

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials



Disseny i anàlisi d'una taula de snowboard

Memòria

Autor: Ivan Luis Vitorino Morais
Director: Josep Maria Pons Poblet
Codirector: Francesc Roure Fernández
Convocatòria: Setembre 2018

Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Índex

1. GLOSSARI	3
2. PRÒLEG	4
2.1 ORIGEN I MOTIVACIÓ	4
2.2 REQUERIMENTS PREVIS	4
3. INTRODUCCIÓ.....	5
3.1 OBJECTIUS DEL PROJECTE.....	5
3.2 ABAST DEL PROJECTE.....	5
4. HISTORIA/ESTUDI DEL MERCAT	6
5. CONCEPTES BÀSIC D'UNA TAULA DE SNOW	7
5.1 PARTS DEL SNOWBOARD	7
5.2 PERFILS	8
5.3 FORMES	10
6. ESTRUCTURA INTERNA DEL SNOW	11
7. ANÀLISI D'ESFORÇOS A SUPORTAR	15
7.1 FLEXIÓ	15
7.2 TORSIÓ.....	17
8. DISSENY	19
8.1 DEFINICIÓ DELS PARÀMETRES.....	19
8.2 PREDIMENSIONAMENT	20
8.3 ELECCIÓ DEL MATERIAL.....	24
8.4 DIAGRAMES D'ESFORÇOS	26
8.5 DISSENY DE LA SECCIÓ	29
9. ANÀLISI FÍSIC DEL DISSENY	29
9.1 PARÀMETRES DE LA SIMULACIÓ	30
9.2 CÀLCUL DELS VALORS TEÒRICS.....	35
9.3 SIMULACIÓ AMB ANSYS.....	41
9.4 ANÀLISI DELS RESULTATS	45
10. OPTIMITZACIÓ DEL DISSENY	47
11. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	48
12. PRESSUPOST.....	49
13. CONCLUSIONS	50
14. BIBLIOGRAFIA	51
PLANÒLS	52

1. Glossari

ANSYS: Software dissenyat per la simulació de variables físiques que utilitza el mètode dels elements finits.

Camber: Elevació de la geometria central de la taula

Coupling: Acoblament de graus de llibertat de 2 nodes en les simulacions.

Cola Epoxi: cola de dos components diferents aplicacions en el món industrial

Material Isotòpic: Material que té les mateixes propietats mecàniques en totes les direccions.

Material ortotròpic: Material amb propietats mecàniques diferents depenent de l'orientació estudiada.

Nose: Extrem davanter de la taula.

Raider: Persona/usuari que utilitza la taula de snowboard.

SolidWorks: Programari especialitzat en el disseny i creació de peces en 3D.

Switch: Conducció de la taula amb el tail a la part davantera.

Tail: Extrem posterior de la taula.

2. Pròleg

2.1 Origen i motivació

El principal motiu que em va portar a realitzar aquest projecte va ser la meva passió pel món dels esports de neu, ja que durant tota la temporada d'hivern realitzo tant snowboard com esquí. A més, la meva curiositat en l'àmbit d'assignatures com resistència de materials i mecànica em van empènyer a cursar les optatives d'ampliació d'aquestes dues.

Aleshores, a l'hora d'escollir un tema per la realització d'aquest projecte volia intentar aplicar els coneixements obtinguts en aquestes assignatures i d'altra banda poder aplicar-los en algun exemple en el qual ja hagués tingut alguna experiència. Seguidament vaig pensar a realitzar el projecte sobre el disseny d'una taula que en un futur, si volgués, pogués arribar a fabricar i que fos completament útil per realitzar descensos.

2.2 Requeriments previs

Per la realització d'aquest treball s'han de tenir clar els conceptes d'assignatures com Resistència de Materials (moments flectors, deformacions, etc.) a més a més de tenir coneixements sobre materials compostos.

D'altra banda s'han de tenir coneixements sobre l'anàlisi pel Mètode dels Elements Finitos per computador mitjançant el Mechanical APDL d'ANSYS per realitzar les simulacions.

Finalment, s'han de tenir coneixements bàsics de SolidWorks per tal de crear els diferents models de la taula per fer les simulacions.

3. Introducció

El snowboard és un esport d'hivern que consisteix a realitzar descensos amb una planxa de neu (o snowboard) en la qual l'usuari està fixat mitjançant les dues fixacions que estan unides a la taula.

Com en tots els àmbits, l'esport segueix evolucionant amb l'aparició de nous materials i optimitzant els seus dissenys, evolucions que permeten una millor valoració per part de l'usuari tant en les prestacions com en la comoditat a l'hora de realitzar el descens.

3.1 Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és principalment realitzar un estudi que permeti fer un disseny per poder fabricar una taula personal per la realització de snowboard. Dins d'aquest objectiu general la taula final ha de ser una taula polivalent bona per qualsevol tipus de neu.

A més es vol estudiar i quantificar els esforços als quals una taula d'aquestes característiques pot estar sotmès durant el seu ús.

D'altra banda també es vol aprofundir en els coneixements adquirits en les assignatures d'Ampliació de Resistència de Materials, on es tractaran principalment les estructures compostes, i d'Anàlisi de Components Estructurals i Mecànics pel Mètode dels Elements Finitos, on es posaran en pràctica els coneixements sobre les simulacions amb el programa d'ANSYS.

3.2 Abast del projecte

Aquest projecte només abastarà les fases de recerca, disseny i anàlisi del comportament mecànic. Aquest no abastarà la fabricació tot i que més endavant es té pensat dur-la a terme.

4. Historia/Estudi del mercat

El snowboard és un esport que neix únicament amb una destinació d'ús lúdic. Actualment a Espanya juntament amb l'esquí són els esports d'hivern més practicats.

En l'actualitat existeixen una gran quantitat d'empreses que es dediquen a la fabricació de taules de snowboard, però si un s'ubica cent anys enrere pot observar que era un esport que encara no existia. La primera persona a dissenyar un prototip similar a les característiques del Snow fou M.J.Burchett, on va unir dues teles a una fusta de contraxapat quedant unit el peu a la fusta per primera vegada, però va quedar en una anècdota d'ús propi.

No va ser fins al 1965 que es va comercialitzar la primera idea d'una taula de snow, Sherman Poppen va unir dos esquís i li va afegir una corda a la punta per tal de proporcionar estabilitat a l'usuari.

