboratori dels valors d'aquests paràmetres). Per contra, són aparells molt cars. Cap càmera "autofocus" és una càmera mètrica. Com que la longitud focal és fixa només poden ser utilitzades en un rang de distancies limitat.

Càmeres estereomètriques: Es tracta de fotografiar l'objecte des de dues posicions per obtenir dues imatges amb unes propietats similars a les que obtindrien les nostres retines. Aquestes es poden veure en 3D, simulant la visió estereoscòpica humana. La càmera estereomètrica consisteix en dues càmeres mètriques separades una distancia definida i mesurada amb precisió. Les dues càmeres han de tenir les mateixes propietats geomètriques. A la pràctica, si no es disposa de dues càmeres, és possible utilitzar la mateixa per fer les dues fotografies.

Càmeres d'aficionat: Són aquelles en que la geometria interna no és estable i a més és desconeguda. És el cas de qualsevol càmera comercial normal. Si les volem utilitzar per fins mètrics s'ha de recórrer a algun procediment de calibració, tot i que degut a la variabilitat de la focal s'haurà de realitzar una calibració cada vegada que s'utilitzi i canviïn les condicions de la fotografia. De totes maneres la precisió no arribarà mai al d'una càmera mètrica. Per tant, poden ser utilitzades per propòsits on no s'exigeix una elevada exactitud. En casos d'emergència, la utilització d'aquest tipus de càmeres és una solució útil.

En quant a les tècniques fotogramètriques i el "mapeig" de les imatges cal dir que a partir d'una sola imatge només es pot obtenir un model 2D, metre que a partir de dues imatges (estereofotogrametria) ja es poden començar a obtenir relleus en 3D.

Si ens centrem en el nostre cas, el frontal del monoplaça és un volum i no simplement una superfície en relleu com podria ser els mapes digitals comentats anteriorment. Per tant, prendre dues fotografies és clarament insuficient i s'ha d'utilitzar un sistema de "mapeig" a partir de moltes fotografies. Aquests objectes 3D s'han de fotografiar des de moltes posicions. Com a norma, qualsevol punt de l'objecte serà visible com a mínim en dues fotografies, i si és possible en tres. A partir dels punts de control de l'objecte i de la triangulació es reconstrueix el model 3D amb una elevada precisió.

En quant al software, el mercat ofereix molta diversitat i alguns dels programes estan enfocats a topografia, a arquitectura o a enginyeria, mentre que d'altres són més genèrics. Entre els que s'utilitzen en el camp de l'enginyeria, destacar el Photomodeler 5.0 que compleix amb les nostres necessitats i té un preu relativament contingut.

La precisió en aquest cas varia en funció de la càmera utilitzada, la resolució,... A l'hora de calcular la precisió és molt important saber a quina escala estem treballant. Per veure això més clarament, suposem que es fa una fotografia a 4MP i que l'error que es comet al modelar és inferior a 5 píxels. Llavors, aquest error transformat en mides reals de l'objecte serà completament diferent si la fotografia és d'un edifici o pel contrari és d'una capsa de mistos. En el cas del nostre frontal de monoplaça, amb una càmera d'aficionat d'una resolució de 4 o 5 MP es poden aconseguir errors inferiors a 0.5mm.

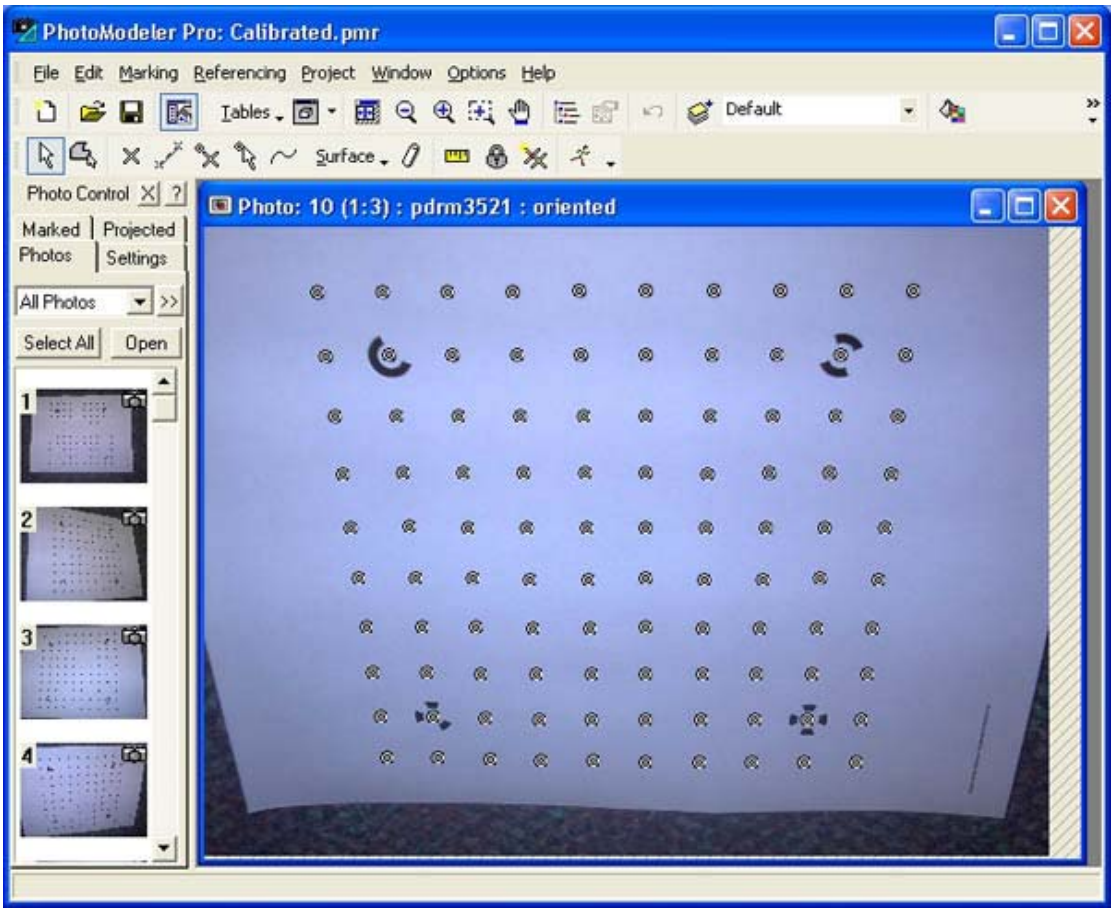


Figura 36. Treball amb Photomodeler. Procés de calibració de la càmera.

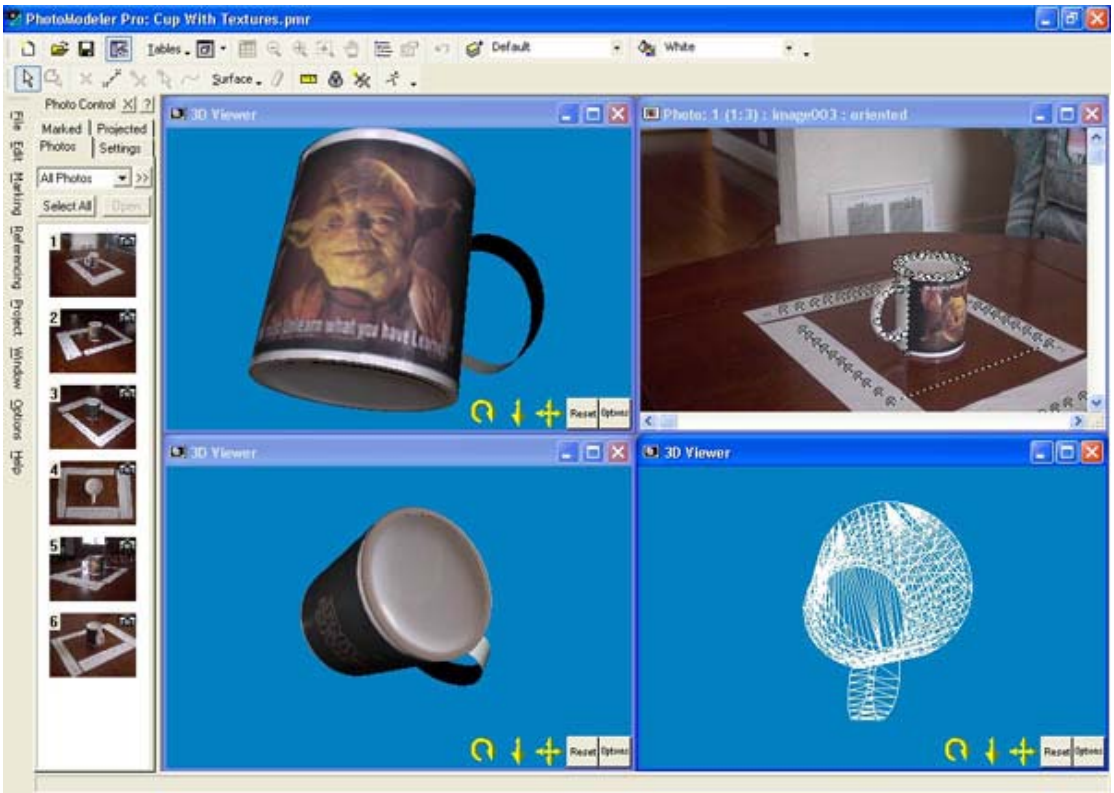


Figura 37. Treball amb Photomodeler. Modelat d'una tassa.

A.4. A partir de vistes ortogonals

Igual que el cas anterior, el primer pas és fotografiar l'objecte que s'ha de modelar, però en aquest cop les vistes només seran des de posicions ortogonals. És a dir, es fotografien les vistes superior, inferior, davant, darrera, dreta i esquerra.

El pas següent es fa amb un software de dibuix 3D que permeti posar aquestes vistes de fons i així poder dibuixar els contorns sobre d'aquestes. Lògicament, amb aquest sistema els errors que es cometen són majors que en els anteriors. En alguns casos, com en les fotografies d'edificis es pot arribar a corregir la perspectiva. Amb tot i això, la fotografia normalment no rep cap mena d'ajust o calibració, excepte l'escalat per fer-la coincidir amb les dimensions exteriors del model. A més, algunes geometries seran difícilment reproduïbles amb aquest sistema. Per exemple, si l'objecte té alguna zona còncava, possiblement quedi amagada, i si no li queda, serà molt difícil avaluar la seva profunditat. Una manera de poder modelar aquestes superfícies "difícils" seria seccionar de la peça cada certa distancia i fer les fotografies corresponents. El model 3D s'obtindria a partir del contorn de cada fotografia i aplicant-los la separació definida al fer els talls.

Aquest últim punt no es podrà aplicar ja que seccionar el frontal del monoplaça seria costos, a més, la unitat a la que tenim accés és funcional i no es pot destruir. A favor, que les superfícies d'aquest són convexes i per tant al fotografiar-lo si que es pot resseguir el contorn.

Un dels softwares més destacats per modelar és el Rhinoceros3D i possiblement el que millor s'adapta a tots aquests requeriments. El Rhino3D permet editar corbes NURBS, superfícies i sòlids en Windows. A més, és compatible amb la majoria de formats utilitzats en enginyeria.

A.5. Valoracions econòmiques

A continuació s'enumeraran totes les opcions considerades fent una valoració del cost econòmic que representa cadascuna:

- Braços digitalitzadors: en quant a la inversió necessària per als braços digitalitzadors, els FaroArm es troben a partir de 40.000€. I els Laser ScanArm, que es poden fixar a qualsevol braç articulat (per exemple al FaroArm), tenen un cost a partir de 30.000€.
- Fotogrametria: per a la fotogrametria es pot adquirir una llicencia educacional del Photomodeler per uns 1000€.
- Dibuix amb software de modelat 3D: La darrera opció considerada és el Rhinoceros 3D i està disponible en versió per estudiants a un preu de 200€, o llicència normal per 900€.

Tecnologia	Eines	Preu	En disposem?	Inversió total
Digitalització	Braç digitalitzador amb escàner	70.000,00 €	NO	70.000,00 €
Fotogrametria	Càmera fotogràfica	400,00 €	SI	1.100,00 €
	Software	1.000,00 €	NO	
Dibuix	Càmera fotogràfica	400,00 €	SI	0,00 €
	Software	200,00 €	SI	

Taula 4. Comparació inversió necessària aproximada en funció de la tecnologia i la situació actual.

Considerant que el braç digitalitzador té un cost molt elevat, la precisió supera en escreix les nostres necessitats i tampoc es disposa de cap unitat a la universitat, podem descartar aquesta opció.

La fotogrametria és una opció a tenir en compte, ja que amb programes com el Photomodeler i una càmera de gama mitjana com de la que es disposa, es possible obtenir un model molt ajustat a la realitat. Però en aquest cas la universitat no disposa de cap software d'aquestes característiques i les versions d'avaluació només són aptes per utilitzar amb els exemples que ens facilita el fabricant. Fent necessària l'adquisició d'una llicencia per tal de poder-lo utilitzar.

El Rhino és la única opció que no suposa cap despesa extra. Actualment es disposa de càmera fotogràfica i la universitat disposa de llicència per utilitzar aquest software. Per tant, s'ha considerat que per als requeriments i pretensions actuals el Rhinoceros 3D és la millor opció. A més, permet exportar el model amb diferents formats CAD, fent-lo plenament compatible amb el software de MSC que més endavant s'utilitzarà.

ANNEX B: MODELAT DEL FRONTAL AMB RHINOCEROS 3D

En el Rhino s'han fixat les unitats de dibuix com a mil·límetres. Per això, a les propietats del dibuix a "unidades del modelo" hi ha de figurar "milimetros". Amb la funció "Bitmap de fondo" del menú "vista" s'ha col·locat la imatge i llavors s'ha escalat de manera que mesuri 808 unitats de dibuix de longitud en el cas de la fotografia superior i frontal. Es procedeix de manera similar per la fotografia de la vista dreta.

Per crear la geometria s'ha seguit el procediment descrit a continuació. Primer s'ha dibuixat el contorn exterior de la vista dreta. Tot seguit s'han creat tres corbes que s'han utilitzat com a guia. En la vista superior i frontal s'ha resseguit el contorn de la peça. I en la vista frontal també s'ha dibuixat una corba equidistant de la cara superior i inferior de la peça. Es tracta de anar copiant el contorn de la peça cada 5cm i centrar-lo verticalment amb la línia guia. Llavors s'ha escalat el contorn però només en una dimensió cada vegada, primer en la dimensió horitzontal des de la vista superior, i llavors en la dimensió vertical en la vista frontal. Amb això s'ha obtingut un "esquelet" com el que es pot veure en la Figura 38.

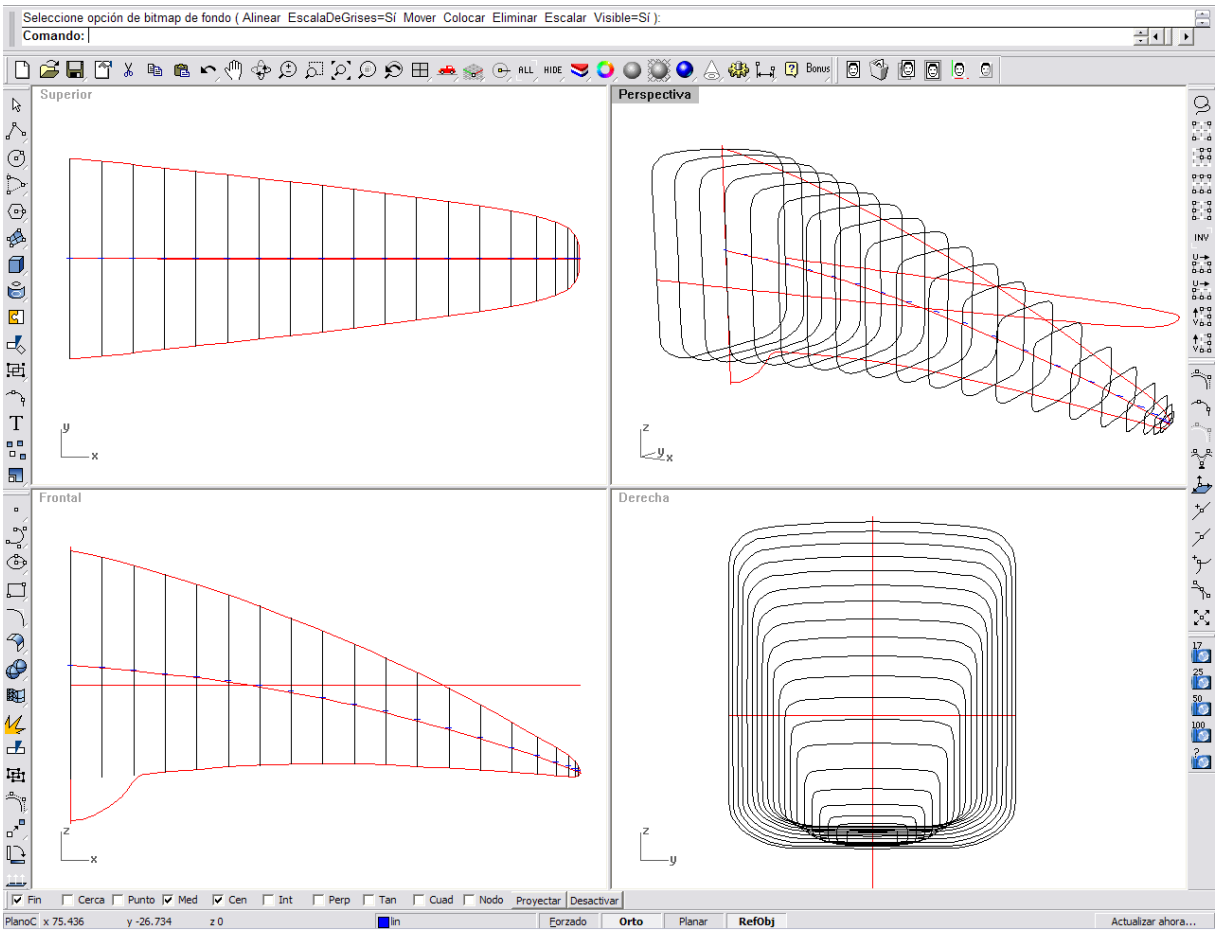


Figura 38. Corbes per generar la superfície. (s'han tret les imatges de fons així com el color gris del fons per fer la imatge més entenedora.

Seguidament s'han seleccionat totes les corbes que formen l' "esquelet" i s'ha crea`t la superfície amb la funció "superficie de transición". Finalment, el tros final de la puntera s'ha tapat amb la funció "parche" seleccionant els "bordes" i ajustant la tangència. En aquest punt es té el model com es pot veure en la Figura 39.

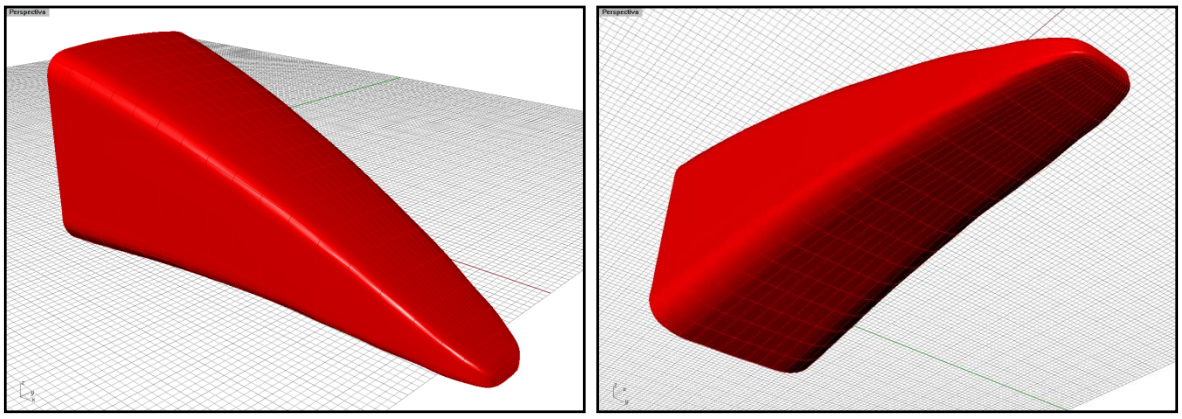


Figura 39. S'ha aplicat les funcions "superficie de transición" i "parche" per generar aquesta superfície.

El següent pas ha estat dibuixar la protuberància de la part inferior de manera que quedin els contorns arrodonits i tangents a la superfície actual. Figura 40.

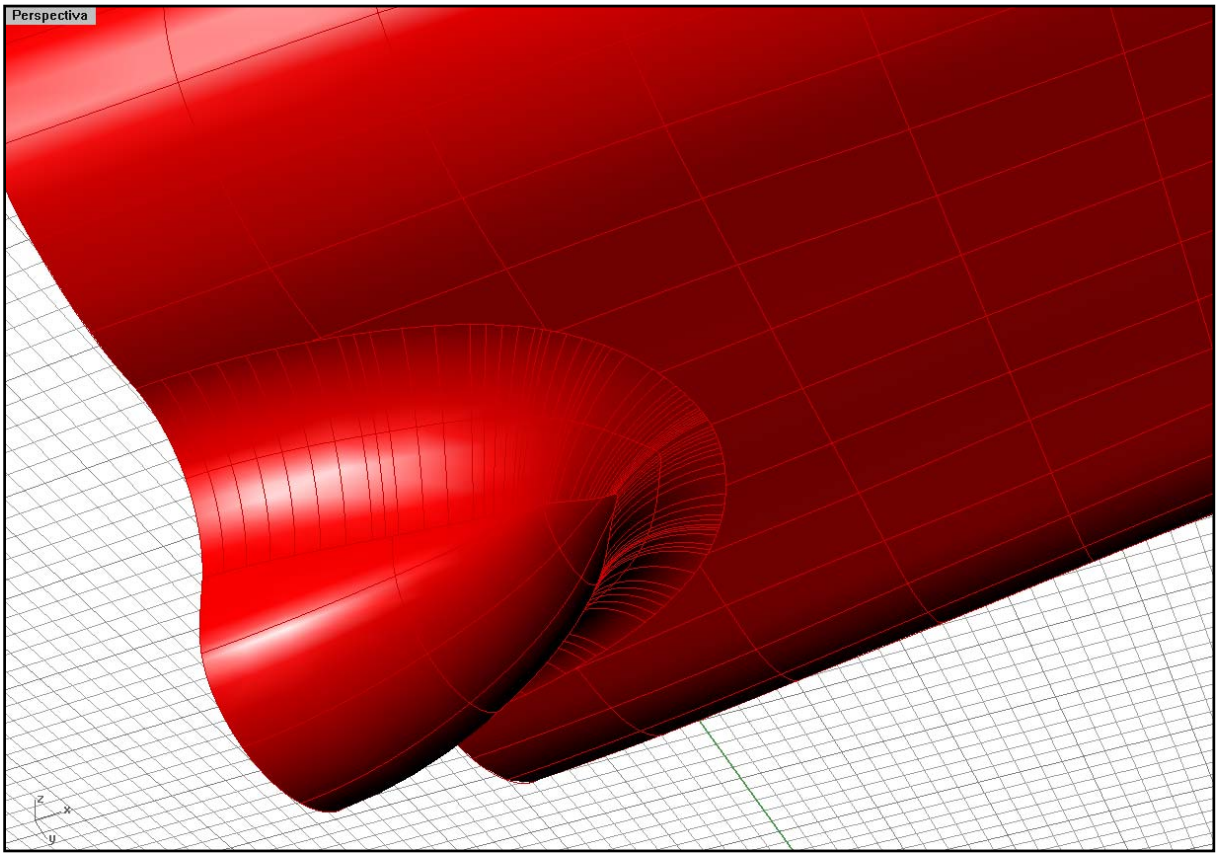


Figura 40. Dibuix de la protuberància de la part inferior del model.

Finalment, per acabar la geometria s'ha dibuixat la placa d'ancoratge que sobresurt per la part inferior i és on es fixen els suports de l'aleró davanter. Aquesta placa té forma rectangular amb les cantonades arrodonides. Així, en la Figura 41 es pot observar la geometria ja acabada.

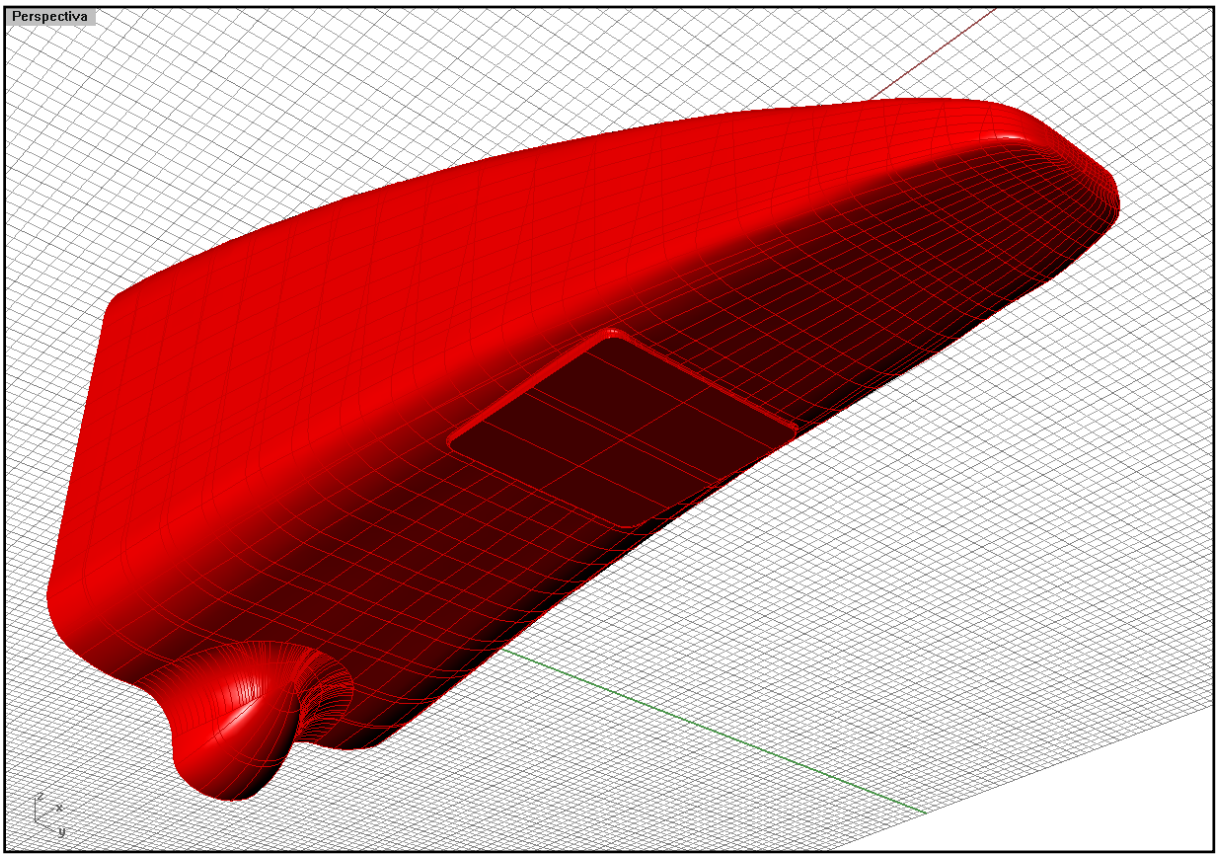


Figura 41. Geometria completa, amb tots els detalls inferiors.

La geometria de la Figura 41 s'haurà de mallar, i un cop aplicades les càrregues processar amb el software d'elements finits. Tot això necessita molta capacitat de procés i per tant interessa que els fitxers i càlculs siguin el menys pesats possible. Per això s'ha utilitzat el pla de simetria de la peça per tallar-la. A partir d'aquí només s'ha utilitzat una meitat de la peça per no fer els càlculs per duplicat. A més, els càlculs en els programes d'elements finits convergeixen millor analitzant mitja peça i aplicant les condicions de simetria.

En la Figura 42 es pot observar el frontal tallat pel pla de simetria. En aquesta imatge també s'observen les fotografies de la Figura 3 que s'han utilitzat per dibuixar col·locades de fons. Es pot apreciar com el model dibuixat s'ajusta al contorn de les imatges del fons.

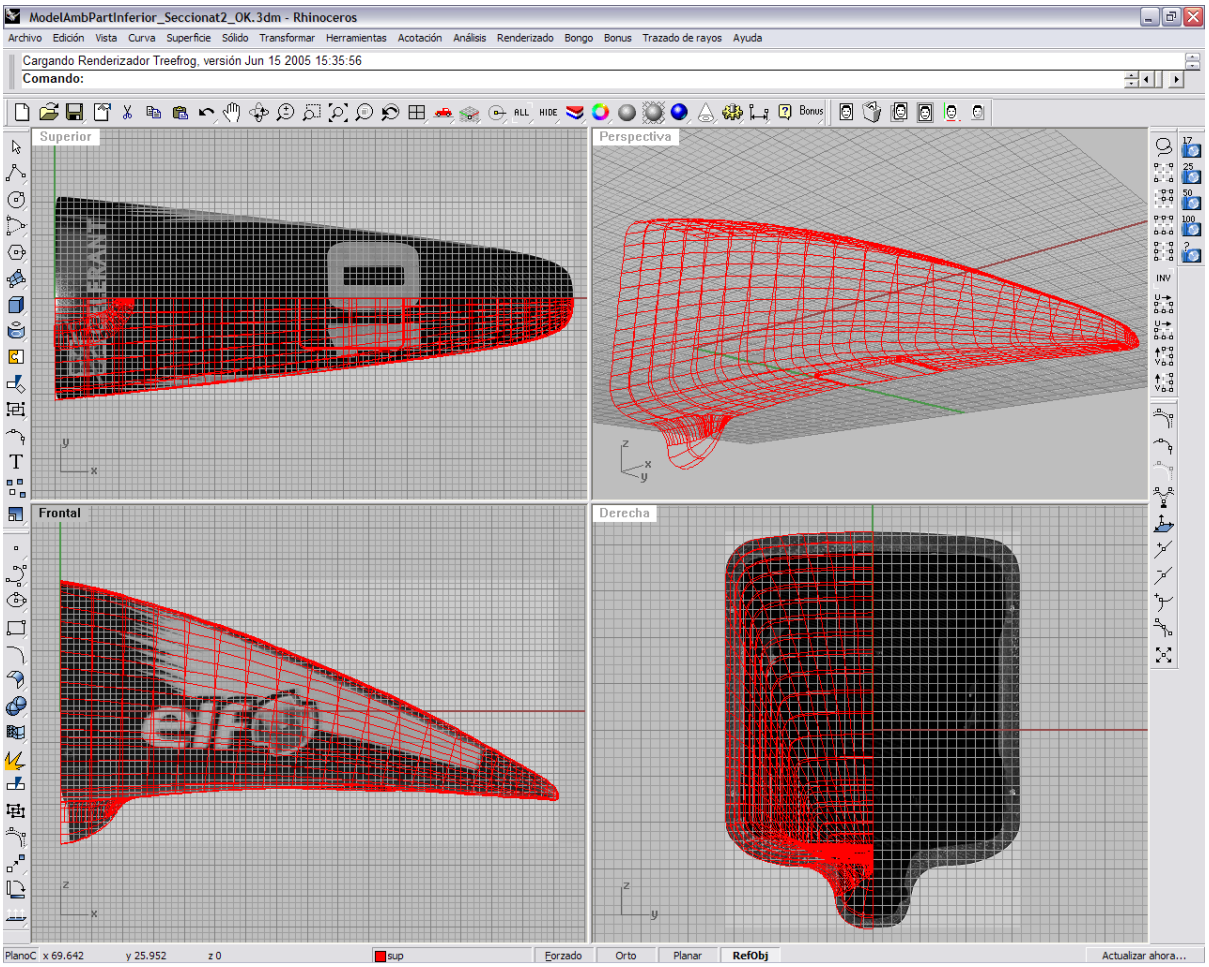


Figura 42. La meitat del frontal dibuixat amb Rhinoceros 3D

S'ha fet una sèrie de talls a la peça de manera que quedi formada per un conjunt de superfícies. Això facilita el mallat del model en el MSC.Patran. Així es pot mallar cada superfície per separat i tenir major control del resultat final.

Per això s'ha decidit dividir la part principal del frontal en 14 superfícies, i la puntera en 6 superfícies. Per fer aquests talls, no s'han utilitzat plans verticals, sinó plans que es van inclinat en el sentit de la curvatura del morro. Per això s'ha dibuixat un pla i llavors s'ha fet una matriu polar de manera que quedin els plans de tall ben col·locats. Aquests plans de tall es poden veure a la Figura 43.

A més dels plans de la Figura 43 també s'ha fet servir un pla de tall en el sentit longitudinal de la peça. Això serveix per separar les zones de la part inferior del frontal on la geometria és més complicada i portarà més feina de mallat. En la Figura 44 es poden apreciar tots els talls que s'han fet al frontal.

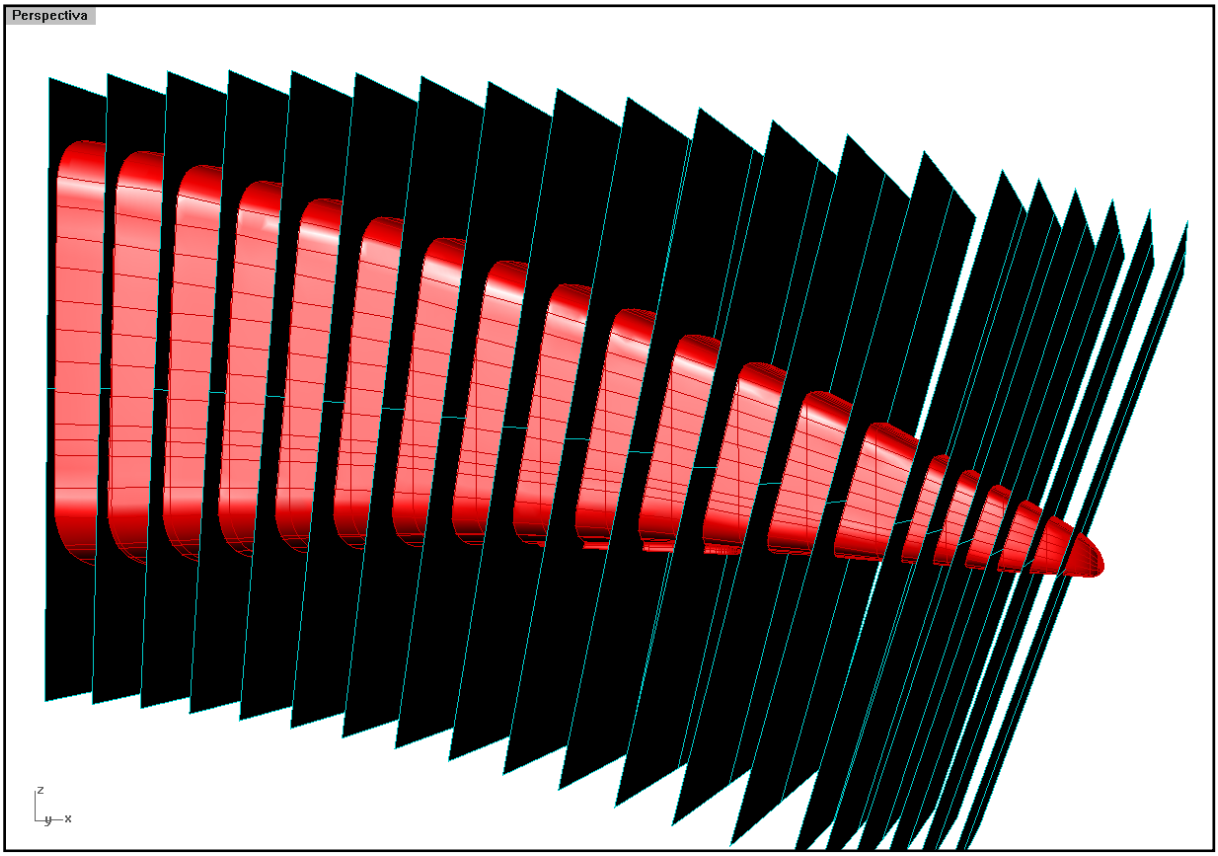


Figura 43. Alguns dels plans de tall que s'han utilitzat per seccionar la peça.