Es van desenvolupar molts prototips al llarg dels anys cadascun amb una idea innovadora però no va ser fins al 1977 quan es va fabricar el que es podria arribar a considerar un antecessor de les taules de snow. Va ser creada per Jake Burton i Tom Sims, entre els dos van arribar a construir un disseny que constava de cantells metàl·lics i un sistema de fixació dels peus que permetia a l'usuari està fixat a la taula.



Figura 1 Taula de Poppen



Figura 2: Primeres taules de Burton

L'esport va anar evolucionant al llarg dels anys però no va ser fins al 1998, als Jocs Olímpics de Nagano, que es va estrenar com a modalitat olímpica.

Des de llavors l'esport ha anat evolucionant creant així nous requisits i actualment es fabriquen gran varietat de taules cadascuna amb alguna característica diferent de l'anterior.



Figura 3: Varietat de formes i dimensions

5. Conceptes bàsic d'una taula de Snow

Per tal de poder entendre bé l'estructura d'una taula de Snowboard s'han de conèixer les diferents parts i perfils que la componen.

5.1 Parts del snowboard

- Nose

És la part davantera de la taula, està lleugerament aixecada per tal d'evitar els possibles obstacles o que no es quedi clavada a la neu.

- Tail

És la part posterior de la taula, en aquest cas tant pot estar aixecada com ser quasi plana, segons la finalitat de la taula.

- Waist

És la part més estreta de la taula i coincideix amb el seu centre.

- Aresta Efectiva ("Effective Edge")

És la part del cantell que està en contacte amb la neu, la curvatura d'aquesta determinarà el radi de gir de la taula.

- "Binding Mounts"

Forats de taula que permeten muntar les fixacions.

- Base

Superfície inferior de la taula que garanteix el lliscament.

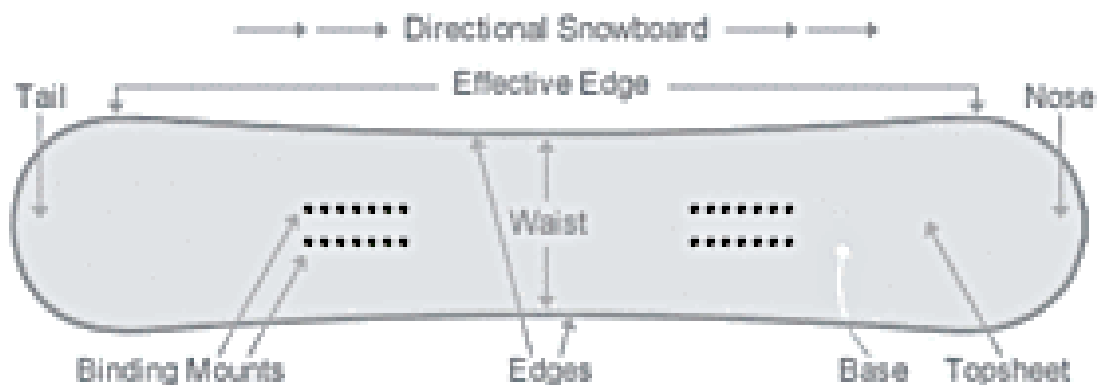


Figura 4: Esquema de les parts d'una taula de snowboard

5.2 Perfils

- Camber:

El perfil Camber és el perfil més utilitzat en el disseny de snowboards. Aquest consisteix en un bombeig de la part central de la taula que descriu un arc convex. La taula quan està en repòs no té en contacte amb el terra en la part central. Aquesta geometria ofereix màxima energia al gir i a l'hora de saltar. Si la taula és molt rígida no és recomanable l'ús del perfil Camber per a usuaris amb nivell baix.

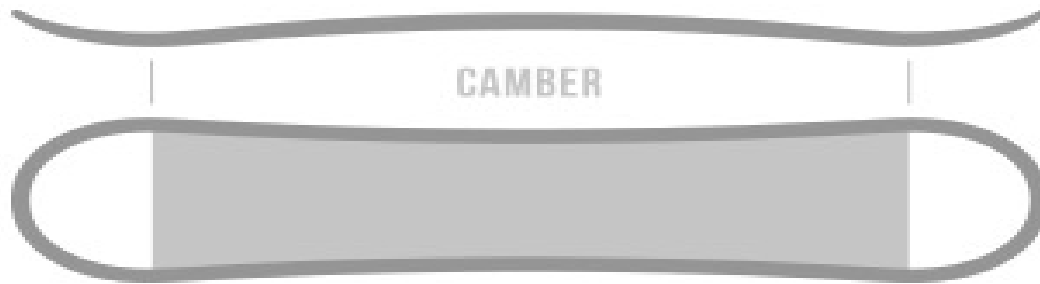


Figura 5: Perfil tipus Camber[1]

- Rocker:

El perfil Rocker és totalment posat al Camber. En aquest cas la part central descriu un radi còncau. Quan la taula està en repòs és la part central la que fa contacte amb el terra. Aquesta geometria afavoreix als girs ràpids i elimina pràcticament la possibilitat de fer un contracanto. A més és recomanable per fer acrobàcies i per realitzar descensos en neu pols. D'altra banda és difícil de controlar a altes velocitats.

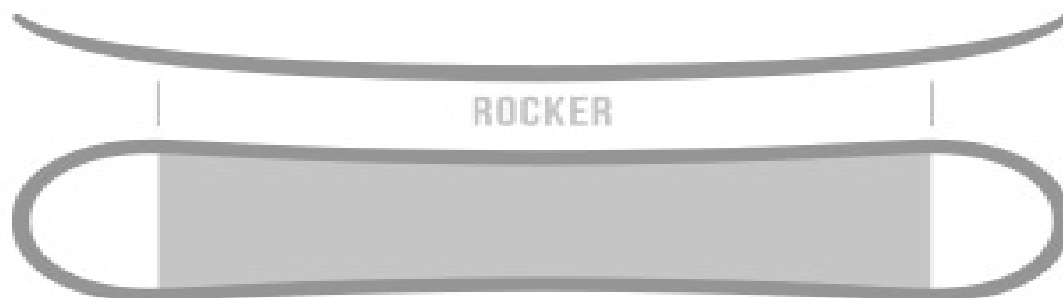


Figura 6: Perfil tipus Rocker [1]

- Flat:

El perfil Flat és un perfil pla, és un punt intermedi entre el perfil Camber i el Rocker. Aquest ofereix una rotació més fàcil que la Camber i una capacitat per perfilar més precisa que la Rocker. És un perfil recomanable per utilitzar en SnowParks en calaixos i raïls. A més és un perfil per la iniciació en el món del Snowboarding.