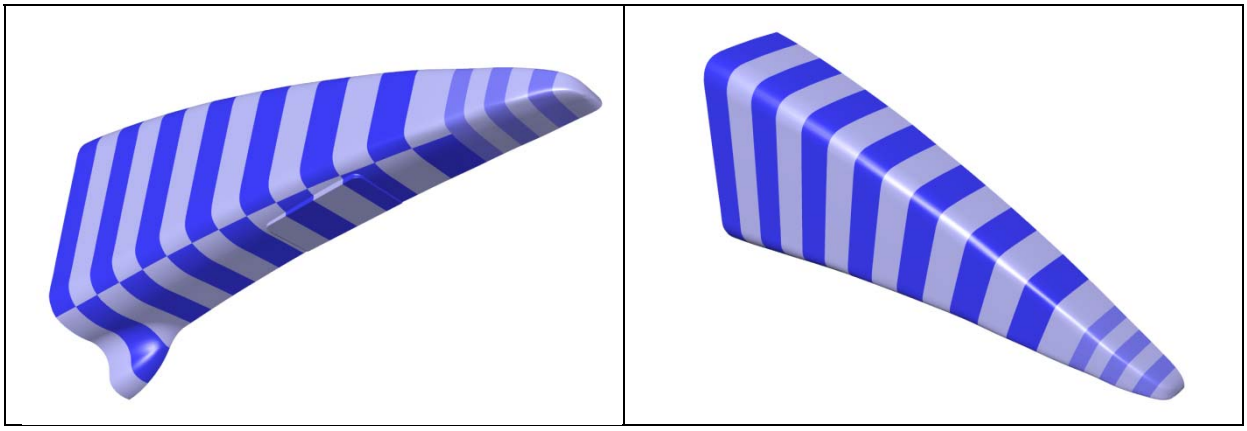


Figura 44. Com ha quedat la superfície un cop fets els talls. Els colors indiquen superfícies independents. Això facilitarà molt el mallat.

Un cop acabat el model, des del Rhino s'ha exportat en format IGES (.igs) per poder-lo obrir posteriorment amb el MSC.Patran.

ANNEX C: MALLAT DEL FRONTAL AMB MSC.PATRAN

Abans de començar, s'ha importat una llibreria de funcions de que disposa el MSC.Patran però que per defecte no està instal·lada. Aquesta llibreria ha servit per les zones més complicades on ha estat necessari dividir els elements de diferents maneres. Per poder-hi tenir accés s'ha copiat el següent arxiu:

C:\MSC.Software\MSC.Patran\2005_r2\shareware\msc\unsupported\utilities\p3epilog.pcl

A la carpeta:

C:\MSC.Software\MSC.Patran\2005_r2\

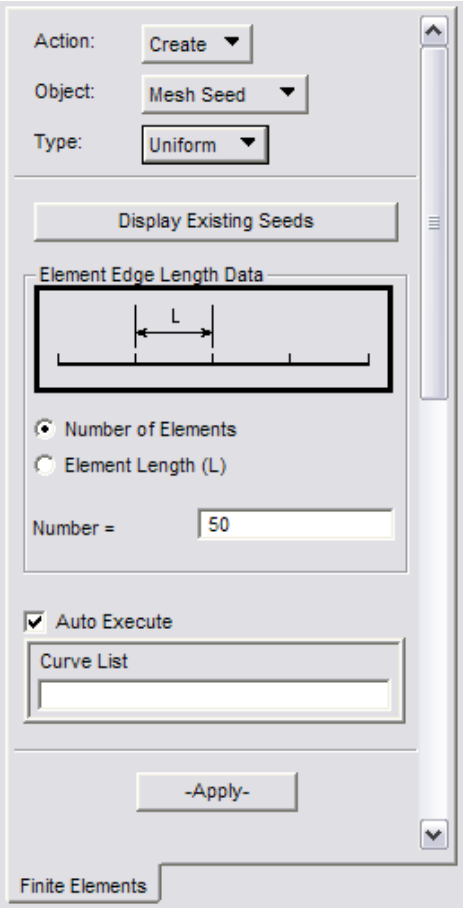


Figura 45. Funció Create Mesh Seed

Primer, en el MSC.Patran s'ha importat el fitxer en format IGES que es va guardar prèviament amb el Rhino. El següent pas ha estat definir els elements. En aquest punt ha estat de gran utilitat el fet d'haver dividit el frontal en diferents superfícies tal com s'ha mostrat anteriorment en la Figura 44.

En la pestanya "Elements" del MSC.Patran s'ha utilitzat la funció "Action: Create \ Object: Mesh seed \ Type: Uniform" per definir en quantes parts es vol dividir les arestes de cada superfície. Aquest menú es pot observar en la Figura 45 i els resultats en la Figura 46. En aquest cas s'han dividit les arestes llargues en 50 divisions, i les curtes en 4 divisions.

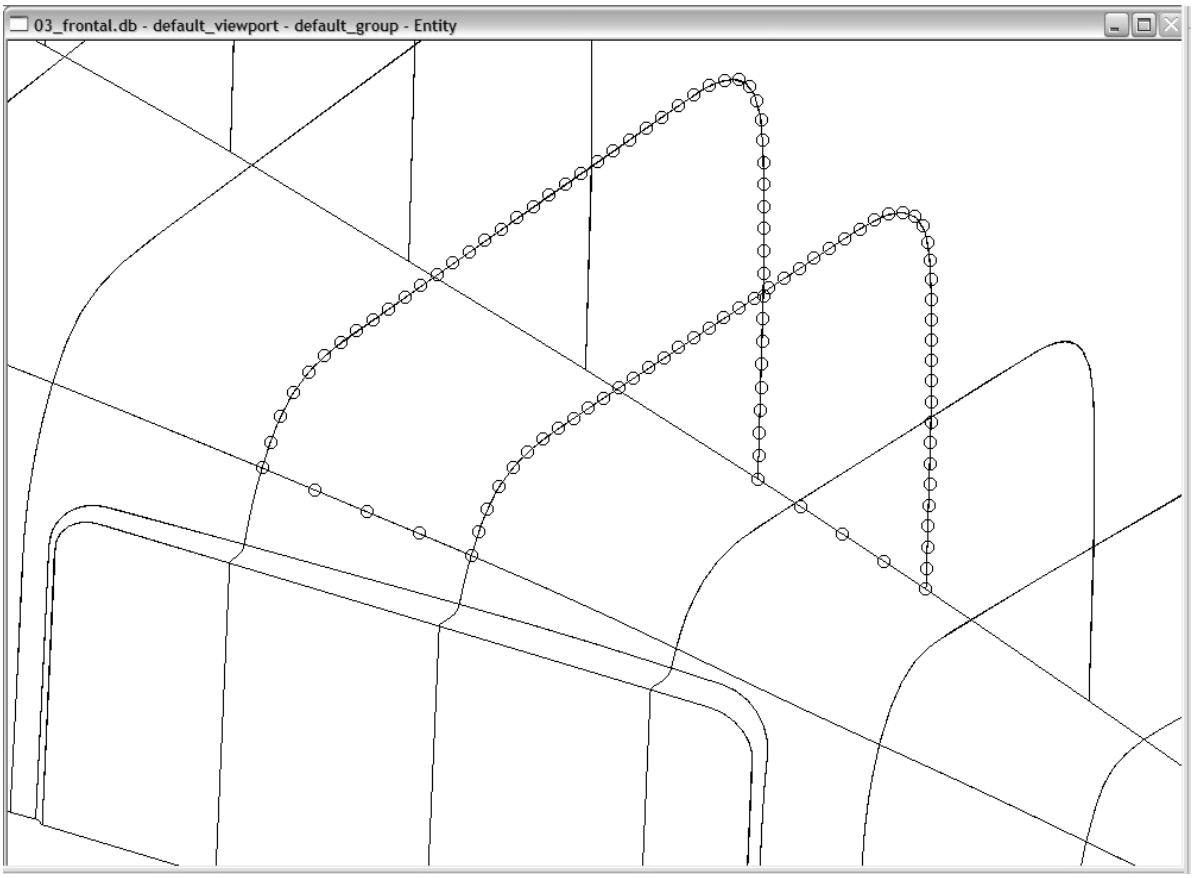


Figura 46. Amb la funció 'Mesh Seed' s'ha indicat en quants trams es vol dividir cada aresta per posteriorment crear els elements.

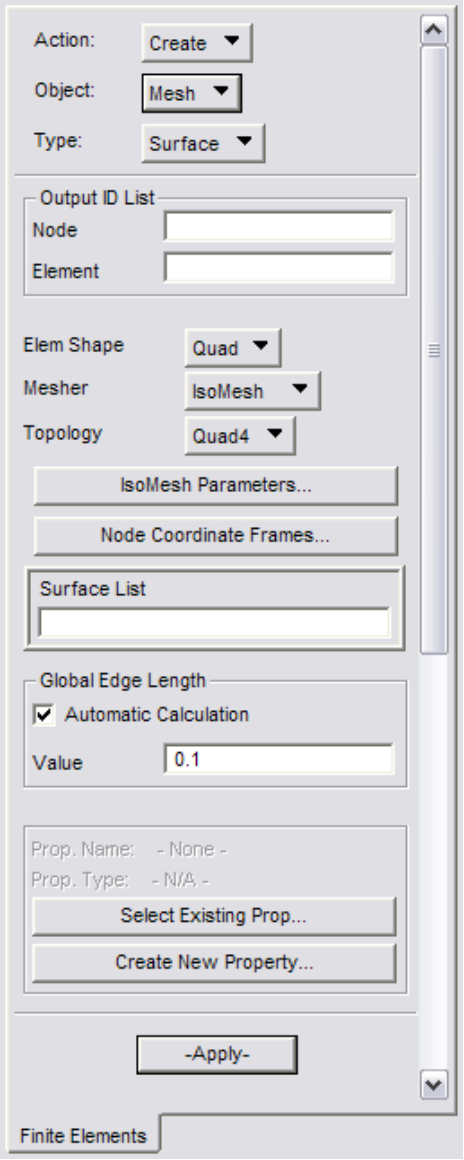


Figura 47. Funció Mesh

Amb la funció "Action: Create \ Object: Mesh \ Type: Surface \ Element Shape: Quad \ Mesher: IsoMesh\ Topology: Quad4" s'han creat els elements quadrilàters per a la superfície on prèviament s'ha aplicat el 'Mesh Seed'. Aquest menú es pot observar en la Figura 47 i els resultats d'aquesta operació en la Figura 48.

On la curvatura de la superfície és més accentuada aquesta funció ha donat certs problemes, ja que sovint ignora el nombre de divisions que se li dona al "Mesh seed" i el programa genera les que li sembla. Llavors s'han d'eliminar i tornar a crear, i si amb això no és suficient provar-ho amb un nombre de divisions més gran.

La superfície s'ha tallat de tal manera que, exceptuant les zones amb geometria complicada, les superfícies resultants són similars entre elles i es van repetint al llarg del frontal. D'aquesta manera, un cop mallada una d'aquestes superfícies, per mallar la del costat s'ha de seguir els mateixos passos. Amb tot i això s'han presentat problemes, ja que inexplicablement, tot i ser superfícies molt similars geomètricament, al programa li costa generar els elements conservant el nombre de divisions que se li dona.

Per posar un exemple d'aquest problema, la superfície que es malla en la Figura 46 i 48 es va repetint des de la puntera del frontal fins al anclatge amb la resta de la carrosseria. Llavors, el MSC.Patran pot ser que no malli correctament una d'aquestes superfícies i en canvi malli amb molta facilitat les altres superfícies veïnes.

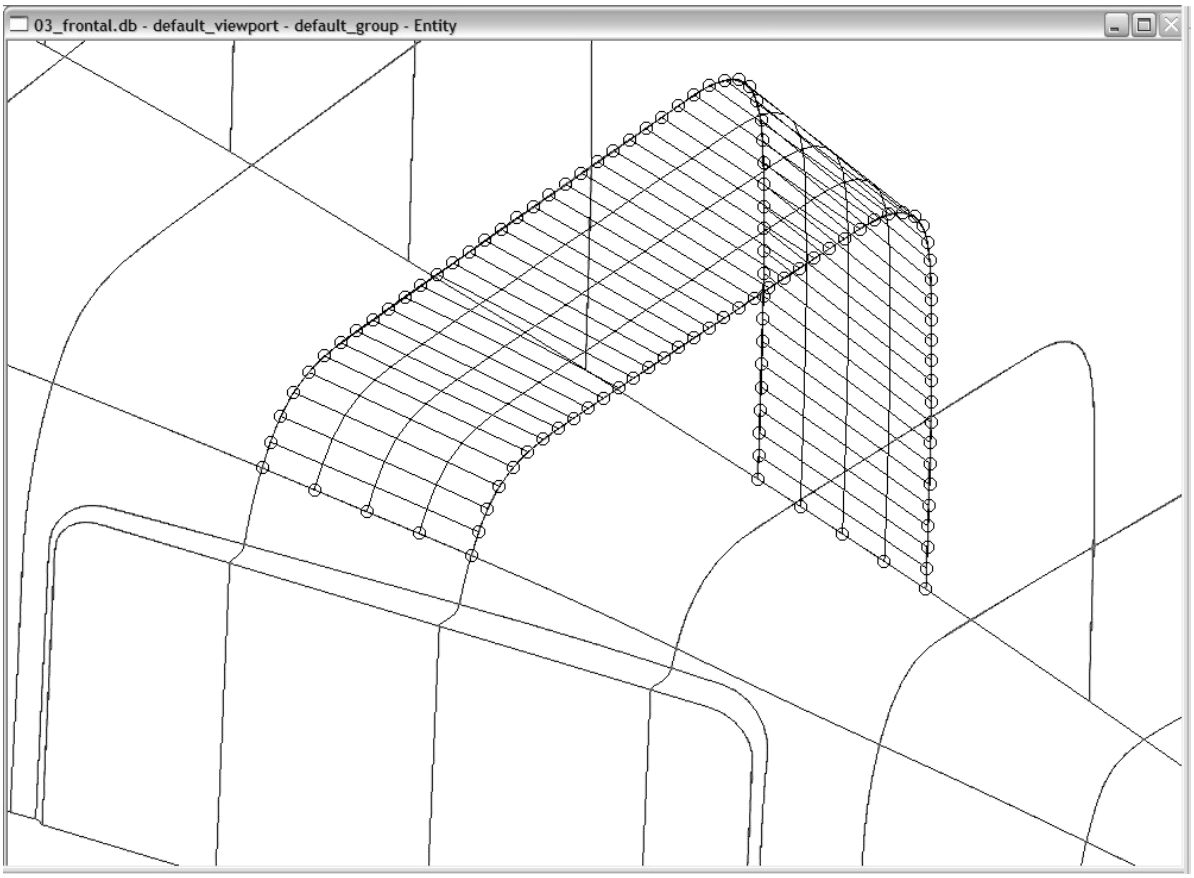


Figura 48. Amb la funció 'Mesh' s'han creat els elements per a la superfície.

D'aquesta manera, per crear el mallat s'han utilitzar les funcions:

- "Action: Create \ Object: Mesh seed \ Type: Uniform", per crear les divisions de les arestes.
- "Action: Delete \ Object: Mesh seed", per eliminar les divisions de les arestes.
- "Action: Create \ Object: Mesh \ Type: Surface \ Element Shape: Quad \ Mesher: IsoMesh\ Topology: Quad4", per crear el mallat de la superfície.
- "Action: Delete \ Object: Mesh \ Type: Surface", per eliminar tots els elements d'una superfície.
- "Action: Delete\ Object: Element", per eliminar elements individualment.

Si s'ha instal·lat correctament la llibreria de funcions tal com s'ha exposat al principi del capítol, es poden utilitzar des del menú "Utilities \ FEM-Elements \ Break Elements". El menú es pot observar a la Figura 50.

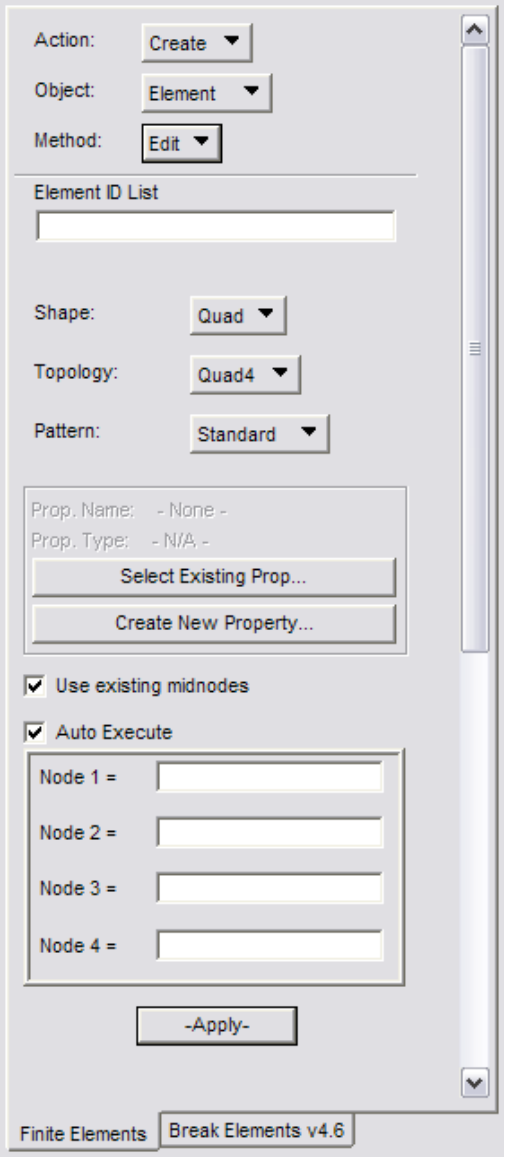


Figura 49. Menú Create Element

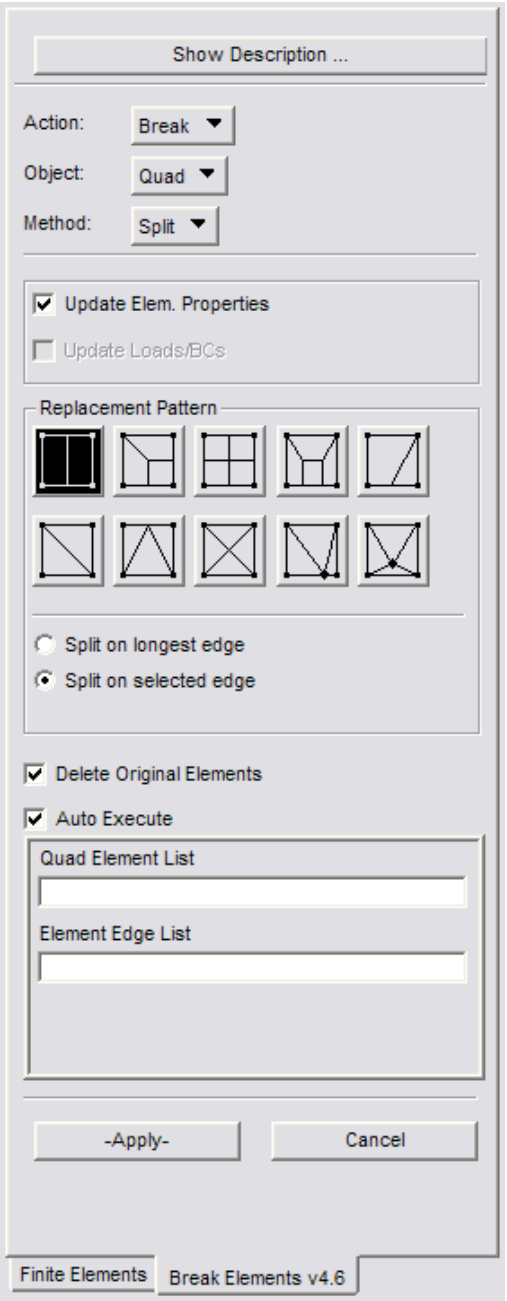


Figura 50. Menú Break Elements

Així, en aquest punt el frontal ja està mallat amb les funcions explicades. Però hi ha una sèrie de superfícies que no s'han pogut mallar o el mallat no és el correcte. Aquestes superfícies són les de la puntera del frontal, la platina de fixació amb l'aleró, i la protuberància inferior. En aquestes zones ha estat necessari crear elements individualment utilitzant la funció "Create Element" de la Figura 49 i posteriorment dividir-los si cal amb la funció "Break Elements" de la Figura 50.

Quant s'utilitza la funció Break Elements s'estan creant nodes nous, però aquests estan continguts en el pla de l'element que s'està dividint i no necessariament són coincidents amb la superfície. Per tant, per una major fidelitat de les curvatures s'ha utilitzat la funció "Action: Modify \ Object: Node \ Type: Project \ Project onto: Surface \ Direction: Normal". Se li ha donat els nodes que es volen projectar i la superfície on es volen projectar i el programa ha fet una projecció dels nodes de manera perpendicular sobre la superfície i els ha mogut a aquesta ubicació.

Un cop s'ha tingut tota la superfície del frontal mallada s'ha considerat necessari refinar la malla en aquelles zones de major curvatura i punts més crítics. Així de nou s'ha utilitzat la funció Break Elements per dividir-los i posteriorment s'han projectat els nodes sobre la superfície. Totes aquestes divisions s'han fet tenint cura que els elements resultants siguin quadrilàters, o dit d'altre manera que cadascun dels elements sigui de quatre nodes.

Així en la Figura 51 i 52 es pot apreciar com aquestes zones s'han fet més denses d'elements.

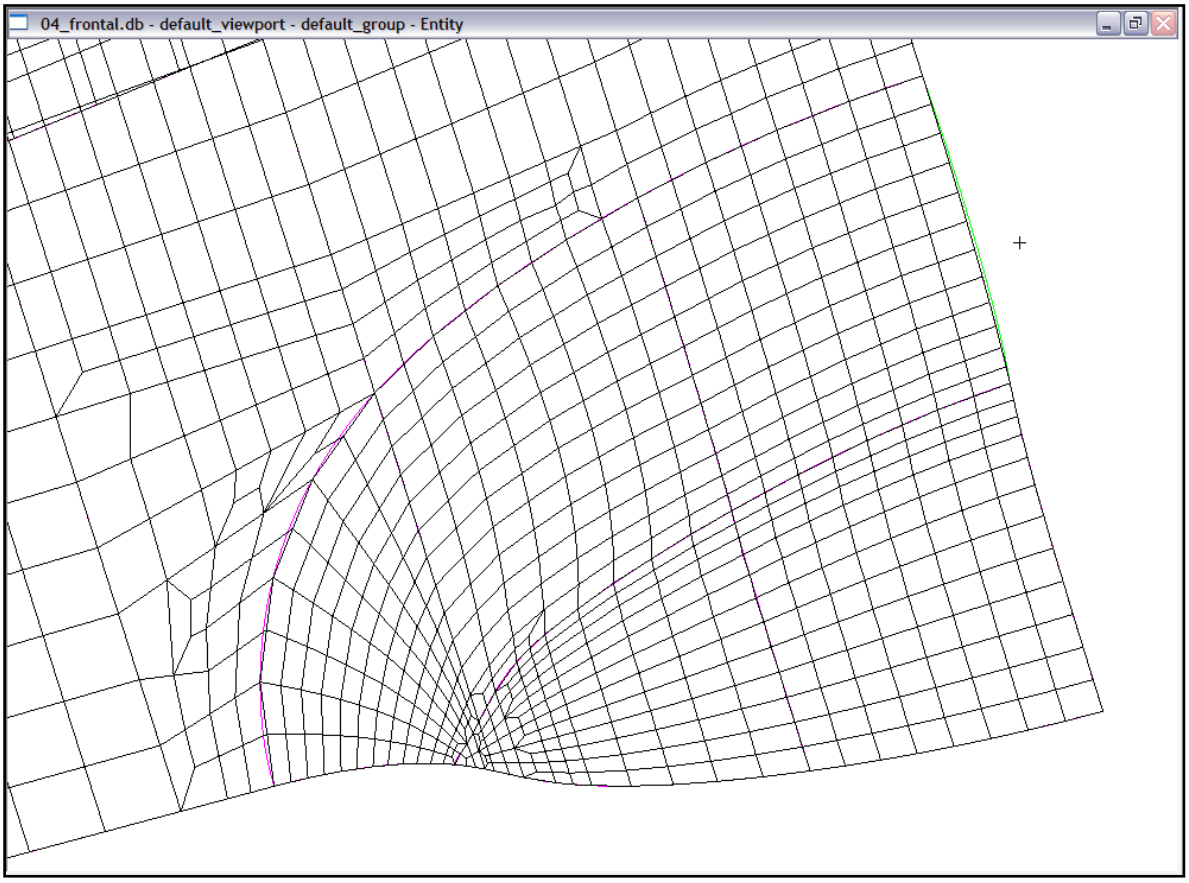


Figura 51. Mallat de la part inferior del frontal.

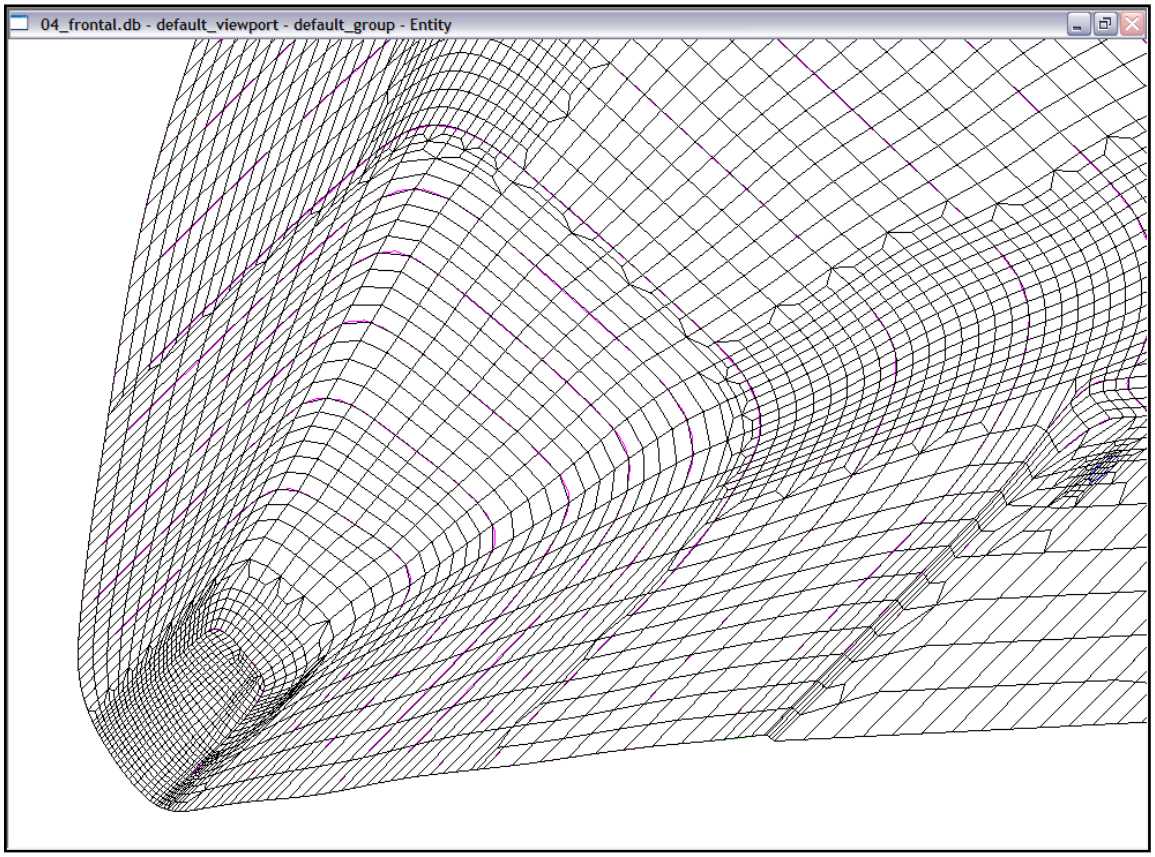


Figura 52. Mallat de la puntera del frontal.

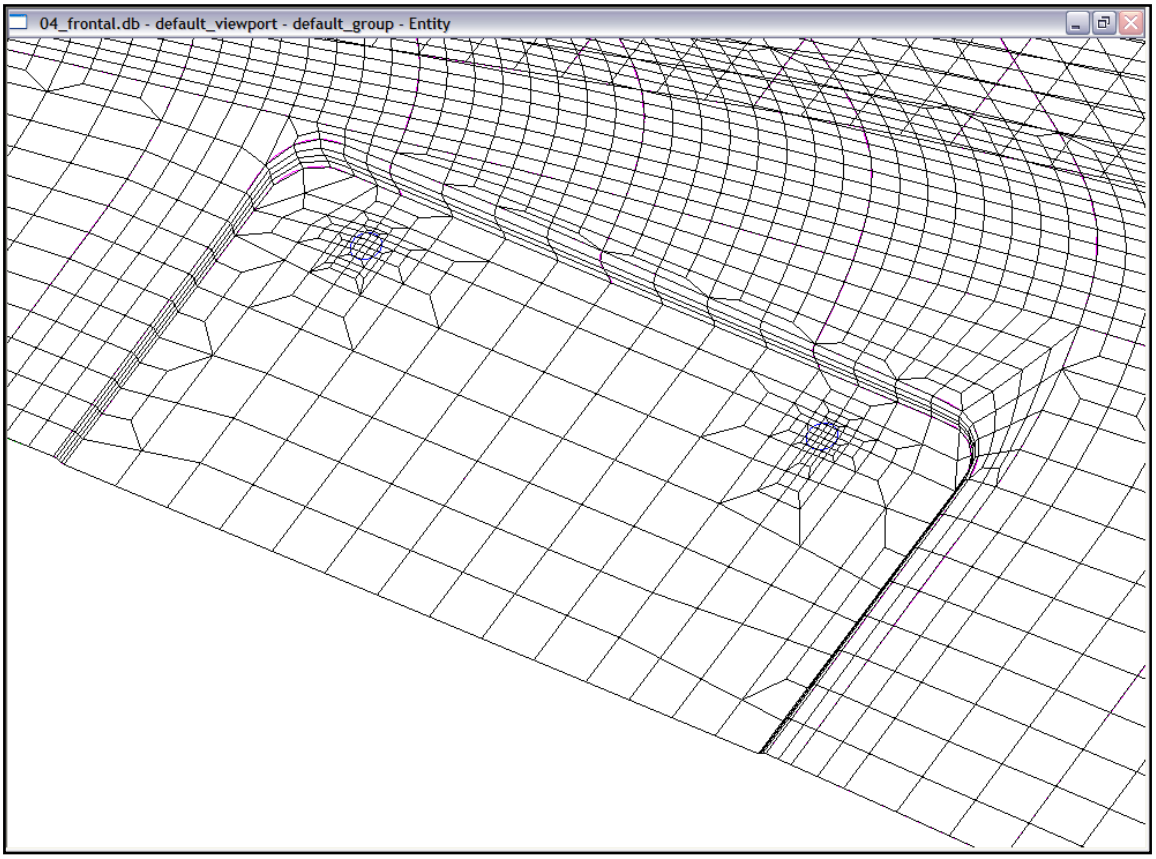


Figura 53. Mallat de la platina inferior on es subjecta l'aleró.

En la platina de fixació amb l'aleró de la Figura 53, a més s'ha augmentat el nombre de nodes i elements de l'àrea que ocupen els espàrrecs on va cargolat l'aleró. Això ha ajudat a distribuir la càrrega posteriorment en el MSC.Marc.

Un cop mallat tot el fontal han quedat 9272 elements i 9445 nodes.

La Figura 54 mostra una vista general de com ha quedat el mallat. Cal notar que s'ha aconseguit que tots els elements tinguin quatre vèrtexs.

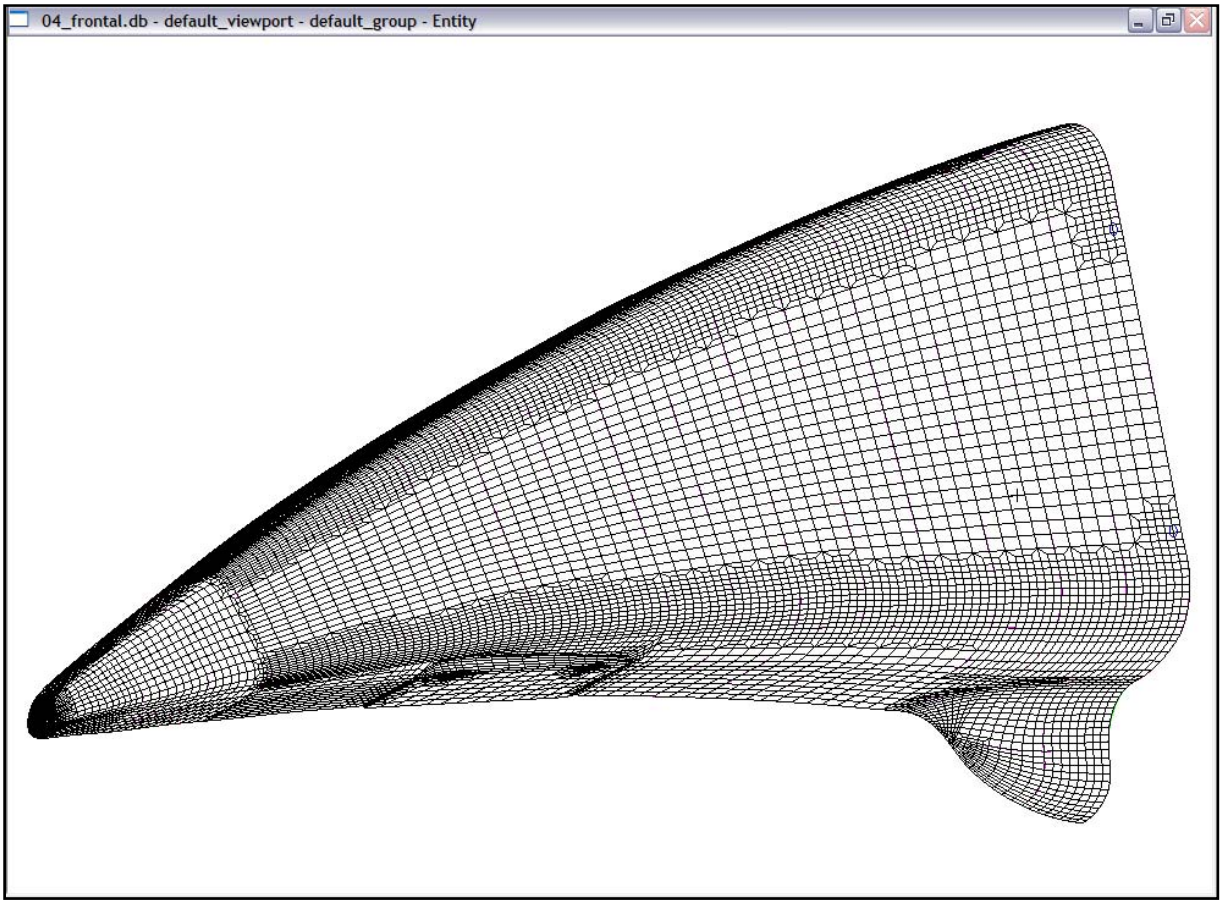


Figura 54. Vista general del mallat del frontal.