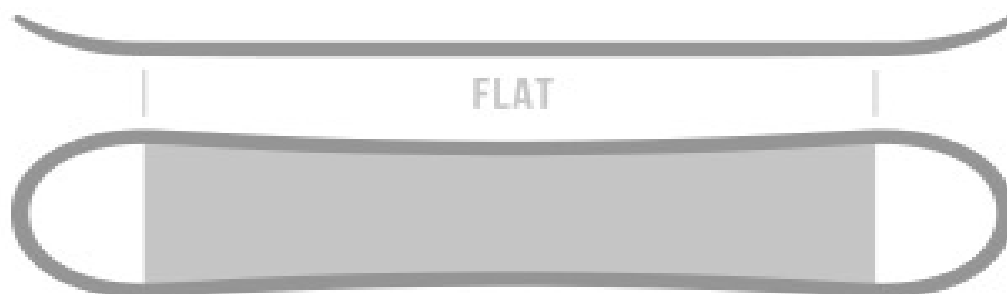


Figura 7: Perfil tipus Flat[1]

Altrament, existeixen perfils que són combinacions dels tres anteriors, adquirint propietats i característiques dels elements combinats. Alguns dels exemples més coneguts d'aquestes combinacions són:

Ex1:Rocker/Camber/Rocker

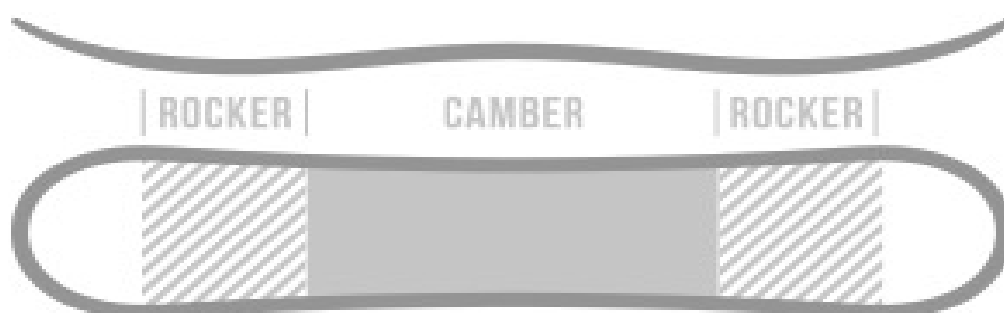


Figura 8: Perfil tipus Rocker/Camber/Rocker [1]

Ex2: Camber/Rocker/Camber

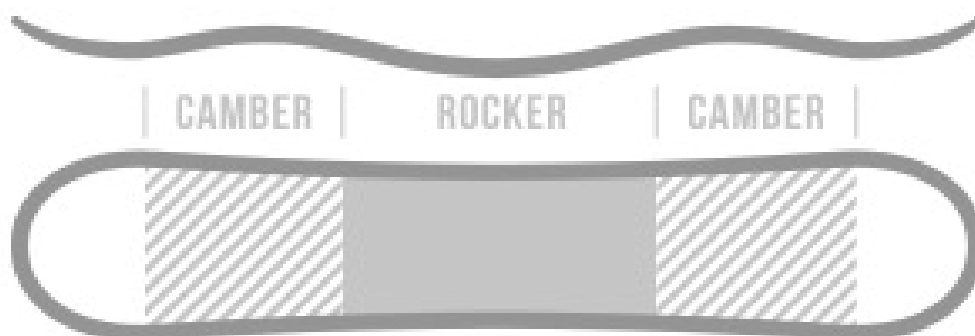


Figura 9: Perfil tipus Camber/Rocker/Camber[1]

5.3 Formes

La forma de la taula de snowboard també és important a l'hora de dissenyar un prototip, ja que segons la seva forma limitarà l'ús d'aquesta.

- Direccional

Les taules direccional són fabricades pensades per realitzar el descens en una única direcció, és a dir, que el peu davanter és sempre el mateix. Aquestes acostumen a tenir dimensions diferents de tail i nose, sent aquest últim més gran. Hi ha diferents talls dins d'aquesta forma. Els talls més progressius proporcionen facilitat a l'hora de girar, en canvi els talls més profunds proporcionen més energia de cara a encarar el següent revolt.

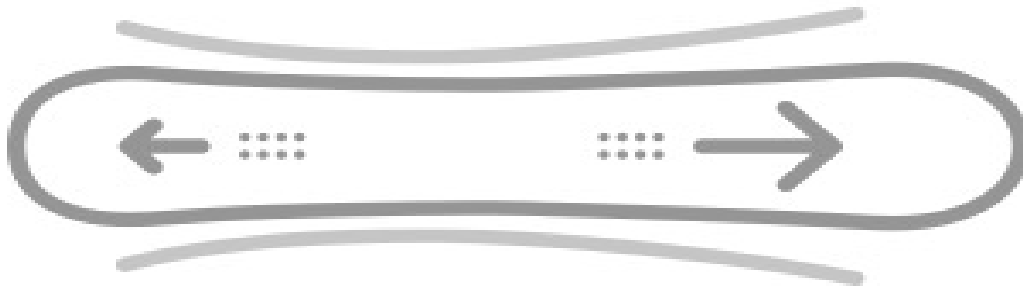


Figura 10: Taula amb forma direccional [1]

- "True Twin"

Aquesta estructura com ve diu el seu nom són autèntics bessons, és a dir, el tail i el nose són idèntics. El tall lateral és completament circular sent la part més profunda just a la meitat de la taula. Està dissenyada per permetre anar tant cap al davant com enrere perfecta per l'estil lliure.

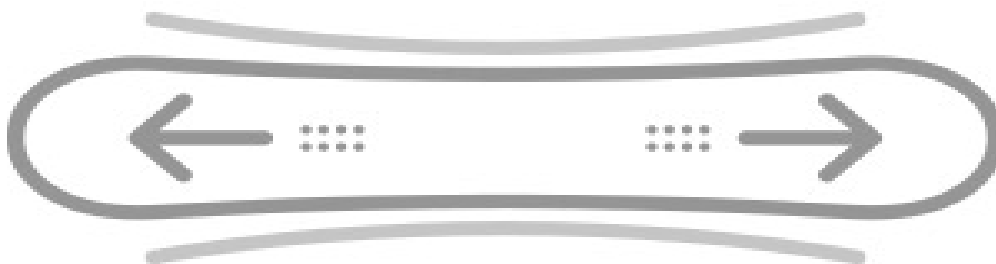


Figura 11: Taula amb forma "True-Twin" [1]

6. Estructura interna del Snow

A l'hora de dissenyar una taula de Snow s'ha de tenir en compte l'estructura interna d'aquest. Tots els elements explicats a continuació també faran que canviïn les característiques de l'element final.

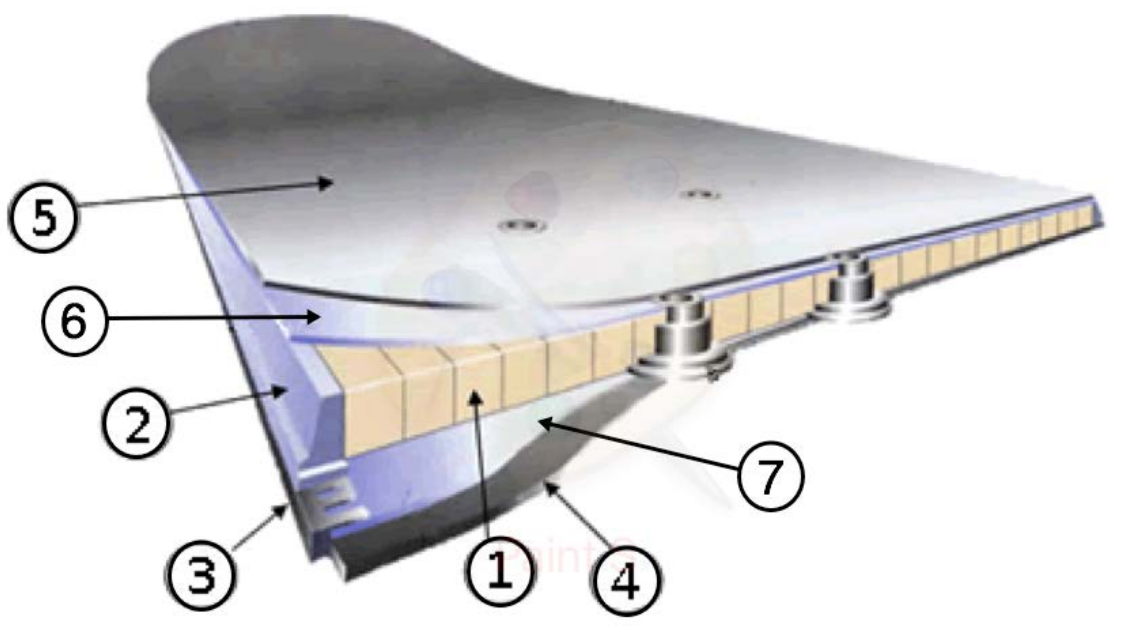


Figura 12: Estructura interna d'una taula de snowboard[2]

1. Nucli

La part més important a l'hora de fabricar una taula és el nucli, segons les propietats del material escollit la taula tindrà un comportament o un altre. Per exemple, si el nucli és més rígid donarà més estabilitat obtenint més comoditat a altes velocitats, en canvi una taula més tova és bona alhora de fer raïls, ja que no s'enganxen tant amb la neu. Actualment s'utilitzen diferents materials per la fabricació del nucli amb els seus pros i contres.

En primer lloc, es poden trobar el nucli d'espuma, aquest es tracta d'una espuma injectada de poliuretà. Aquesta és l'opció més barata a l'hora de comprar una taula, ja que és la més industrialitzada de totes. El poliuretà pot perdre flexibilitat tot i tenir un pes reduït. Són aconsellables per algú amb poca experiència que vulgui una taula.

En segon lloc, es poden trobar el nucli de fusta, és un material amb molta més qualitat. Acostumen a ser més cares que les anteriors però les propietats obtingudes són millors. La flexibilitat depèn de la fusta utilitzada a l'hora de fabricar-la, poden ser d'un únic material o arribar a combinar diferents tipus de fusta. A més una de les característiques que aporta la fusta és que aconseguix mantenir la flexibilitat i alhora dissipar les vibracions. Per tal de fabricar aquest tipus de nucli es realitza una laminació de diferents planxes enganxades amb cola epoxi a pressió per tal de minimitzar les irregularitats que pot tenir una sola planxa.

Finalment, es pot aconseguir un nucli d'alumini, aquests són panells hexagonals que compten amb una estructura de niu d'abella. Té un pes molt reduït però no dissipa les vibracions. A més aquesta opció és la més cara de totes.

2. Sidewall

El sidewall és la part lateral de la taula que serveix essencialment per protegir el nucli dels agents externs que poden danyar el nucli com ara l'aigua o bé de cops que pugués arribar a rebre la taula a causa d'un xoc contra una pedra o un mal ús d'aquesta. Encara que no tots els tipus de taula en tenen, per exemple, les estructures de monocasc no tenen sidewalls.

Els sidewalls més comuns acostumen a ser d'ABS o bé de UHMWPE (P-TEX), tot i que també es poden trobar de fusta o fins i tot d'epoxi. Els dos primers són els més aconsellables, ja que són més resistents als cops i als agents externs, fet que augmenten la seva durabilitat.

3. Cantells

Els cantells són les parts laterals d'acer templat de la taula que permeten que aquest no llisqui a l'hora de fer un revolt. Permeten dirigir i controlar la velocitat de la taula sobretot en superfícies gelades on la fricció és molt petita.

4. Base

La base és la superfície inferior de la taula, la que està amb contacte amb la neu. Aquesta determinarà la velocitat de la planxa. Es fabriquen amb UHMWPE (P-TEX) però es poden obtenir a partir de dos processos diferents: extrusió i sinteritzat. L'extrusió és la més barata però també és amb la que s'obté menys velocitat i la més tova.

La sinteritzada és una mica més cara però és necessari menys manteniment i té més durabilitat, ja que és més resistent als cops. A més permet obtenir velocitats més elevades.

5. Topsheet

El topsheet és la part superior de la taula, es tracta d'una capa polimèrica que protegeix l'estructura interior de la taula dels agents externs. El material utilitzat pot variar, tot i que per norma general es classifiquen en dos tipus: el mate i els brillants. En el primer cas el dibuix va imprès al mateix polímer mentre que en el segon el polímer recobreix el dibuix que es vol obtenir.