Abans de donar el mallat per acabat, s'ha anat al menú "Action: Verify \ Object: Element \ Test: Boundaries", i "Display Type" s'ha seleccionat "Free Edges". Aquesta comprovació serveix per veure les arestes lliures dels elements. Si el mallat és correcte només es veurà l'aresta del contorn de la peça. Si el mallat no està ben fet es poden observar arestes

d'elements que no estan correctament connectats amb els veïns. La comprovació per al frontal es pot observar en la Figura 55.

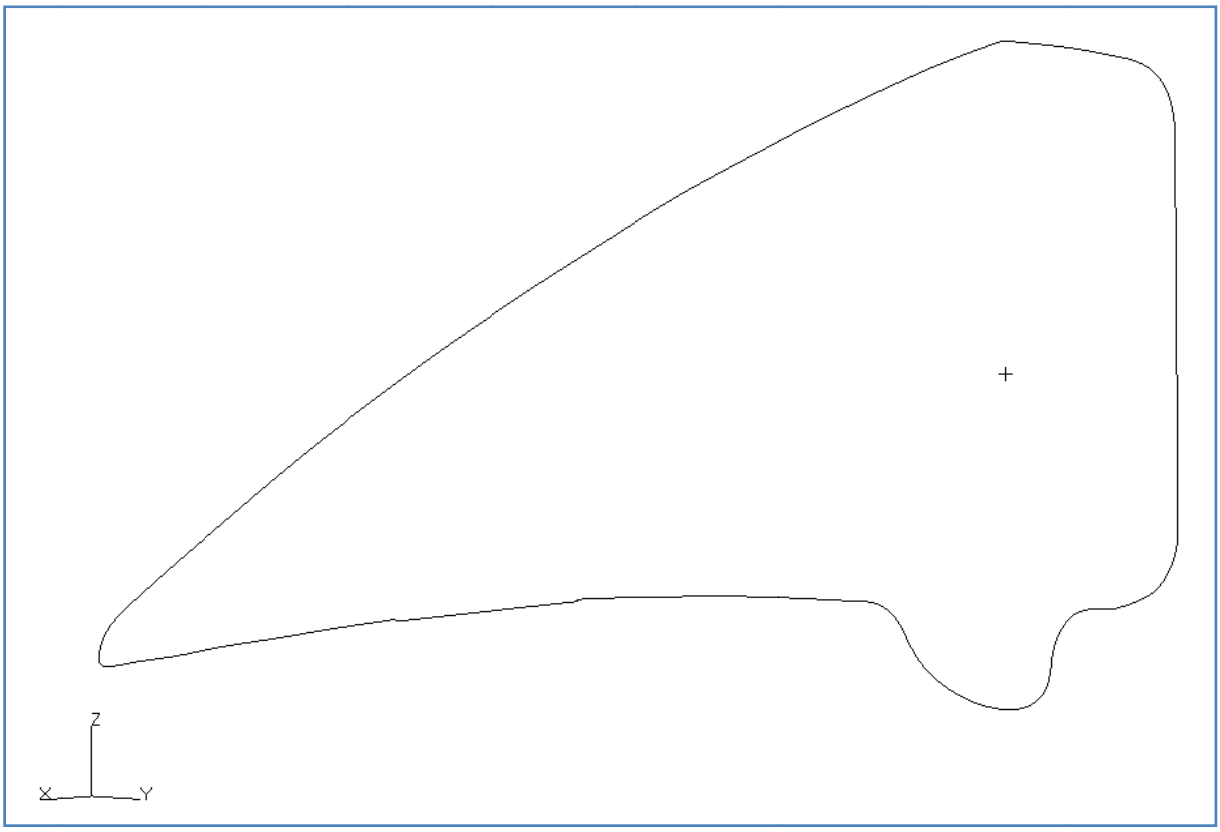


Figura 55. Comprovació de les arestes lliures.

Un cop acabat de definir el mallat amb MSC.Patran s'ha comprovat que en el menú "Preferences \ Analysis..." hi consta "Analysis Code: MSC.Marc". Llavors s'ha anar al menú "Action: Analyze \ Object: Entire Model \ Method: Full Run" per fer un Analysis del model amb el MSC.Patran. El programa ha creat un arxiu amb extensió ".dat" que posteriorment s'importarà en el MSC.Marc.

ANNEX D: LAMINAT DEL FRONTAL AMB EL MSC.LAMINATE MODELER

En aquest punt, la geometria i el mallat ja estan definits en l'arxiu "frontal.db" del MSC.Patran. El Laminate Modeler utilitza arxius amb extensió ".layup" que contenen la informació sobre els materials i les capes del laminat. Aquest últim arxiu va associat i funciona conjuntament amb l'arxiu de geometria del MSC.Patran.

Primer s'ha creat un material en el MSC.Patran amb les propietats físiques del teixit. En el menú "Materials" del MSC.Patran: "Action: Create \ Object: 3D Orthotropic \ Method: Manual Input". "Material Name" és el nom del material i en aquest cas se l'ha anomenat "FibraCarboni". A "Input Properties..." s'ha introduït les propietats d'un teixit de fibra de carboni. Aquestes dades són les següents:

- Mòdul de Young $E_{11} = E_{22} = 50000$ MPa
- Relació de Poisson $\nu_{12} = 0{,}25$
- Mòdul de rigidesa $G_{12} = 45000$ MPa

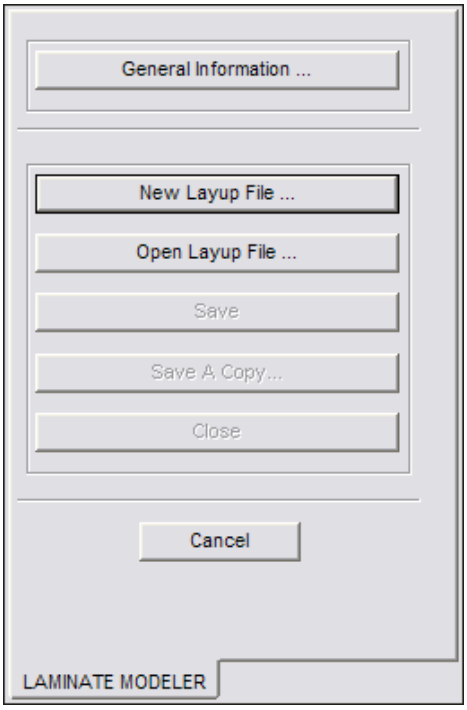


Figura 56. Menú principal del Laminate Modeler

Llavors s'ha obert el Laminate Modeler. S'ha fet des de "Tools \ Laminate Modeler \ LayupLaminate..." Ha aparegut el menú de la Figura 56. En la opció "New Layup File..." s'ha creat un arxiu que s'ha anomenat "frontal_LM_30.Layup"

El següent pas ha estat crear un material per al Laminate Modeler. "Action: Create \ Object: LM_Material \ Method: Add". Se li ha donat les següents propietats:

- Type: Drape (Scissor)
- Thickness = 0.15
- Maximum Strain (degrees) = 30
- Warp/Weft Angle (degrees) = 90

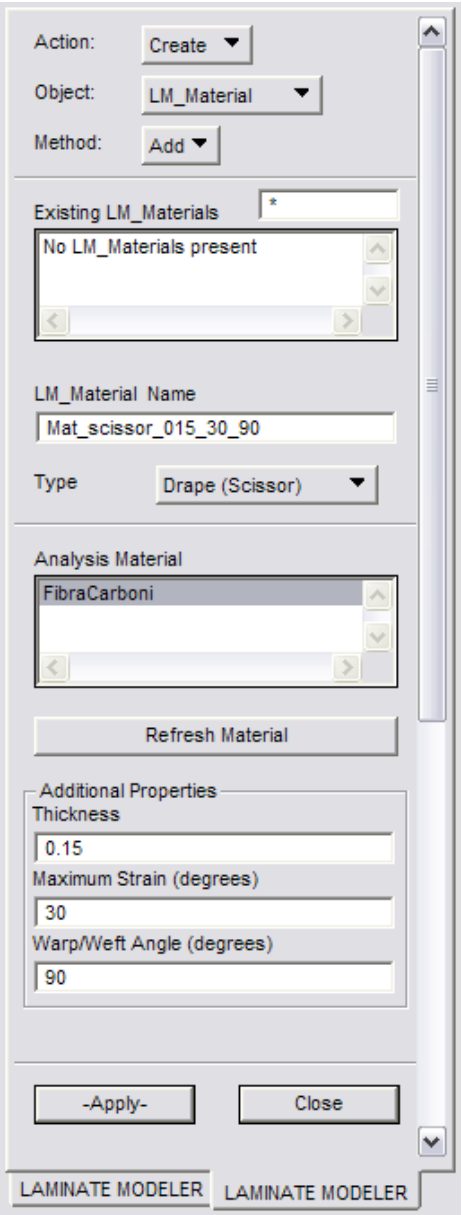


Figura 57. Create LM_Material

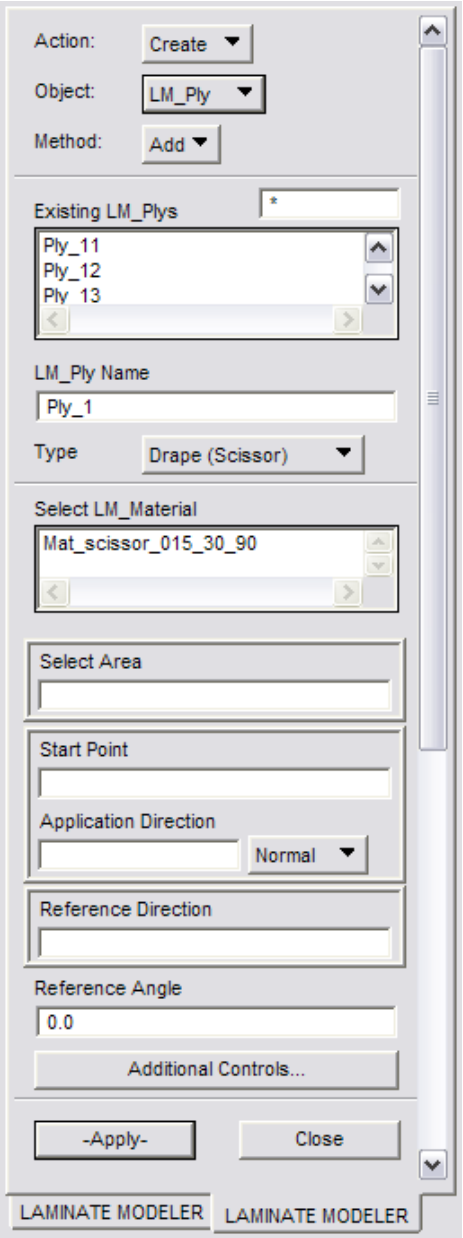


Figura 58. Create LM_Ply

En "LM_Material Name", se l'ha anomenat "Mat_scissor_015_30_90". Les opcions del menú es poden observar en la Figura 57.

El material creat s'ha utilitzat posteriorment per fer els patrons o "Plys". Per crear els patrons s'ha utilitzat el menú "Action: Create; Object: LM_Ply; Method: Add". Tal com s'observa a la Figura 58. Se li ha donat les següents propietats:

- Select LM_Material: el material creat anteriorment, "Mat_scissor_015_30_90".
- Select area: s'ha seleccionat els elements que formen el patró actual. S'ha seguit els criteris de la Figura 24 del "Capítol 6: Laminat del Model".
- Start Point: s'ha seleccionat el primer punt que entra en contacte amb el motllo. Normalment està cap al centre del patró. Com que s'ha treballat amb la meitat de la geometria, per la major part dels patrons s'ha situat en el pla de simetria.
- Aplication Direction: direcció normal al motllo. Tenint en compte que es tracte d'un motlle femella, s'ha aplicat per la part interior. El software el dibuixa de color vermell.
- Reference Direction: s'ha definit un vector que surt del Start Point i va en direcció axial al frontal i cap endavant. El software el dibuixa de color verd.
- Reference Angle: s'ha donat valor zero. Per als patrons que hagin d'anar desfasats un cert angle ja es definirà quan es faci el "Layup".

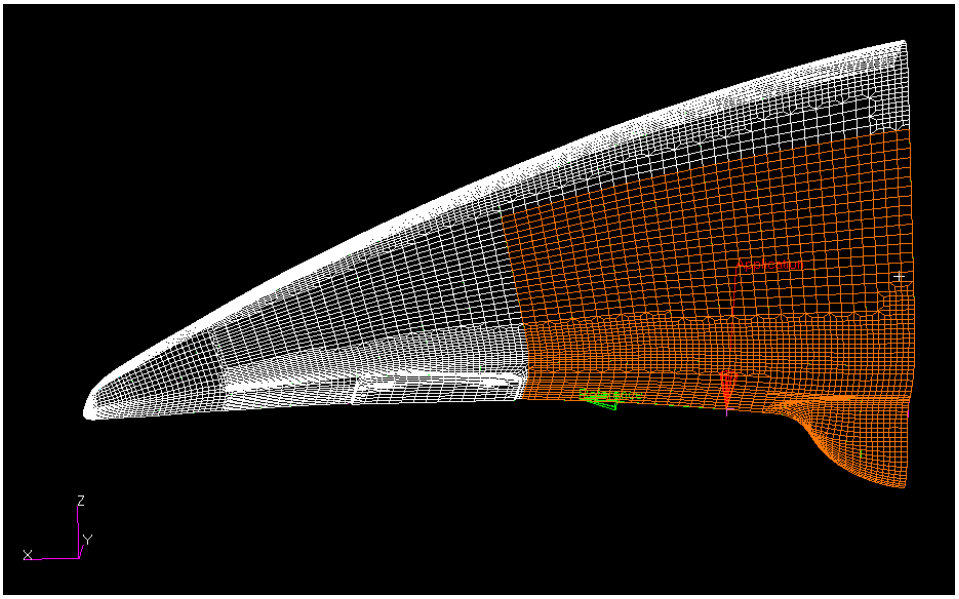


Figura 59. Selecció de l'àrea i els vectors per crear el LM_Ply.

Mentre es crea el LM_Ply, l'àrea seleccionada i els vectors creats es poden visualitzar sobre la geometria, tal com s'observa en la Figura 59.

Abans de crear el "Ply" s'ha obert el menú "Additional Controls..." que es mostra en la Figura 60. S'ha fixa la direcció de l'ordit (warp) amb les arestes dels elements seleccionats. Els elements que s'ha seleccionat es poden observar en la Figura 61. D'aquesta manera, el patró del teixit ha quedat completament recte en el seu pla de simetria. Gràcies a aquesta restricció, els patrons que s'obtinguin posteriorment amb AutoCAD només caldrà afegir-los la seva meitat simètrica.

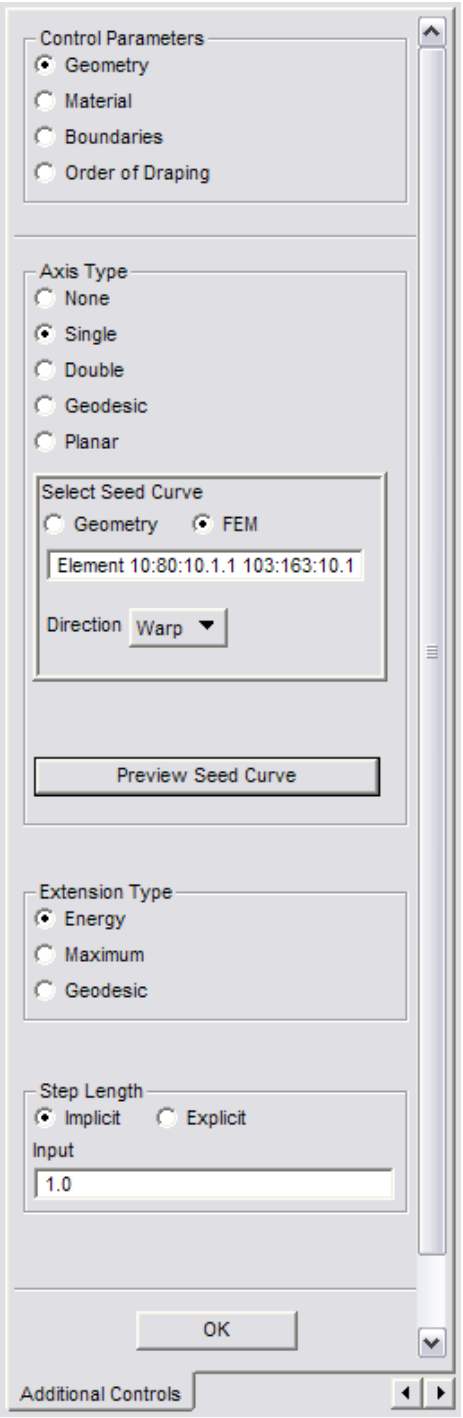


Figura 60. Additional Controls

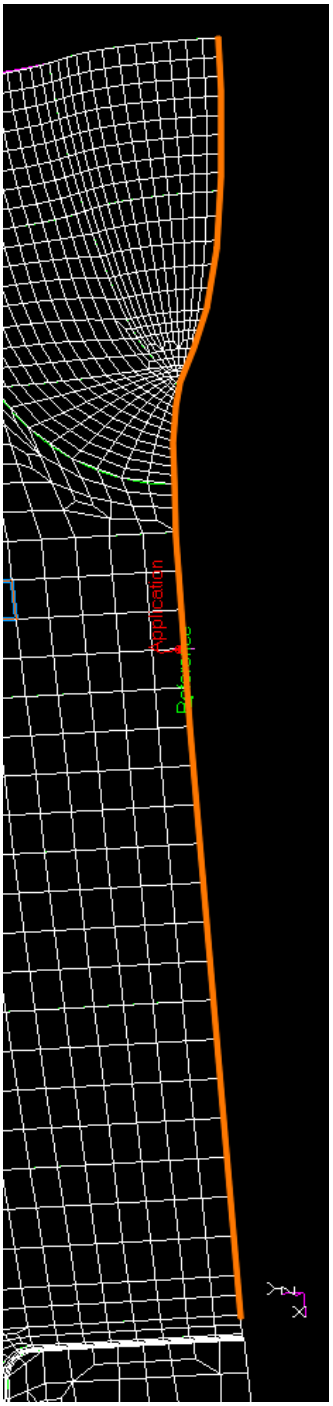


Figura 61. Selecció de les arestes coincidents amb el pla de simetria

Un cop s'aplica el LM_Ply a la geometria es mostra per pantalla el resultat gràfic, la deformació del teixit i el gruix màxim que té el teixit degut a la deformació. En la Figura 62 el teixit té una zona de color groc. Això és degut a que el teixit en aquesta zona està proper a

la deformació màxima. En aquest cas és de 24º i el màxim que se li ha donat és 30º. En cas de superar aquest màxim el teixit és de color vermell.

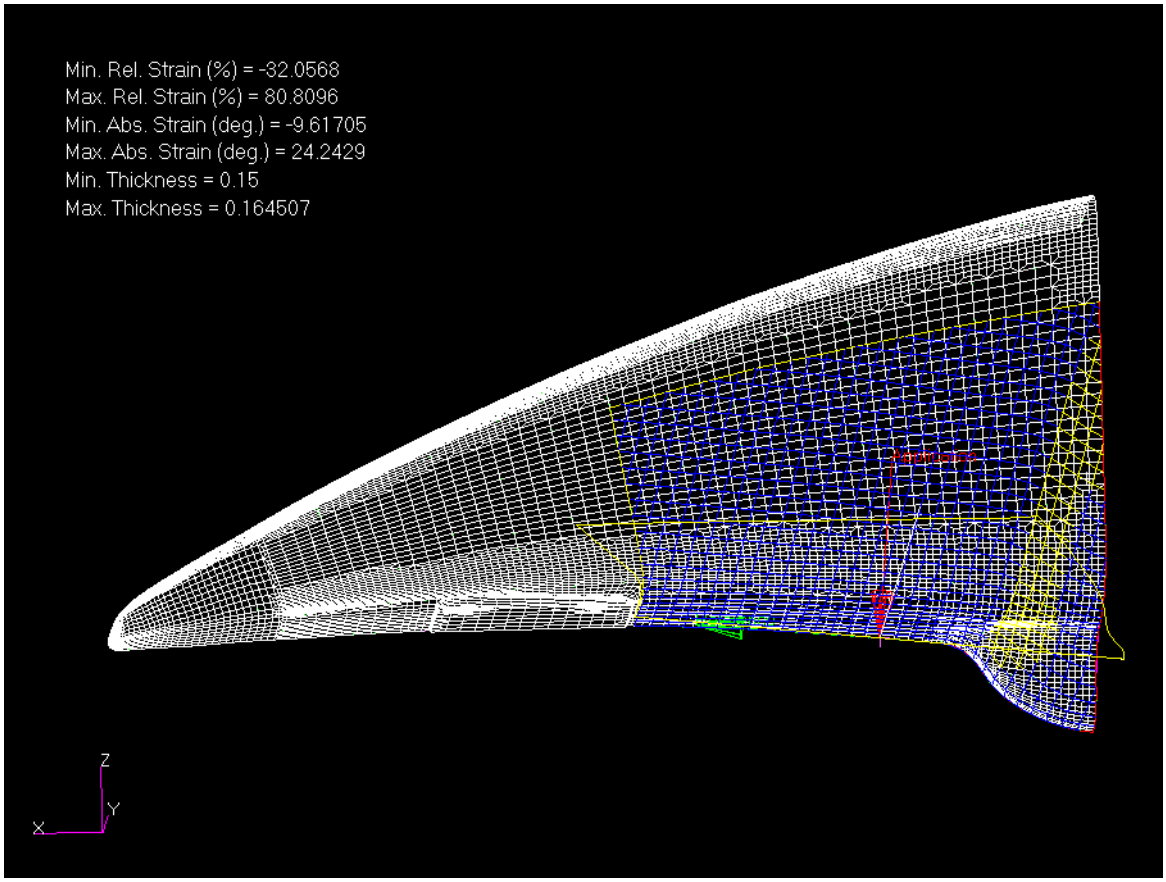


Figura 62. Resultat un cop aplicat el LM_Ply

Tots aquests passos es repeteixen per els 32 patrons de la Figura 24 del "Capítol 6: Laminat del Model".

Un cop fets tots els patrons, s'ha definit l'ordre i l'angle en el que van col·locats en el LM_Layup. El menú "Action: Create \ Object: LM_Layup \ Method: Add" es pot observar en la Figura 63.

Llavors s'ha obert el menú "Select Element Type..." de la Figura 64 per tal d'assignar "2D_Elements (75,22) – q4/t3,q8/t6" ja que aquests són els que utilitza el MSC.Marc.

Per definir el laminat s'ha obert el menú "Layup Definition...". En el quadre de la Figura 65 s'han anat entrant les capes per ordre d'aplicació. El laminat que s'ha creat és un [0 90 / 45 -45 / 45 -45 / 0 90]. Un cop entrats tots els LM_Ply ha quedat com es mostra en la Taula 5. Es pot observar com el "Angle Offset" del segon i tercer grup de LM_Ply té per valor 45.

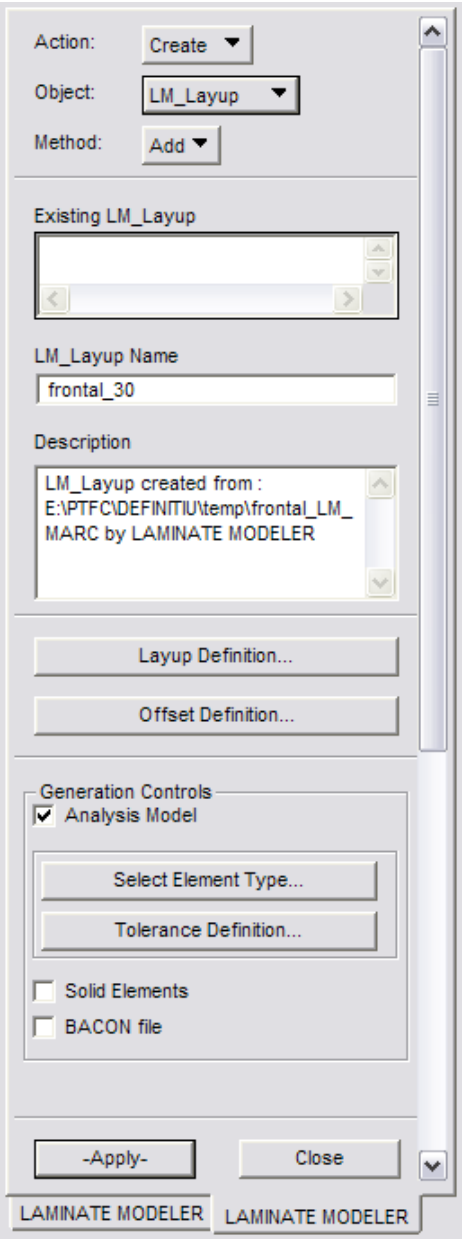


Figura 63. Create LM_Layup

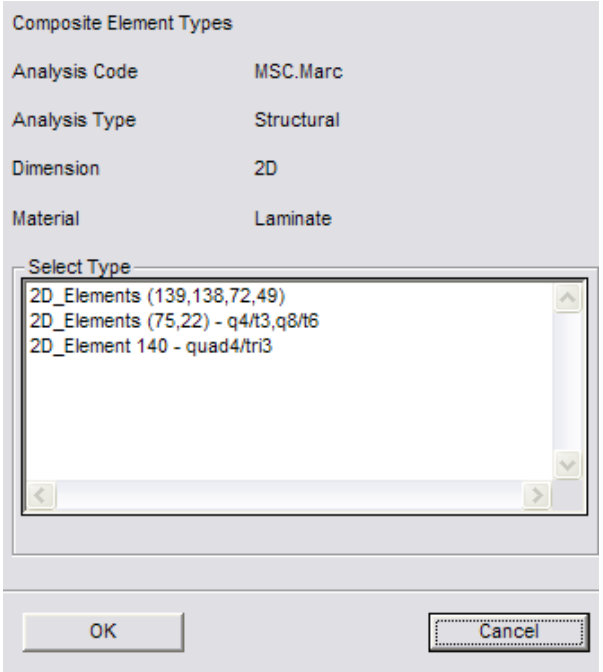


Figura 64. Element Type

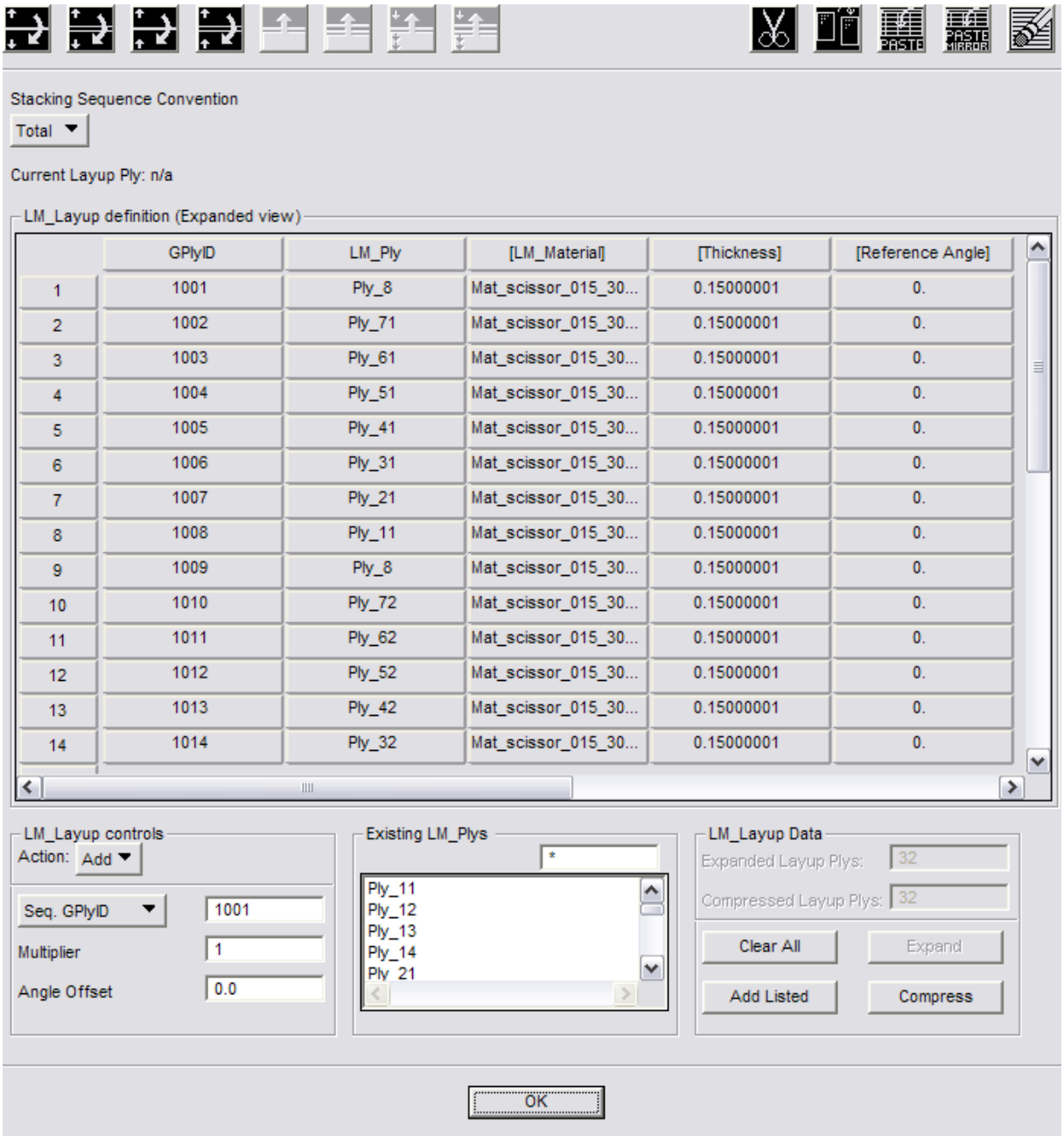


Figura 65. LM_Layup Definiton

Index	LM_Ply	LM_Material	Thickness	Ref. Angle	Type	Multiplier	Application Direction	Angle Offset
1	Ply_8	Mat_scissor_015_30_90	0.15	0.	Scissor	1	Original	0.
2	Ply_71	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
3	Ply_61	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
4	Ply_51	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
5	Ply_41	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
6	Ply_31	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
7	Ply_21	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
8	Ply_11	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
9	Ply_8	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
10	Ply_72	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
11	Ply_62	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
12	Ply_52	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
13	Ply_42	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
14	Ply_32	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
15	Ply_22	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
16	Ply_12	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
17	Ply_8	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
18	Ply_73	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
19	Ply_63	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
20	Ply_53	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
21	Ply_43	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
22	Ply_33	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
23	Ply_23	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
24	Ply_13	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	45.
25	Ply_8	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
26	Ply_74	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
27	Ply_64	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
28	Ply_54	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
29	Ply_44	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
30	Ply_34	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
31	Ply_24	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.
32	Ply_14	Mat_scissor_015_30_90	0. 15	0.	Scissor	1	Original	0.

Taula 5. Definició de les característiques de cada Ply en el Layup

Definides totes les característiques del Layup, s'ha acceptat amb el boto "Apply" i el programa ha generat totes les propietats necessàries per els elements finits.

Finalment, s'ha creat el llibre de patrons. "Action: Create; Object: Ply Book; Method: LM_Layup". Figura 66. S'ha seleccionat tots els "LM_Plys". En el menú "Export Options..." que es pot observar en la Figura 67 s'ha marcat la casella DXF de "Flat Pattern". Amb això s'han generat els arxius dels patrons desplegats en el pla en format DXF que es poden obrir

directament amb AutoCAD. La opció "Draped Pattern" genera els patrons en 3D sense desplegar.

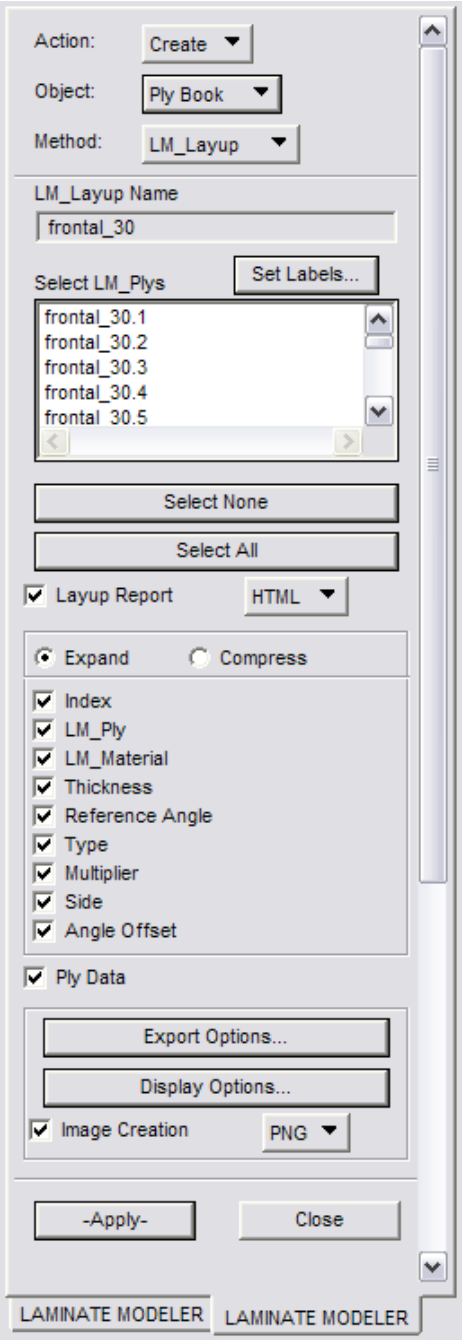


Figura 66. Create Ply Book

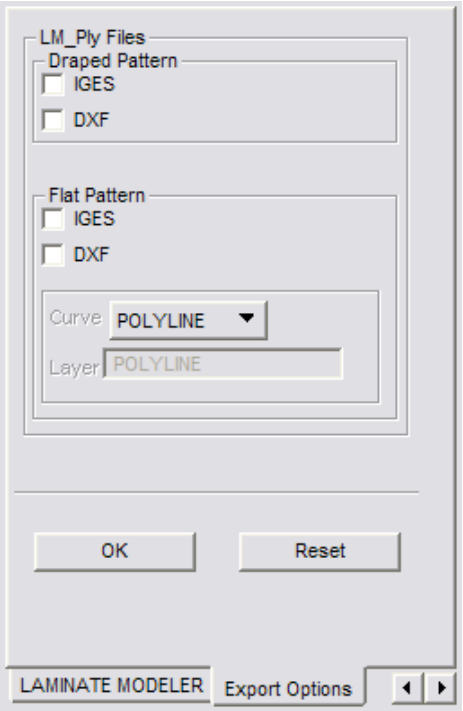


Figura 67. Export Options

Els plànols dels patrons es poden consultar en el "Document numero 2: Plànols dels Patrons".