6,7. Reforços

Els reforços estan situats tot just per sobre i per sota del nucli. Serveixen per augmentar la rigidesa i resistència de la taula quan aquesta està sotmesa a grans esforços. Per a aquests reforços s'utilitzen diferents materials compostos segons la utilitat i les característiques que es vulguin obtenir.

Els materials composts són combinacions macroscòpiques de dues o més materials diferents que posseeixen una interfase discreta i recognoscible que els separa. A causa d'això, són heterogenis (les seves propietats no són iguals en totes les direccions). Normalment els materials utilitzats són làmines de fibres unides per un material aglomerant. Les fibres més utilitzades en la fabricació de taules de snowboard són la fibra de vidre i la fibra de carboni.

- Fibra de vidre

La fibra de vidre és un material que format per nombrosos filaments de diòxid de silici (SiO_2) extremadament fins, entre 1-8 μm . La fibra de vidre té grans propietats mecàniques, entre altres. Aquesta fibra té un preu més reduït que les altres a continuació.

Els filaments de fibra es poden unir per formar teles, segons la unió d'aquests filaments la tela final tindrà un comportament o un altre.

D'una banda, es pot trobar el mat de fibra de vidre. Aquest es tracta d'anar dipositant aleatòriament els filaments al llarg del pla, aconseguint que el material final sigui isotròpic en el pla.

D'altra banda, es poden trobar teixits de fibra. Aquest s'aconsegueixen mitjançant la disposició dels filaments amb direccions determinades. Existeixen diferents tipus de teixits obtenint així diferent comportament mecànic.

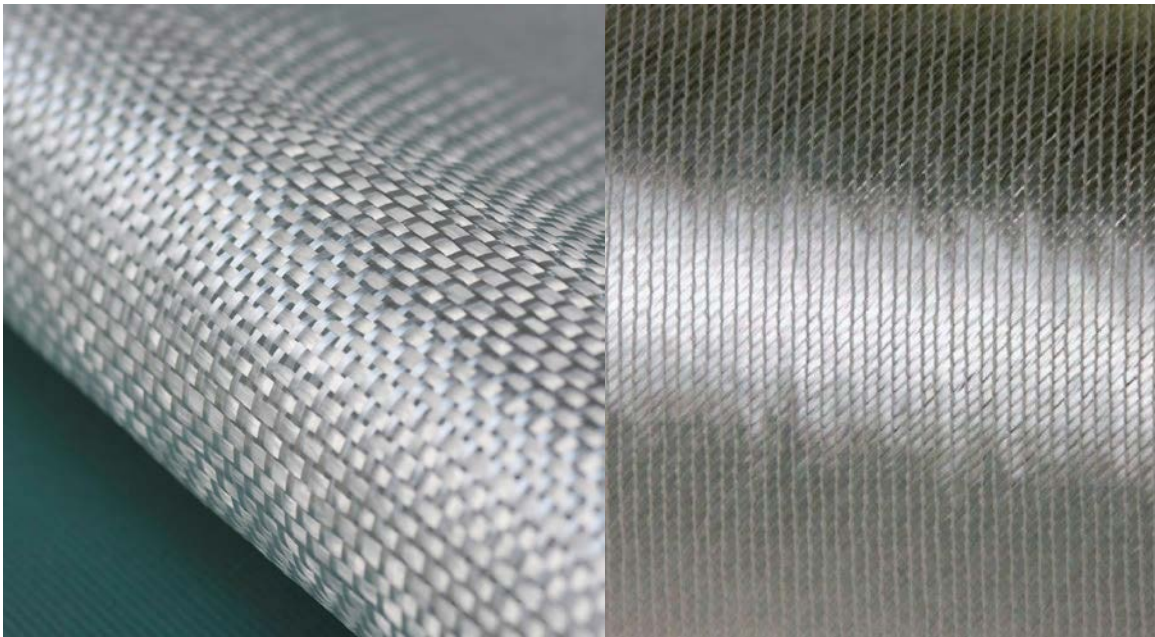


Figura 13: Teixit de fibra de vidre biaxial(esquerra) i triaxial(dreta) [3]

- o Biaxial

Els teixits biaxials són aquells que es formen col·locant els filaments a 0° i 90° . Aquesta malla sol utilitzar-se en taules destinades a parc o carrer, creen una bona plataforma per l'aprenentatge. Tenen una bona resistència a tracció en les dues direccions principals.

- Triaxial

Els teixits biaxials són aquells que es formen col·locant els filaments a 0° , -45° i $+45^\circ$. Aquesta disposició és ideal per grans pendents i grans velocitats. A més, la malla a $\pm 45^\circ$ aporta una gran resistència a torsió.

- Quadriaxial

Aquesta última és una combinació de les dues anteriors, ja que presenta capes en les direccions $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ i -45° .

- Fibra de carboni

Pel que fa la fibra de carboni també es tracta de compost per filaments que units poden formar una malla. En aquest cas els filaments d'una estructura similar al grafit de carboni. El diàmetre dels filaments està comprès entre $5-10 \mu\text{m}$. Tot i que no s'utilitza tant en el món de la neu com la fibra de vidre en alguns casos es poden trobar de reforç per tal d'augmentar les propietats mecàniques finals.

A continuació es mostren alguns dels reforços utilitzats actualment al mercat:



Figura 14: Diferents tipus de reforços de fibra de carboni [4]

7. Anàlisi d'esforços a suportar

En aquest apartat s'estudien els esforços que ha de suportar la taula abans de realitzar el seu disseny i com afecten aquest al seu funcionament.

La taula de snowboard està sotmesa a diferents tipus d'esforços durant la realització de l'activitat. Per tal de poder girar, fer salts o fer les recepcions l'esquiador ha de fer certs esforços que es transmeten a través de la taula. A més, el terreny sobre el qual circula la taula no completament llis, pot haver-hi irregularitats, i la taula ha de poder absorbir aquests esforços sense afectar el descens de l'usuari. Principalment els esforços als quals està sotmesa la taula són la flexió i la torsió.

7.1 Flexió

La flexió és la principal característica en les taules de snowboard. La flexió d'una taula permet que a l'hora de fer un revolt la taula adopti una curvatura adequada per realitzar-lo, a més de permetre adaptar-se a les irregularitats que puguin haver-hi en el descens. D'altra banda, la flexibilitat de la taula definirà també l'ús per al qual està dissenyada, per exemple, les taules de curses de competició són més rígides, ja que són més fàcils de controlar a altes velocitats. En canvi les destinades a realitzar descensos fora pista (en grans acumulacions de neu pols) són menys rígides, ja que augmenta la flotabilitat i són més fàcils de maniobrar.