Finalment, s'ha creat un fitxer per llavors poder-lo importar en el MSC.Marc. Per fer això, en el MSC.Patran "Action: Analyze; Object: Entire Model; Method: Full Run". En "Job paràmetres..." se li ha fixat:

- MSC.Marc Version: 2005
- Output File Format: 2005
- Results File Type: Both
- Desseleccionar "Constant Dilatation".

Dels arxius que crea el programa s'ha utilitzat el ".dat". En el MSC.Marc s'ha importat el fitxer des de "Files \ Import \ Marc Input". S'han eliminat totes les "Initial Conditions" i "Jobs" que ha creat per defecte el MSC.Patran.

Tots aquests passos han servit per crear una peça amb una sola capa de laminat. També s'ha fet un altre model consistent amb una estructura sandwitch. Aquest està format per dues capes de laminat i una capa intermèdia d'un material com pot ser un foam o un panell d'abella. La funció de la capa intermèdia és mantenir la separació dels dos laminats, de manera que la resta de característiques mecàniques no són massa importants. Per al cas del frontal, s'ha considerat que aquesta capa és de "foam" o espuma. La diferencia amb el procediment anterior és que en el MSC.Patran també s'ha creat el material "foam" amb les característiques:

- Mòdul de Young E = 50 MPa
- Relació de Poisson ν = 0,3

Llavors en el Laminate Modeler s'ha fet una capa de material foam amb 15mm de gruix que va col·locada entremig de dues capes de laminat idèntiques a les que s'ha descrit.

ANNEX E: CALCUL AERODINAMIC DE L'ALERÓ AMB EL CFDESIGN

Primer ha estat necessari importar la geometria del aleró i el túnel de vent del Rhino3D al CFdesign. Els formats que el Rhino3D i el CFdesign tenen en comú són el parasolid (.x_t) i el ACIS (.sat), però desprès de d'haver exportat la geometria tant amb parasolid com amb ACIS i provat totes les opcions per cadascun d'aquests dos formats, el CFdesign només ha importat la geometria correctament quant s'ha fet amb ACIS i triant l'opció d'AutoCAD2000. Per tant importarem en el CFdesign el fitxer ACIS guardat prèviament amb el Rhinoceros.

Un cop en el CFdesign, s'ha definit les condicions de contorn i ha quedat tal com es mostra en la Figura 68. Aquí es pot apreciar la condició de velocitat marcada amb una franja blanca a la cara frontal del túnel (en la Figura 68 té la llegenda "VN" de velocitat normal). Al flux se li ha donat una velocitat d'entrada de 300Km/h. La cara posterior té una condició de pressió relativa de 0 Pa i el CFdesign ho ha marcat amb una franja groga. La cara marcada amb una franja blava és la cara de simetria i en el CFdesign se li ha donat la condició de "Slip/symmetry".

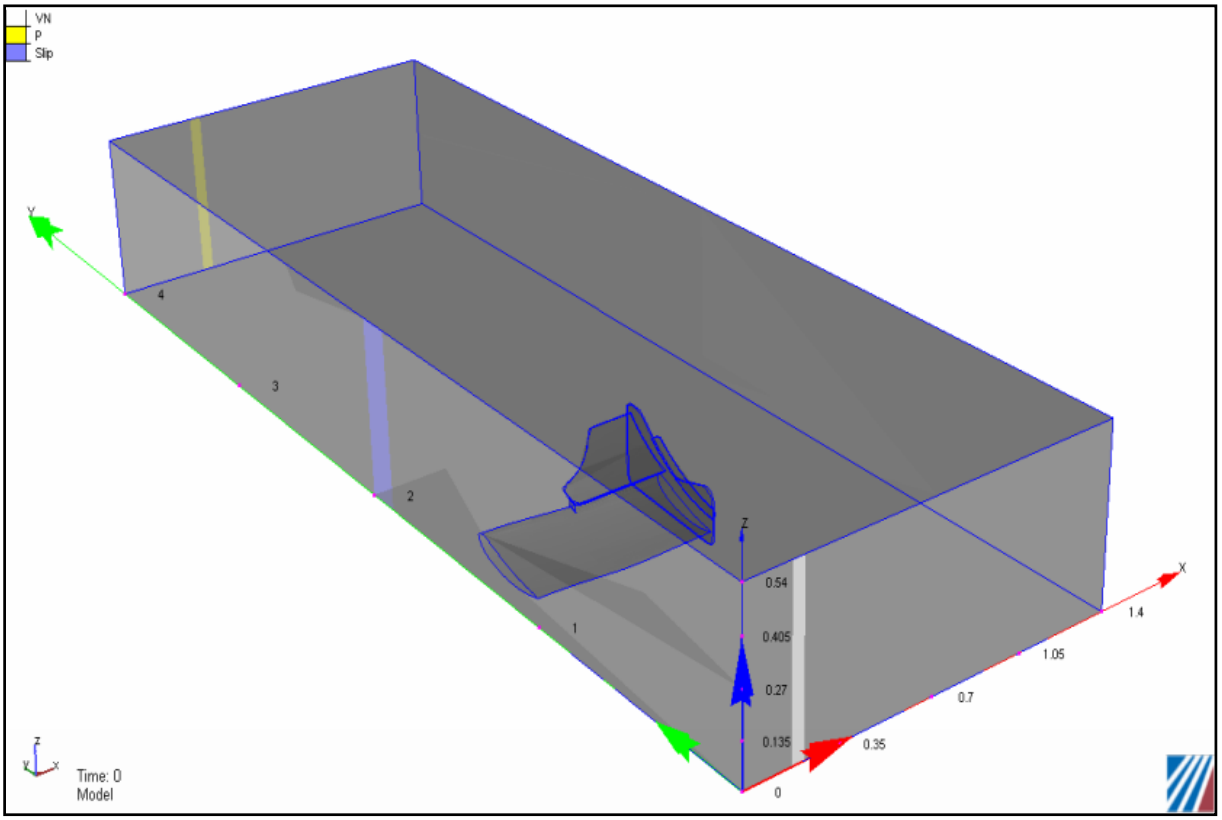


Figura 68. Túnel de vent en el CFdesign.

En aquesta simulació i per les seves característiques s'ha considerat flux extern al model, flux en estat turbulent i estable. Per això, en el CFdesign s'ha comprovat que en tipus d'anàlisis i opcions hi hagi fluid incompressible i turbulent.

El CFdesign pot donar la força resultant sobre les superfícies que interessi. Per això s'han seleccionat totes les superfícies que formen l'aleró i s'han obtingut els resultats de la següent forma: La magnitud de la component X de la força, que és normal al pla X i el punt d'aplicació està definit per una coordenada Y i una coordenada Z. La magnitud de la component Y, normal al pla Y i amb les coordenades d'aplicació X i Z. I finalment la magnitud de la component Z, normal al pla Z juntament amb les coordenades X i Y.

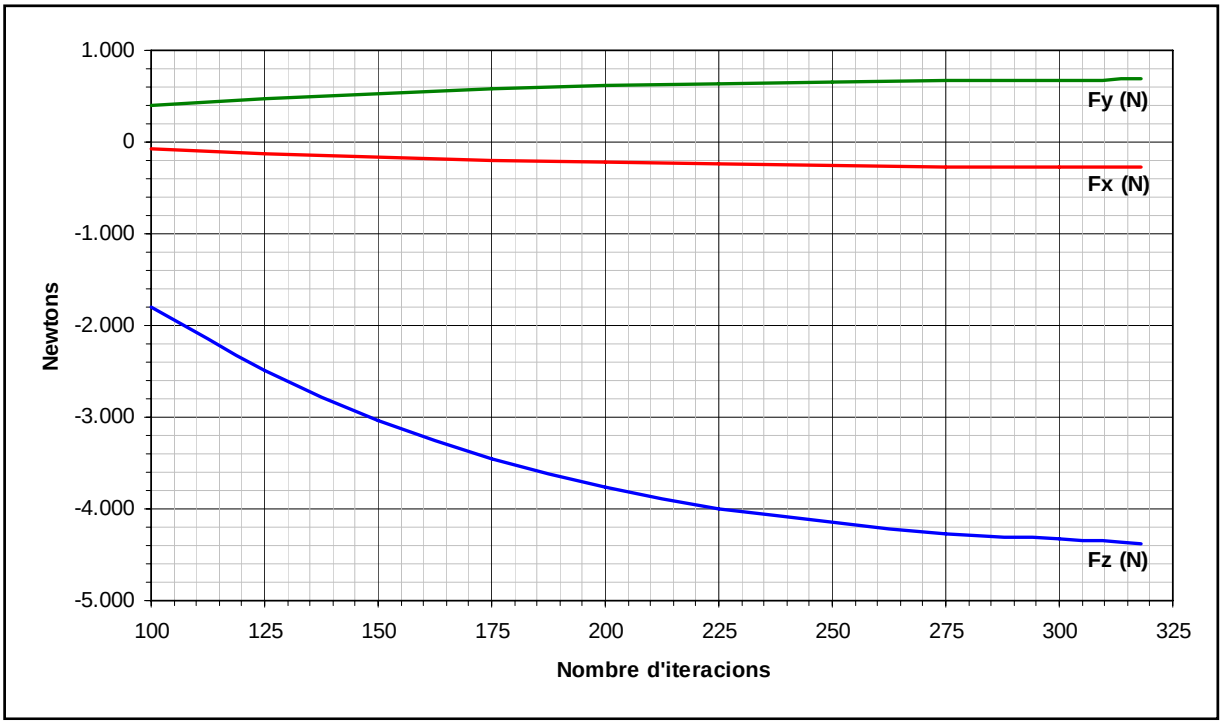
Primerament per provar el model s'ha fet un anàlisis amb unes mides de malla una mica grans i s'ha comprovat que gràcies a això l'anàlisi és molt ràpid però els resultats no convergeixen. Per solucionar això s'ha refinat la malla a unes mides més apropiades i així s'ha assegurat uns resultats molt més acurats.

S'ha definit la malla que utilitza el programa per fer els càlculs i se li ah donat un pas de 0.5 metres per les quatre cares del túnel que estan més allunyades de l'aleró, 0.2 metres per la cara de simetria i inferior del túnel, 0.02 metres per les superfícies de l'aleró més grans i 0.005 metres per les superfícies de l'aleró més petites i amb més curvatura.

Per tal de comprovar que els resultats ara si que s'estabilitzen i convergeixen s'han fet les primeres 100 iteracions d'una sola vegada i les següents de 25 en 25. A la iteració 318 el CFdesign s'ha aturat perquè ha considerat que els resultats ja eren prou bons. D'aquesta manera s'ha pogut guardar els resultats cada 25 iteracions i construir la Taula 6 i el Gràfic 1 on es pot observar l'evolució de les magnituds de les forces . La Taula 7 i el Gràfic 2 mostra l'evolució del punt d'aplicació d'aquestes forces.

ITERACIÓ	**100**	**125**	**150**	**175**	**200**	**225**	**250**	**275**	**300**	**318**
Fx (Newton)	-79	-136	-169	-198	-222	-240	-254	-266	-275	-281
Fy (Newton)	409	479	536	578	613	637	658	674	676	682
Fz (Newton)	-1.799	-2494	-3045	-3456	-3769	-3991	-4149	-4268	-4334	-4377

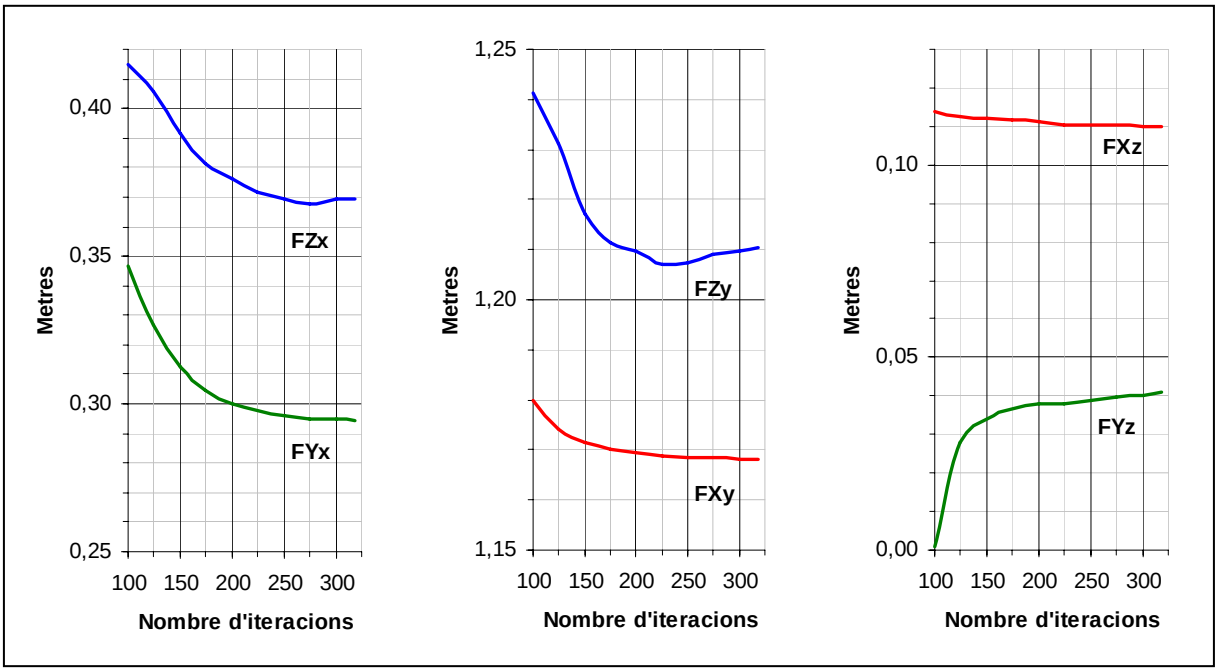
Taula 6. Magnitud de les tres components de les forces resultants en les diferents iteracions.



Gràfic 1. Evolució de les magnituds de les components de les forces resultants en l'anàlisi.

ITERACIÓ	100	125	150	175	200	225	250	275	300	318
FXy (m)	1,1797	1,1743	1,1715	1,1701	1,1694	1,1687	1,1686	1,1684	1,1680	1,1680
FXz (m)	0,1137	0,1127	0,1121	0,1116	0,1111	0,1106	0,1103	0,1102	0,1101	0,1101
FYx (m)	0,3468	0,3270	0,3125	0,3043	0,3000	0,2977	0,2959	0,2947	0,2948	0,2944
FYz (m)	0,0011	0,0279	0,0339	0,0367	0,0380	0,0379	0,0386	0,0396	0,0402	0,0411
FZx (m)	0,4151	0,4057	0,3913	0,3816	0,3760	0,3719	0,3691	0,3674	0,3696	0,3691
FZy (m)	1,2414	1,2311	1,2172	1,2115	1,2098	1,2070	1,2075	1,2090	1,2097	1,2105

Taula 7. Posició dels vectors de la Taula 1.



Gràfic 2. Evolució de les coordenades d'aplicació les forces resultants en l'anàlisi.

Amb aquest assaig s'han pogut comprendre les característiques del flux al voltant del model i obtenir les fores aerodinàmiques creades en les superfícies.

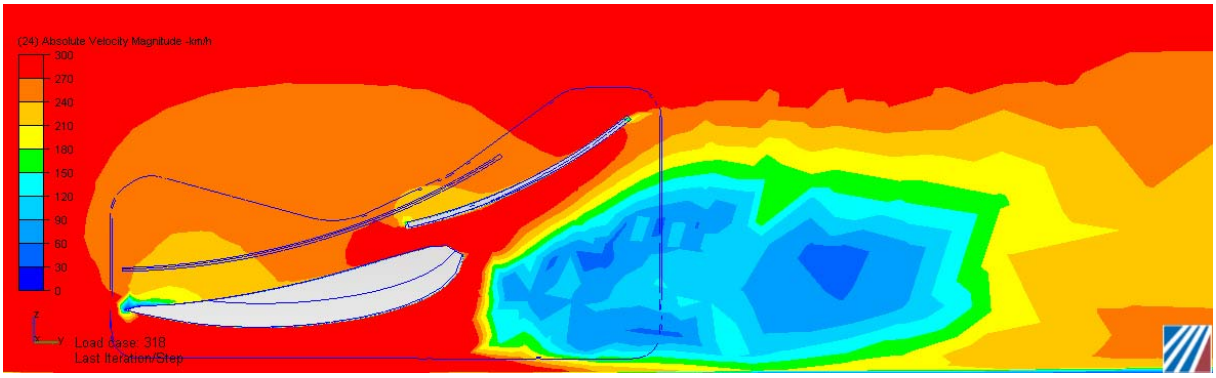


Figura 69. Velocitat del fluid en un pla normal al eix de les X.

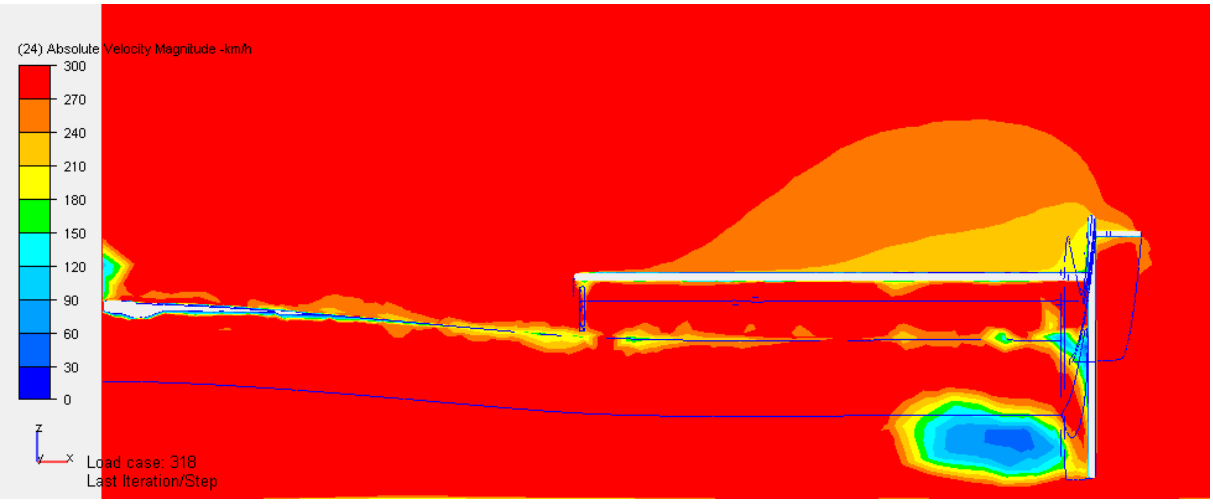


Figura 70. Velocitat del fluid en un pla normal al eix de les Y.

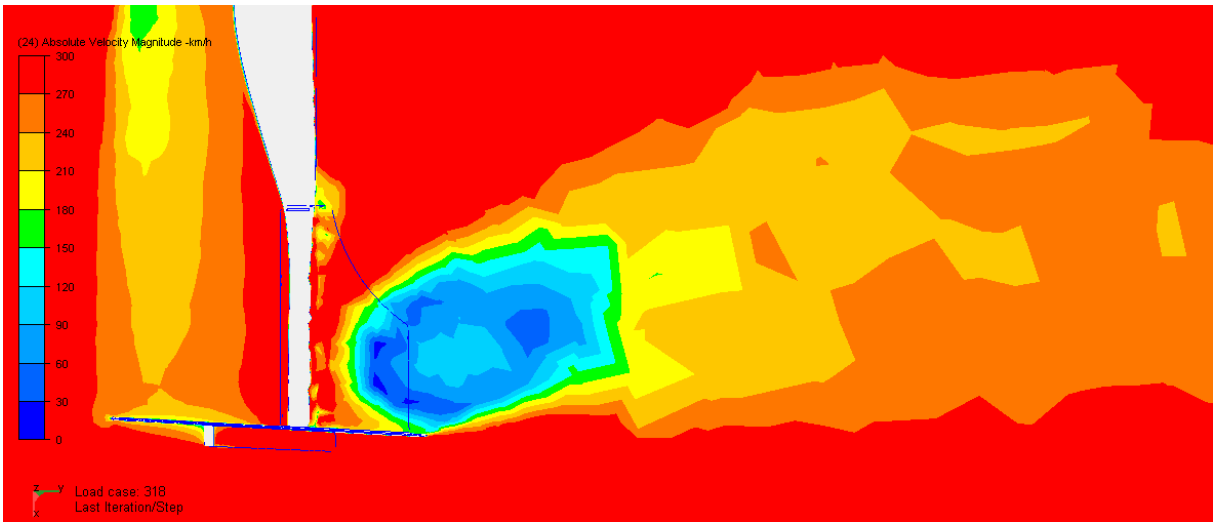


Figura 71. Velocitat del fluid en un pla normal al eix de les Z.

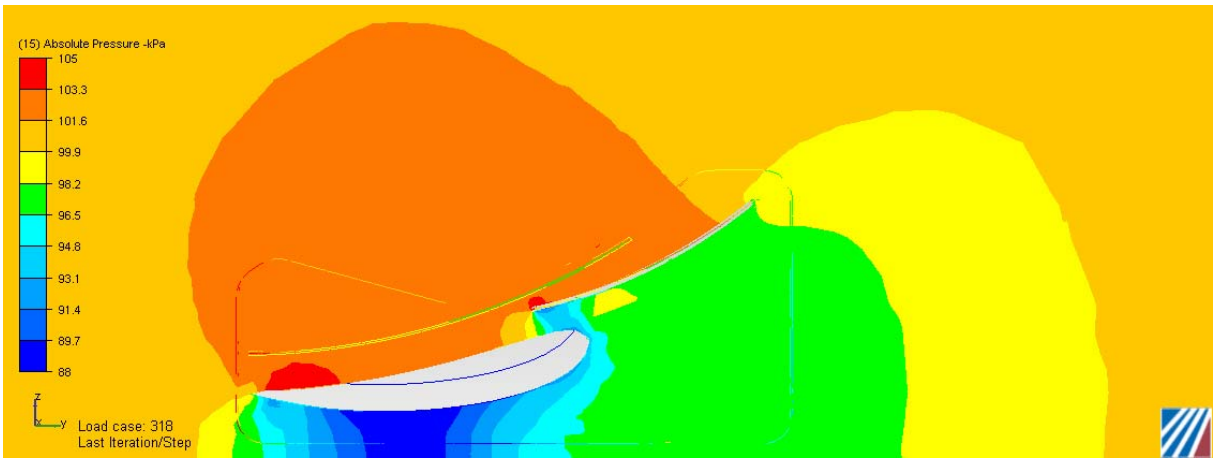


Figura 72. Diagrama de pressions del fluid en un pla normal al eix de les X.

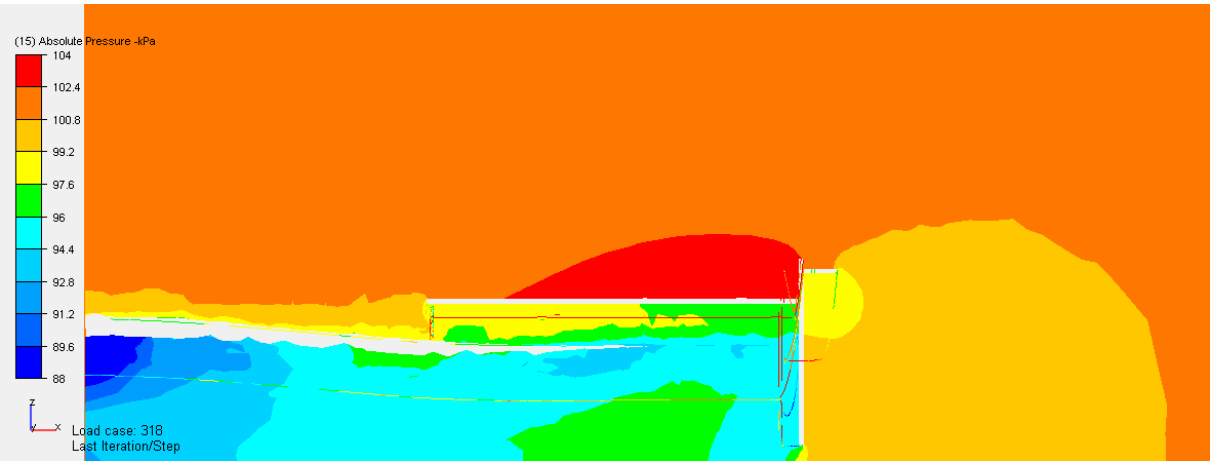


Figura 73. Diagrama de pressions del fluid en un pla normal al eix de les Y.

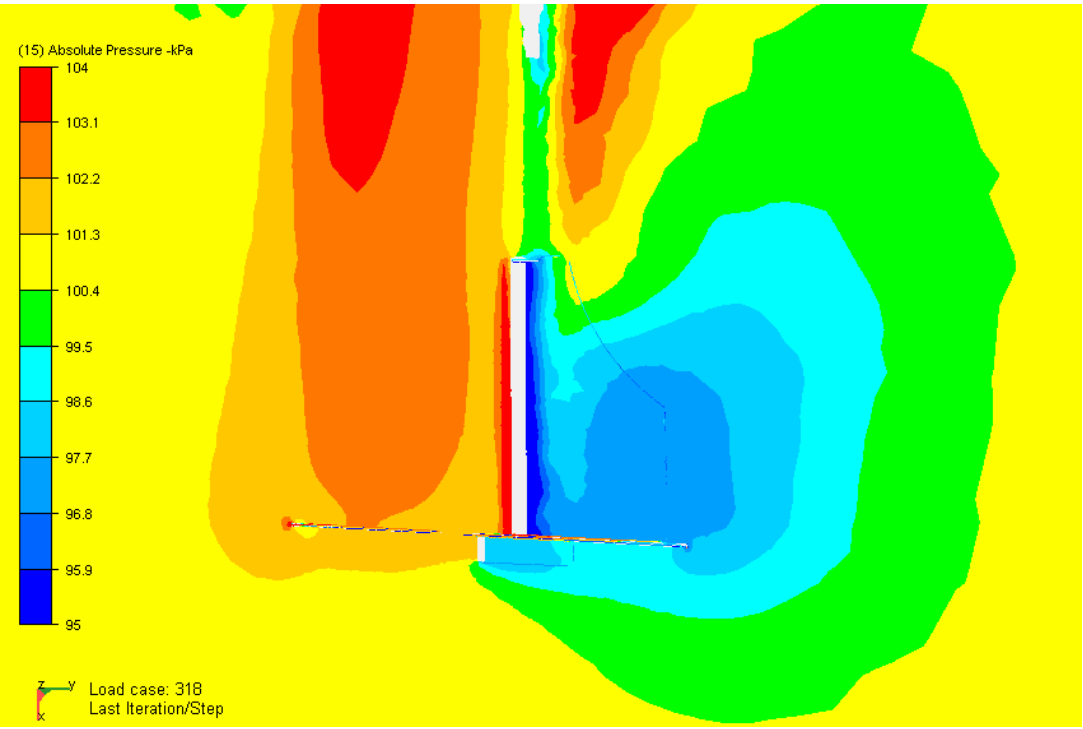


Figura 74. Diagrama de pressions del fluid en un pla normal al eix de les Z.

Les Figures 69, 70 i 71 mostren les variacions de velocitat que experimenta el fluid al passar al voltant de la geometria de l'aleró. Cal recordar que en aquesta simulació de túnel de vent no és l'aleró el que es desplaça, sinó el fluid. Així s'observen en vermell les zones més allunyades que conserven la velocitat de 300 Km/h, mentre que darrera de l'aleró es formen zones de color blau amb velocitat zero. En aquestes zones també és on es creen les turbulències tal com s'observa en les Figures 69 i 71. La Figura 70 representa l'aleró vist des de darrera i la zona de color blau és degut a la superfície vertical de l'extrem de l'aleró que es 'tanca cap dins' creant una zona de més alta pressió a l'exterior i de baixa pressió i velocitat a la cara interior.

Les Figures 72, 73 i 74 mostren la distribució de pressions en el fluid que envolta l'aleró. Les zones vermelles tenen de l'ordre de 105 KPa, mentre que les blaves de l'ordre de 90 KPa. La Figura 72 mostra molt clarament com les altes pressions sobre l'aleró contrasten amb les baixes pressions a sota, creant una succió cap al terra i augmentant per tant l'adherència del vehicle.

ANNEX F. ANALISIS DEL FRONTAL AMB MSC.MARC

F.1. Considerant un material isotròpic

F.1.1 Preparació del model

En el MSC.Marc s'ha importat el mallat del MSC.Patran fent "Files \ Import \ Marc Imput" i seleccionant l'arxiu ".dat" guardat anteriorment.

Primer s'ha orientat correctament els elements, ja que sinó possiblement el resultat no convergiria. Per tant s'ha activat:

Mesh generation \ Check \ ID Backfaces

En la Figura 75 es mostra en blau els elements orientats cap en fora, i en marró els elements orientats cap en dins.

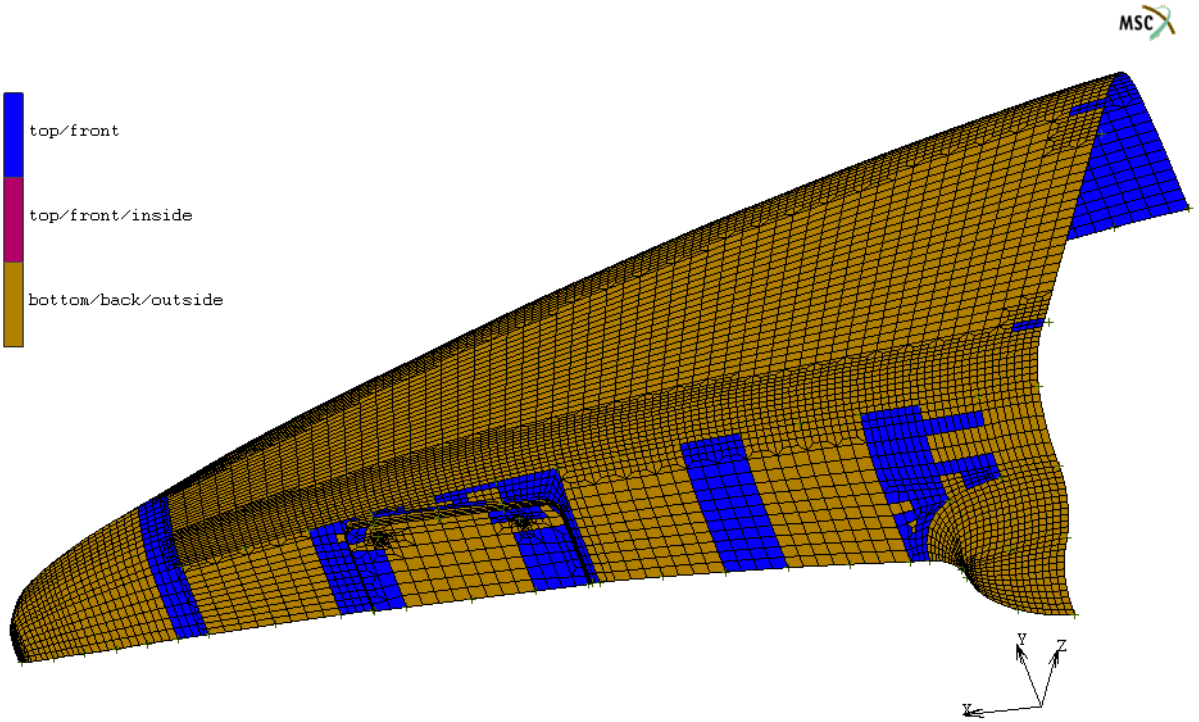


Figura 75. Orientació dels elements un cop importat el model en el MSC.Marc

La instrucció "Flip Elements" ha permès canviar la orientació dels elements seleccionats. Amb això s'ha aconseguit tenir el mallat amb tots els elements orientats cap enfora (blau) tal com es mostra en la Figura 76.

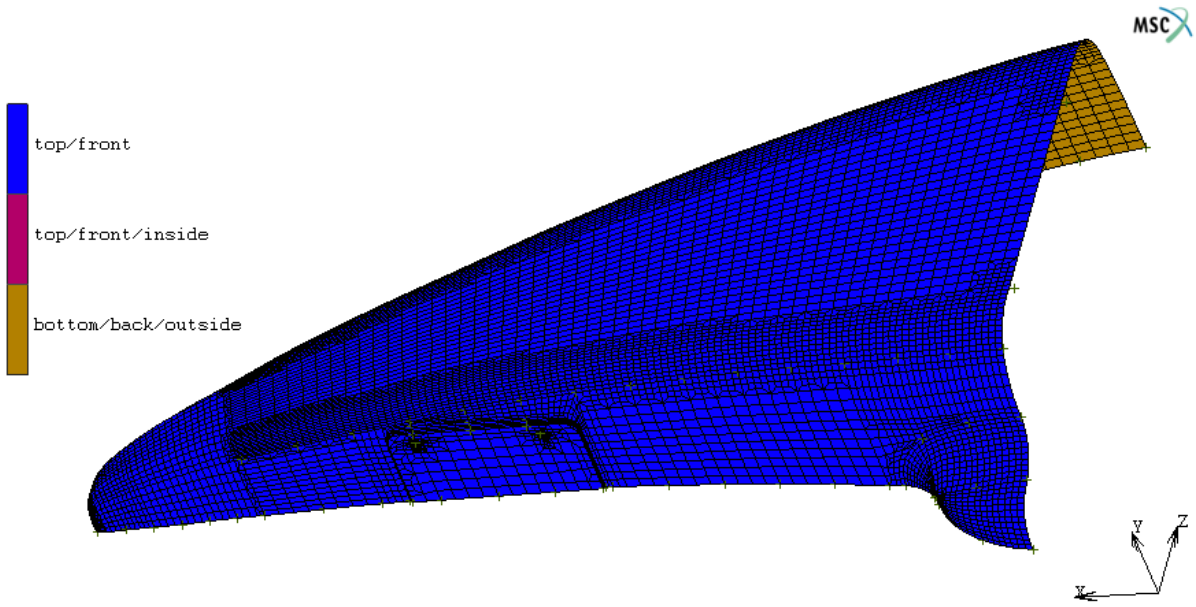


Figura 76. Orientació dels elements després d'aplicar "Flip elements"

F.1.2. Càlcul amb les càrregues aerodinàmiques

Primer s'han fet els càlculs amb un material isotròpic amb mòdul de Young de 50.000 MPa i mòdul de Poisson de 0.25. Com que s'intenta simular un material laminat de quatre capes de fibra de carboni de 0,15mm cadascuna, se li ha donat un gruix total i uniforme de 0,6 mm. Per definir aquestes propietats en el MSC.Marc s'ha introduït en el menú:

Geometric Properties \ Mechanical Elements 3-D \ Shell \ Thickness = 0.6 (mm)

Material Properties \ Material Properties \ Isotropic \ Young Modulus = 50000 (N/mm^2 o MPa)
Poisson's Ratio = 0.25

La placa d'alumini on es cargola l'aleró té un mòdul de Young de 70.000 MPa i mòdul de Poisson de 0.3.

Material Properties \ Material Properties \ Isotropic \ Young Modulus = 70000 (N/mm^2 o MPa)
Poisson's Ratio = 0.3

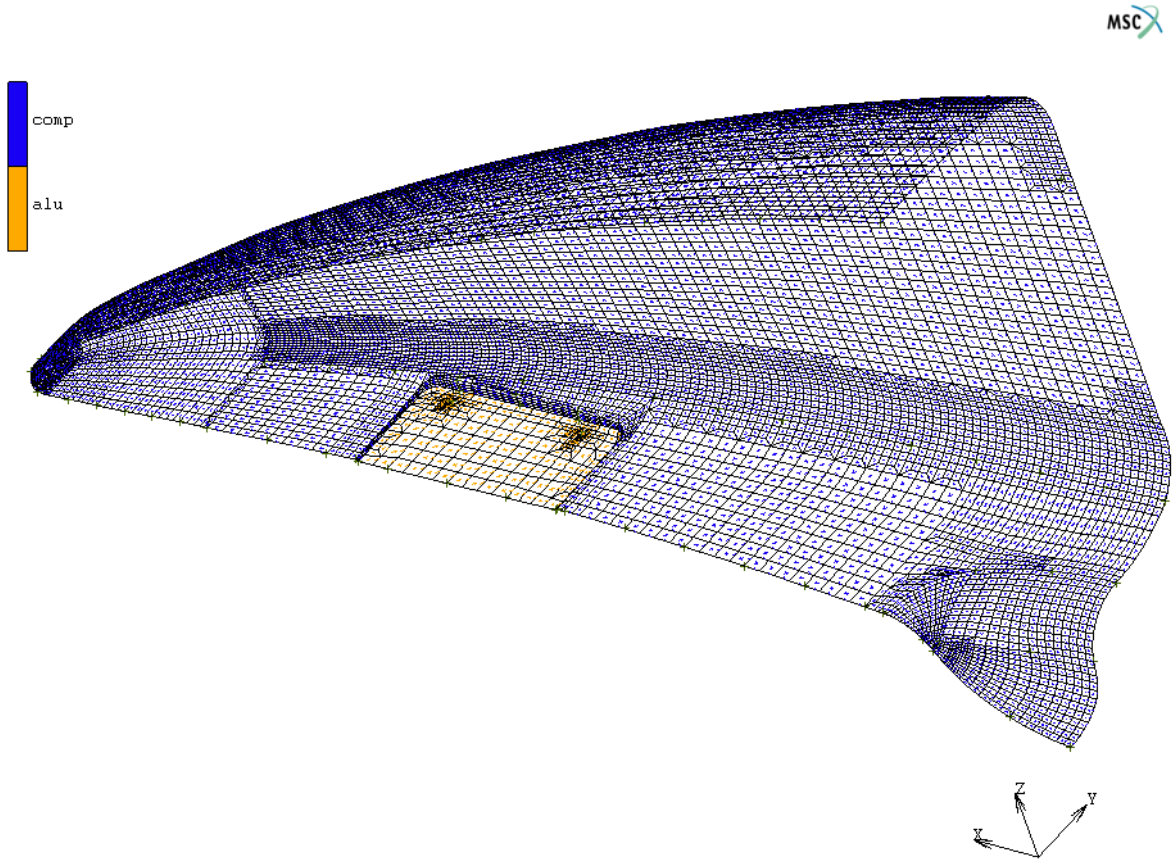


Figura 77. Definició dels materials que formen el nostre model.

Condició de simetria:

Per a la condició de simetria, s'ha limitat tots aquells desplaçaments i rotacions que provocarien una deformació no simètrica respecte al pla de simetria del model. S'ha creat una "Boundary Condition" anomenada "cond_simetria" amb les condicions:

Boundary Conditions \ Mechanical \ Fixed Displacement \ Displacement Y = 0
Rotation X = 0
Rotation Z = 0

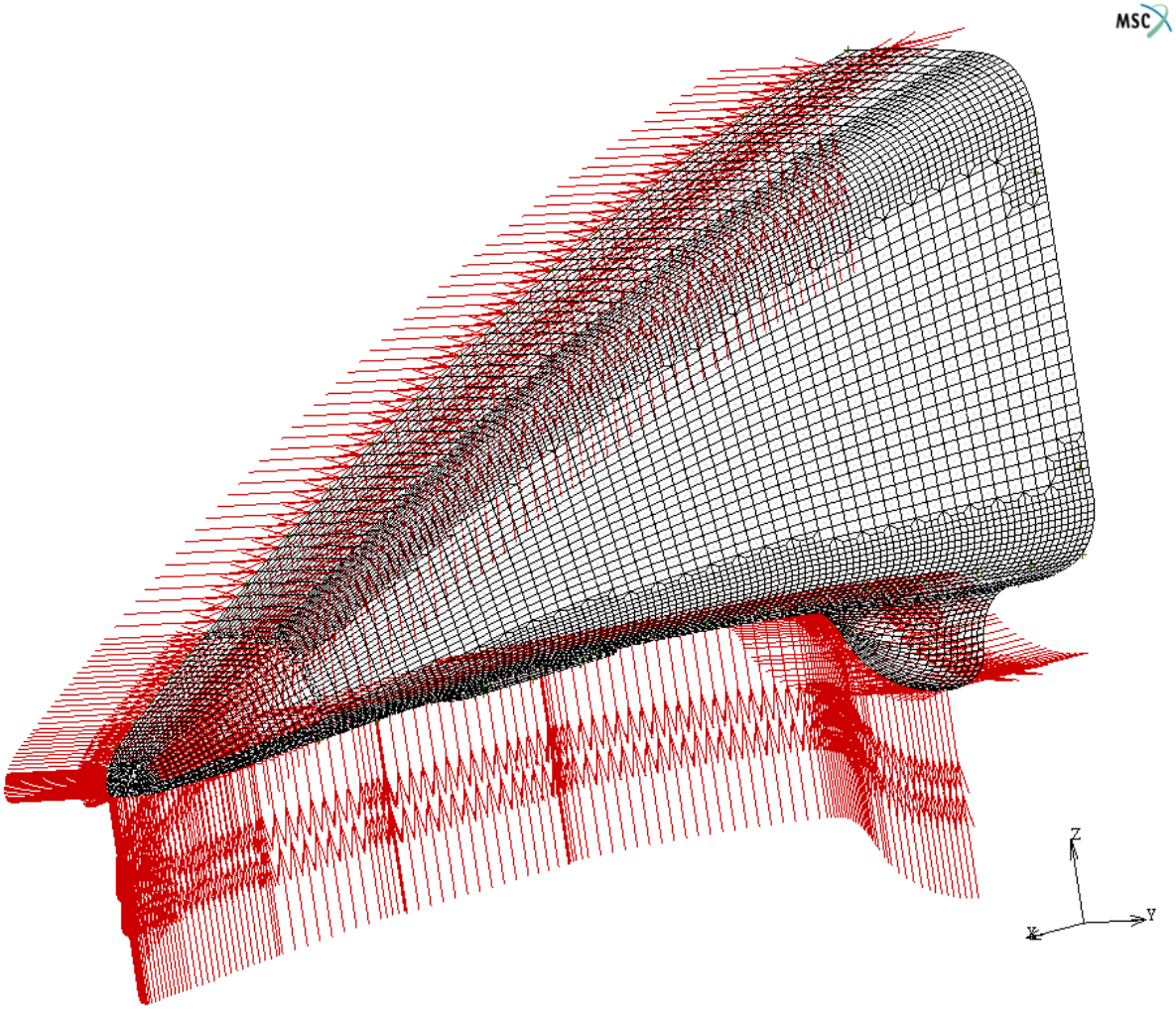


Figura 78. Definició de la condició de simetria per tots els nodes continguts en el pla de simetria.

Punts d'anclatge:

En els punts de fixació a la carrosseria, s'ha limitat tots els desplaçaments i rotacions de les zones ocupades pels espàrrecs o cargols de fixació. S'ha creat una "Boundary Condition" anomenada "fix_carro". En aquest cas s'ha repartit entre 15 nodes a l'anclatge inferior i 15 nodes més a l'anclatge superior.

Boundary Conditions \ Mechanical \ Fixed Displacement \ Displacement X = 0
Displacement Y = 0
Displacement Z = 0
Rotation X = 0
Rotation Y = 0
Rotation Z = 0

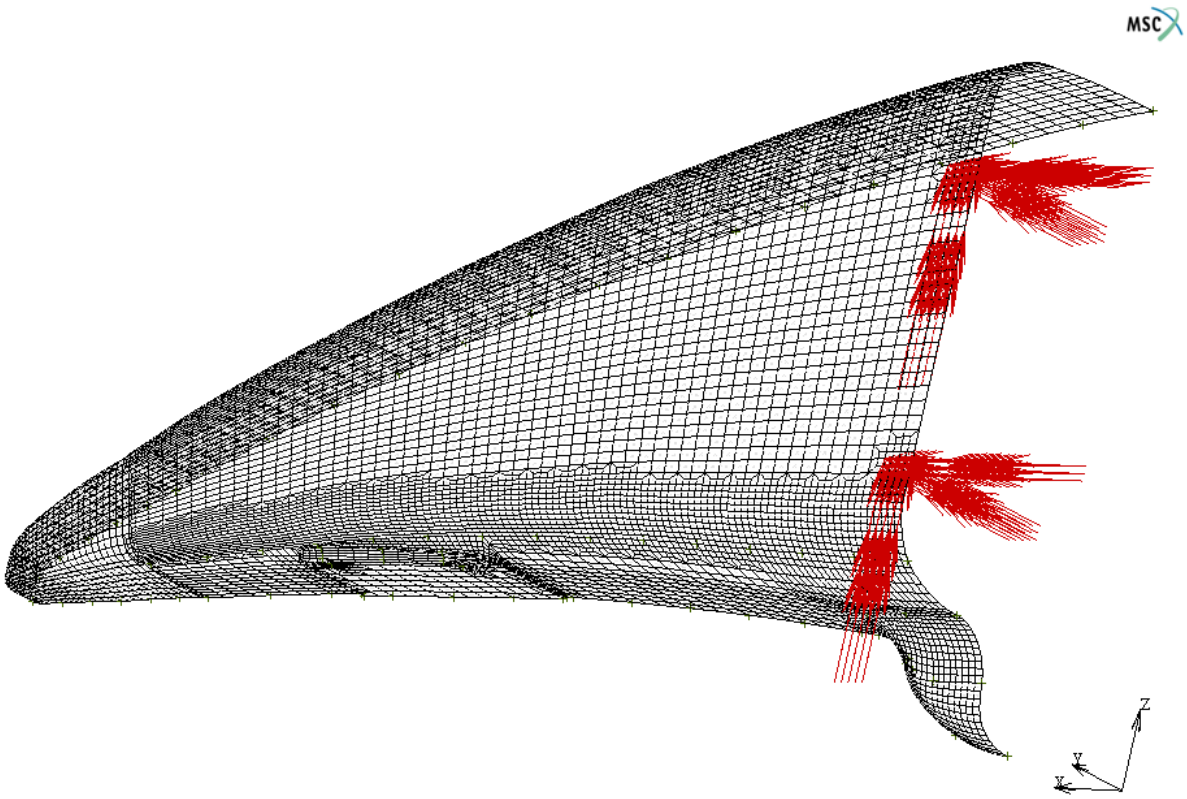


Figura 79. Definició dels punts de fixació.

Zona de contacte:

També s'ha limitat el moviment en les zones de contacte. Per aquesta condició s'ha creat una "Boundary Condition" anomenada "contacte" en la qual només s'ha restringit els desplaçaments en l'eix X.

Boundary Conditions \ Mechanical \ Fixed Displacement \ Displacement X = 0

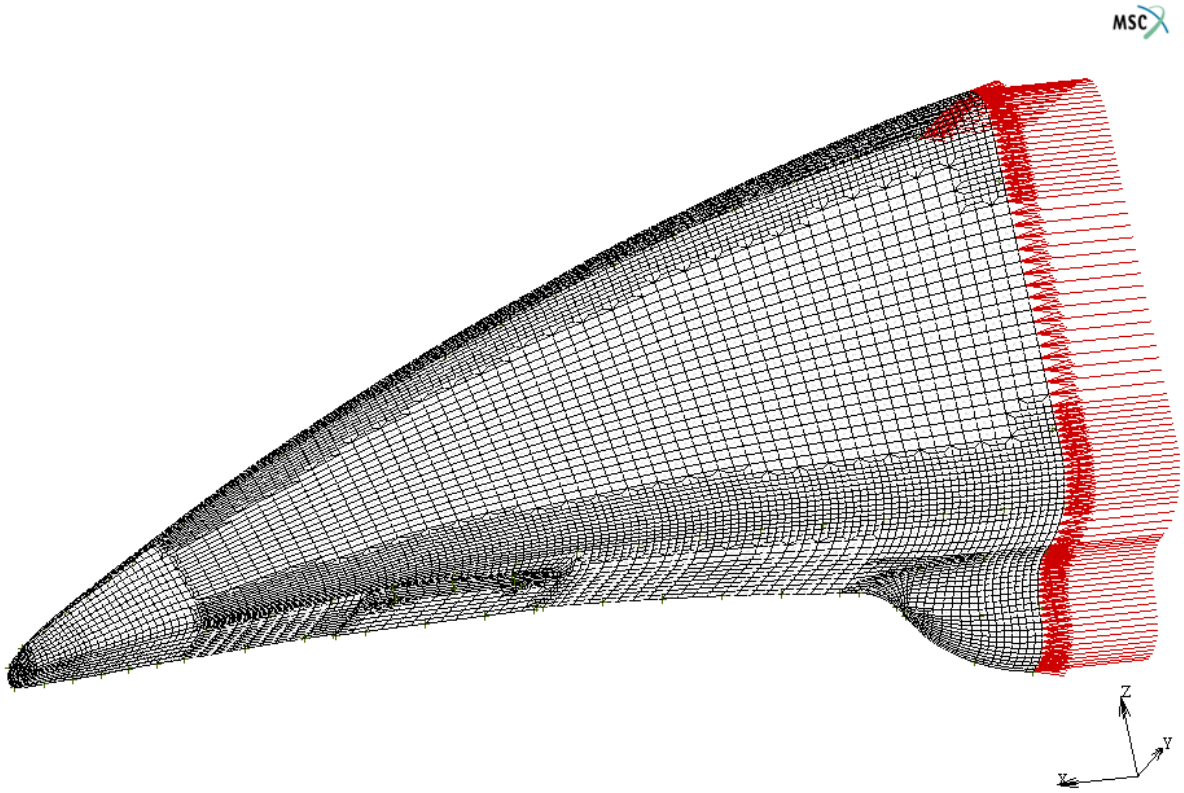


Figura 80. Definició dels punts en contacte amb la resta de carrosseria.

Estat de càrregues. Forces aerodinàmiques:

Les forces aerodinàmiques resultants del càlcul aerodinàmic s'han aplicat sobre l'àrea que ocupa cadascun dels cargols que fixa l'aleró al frontal. Com es pot observar en la Figura 81, per repartir aquesta força s'ha seleccionat 32 nodes. Prenent les forces resultants sobre els punts A i B que es van calcular en la Figura 21, la força que s'ha aplica sobre cada node és:

Punt A. F_{AY} = -341 N / 32 = -10.7 N; F_{AZ} = -3798 N / 32 = -118.7 N
Punt B. F_{BY} = -341 N / 32 = -10.7 N; F_{BZ} = -5798 N / 32 = -18.1 N

Per al punt A s'ha creat una "Boundary Condition" anomenada "Ra" amb les condicions:
Boundary Conditions \ Mechanical \ Point Load \ Force Y = -10.7 (N)
Boundary Conditions \ Mechanical \ Point Load \ Force Z = -118.7 (N)

Per al punt B s'ha creat una "Boundary Condition" anomenada "Rb" amb les condicions:
Boundary Conditions \ Mechanical \ Point Load \ Force Y = -10.7 (N)
Boundary Conditions \ Mechanical \ Point Load \ Force Z = -18.1 (N)

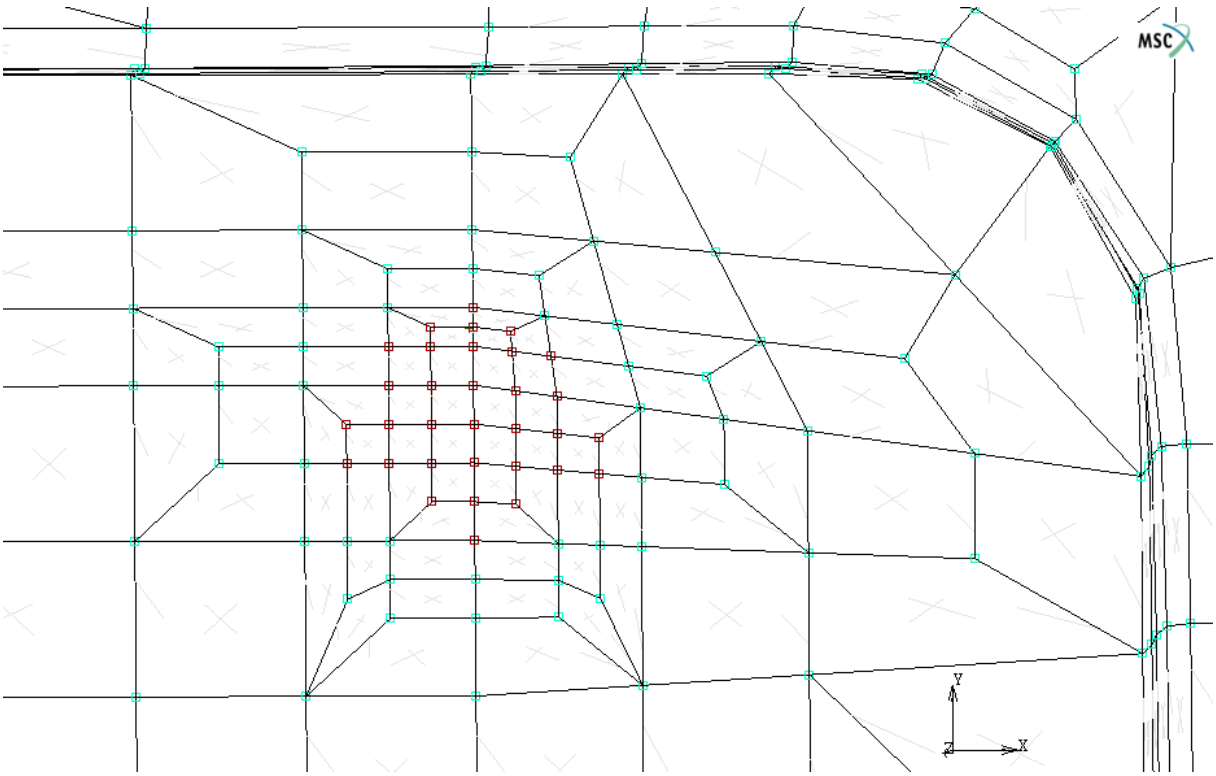


Figura 81. Selecció dels nodes del punt B on s'aplicarà la força.

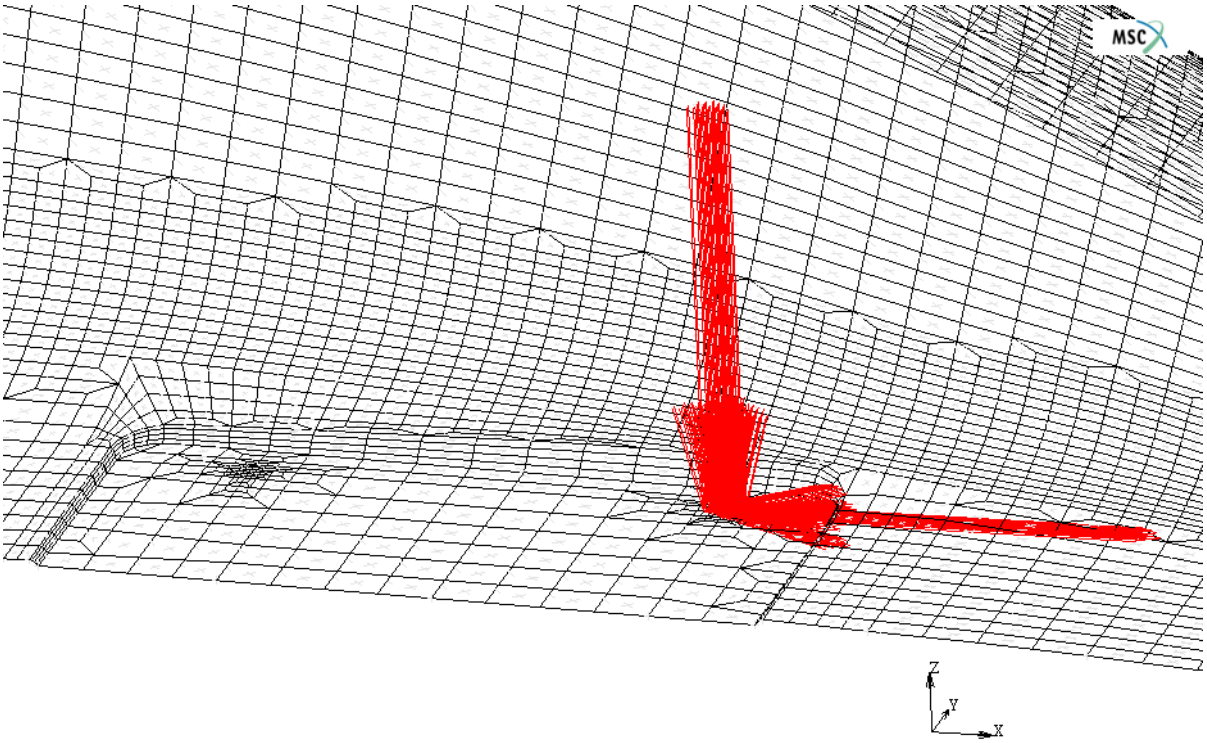


Figura 82. Forces en el punt A. Vista des de l'interior del frontal.

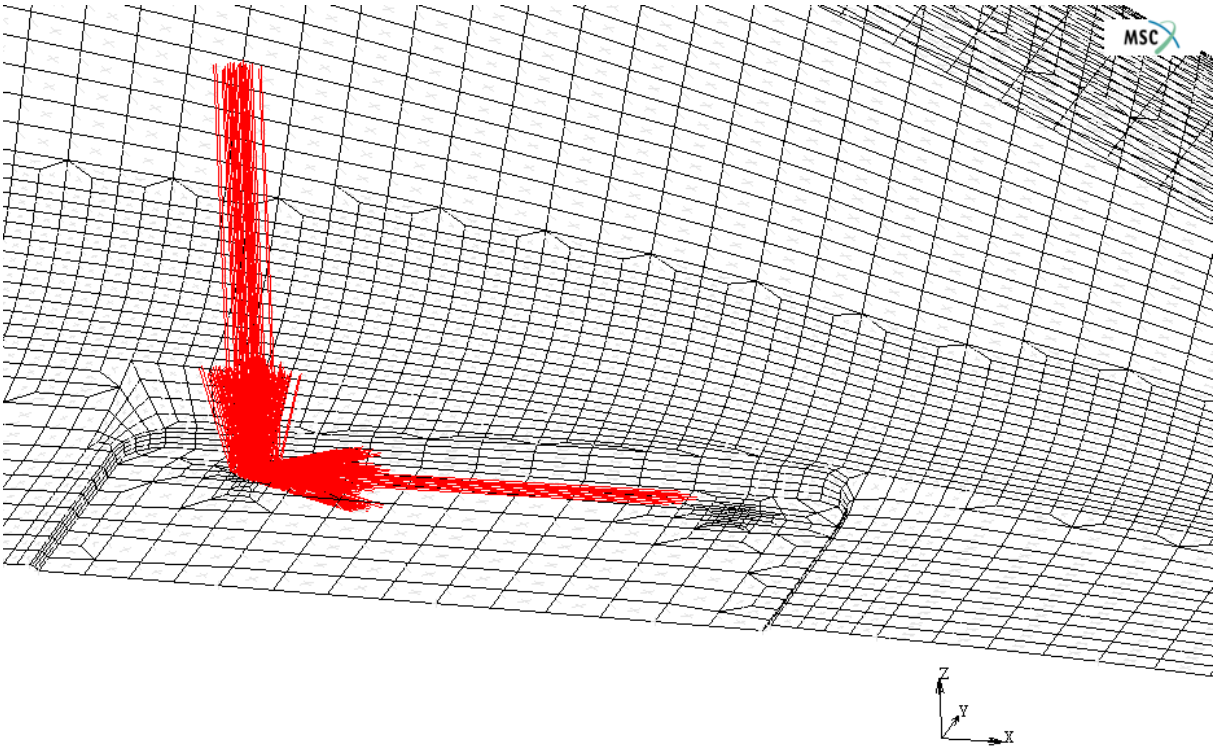


Figura 83. Forces en el punt B. Vista des de l'interior del frontal.

Per al cas de les forces aplicades en els punts A i B cal dir que primer s'havia provat d'aplicar directament tota la càrrega en un sol node. Però al analitzar el model s'observava una concentració d'esforços que no responia a la realitat. De manera que s'ha optat per distribuir-les entre els nodes inclosos dins l'àrea que correspondria a la secció del cargol.

Finalment, per tal de fer els càlculs s'ha triat les opcions:

A "Analysis \ Jobs \ Mechanical \ Initial Loads" s'ha comprovat que totes les Boundary Conditions estiguin seleccionades.

A "Analysis \ Jobs \ Mechanical \ Analysis Options" s'ha marcat "Linear elastic analysis".

A "Analysis \ Jobs \ Mechanical \ Job results" s'ha seleccionat el que es vol calcular. En aquest cas el "Stress", i el "Elastic Strain".

A "Analysis \ Jobs \ RUN" s'ha clicat en "Submit(1)" i el MSC.Marc ha creat un arxiu ".t16" amb tots els resultats.

Cal comprovar que el "Exit Number" sigui 3004, ja que vol dir que s'ha completat l'anàlisi satisfactòriament.

F.1.3. Càlcul amb les càrregues del pes

Per fer aquest càlcul, s'ha utilitzat el mateix arxiu del MSC.Marc de l'apartat anterior, ja que els materials i restriccions de moviment són els mateixos. Simplement s'han eliminat les "Boundary Conditions" que es varen anomenat "Ra" i "Rb". En lloc d'aquestes, se n'ha creat una anomenada "pes" i que servirà alhora pels punts A i B, ja que ara tenen el mateix valor. En aquest cas la càrrega també s'ha repartit en 32 nodes. Cada cargol suporta 100 kg que generaran una força de 1000 N. Aquests s'han repartiran entre els diferents nodes que ocupen l'àrea del cargol. Per tant s'ha repartit entre 32 nodes per cada punt d'anclatge: 1000 N / 32 = 31.3 N

Boundary Conditions \ Mechanical \ Point Load \ Force Z = 31.3 (N)

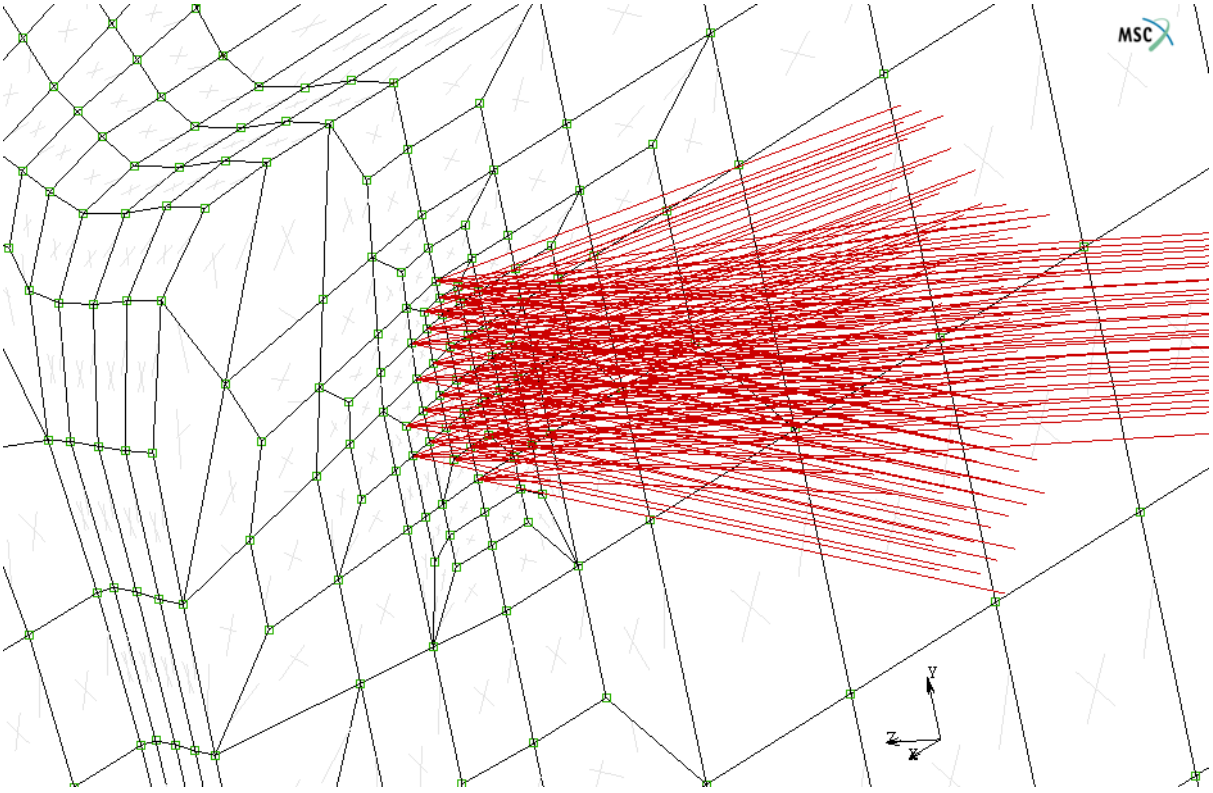


Figura 84. Detall dels 32 nodes del punt A on s'apliquen les forces.

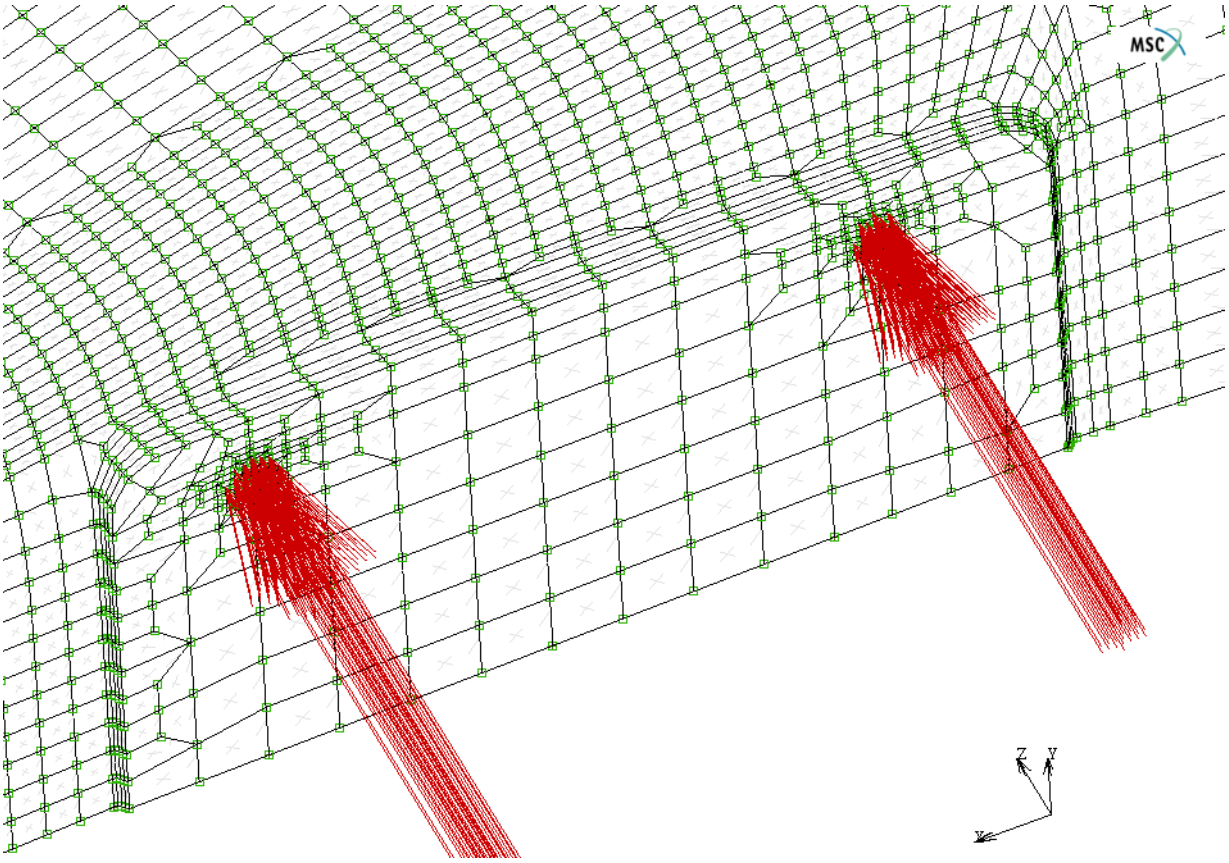


Figura 85. Punts A i B d'aplicació de les forces.

Per fer el càlcul cal procedir igual que en l'apartat anterior.

F.2. Considerant un laminat i considerant un sandwitch

Primer s'ha importat des de "Files \ Import \ Marc Imput" el fitxer ".dat" que conté tot el laminat i s'ha creat anteriorment amb el MSC.Patran.

En aquest cas, dins el menú "Material Properties \ Material Properties" s'ha observat com s'han generat un gran nombre de materials que defineixen la multitud de gruixos i característiques físiques de cada element. En "Material Properties \ Orientations" també hi figura un gran nombre d'orientacions deguts al canvi de direcció de les fibres al adaptar-se sobre el motllo i a la superposició de capes de teixit.

El MSC.Marc també ha importat una sèrie d' "Initial Conditions" que ha generat el MSC.Patran però que no serveixen. Per tant, s'ha anat a "Initial Conditions \ Remove all Initial Conds" per eliminar-les.

Seguidament en el menú "Boundary Conditions" s'ha introduït les mateixes condicions que en els casos anteriors pel material isotròpic. La condició de simetria, la de fixació, la de contacte, i les corresponents als estats de càrrega.

Finalment, s'ha obtingut un total de quatre fitxers, un per cada cas:

- Laminat amb carregues aerodinàmiques.
- Laminat amb càrregues de pes.
- Sandwitch amb carregues aerodinàmiques.
- Sandwitch amb càrregues de pes.