La taula de snowboard pot estar sotmesa a flexió en diferents casos. Quan la taula està sotmesa a un esforç de flexió apareix un moment flector que provoca tensions que s'estudiaran per garantir que aquest treballa sempre en règim elàstic, és a dir, no sobrepassar mai la seva tensió de límit elàstic, ja que es vol que sempre recuperi la seva forma original. Més endavant es tracten els casos més comuns en la realització de descensos i d'acrobàcies en SnowParks. Alguns d'aquests casos són els més crítics que es poden arribar a assolir en la pràctica de l'esport.

En el descens la taula està sotmesa principalment a dos esforços:

- F_{pes} : és la força provocada pel propi rider, i segueix la fórmula $m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$. (On α és l'angle del pendent per o es realitza el descens, g és la constant de gravetat i m és la massa del rider)
- $R_{neu-taula}$: reacció que fa la neu contra la taula de Snow

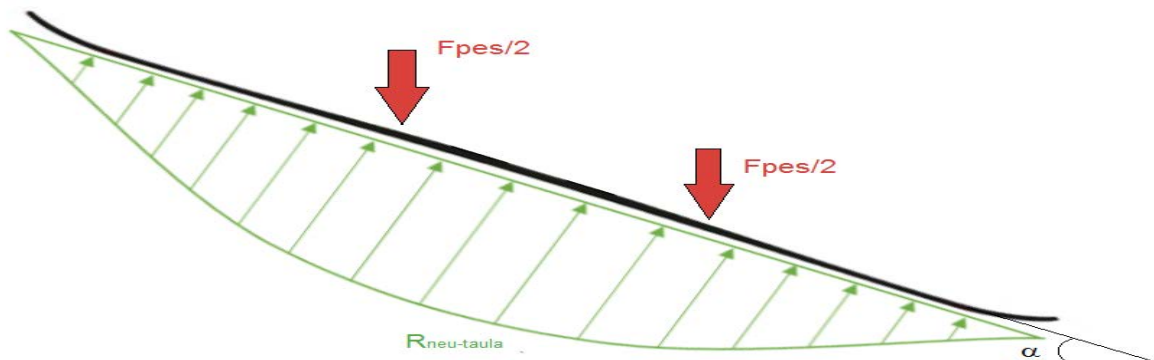


Figura 15: Esquema de forces durant la baixada

La força del pes es pot simplificar en dues forces puntuals a l'alçada de les fixacions amb un repartiment del 50% a cadascuna, tot i que no sempre és així és l'aproximació més correcta del repartiment de pes. En canvi, la reacció de la neu no sempre es pot simplificar amb forces puntuals, ja que dependrà completament del terreny.

El primer cas que un es pot trobar és quan la taula està totalment en contacte amb terra. En aquest cas la reacció es distribueix al llarg de taula seguint una distribució no lineal, on els extrems estan sotmesos a una càrrega menor que la part més central de la taula.

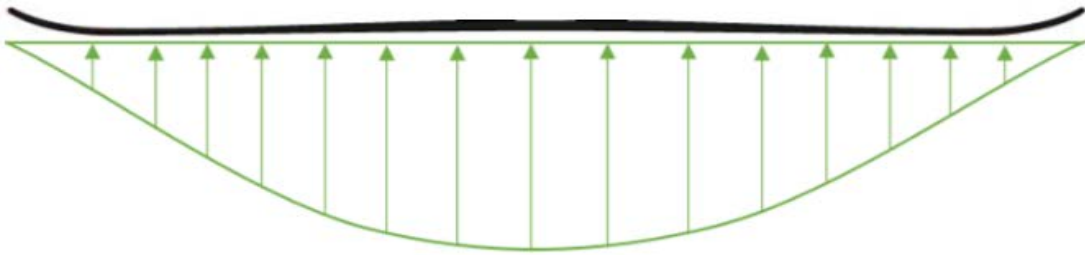


Figura 16: Distribució de la reacció al llarg de la taula

El conjunt total de la força de reacció es regeix per la fórmula:

$$R_{neu-taula_T} = \int_0^l R_{neu-taula}(s) \cdot ds \quad (1)$$

Però a més s'ha de mantenir l'equilibri de forces en l'eix vertical, ja que no pateix cap acceleració vertical si es vol mantenir el contacte amb la neu.

$$\sum F_{ext} = 0 \rightarrow \bar{R}_{neu-taula} + \bar{F}_{pes} = 0 \quad (2)$$

D'aquesta segona equació s'extreu que en cap cas la reacció vertical mai superarà el valor del propi pes de l'usuari en el cas de flexió pura.

El segon cas, més crític que l'anterior, és quan la taula únicament està recolzada pels dos extrems. En aquest cas apareixen dues reaccions, una al tail i una altra al nose. Aquestes es poden modelar com a dues forces puntuals. Si es té en compte que les fixacions estan a la mateixa distància del centre de la taula i els dos punts de contacte també ho estan, s'obté que el valor de les dues reaccions és el mateix i equivalent a la meitat del pes (equacions 3 i 4).

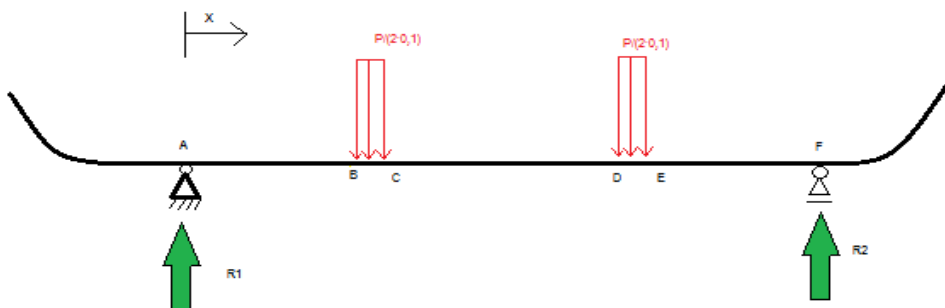


Figura 17: Esquema de forces aplicades sobre la taula

$$\sum F_{ext} = 0 \rightarrow \bar{R}_{neu-taula} + \bar{F}_{pes} = 0 \rightarrow R_1 + R_2 = F_{pes} \quad (3)$$

$$\sum M_{ext} = 0 \rightarrow -R_1 \cdot d + R_2 \cdot d = 0 \rightarrow R_1 = R_2 \quad (4)$$

En aquest cas, si s'estudia el moment flector que provocarà l'aparició de tensions s'observa que hi ha dos trams lineals i un tram de valor màxim constant entre els dos punts de fixació de les botes. És a dir, per tal d'estudiar les tensions màximes degudes a la flexió s'estudiarà una secció del tram compres entre les dues fixacions.