En tots quatre casos els resultats a analitzar en "Analysis \ Jobs \ Mechanical \ Job results" han estat els mateixos. S'ha seleccionat: "Thickness of Element \ Layers: Default", "Stress in Preferred Sys \ Layers: All", i "Elastic Strain in Preferred Sys \ Layers: All".

ANNEX G. RESULTATS

G.1. Introducció

Per poder decidir si l'estructura és valida o no, es disposa de les següents característiques tècniques que ha facilitat el fabricant de la fibra de carboni:

Tensió última	Direcció longitudinal	Direcció transversal
Tracció	$\sigma_{TI}^{U} = 600\ MPa$	$\sigma_{TII}^{U} = 600\ MPa$
Compressió	$\sigma_{CI}^{U} = 370\ MPa$	$\sigma_{CII}^{U} = 370\ MPa$

Taula 8. Valors de la tensió última per al teixit de la fibra de carboni utilitzat.

Deformació última	Direcció longitudinal	Direcció transversal
Tracció	$\varepsilon_{TI}^{U} = 3\%$	$\varepsilon_{TII}^{U} = 3\%$
Compressió	$\varepsilon_{CI}^{U} = 3\%$	$\varepsilon_{CII}^{U} = 3\%$

Taula 9. Valors de la deformació última per al teixit de la fibra de carboni utilitzat.

Considerant que l'estructura està destinada a la competició i no interessa augmentar gaire el pes, es pren un factor de seguretat de 1,2. Així, la tensió admissible i la deformació admissible és:

	Tensió admissible	**Deformació admissible**
Tracció	$\sigma_{TI} = \sigma_{TII} = 500\ MPa$	$\varepsilon_{TI} = \varepsilon_{TII} = 2{,}5\ \%$
Compressió	$\sigma_{CI} = \sigma_{CII} = 308\ MPa$	$\varepsilon_{CI} = \varepsilon_{CII} = 2{,}5\ \%$

Taula 10. Valors admissibles considerant un factor de seguretat de 1,2.

En quant a la deformació, les unitats dels resultats en MSC.Marc són "10^6 $\mu\varepsilon$" (micro-deformacions). Per tant no es pot superar el valor "0,025" tal com es mostra en el següent càlcul:

$$2{,}5\% = \frac{2{,}5\,m}{100\,m} = 25.000 \cdot 10^{-6}\frac{m}{m} = 25.000\mu\varepsilon = 0{,}025 \cdot 10^{6}\mu\varepsilon \qquad (Eq.5)$$

Així, a l'hora de calcular amb el MSC.Marc s'ha triat la tensió: "Stress" per al material isotròpic, i "Stress in Preferred Sys" amb la opció "Layers All" per als materials laminats. Amb això el programa ha calculat la tensió en coordenades locals de cada element i a més s'ha pogut consultar els resultats capa a capa.

També s'ha triat la deformació elàstica: "Elastic Strain" per al material isotròpic, i "Elastic Strain in Preferred Sys" per als materials laminats. Amb això s'ha calculat la deformació elàstica en coordenades locals de cada element i també s'ha pogut consultar capa a capa.

Altres càlculs com la tensió de Von Misses en el MSC.Marc no serviria per materials compòsits ja que ho consideraria com un material quasi isotròpic.

Tant la Tensió com la deformació s'han consultat en les direccions "11" i "22" que són les que estan en el pla del laminat. La direcció "33" no cal per què és la perpendicular al teixit i en aquesta direcció no aguanta càrrega.

En les simulacions que s'ha fet amb material laminat aquest està distribuït en capes com es mostra en la Figura 86.

(a) **1 Laminat**

	Interior peça
Capa 4	Teixit 0/90
Capa 3	Teixit +45/-45
Capa 2	Teixit +45/-45
Capa 1	Teixit 0/90
	Exterior peça

(b) **2 Laminats + Foam**

	Interior peça
Capa 9	Teixit 0/90
Capa 8	Teixit +45/-45
Capa 7	Teixit +45/-45
Capa 6	Teixit 0/90
Capa 5	Foam
Capa 4	Teixit 0/90
Capa 3	Teixit +45/-45
Capa 2	Teixit +45/-45
Capa 1	Teixit 0/90
	Exterior peça

Figura 86. (a) Distribució de les capes per la simulació amb un laminat. (b) Distribució de les capes per la simulació de dos laminats i foam.

En els següents apartats s'ha analitzat els desplaçaments que ha sofert la geometria del frontal, i a continuació les tensions i deformació elàstica per comparar-les amb els valors màxims del fabricant.

G.2. Desplaçament

Per tal de poder comparar els desplaçaments que ha experimentat la carcassa del frontal s'ha construït la Taula 11. El primer que s'observa és que els valors obtinguts pel material isotròpic i laminat han estat molt més elevats que per el material sandwitch. Això és degut a que els 16,2 mm de gruix del material sandwitch li donen una gran inèrcia, impedint que es deformi massa. En canvi, el material isotròpic només té 0,6 mm de gruix i el material laminat quatre capes de 0,15 mm cadascuna.

Desplaçaments màxims (valors en mm)							
Tipus material		Material isotròpic		Material laminat		Material sandwitch	
Estat de càrrega		aerodinàmic	pes	aerodinàmic	pes	aerodinàmic	pes
Direcció (eix 'X', 'Y', 'Z') Sentit ('+' positiu, '-' negatiu)	X +	4,19	3,90	1,13	1,05	0,071	0,0440
	X -	-7,60	-2,56	-2,05	-0,72	-0,134	-0,0283
	Y +	4,00	38,23	1,45	10,18	0,046	0,0247
	Y -	-73,81	-2,24	-19,68	-0,78	-0,048	0,0169
	Z +	5,32	39,50	1,38	11,45	0,000	0,241
	Z -	-56,25	-4,07	-19,36	-1,22	-0,658	0,000
Total (en valor absolut)		74,22	39,51	19,79	11,45	0,671	0,244

Taula 11. Valors del desplaçament màxim per cada tipus de material, estat de càrrega, i direcció.

La intenció al fer un anàlisis amb material isotròpic era comprovar fins a quin punt servia per simular els resultats d'un material laminat del mateix gruix. Tal com mostra la Taula 11, tots els valors del material isotròpic han sortit més elevats que pel material laminat. Per entendre que ha succeït es pot veure la Figura 87. Tal com s'observa, en moltes zones de la peça, el gruix és superior als 0,6 mm, arribant fins i tot a més de 1,8 mm. Els resultats d'aquest solapament han estat com s'esperava, a la zona on els patrons són més grans s'han pogut distribuir millor i no hi ha tant de solapament. Mentre que en la zona de la punta, es varen fer coincidir tots els solapaments i al final a adquirit un gruix considerable.

Així, considerant que el material laminat ha acabat tenint més gruix que l'isotròpic és lògic que tingui menors deformacions. Possiblement, un patronatge amb menys solapaments o més distribuïts per la superfície hauria provocat uns resultats més similars. Amb tot i això, en cas d'haver fet només un càlcul isotròpic s'estaria del costat de la seguretat en quant a desplaçaments. Això pot ser molt útil en el cas d'haver de fer un predimensionat d'una peça.

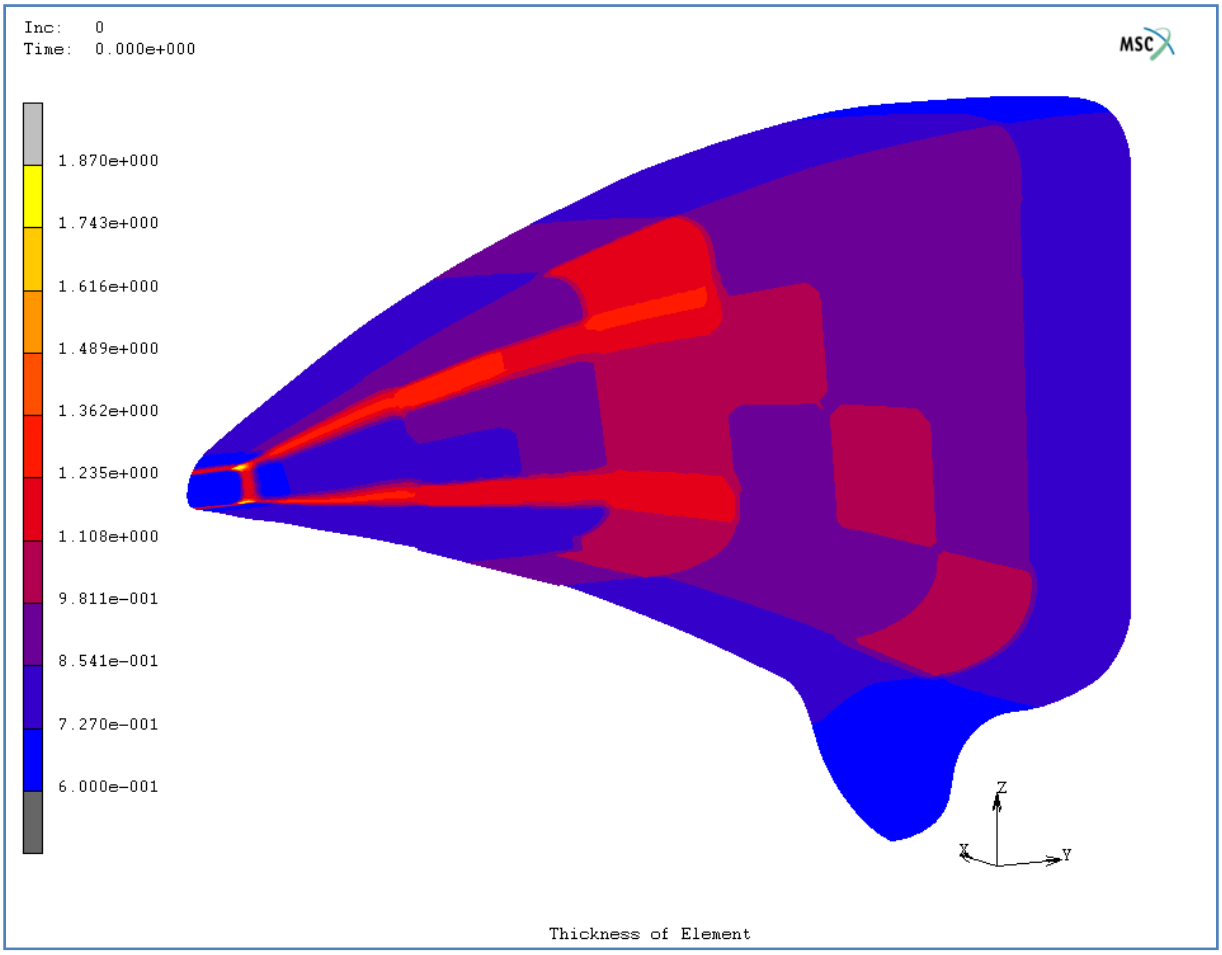


Figura 87. Forma en que està distribuït el gruix en el material laminat

En les dues hipòtesis de càrrega, la forma en que s'ha deformat la peça ha estat molt similar per al material isotròpic i per al laminat. Pràcticament només han variat els valors. En canvi, degut a la diferent naturalesa del material sandwitch, la distribució de les deformacions en aquest han estat diferents respecte als altres dos materials.

G.2.1 Càrrega aerodinàmica

La hipòtesi de càrrega aerodinàmica és la que ha donat majors desplaçaments i aquests han estat majors en l'eix de la 'Z'. Resultat esperat, ja que és la direcció on les carregues aplicades són majors. Tal com s'ha dit, la forma en el material isotròpic i laminat s'ha

desplaçat és molt similar. Per això a continuació s'ha fet una comparació de deformació del laminat amb el sandwitch en cadascun dels eixos. Així, en les Figures 88 i 89 s'observa com la deformació en l'eix de les 'Z' és completament diferent. En el cas del laminat que és més prim la força que genera l'aleró l'ha estirat en la zona d'anclatge més de 68 mm cap avall. A més de ser una deformació gran, està molt localitzada a la part inferior del frontal. En canvi, el sandwitch de la Figura 89 és molt més rígid i l'estructura fletxa tota ella sense provocar l'abonyegament del cas anterior. En la Figura 89 s'ha dibuixat la deformada amb un factor d'escala 50 ja que la deformació ha estat de menys de 0,66 mm.

Per tant, amb aquests primers resultats ja s'ha vist que el laminat es deforma massa i no compleix amb la seva funció. En canvi, la deformació de l'estructura sandwitch es manté dins uns límits acceptables.

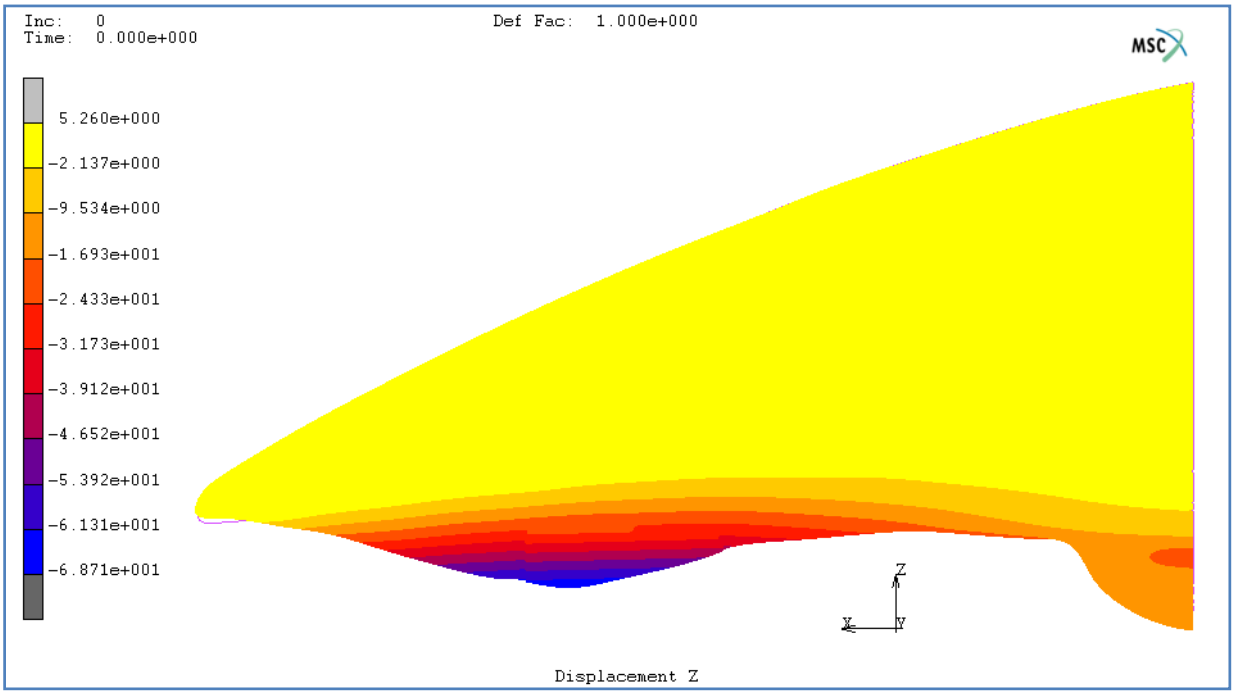


Figura 88. Material laminat amb càrregues aerodinàmiques. Valors del desplaçament en l'eix 'Z'. Vista de la deformada amb factor d'escala 1.

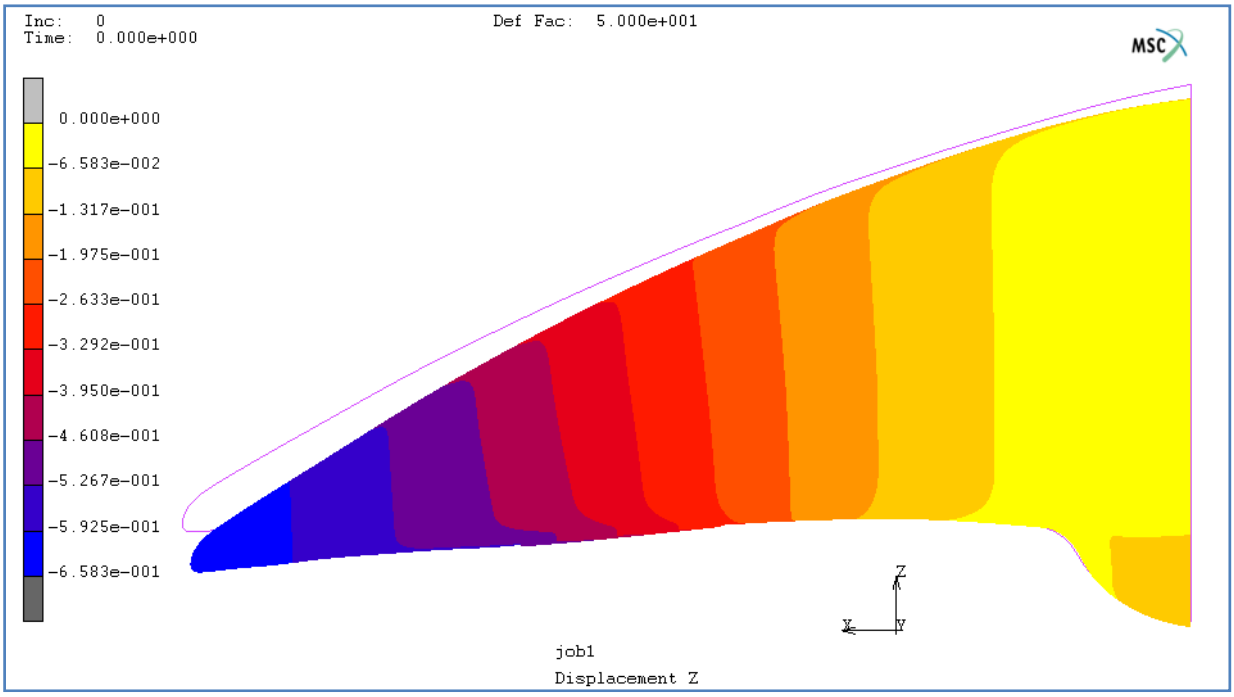


Figura 89. Material sandwitch amb càrregues aerodinàmiques. Valors del desplaçament en l'eix 'Z'. Vista de la deformada amb factor d'escala 50.

En el material laminat, l'estirament de la peça en sentit vertical també li ha provocat un abonyegament cap dins del frontal en els laterals. Això es pot observar en la Figura 90, on el sentit de l'eix 'Y' és cap enfora el paper, i per tant els valors negatius indiquen que s'ha deformat cap endins.

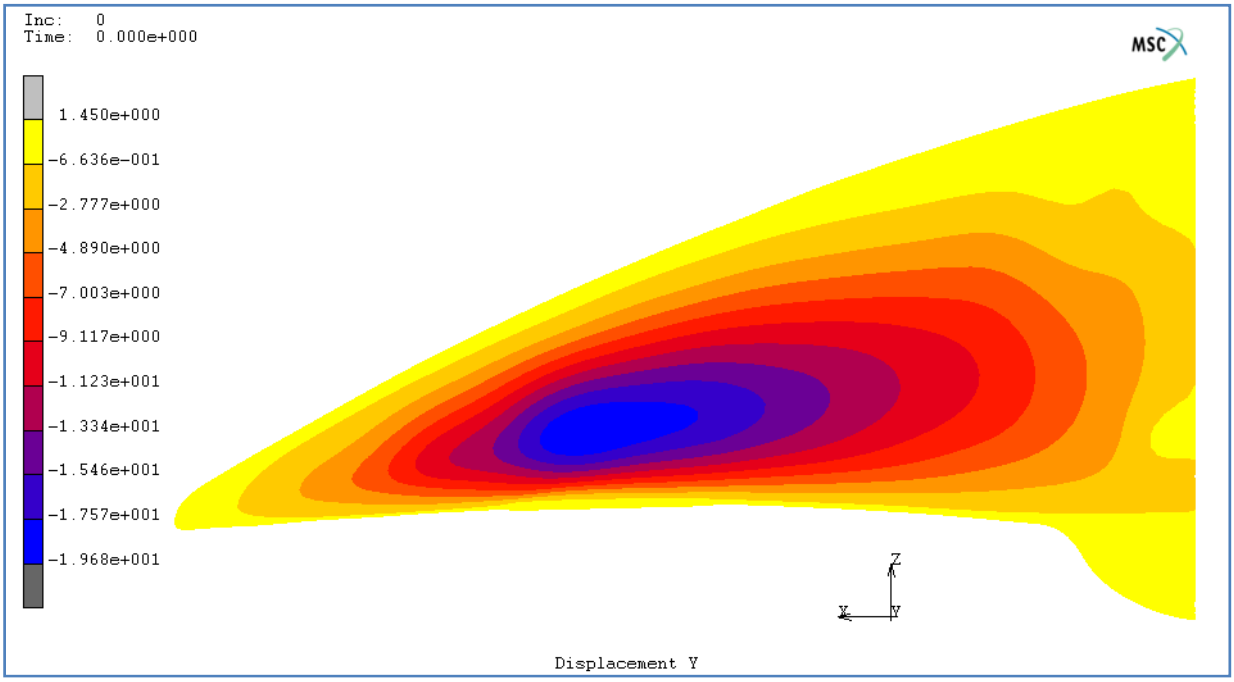


Figura 90. Material laminat amb càrregues aerodinàmiques. Desplaçament en l'eix 'Y'.

Si es pren com a referència el frontal tal com està col·locat en la Figura 91, en el pla perpendicular a l'eix 'Y', l'estructura sandwitch ha experimentat un gir en sentit antihorari respecte als seus anclatges amb la resta de carrosseria (degut a la força de l'aleró que l'estira cap avall i cap a la dreta). Aquesta deformació li ha provocat dos bonys en els laterals i en la direcció de l'eix 'Y'. Un cap enfora que es pot observar de color groc, i un cap endins i de color blau en la Figura 91.

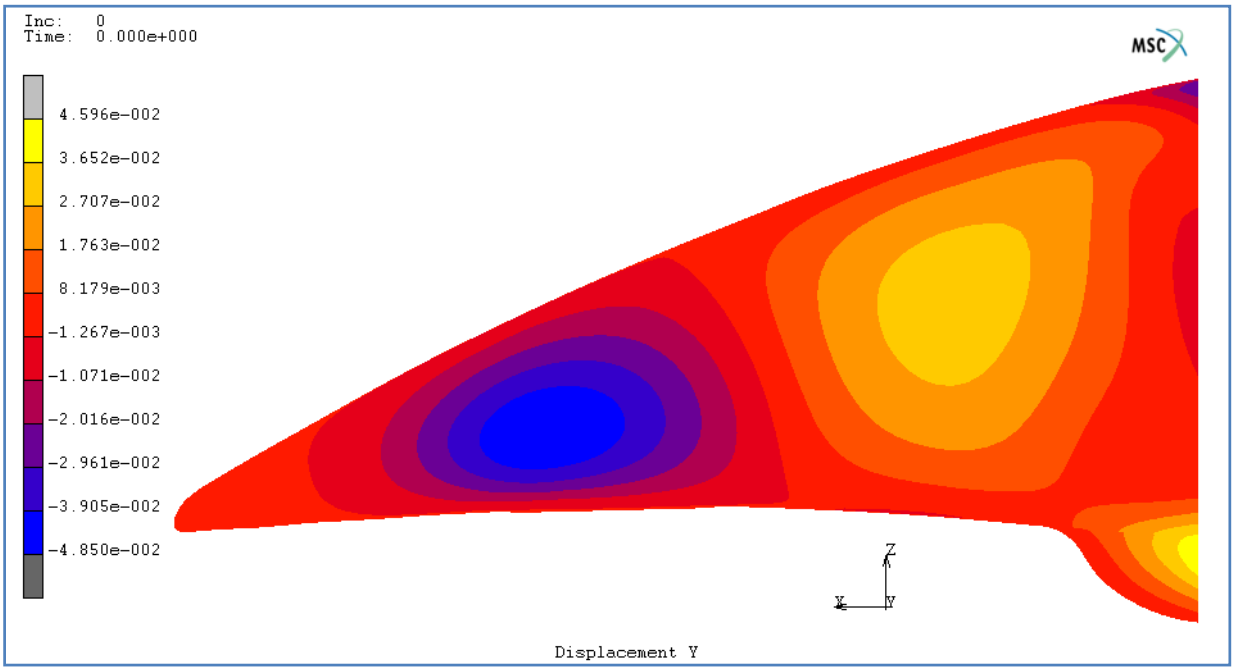


Figura 91. Material sandwitch amb càrregues aerodinàmiques. Desplaçament en l'eix 'Y'.

En la Figura 92 es pot observar el desplaçament en l'eix 'X' de la peça laminada. Aquí el desplaçament bàsicament és en el sentit negatiu de l'eix 'X' però aquesta component està molt influenciada pels grans abonyegaments que ha patit i resulta complicat veure'n la causa exacte.

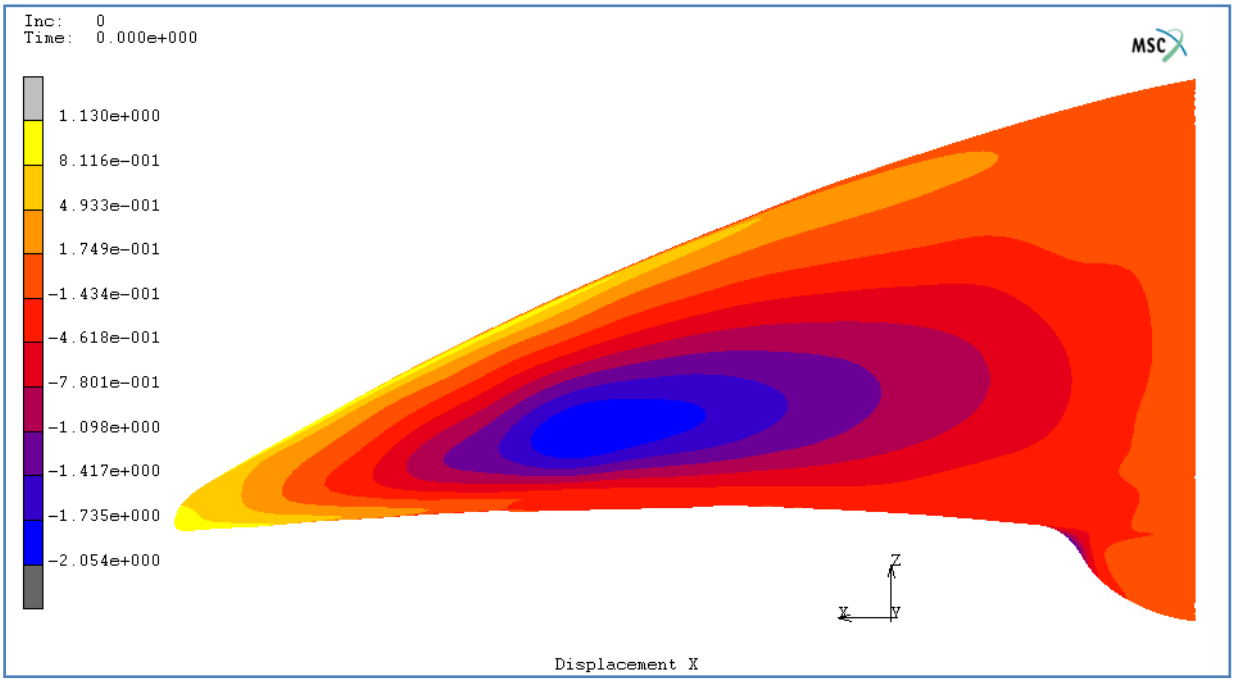


Figura 92. Material laminat amb càrregues aerodinàmiques. Desplaçament en l'eix 'X'.

Pel que fa al material sandwitch el comportament ha tornat a estar diferent. Respecte l'eix 'X', l'estructura sandwitch s'ha desplaçat unes centèsimes de mil·límetre en sentit positiu a la part més alta del frontal (color groc) degut a que aquesta zona està traccionada. La zona de la punta del frontal s'ha desplaçat unes dècimes en sentit negatiu de l'eix 'X' degut a que la zona inferior està comprimida.

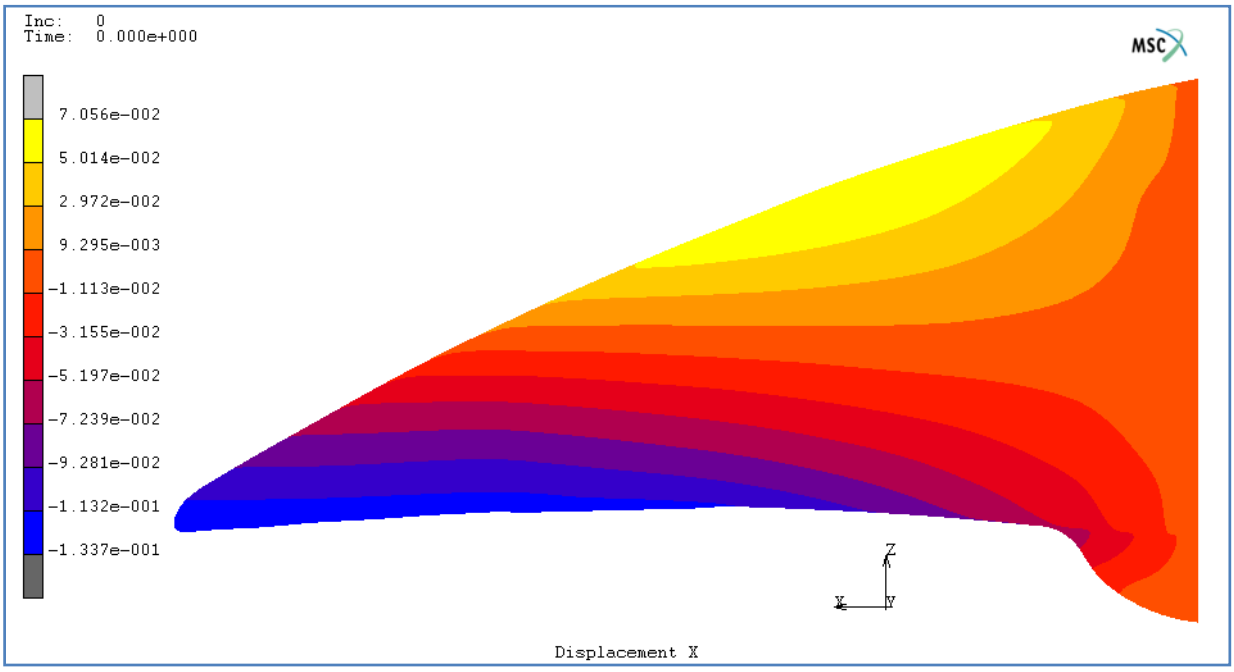


Figura 93. Material sandwitch amb càrregues aerodinàmiques. Desplaçament en l'eix 'X'.

Finalment, en les Figures 94, 95, i 96 es poden observar els valors de desplaçament total i la forma de la deformada per els tres materials estudiats.

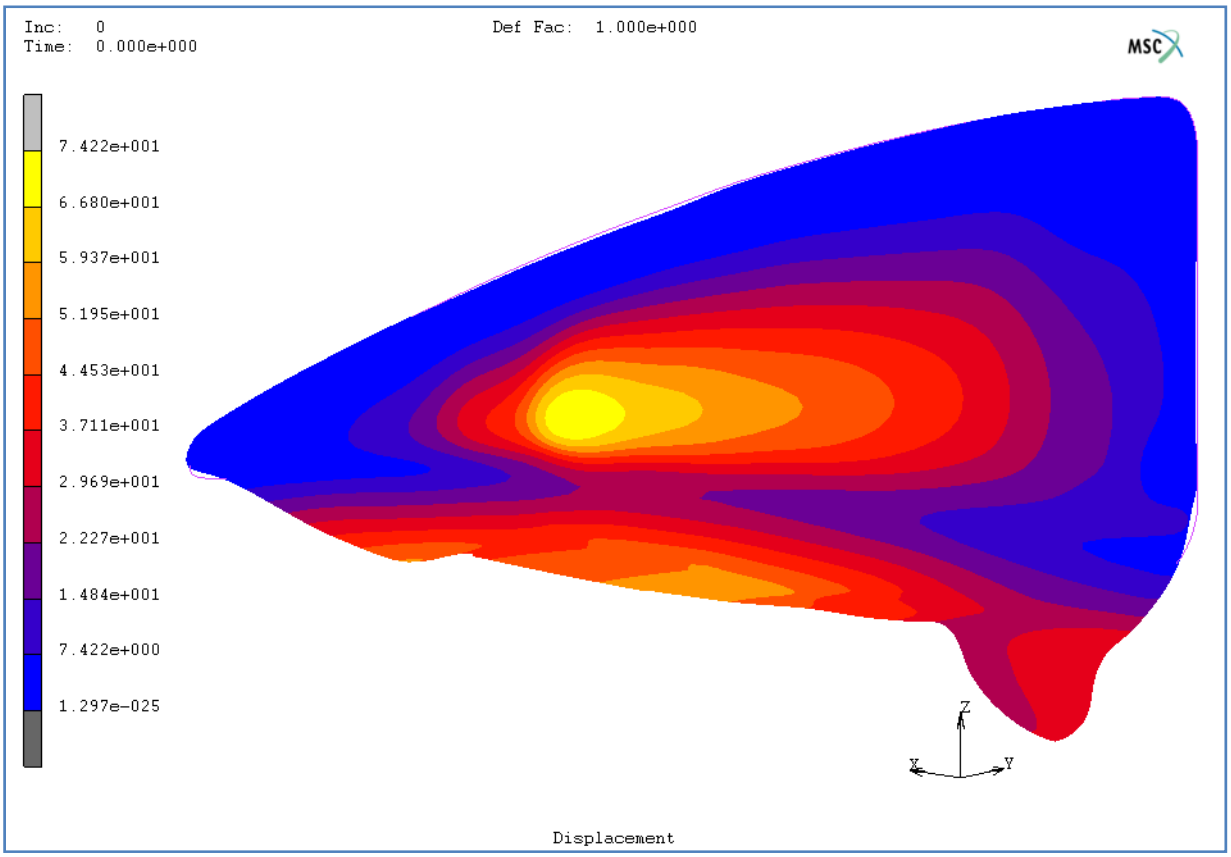


Figura 94. Material isotròpic amb càrregues aerodinàmiques. Valors del desplaçament total. Vista de la deformada amb factor d'escala 1.

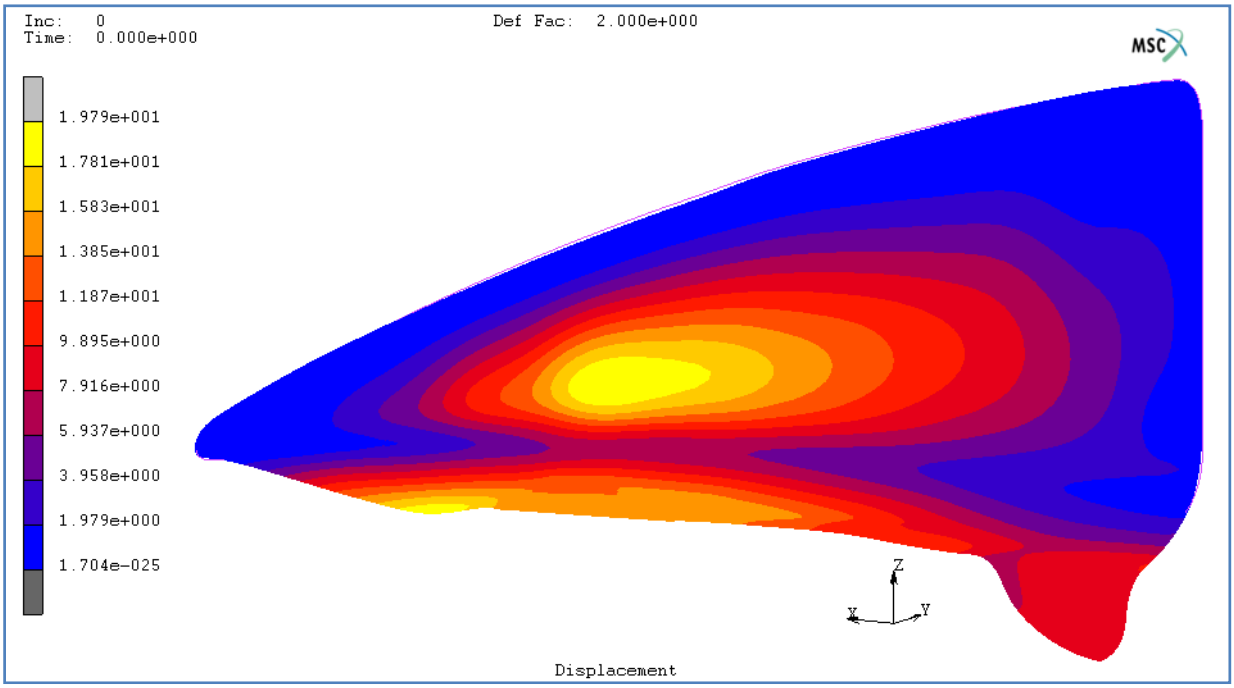


Figura 95. Material laminat amb càrregues aerodinàmiques. Valors del desplaçament total. Vista de la deformada amb factor d'escala 2.

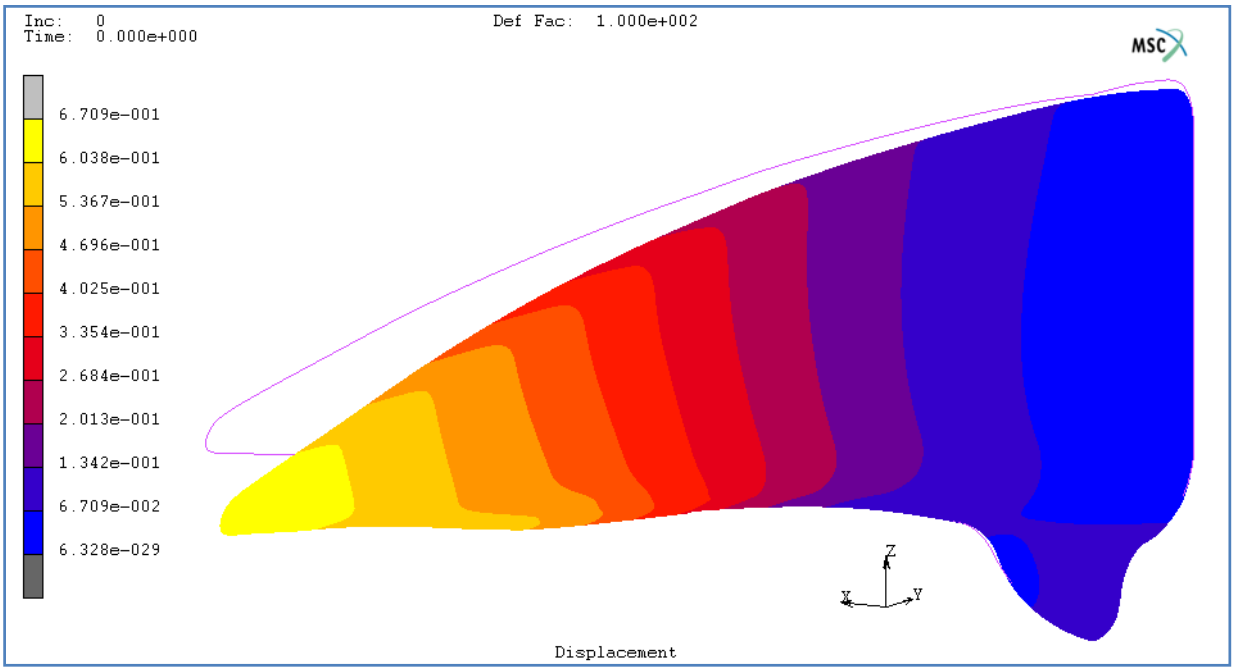


Figura 96. Material sandwitch amb càrregues aerodinàmiques. Valors del desplaçament total. Vista de la deformada amb factor d'escala 100.

G.2.2. Càrrega deguda al pes del vehicle

La forma en que s'han distribuït els desplaçaments en la superfície del frontal han estat molt similars a les obtingudes a l'apartat anterior en cadascun dels casos. Així, les diferencies amb l'apartat anterior bàsicament són dues: la magnitud, i el sentit de les càrregues. Ara el valor de les càrregues és menor i per tant les deformacions resultants també són menors. Tot i que la càrrega aerodinàmica tenia una component 'X', la que dominava era la component 'Z'. Així, en el cas que es tracta ara la component 'Z' té signe contrari al de l'apartat anterior i ha provocat unes deformacions en sentit contrari a l'anterior.

El que s'ha explicat es pot comprovar comparant la Figura 93 amb 97, Figura 44 amb 91, i Figura 89 amb 99.

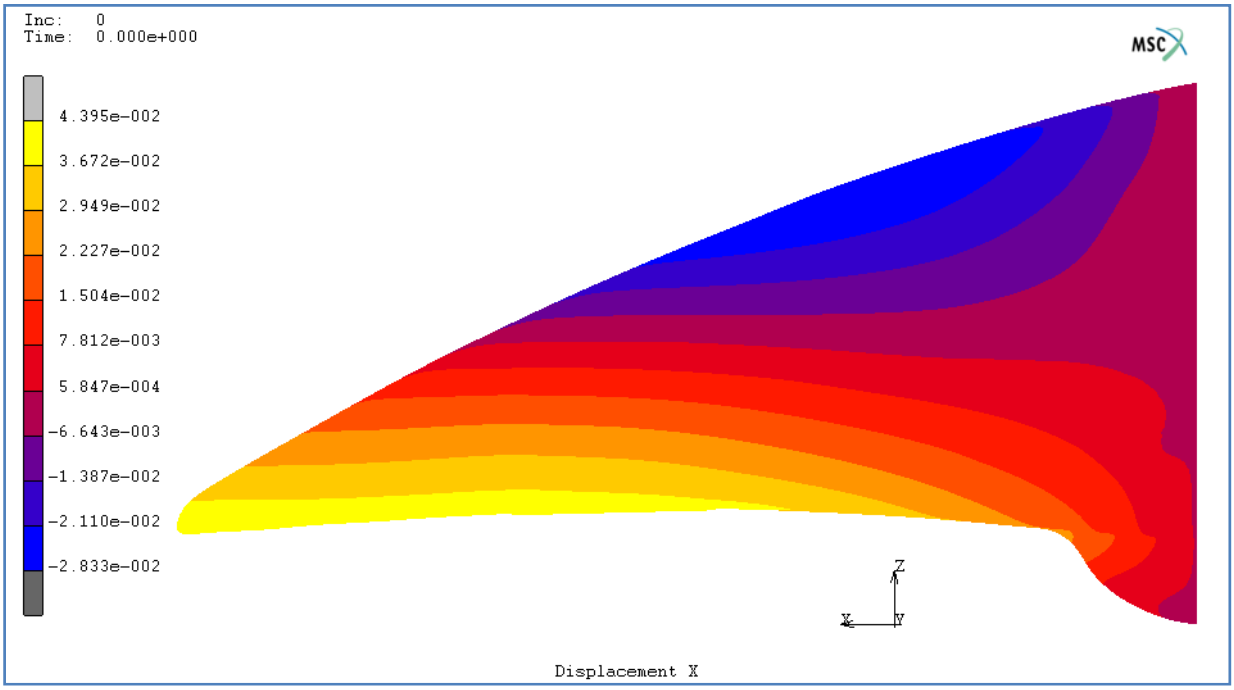


Figura 97. Material sandwitch amb càrregues degudes al pes. Desplaçament en l'eix 'X'.

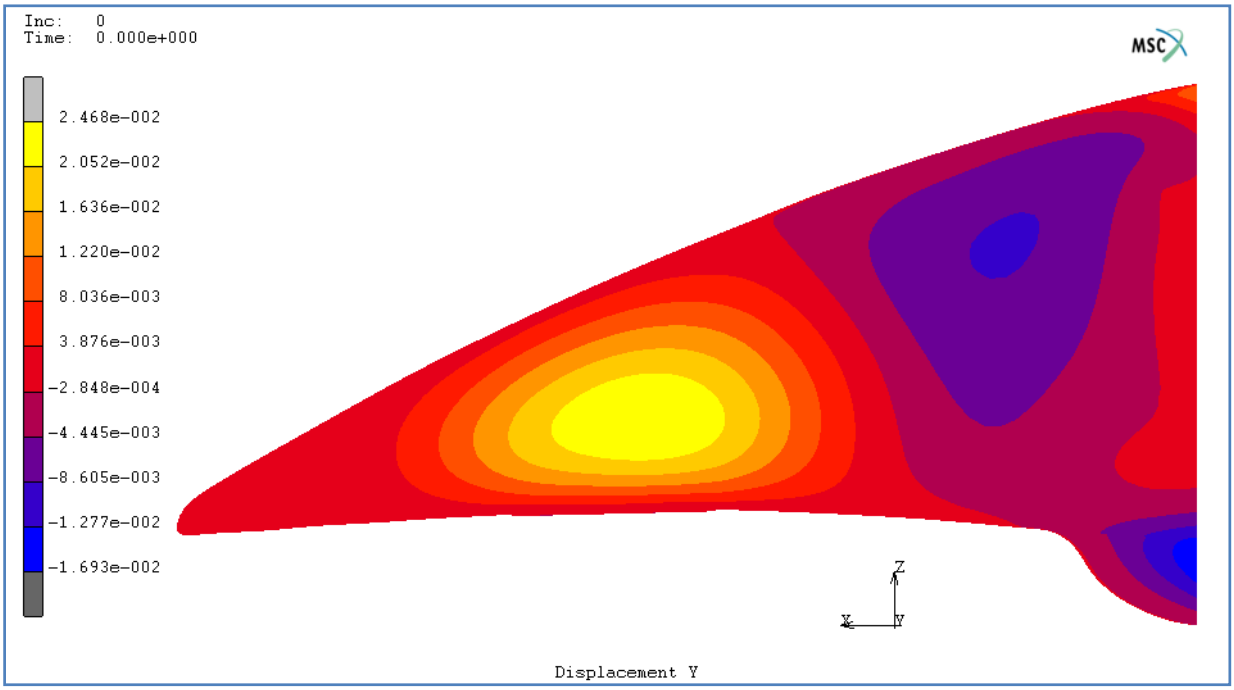


Figura 98. Material sandwitch amb càrregues degudes al pes. Desplaçament en l'eix 'Y'.

Figura 99. Material sandwitch amb càrregues degudes al pes. Desplaçament en l'eix 'Z'.

Així, de la mateixa manera que s'ha invertit el sentit de les deformacions pel cas de l'estructura sandwitch ha succeït amb la peça de laminat.

G.3. Tensió

G.3.1. Material isotròpic

Tensió màxima (valors en MPa) per al material isotròpic				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (tracció)	1528	Unió amb placa	389,3	Unió amb placa
Component 11 (compressió)	-599,6	Unió amb placa	-586,8	Unió amb placa
Component 22 (tracció)	1201	Cargol inferior	316,6	Sota cargol inferior
Component 22 (compressió)	-480,6	Zona propera a placa	-972,5	Cargol inferior

Taula 12. Valors de tensió màxima per al material isotròpic en les dues hipòtesis de càrrega.

Tal com s'observa en la Taula 12, per la càrrega aerodinàmica se superen les tensions admissibles tant a tracció com a compressió. Per la càrrega deguda al pes del vehicle se superen les tensions admissibles en compressió. De totes formes cal dir que aquestes tensions màximes que s'han obtingut estan molt concentrades en punts concrets.

En les Figueres 100, 101, 102, i 103 es pot observar la localització de les zones de màxima tensió mostrades en la Taula 12.

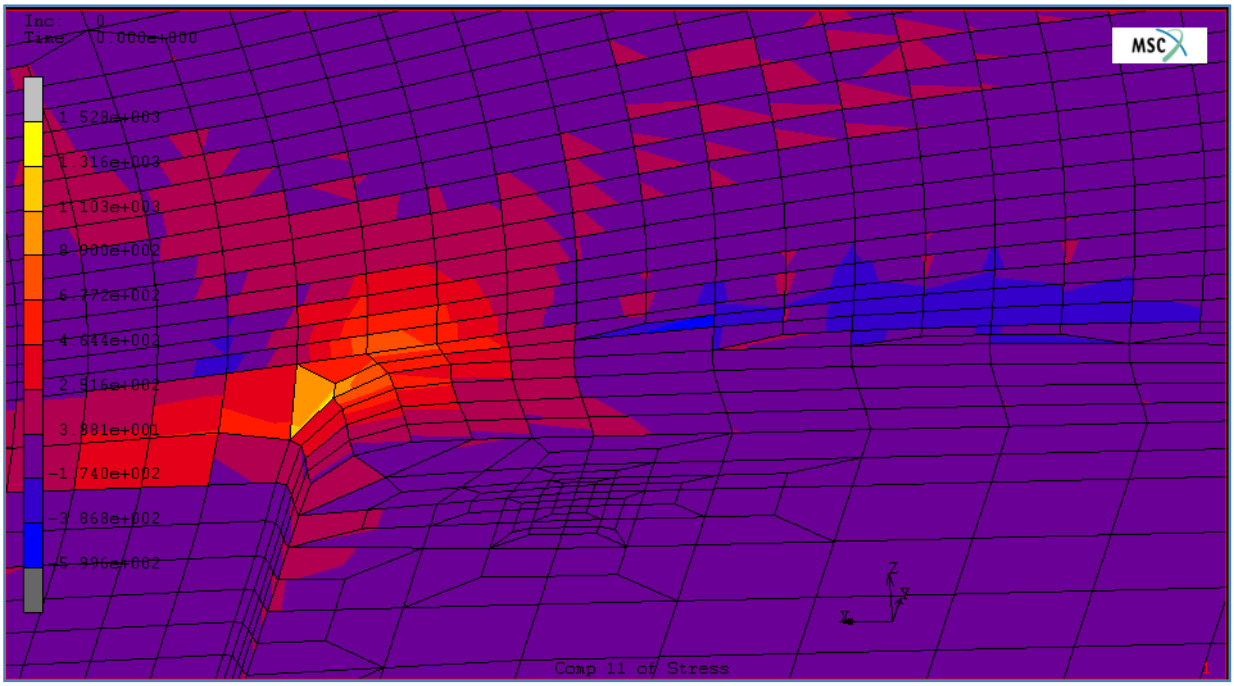
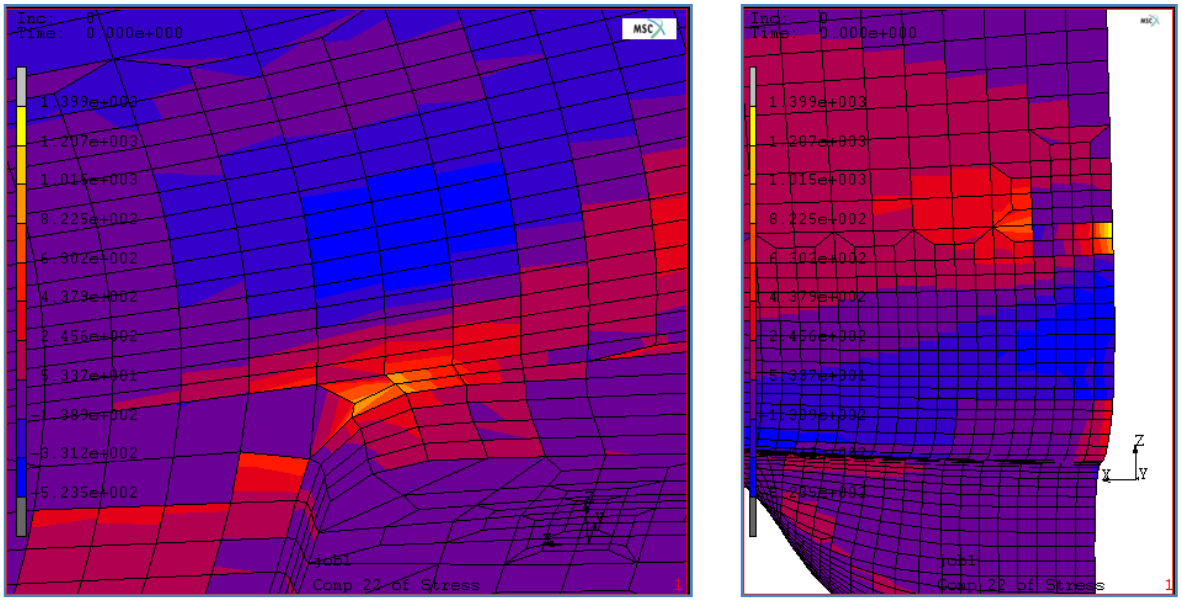
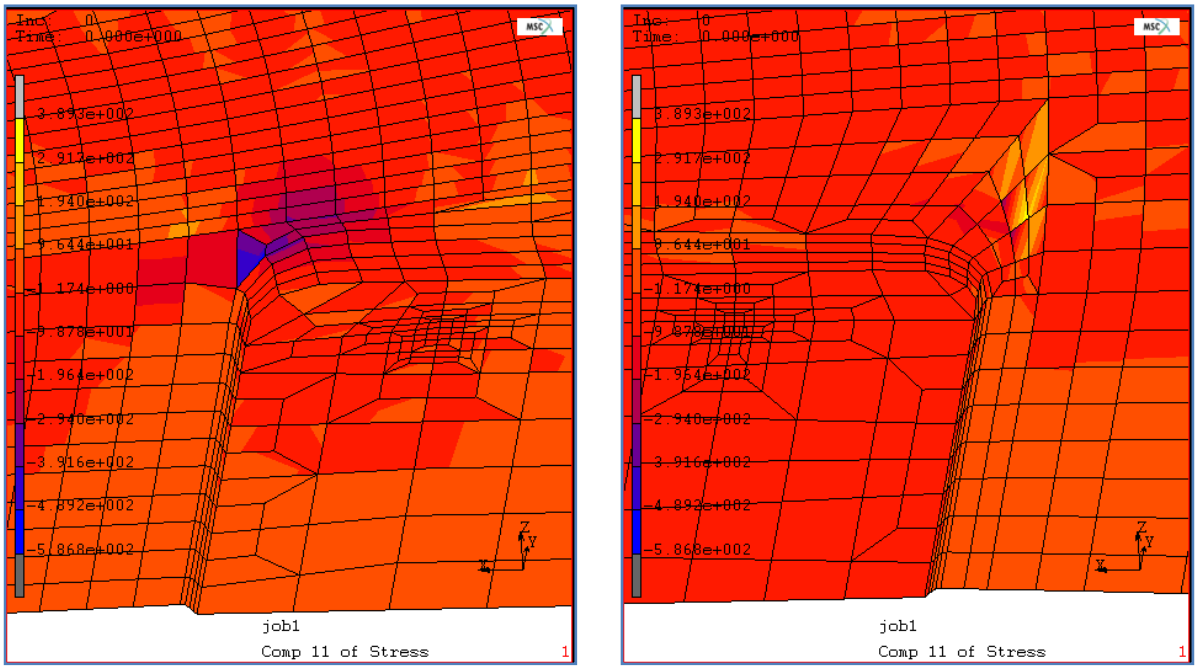


Figura 100. Component 11 de la tensió deguda a la càrrega aerodinàmica. La zona de màxima tracció (color groc) i màxima compressió (color blau) es troben molt propers.



(a) **(b)**

Figura 101. Component 22 de la tensió deguda a la càrrega aerodinàmica. (a): zona de màxima compressió (color blau). (b): la zona de màxima tracció (color groc) és on va cargolat amb la resta de la carrosseria.



(a) **(b)**

Figura 102. Component 11 de la tensió deguda a la càrrega del pes. (a): zona de màxima compressió (color blau). (b): la zona de màxima tracció (color groc).

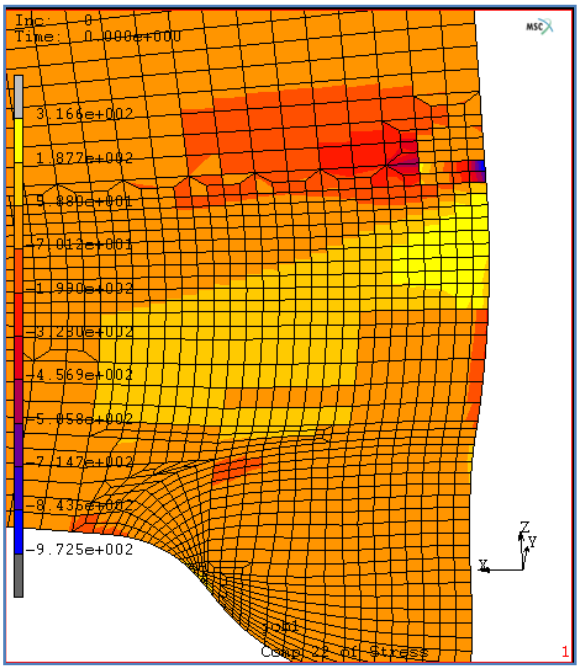


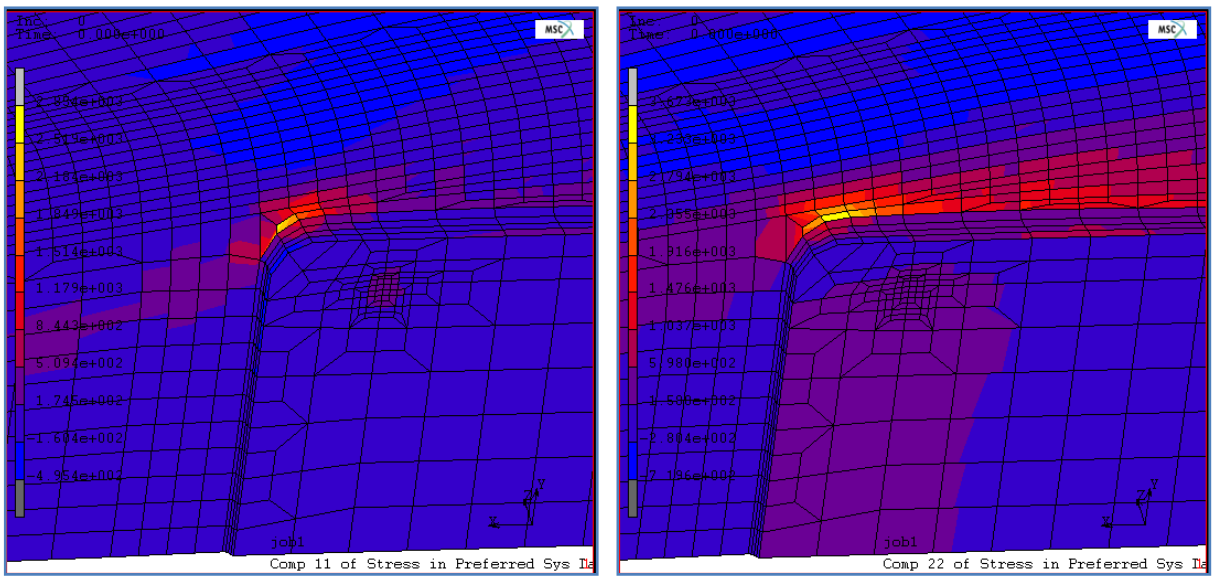
Figura 103. Component 22 de la tensió deguda a la càrrega del pes. La zona de màxima tracció (color groc) està situada sota el cargol. La zona de màxima compressió (color blau) coincideix amb el cargol.

G.3.2. Material laminat

Tensió màxima (valors en MPa) per al material laminat				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (tracció)	2854	Unió amb placa Capa 1, Ply_31	672,3	Unió amb placa Capa 4, Ply_54
Component 11 (compressió)	-1810	Unió amb placa Capa 4, Ply_54	-984,1	Unió amb placa Capa 1, Ply_31
Component 22 (tracció)	3673	Unió amb placa Capa 1, Ply_31	1098	Unió amb placa Capa 4, Ply_54
Component 22 (compressió)	-2797	Unió amb placa Capa 4, Ply_54	-1347	Unió amb placa Capa 1, Ply_31

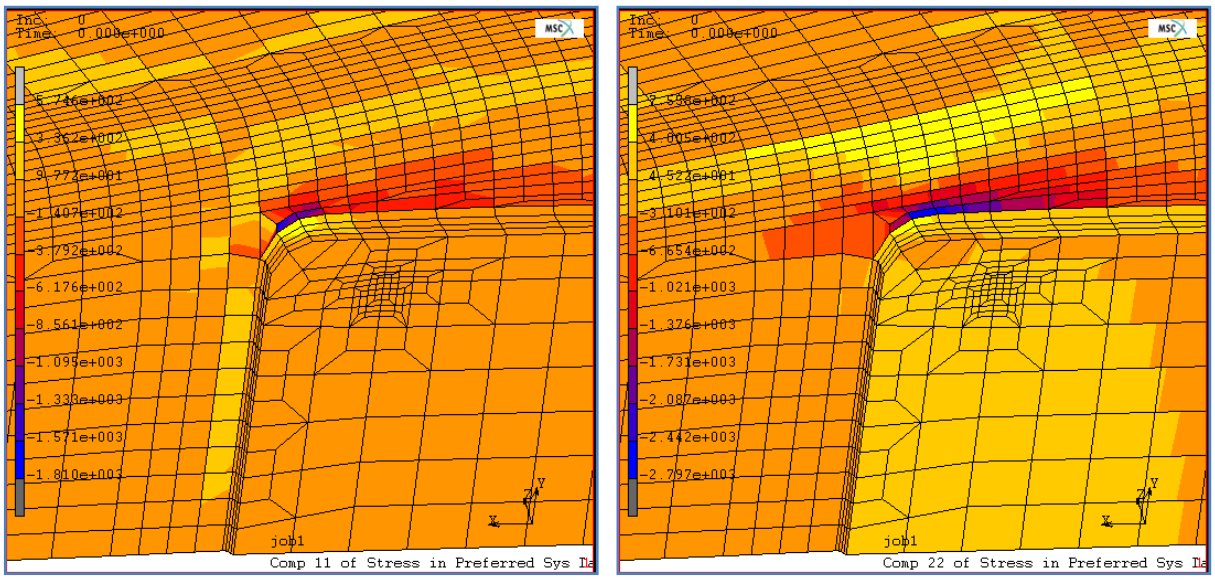
Taula 13. Valors de tensió màxima per al material laminat en les dues hipòtesis de càrrega.

En el material laminat se superen les tensions admissibles en tracció i compressió en les dues hipòtesis de càrrega. En les Figures 104 i 105 s'observa en es localitzen les tensions màximes per la càrrega aerodinàmica.



(a) **(b)**

Figura 104. Tensions creades per la càrrega aerodinàmica en la capa exterior del material laminat. Les zones de màxima tracció (color groc) es troben al mateix lloc tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 105. Tensions creades per la càrrega aerodinàmica en la capa interior del material laminat. Les zones de màxima compressió (color blau) es troben al mateix lloc tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).

També s'ha comprovat quines eren les zones més crítiques per a les càrregues degudes al pes. La zona amb tensions majors ja estat la mateixa cantonada de la placa que la càrrega del cas anterior. Amb la diferencia, que el valor de les tensions han estat menors i que on abans hi havia compressió ara hi ha tracció, i on abans hi havia tracció ara hi ha compressió.

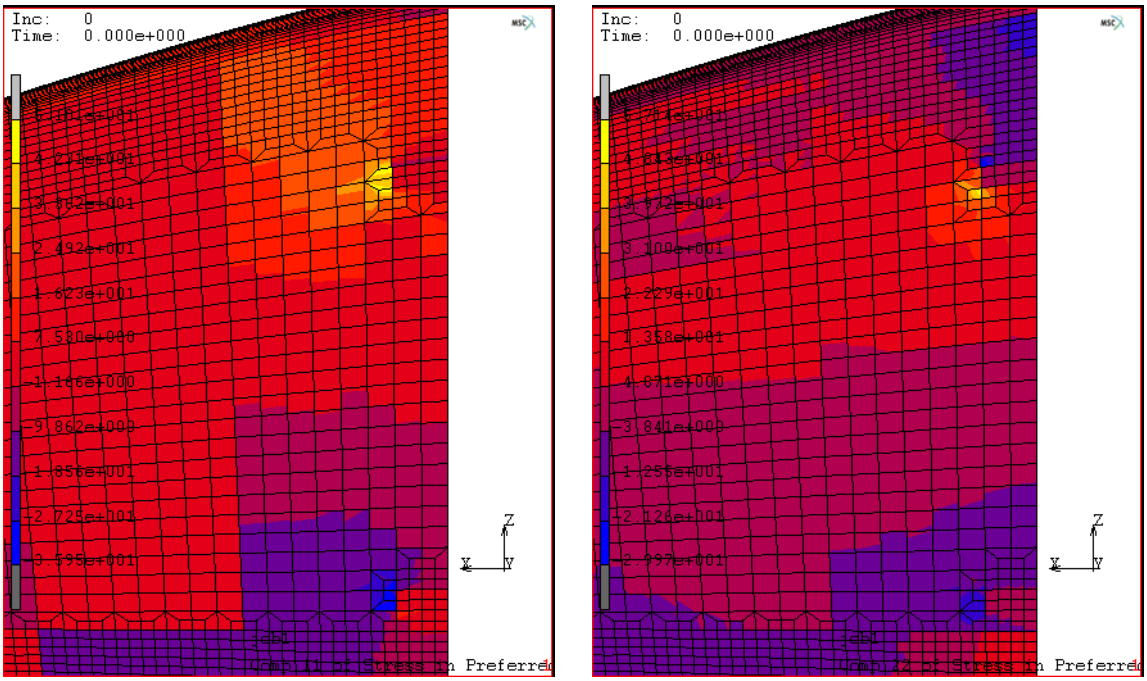
G.3.3. Material sandwitch

Tensió màxima (valors en MPa) per al material sandwitch				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (tracció)	51,0	Cargol superior Capa 6, Ply_21	14,3	Protuberància inferior Capa 9, Ply_14
Component 11 (compressió)	-44,2	Cargol inferior Capa 2, Ply_12	-18,4	Cargol superior Capa 9, Ply_24
Component 22 (tracció)	57,1	Cargol superior Capa 8, Ply_23	13,8	Protuberància inferior Capa 8, Ply_13
Component 22 (compressió)	-45,7	Cargol inferior Capa 4, Ply_24	-15,5	Cargol superior Capa 8, Ply_23

Taula 14. Valors de tensió màxima per al material sandwitch en les dues hipòtesis de càrrega.

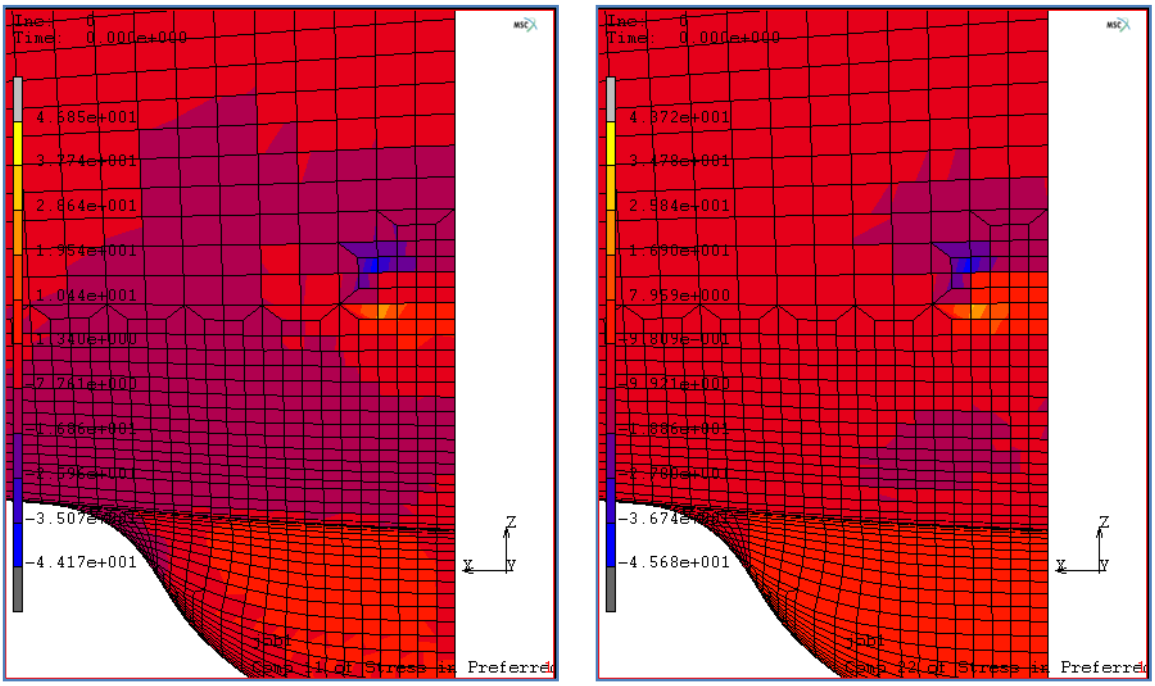
En la Taula 14 s'observen les tensions màximes per al material sandwitch. Aquest cas els valors de les tensions contrasten amb els dos materials anteriors ja que els valors són molt més baixos. En cap cas s'arriba la tracció admissible 500 MPa, ni a la compressió admissibles de 370 MPa.

En les Figures 106, 107, 108, i 109 s'observa on estan localitzats els punts de màxima tensió mostrats a la Taula 14.