Finalment, s'estudiarà un tercer cas que és a priori el més crític, és tracta d'analitzar la caiguda d'un raider des d'una certa alçada sobre un terreny irregular. Es suposarà, com en el cas anterior, que únicament està recolzat per dos punts, els dos extrems. A més tenint en compte l'estudi de Michael J. O'Shea[5] on determina les forces rebudes en l'aterratge d'un salt amb snowboard a unes condicions determinades. Suposant que l'usuari cau d'una alçada de 2m, amb neu dura i sobre una superfície horitzontal la força rebuda és de $3g \cdot \text{massa_usuari}$. Aleshores l'estudi de forces es realitzarà repartint aquesta força de manera equivalent a les dues fixacions. Si es tornen a utilitzar les equacions 3 i 4, s'observa que les reaccions tenen el mateix valor de $1,5 \cdot m \cdot g$ cadascuna.

7.2 Torsió

L'altre principal esforç al qual està sotmès la taula de snowboard és la torsió. Aquesta apareix quan hom intenta realitzar un revolt. És important a l'hora d'estudiar l'estabilitat en el descens. Una taula amb molta rigidesa a torsió serà una taula amb una estabilitat elevada, ja que mantindrà el contacte dels cantells amb la neu pràcticament en tot moment i pràcticament no percebrà les possibles irregularitats del terreny. D'altra banda si es tracta d'una taula amb poca rigidesa a torsió, perdrà fàcilment el contacte dels cantells amb la neu i aquests patinarà i acabarà lliscant sobre la neu.

També s'ha de tenir en compte quin tipus de taula es vol dissenyar, ja que, com ja passa a la flexió, les taules dissenyades per competició a pista són molt més rígides que aquelles dissenyades especialment per al descens sobre neu pols.

L'esforç de torsió és més difícil de quantificar que el de flexió, ja que intervenen elements com la força centrífuga i la pròpia inclinació de l'usuari per intentar mantenir els cantells en contacte amb la neu en tot moment. A més de tenir en compte els elements com el radi de gir, la velocitat, la inclinació de la taula i la massa del conjunt. D'altra banda la reacció no és constant al llarg del cantell, tot i que per aquest estudi s'utilitzarà el valor total de la reacció per tal d'estudiar els esforços que pateix la taula.

Aleshores, tenint en compte totes les simplificacions citades anteriorment podem simplificar l'esquema de forces com:

- F_{pes} : és la força provocada pel propi rider, i segueix la fórmula $m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$. (On α és l'angle del pendent per o es realitza el descens, g és la constant de gravetat i m és la massa del rider)

- $F_{\text{centrífuga}}$: Força centrífuga seguint la fórmula: $m \cdot \frac{v}{R_{\text{gir}}}$ (5). (on m és la massa, v és la velocitat a la qual es realitza el gir i R_{gir} és el radi de curvatura del revolt que es vol realitzar.
- M_{torsor} : Moment torçor, que transmet l'usuari per tal d'intentar mantenir el contacte amb la neu.
- $R_{\text{neu-taula}}$: Reacció que fa la neu contra la taula de Snow. És la resultant de la suma vectorial de la força del pes i de la força centrífuga.

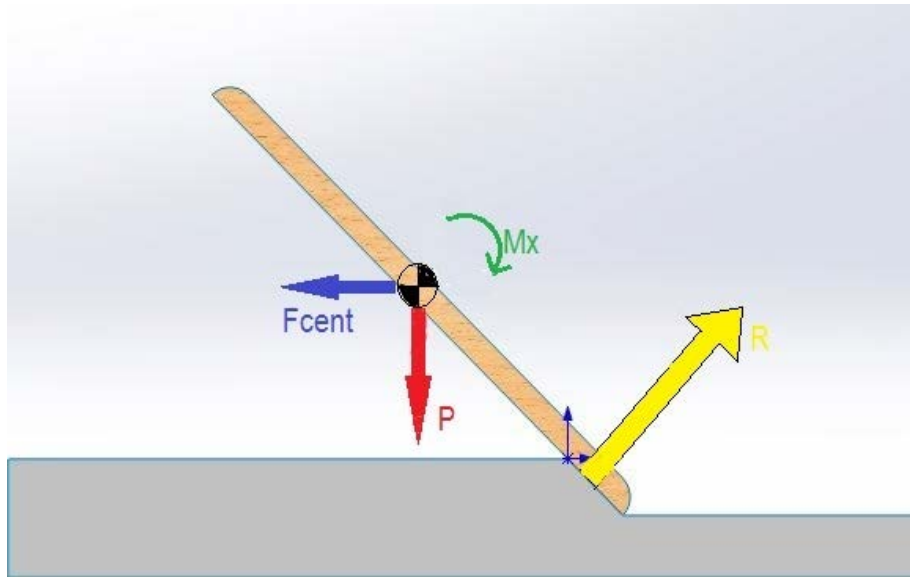


Figura 18: Esquema de forces quan la taula treballa a torsió

8. Disseny

Per tal de realitzar el disseny de la taula primer s'han de definir els paràmetres que permetran realitzar el disseny final. Segons el perfil de l'usuari al qual va destinat la taula tindrà unes dimensions (mida, pes,...) o formes diferents (segons la modalitat a la qual va destinada). A més s'han de definir les condicions en les quals es realitzaran les simulacions.

8.1 Definició dels paràmetres

Primerament com la taula va destinada l'ús propi cal destacar que totes les dimensions i estimacions estan ajustades a mi, el disseny per a qualsevol altra persona segurament seria diferent.

- Massa (kg)

Pel que fa a la massa total que haurà de suportar el disseny la massa de l'usuari es fixa en 90 kg, però a tot això se li ha de sumar tot l'equipament que portarà (botes, casc,...), aquest equip s'estima amb un pes de 10 kg obtenint així una massa total de $m=100\text{kg}$

- Alçada de l'usuari (cm)

Pel que respecta l'alçada del usuari és de 190cm, és a dir, a l'hora de dimensionar la taula s'haurà d'anar amb cura que sigui adequada per l'ús.