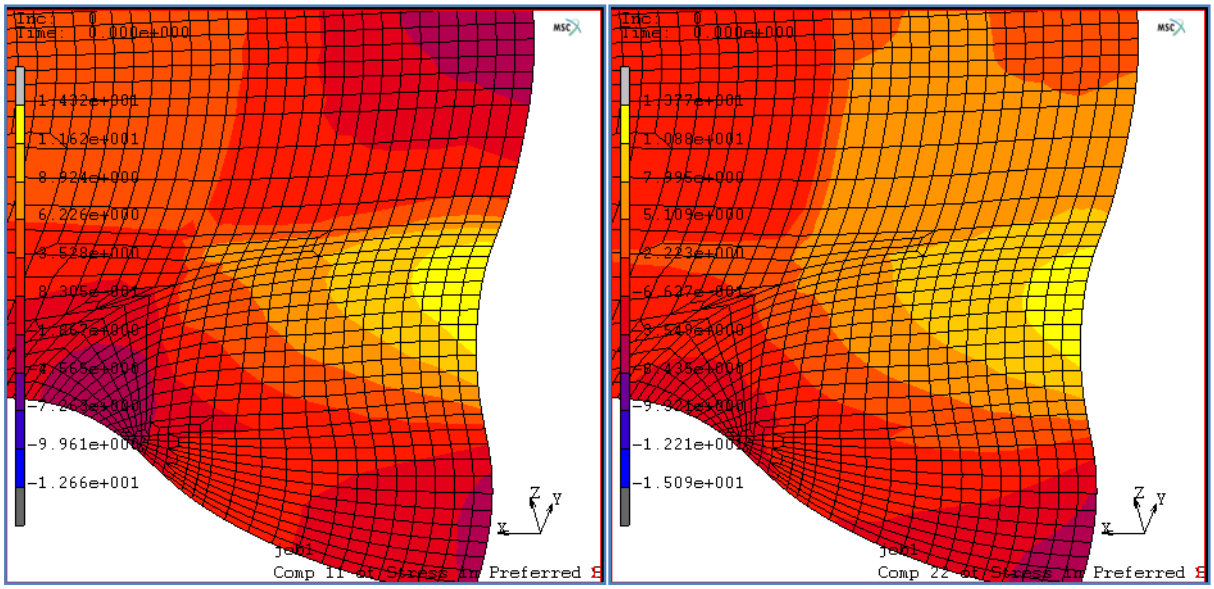
(a) **(b)**

Figura 106. Tensions creades per la càrrega aerodinàmica en el material sandwitch. Les zones de màxima tracció (color groc) es troben en el cargol superior tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



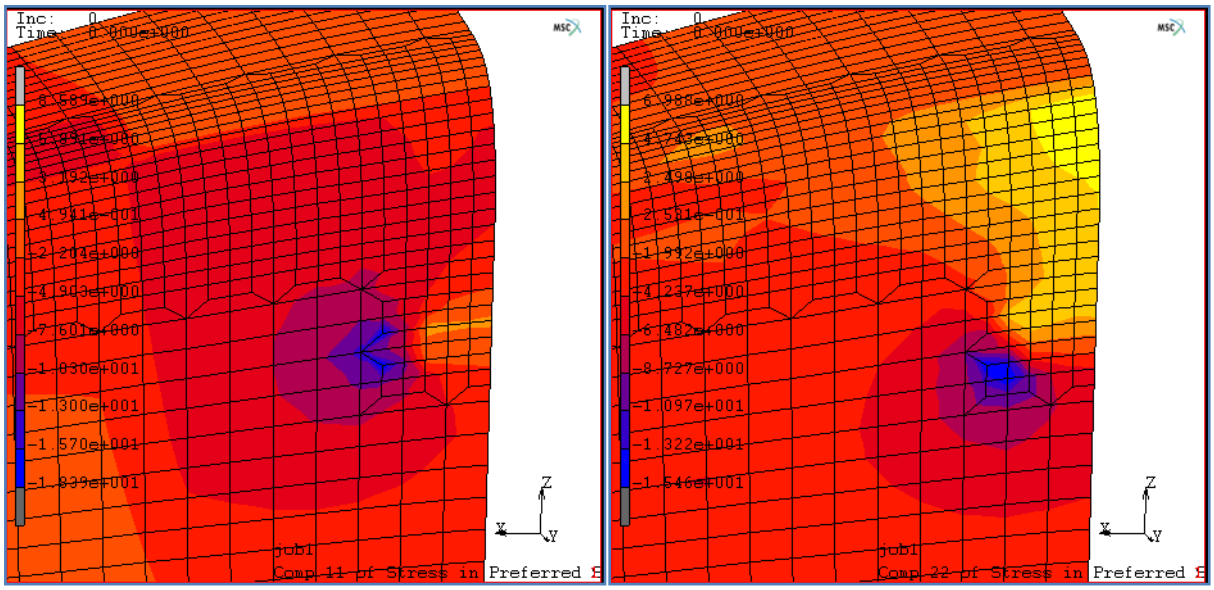
(a) **(b)**

Figura 107. Tensions creades per la càrrega aerodinàmic en el material sandwitch. Les zones de màxima compressió (color blau) es troben en el cargol inferior tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 108. Tensions creades per la càrrega deguda al pes en el material sandwitch. Les zones de màxima tracció (color groc) es troben en la protuberància de la part inferior tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 109. Tensions creades per la càrrega deguda al pes en el material sandwitch. Les zones de màxima compressió (color blau) es troben en el cargol superior tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).

G.4. Deformació elàstica

G.4.1. Material isotròpic

Deformació elàstica màxima ($x10^6$ $\mu\varepsilon$) per al material isotròpic				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (positiu)	0,089	Unió amb placa	0,014	lateral
Component 11 (negatiu)	-0,028	lateral	-0,036	Unió amb placa
Component 22 (positiu)	0,160	Unió amb placa	0,008	Sota el cargol inferior
Component 22 (negatiu)	-0,012	Sota el cargol inferior	-0,067	Unió amb placa

Taula 15. Valors de la deformació elàstica màxima per al material isotròpic en les dues hipòtesis de càrrega.

Tal com es pot observar en la Taula 15, per a la càrrega aerodinàmica es supera la deformació elàstica màxima admissible de $\pm 0{,}025 x10^6$ $\mu\varepsilon$. En el cas de la càrrega deguda al pes, la deformació elàstica admissible només es supera en compressió del material.

En les Figures 110, 111, i 112 es pot observar la localització de les deformacions màximes per la càrrega aerodinàmica.

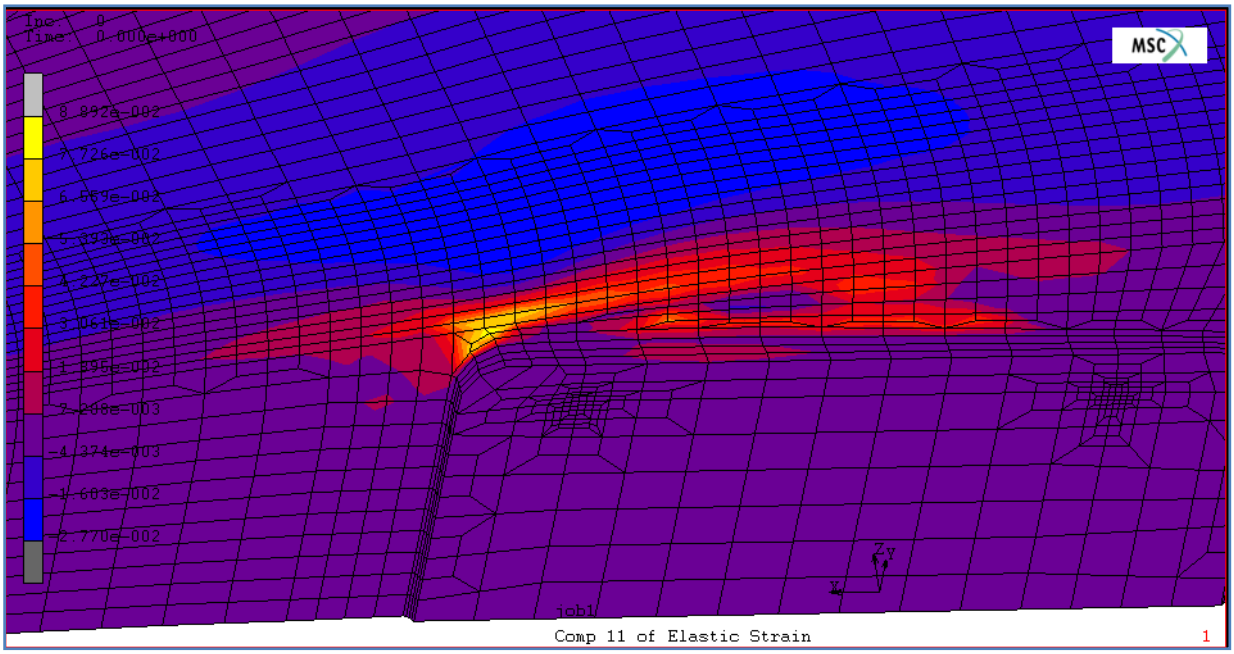


Figura 110. Component 11 de la deformació elàstica creada per la càrrega aerodinàmica en el material isotròpic. La zones de màxima deformació negativa (color blau) es troba propera a la zona de màxima deformació positiva (color groc).

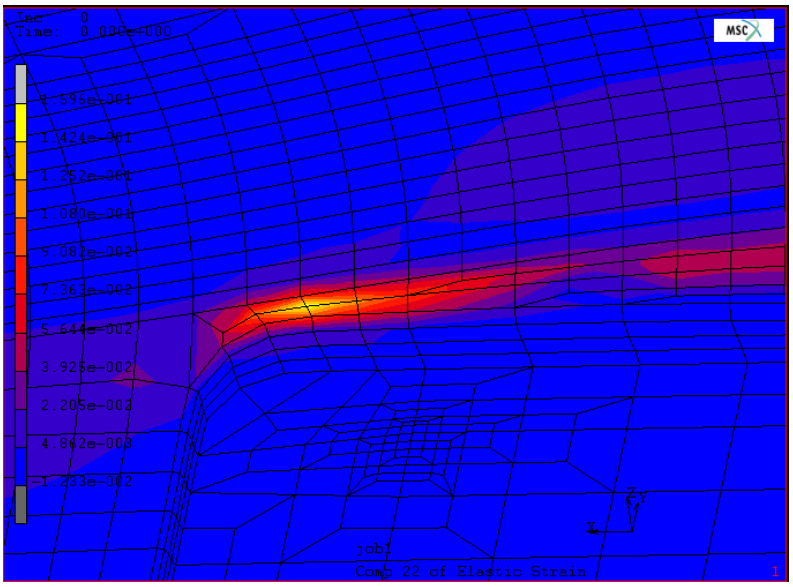


Figura 111. Component 22 de la deformació elàstica creada per la càrrega aerodinàmica en el material isotròpic. Zona de màxima deformació positiva (color groc).

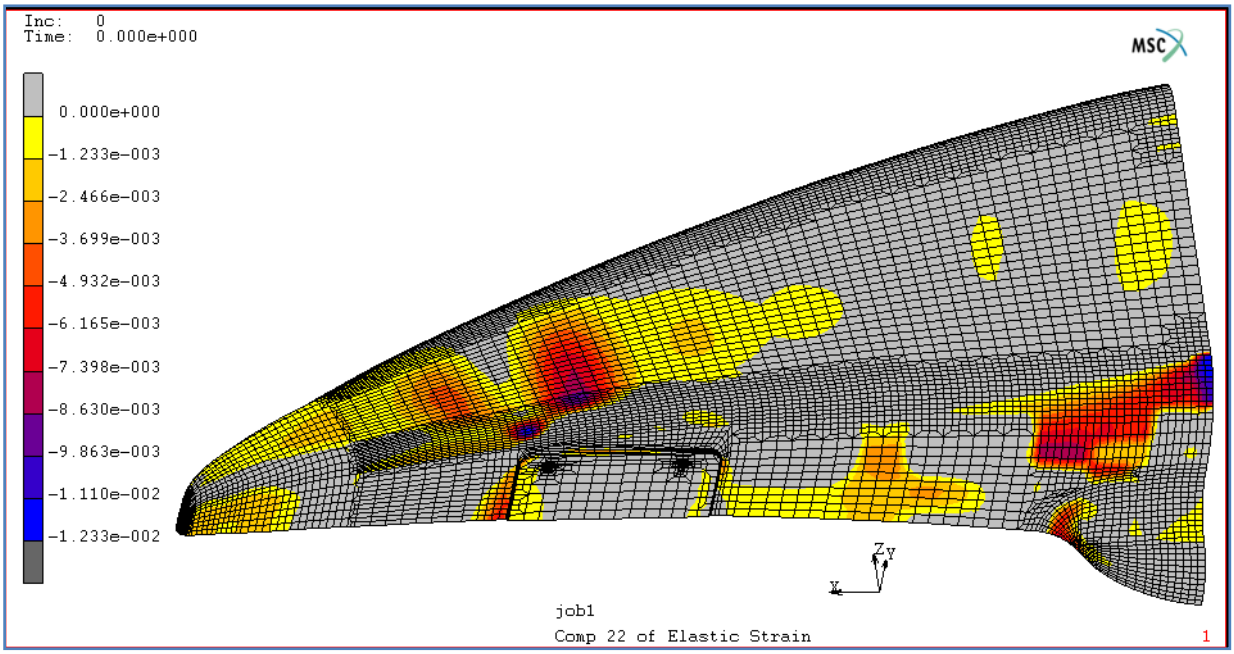


Figura 112. Component 22 de la deformació elàstica creada per la càrrega aerodinàmica en el material isotròpic. Hi ha dos punts de màxima deformació negativa (color blau).

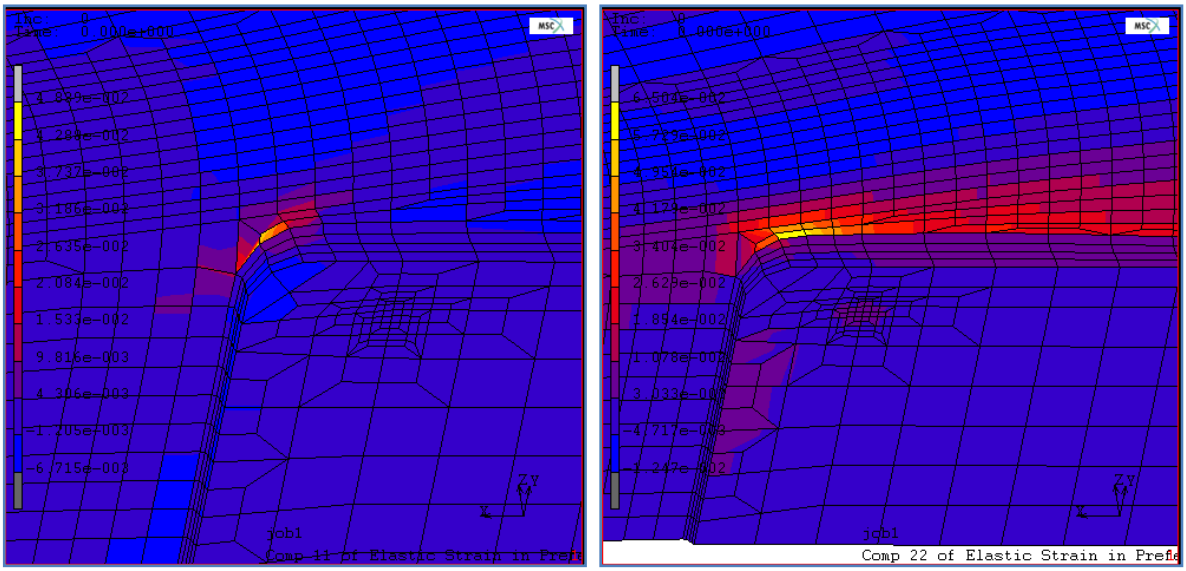
G.4.2. Material laminat

Deformació elàstica màxima ($x10^6$ $\mu\varepsilon$) per al material laminat				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (positiu)	0,048	Unió amb placa Capa 1, Ply_31	0,0062	Unió amb placa Capa 3, Ply_33
Component 11 (negatiu)	-0,032	Unió amb placa Capa 4, Ply_54	-0,010	Unió amb placa Capa 2, Ply_32
Component 22 (positiu)	0,048	Unió amb placa Capa 1, Ply_31	0,013	Unió amb placa Capa 4, Ply_34
Component 22 (negatiu)	-0,053	Unió amb placa Capa 4, Ply_54	-0,0049	Prop unió amb placa Capa 4, Ply_54

Taula 16. Valors de la deformació elàstica màxima per al material laminat en les dues hipòtesis de càrrega.

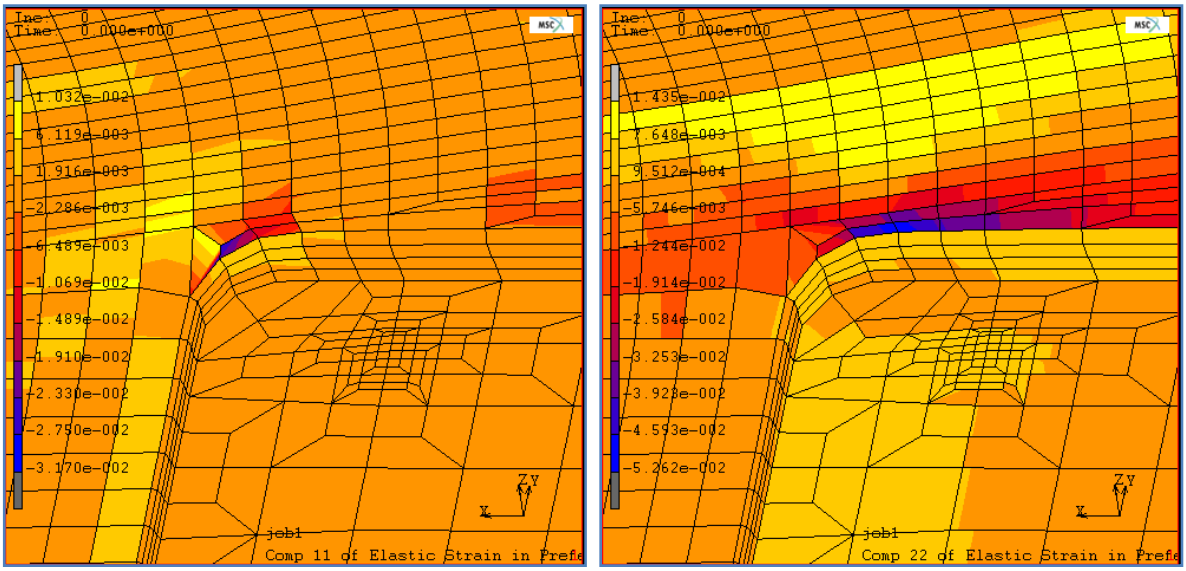
Tal com es pot observar en la Taula 16, per a la càrrega aerodinàmica es supera la deformació elàstica màxima admissible de $\pm 0{,}025 x10^6$ $\mu\varepsilon$. En canvi, el cas de la càrrega deguda al pes no es supera la deformació elàstica admissible.

En les Figures 113, 114, 115, i 116 es pot observar la localització de les deformacions màximes per als dos estats de càrrega.



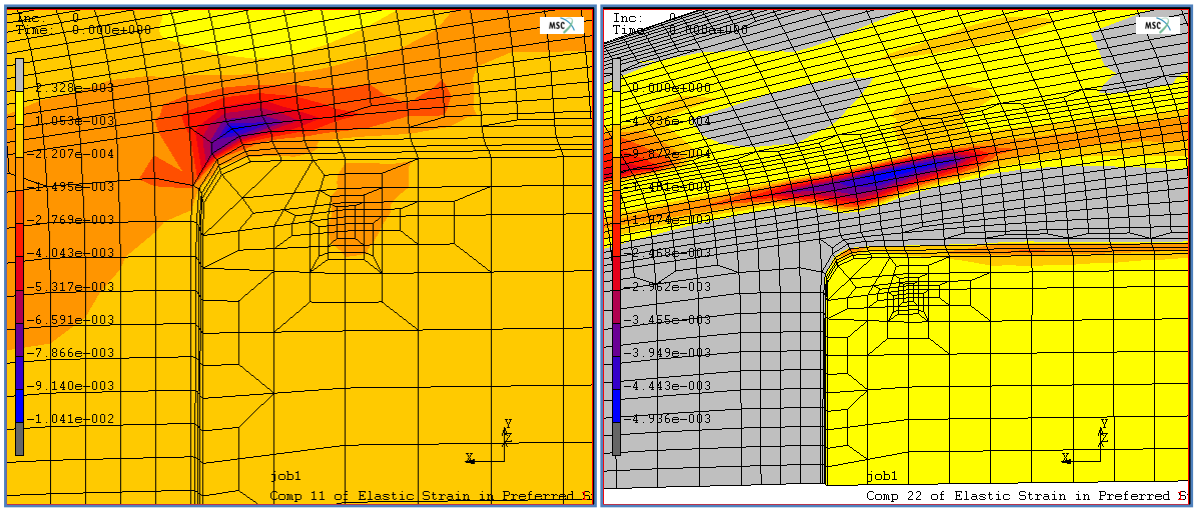
(a) **(b)**

Figura 113. Deformació elàstica deguda a la càrrega aerodinàmica en el material laminat. Les zones de màxima deformació positiva (color groc) es troben en el mateix lloc tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



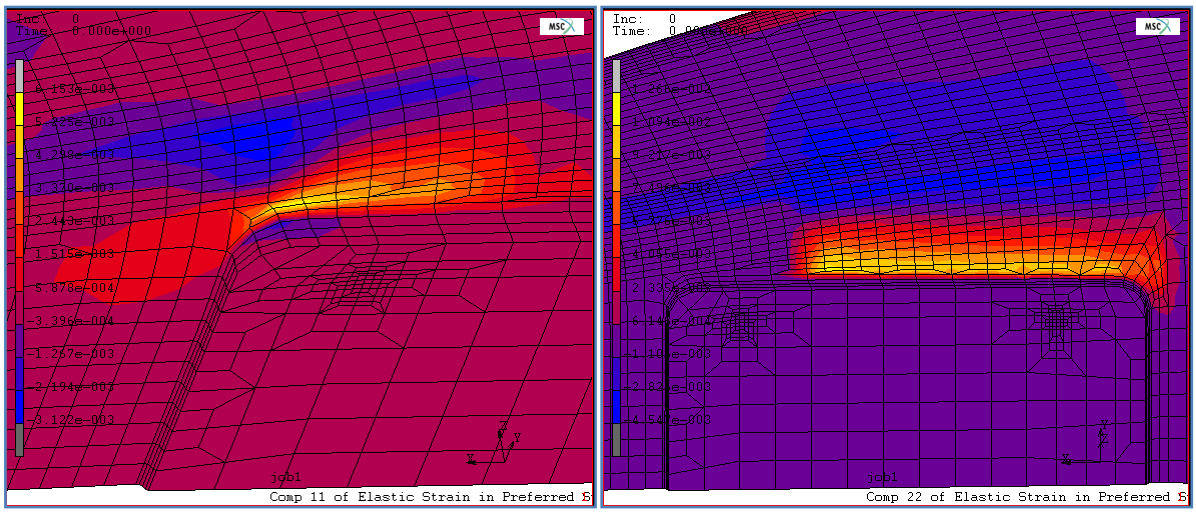
(a) **(b)**

Figura 114. Deformació elàstica deguda a la càrrega aerodinàmica en el material laminat. Les zones de màxima deformació negativa (color blau) es troben en el mateix lloc tant per la component 11 (a) com per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 115. Deformació elàstica de la càrrega deguda al pes en el material laminat. Zones de màxima deformació negativa (color blau) per la component 11 (a) i per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 116. Deformació elàstica de la càrrega deguda al pes en el material laminat. Zones de màxima deformació positiva (color groc) per la component 11 (a) i per la 22 (b).

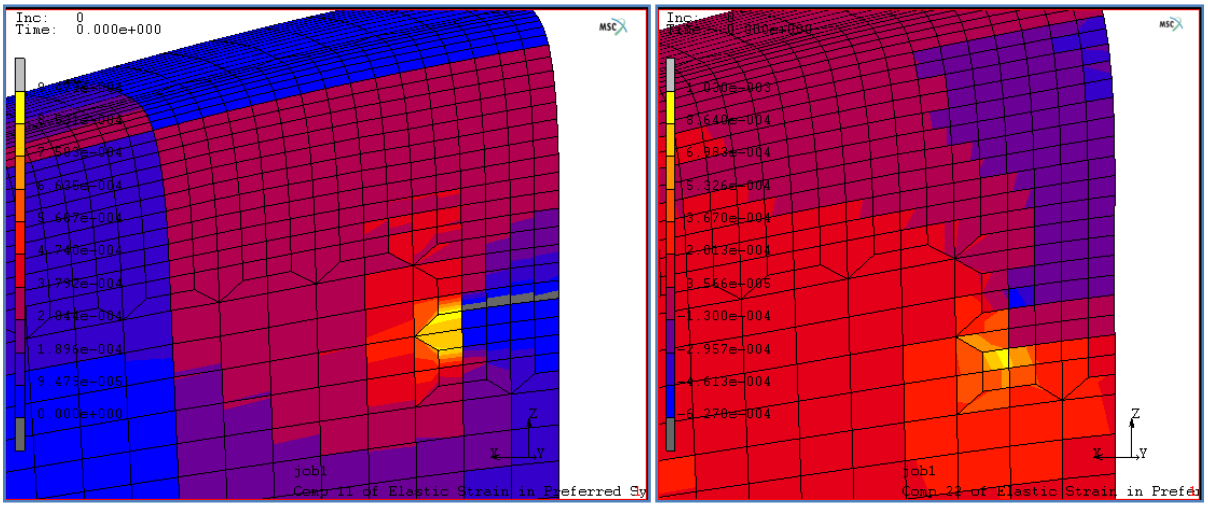
G.4.3. Material sandwitch

Deformació elàstica màxima ($x10^6$ $\mu\varepsilon$) per al material sandwitch				
	Càrrega aerodinàmica		Càrrega deguda al pes	
	valor	localització	valor	localització
Component 11 (positiu)	0,00095	Cargol superior Capa 9, Ply_24	0,00041	Cargol inferior Capa 3, Ply_13
Component 11 (negatiu)	-0,00078	Cargol inferior Capa 2, Ply_12	-0,00036	Cargol superior Capa 9, Ply_24
Component 22 (positiu)	0,00103	Cargol superior Capa 8, Ply_23	0,00025	Cargol superior Capa 1, Ply_21
Component 22 (negatiu)	-0,00088	Cargol superior Capa 1, Ply_21	-0,00029	Cargol superior Capa 8, Ply_23

Taula 17. Valors de la deformació elàstica màxima per al material sandwitch en les dues hipòtesis de càrrega.

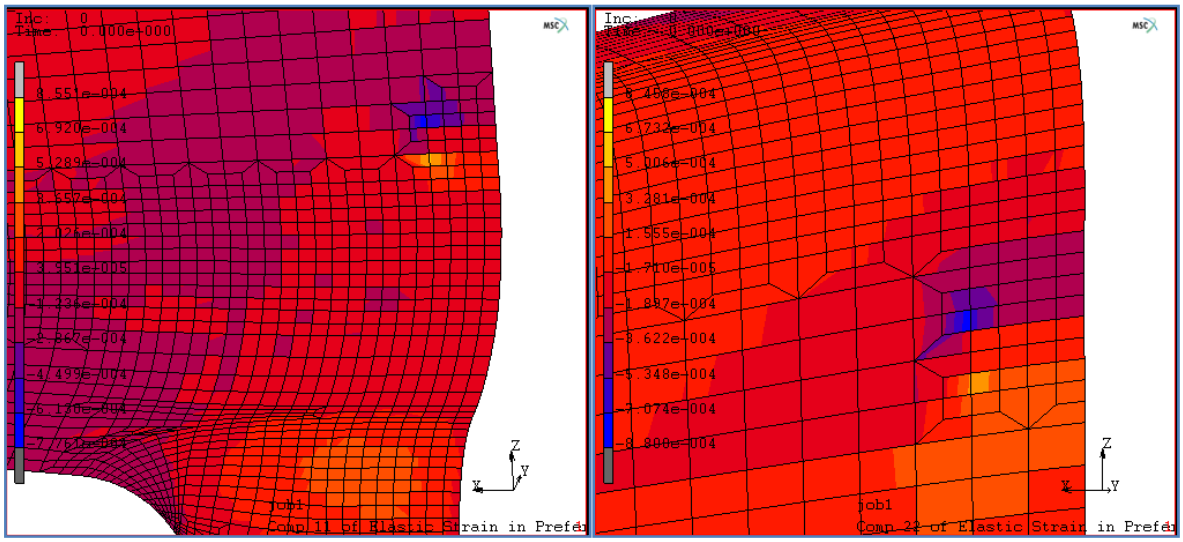
Tal com es pot observar en la Taula 16, en cap hipòtesis de càrrega es supera la deformació elàstica màxima admissible de $\pm 0{,}025 x 10^6$ $\mu\varepsilon$.

En les Figures 117, i 118 es pot observar la localització de les deformacions màximes per la càrrega aerodinàmica. I en les Figures 119, 120, i 121 es pot observar la localització de les deformacions màximes per la càrrega deguda al pes.



(a) **(b)**

Figura 117. Deformació elàstica deguda a la càrrega aerodinàmica en el material sandwitch. Zones de màxima deformació positiva (color groc) per la component 11 (a) i per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 118. Deformació elàstica deguda a la càrrega aerodinàmica en el material sandwitch. Zones de màxima deformació negativa (color blau) per la component 11 (a) i per la 22 (b).

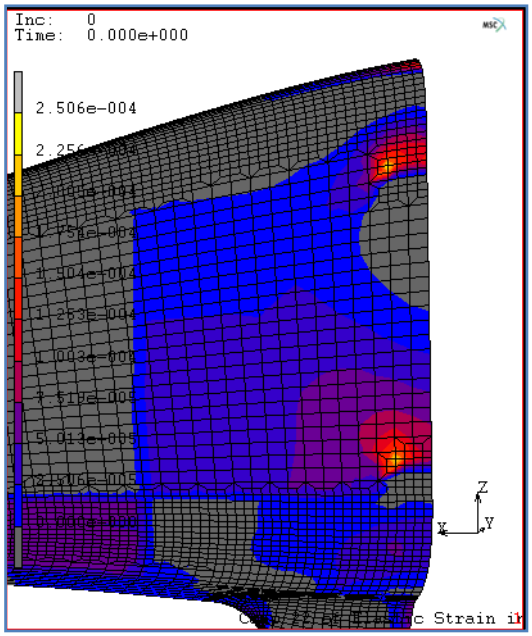
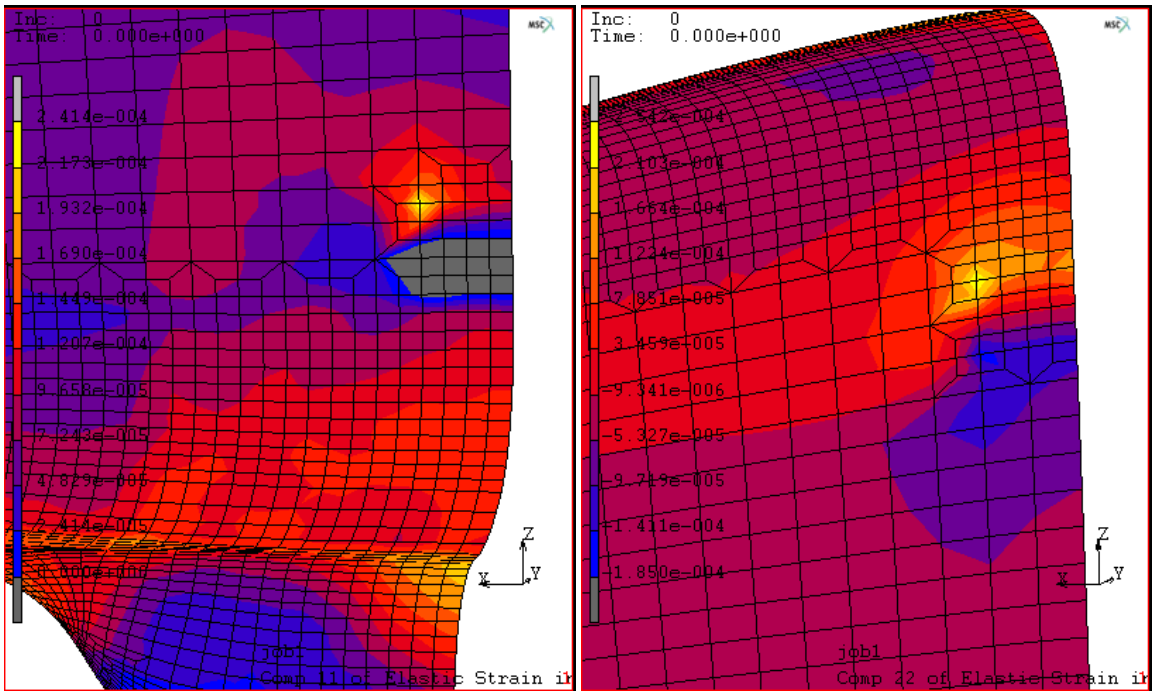
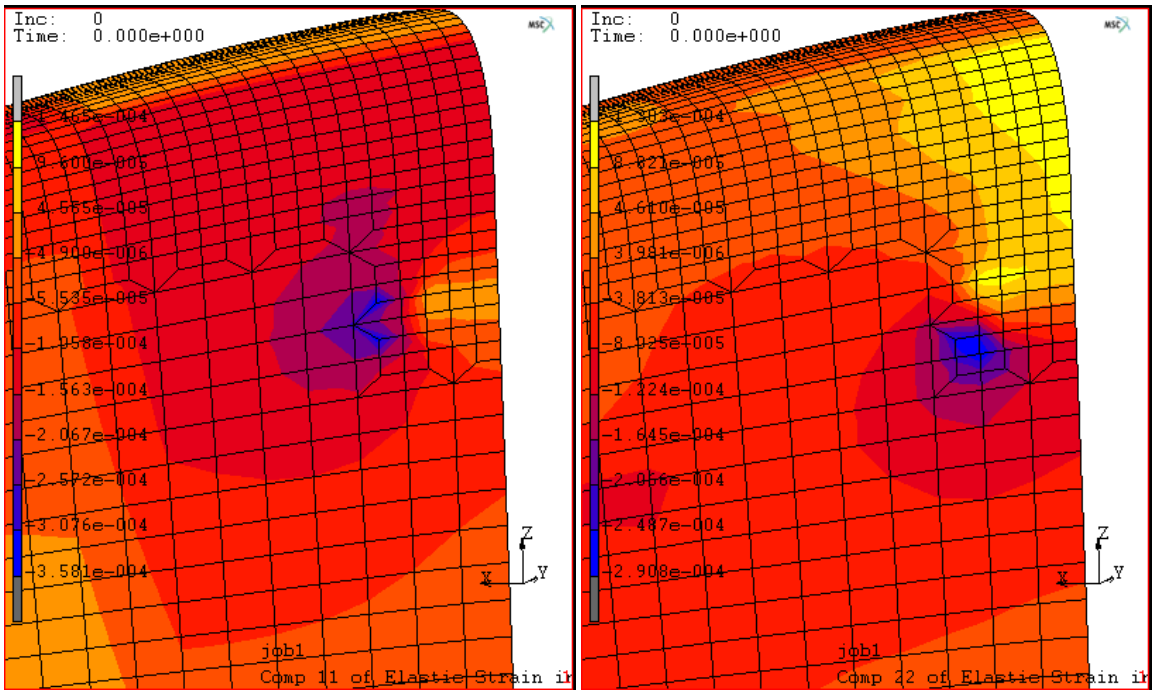


Figura 119. Deformació elàstica deguda a la càrrega de pes en el material sandwitch. Valors positius màxims de la component 22 de la capa 4 (Ply_24) molt propers als màxims.



(a) **(b)**

Figura 120. Deformació elàstica deguda a la càrrega del pes en el material sandwitch. Zones de màxima deformació positiva (color groc) per la component 11 (a) i per la 22 (b).



(a) **(b)**

Figura 121. Deformació elàstica deguda a la càrrega del pes en el material sandwitch. Zones de màxima deformació negativa (color blau) per la component 11 (a) i per la 22 (b).

Girona, 15 de juny de 2007

Marc Casas Bosch

El redactor