Alçada=190cm

- Modalitat d'ús

La finalitat de la taula és aconseguir un disseny que sigui polivalent, és a dir, un all-mountain. Tot i que es volen tenir bones prestacions a l'hora de realitzar descensos per fora pista. En resum, es busca una taula All-mountain decantada cap a l'ús fora pista.

- Paràmetres d'anàlisi

Com paràmetres d'anàlisi s'han de fixar aquells que no estan condicionats per cap altre requeriment. En aquest la inclinació de la pista i la velocitat de gir.

- o Inclinació de la pista (α)

Aquest paràmetre és molt important, ja que influeix en les forces que rep l'usuari. Al ser un factor que influeix en l'anàlisi es buscarà el valor que maximitzi el valor de la força rebuda. En una primera instància es podria pensar a fer els càlculs amb un valor d'inclinació pres durant el descens, ja que la major part del temps l'usuari estarà descendent. Però si un es para a observar com afecta l'angle a les components de força veu que la força del pes és màxima quan aquesta té un valor de 0° . Així doncs es prendrà aquest valor com a valor referent per a l'estudi.

$$\alpha = 0^\circ$$

- o Velocitat de gir (v)

La velocitat de gir és la velocitat a la qual hom pren el revolt que vol realitzar. S'observa que la força centrífuga és proporcional al quadrat de la velocitat. Així doncs s'ha de buscar un valor que maximitzi el valor de la força, és a dir, un valor

elevat però sempre dins d'un rang de velocitat assumible per l'usuari. Fent una mica de recerca es pot trobar el cas d'Edmond Plawczyk [6] que va arribar a assolir els 203km/h però aquest no és un valor comú. Aleshores es prendrà com a velocitat de gir 70 km/h, tot i que aquesta velocitat ja no és assumible per a qualsevol usuari es fixa com a valor extrem que hom pot obtenir realitzant un revolt sense arribar a caure.

$$v=70\text{km/h}$$

Així doncs, els paràmetres d'anàlisi es reduiran a la realització d'una corba en pla després d'un descens per pista per poder arribar a assolir la velocitat desitjada. Aquest cas es podria dur a terme al fons de tot d'una pista abans d'arribar a frenar.

8.2 Predimensionament

En aquest apartat es farà un dimensionament de la taula per tal que acompleixi els requeriments prèviament imposats i es realitzarà un primer model 3D.

- Distàncies i longituds

Per tal de definir les cotes del model es definirà la longitud total, les distàncies de les fixacions, l'amplada i el radi de gir.

o Longitud

Per tal de determinar la longitud que ha de tenir la taula prèviament s'ha realitzat un estudi per tal d'escollir un valor correcte per a l'usuari.

Tenint en compte les recomanacions que fan la majoria d'experts, les dimensions adequades per a un home segones el seu pes i alçada són[7]:

Estatura (cm)	Pes (kg)	Mida taula (cm)		
		Fora pista	Freestyle	Polivanet
+190	+90	+169	+163	+165
180-190	70-90	165-169	160-165	160-165
175-180	65-75	160-165	157-160	155-160
160-175	60-75	155-160	153-155	153-157
160-170	55-60	150-150	143-153	147-153

Taula 1: Dimensions recomanades segons alçada i pes

Aleshores en aquest cas l'usuari es troba en un cas límit, ja que la seva alçada i pes són un valor frontera. Així doncs s'ha decantat per escollir el cas més extrem per tal de si l'usuari creix o s'engreixa una mica entrar dins de les recomanacions.

A continuació, com ja s'ha dit anteriorment, s'ha de decidir la modalitat. Com l'ús serà All-mountain s'agafa la columna d'una taula polivalent.: 165 cm.

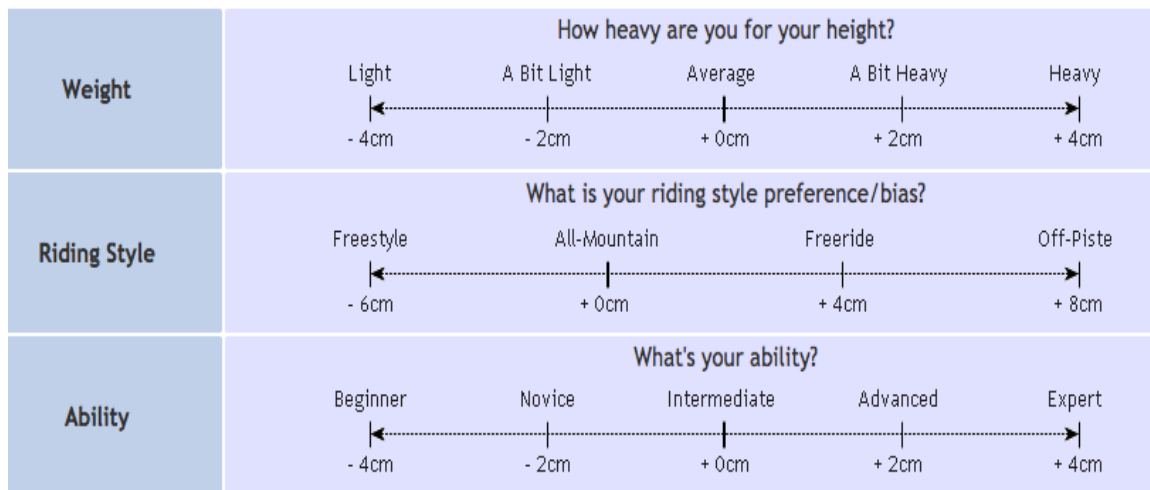


Figura 19: Dimensions recomanades segons les qualitats de l'usuari[8]

Però tot i això com es vol decantar per una taula una mica més adaptada per fer fora pista. Vist el perfil de l'usuari modificat la mida de 165 cm per 167cm. Aquesta mida té la recomanació de tenir un nivell una mica elevat respecte a tècnica de descens, però això no suposa cap mena de problema per a l'usuari. Així doncs la longitud final establerta és:

$$L=167 \text{ cm}$$

- Distàncies fixacions

Les distàncies de les fixacions no estaran fixades prèviament, ja que els Binding Mounts permeten anar canviant la posició d'aquestes segons la pròpia elecció. Tot i això es fixarà un valor per tal de poder realitzar una estimació del punt d'aplicació de la força exercida per ell pes. La posició d'aquestes també determinaran el comportament de la taula i la seva manejabilitat. Com més enrere estiguin les fixacions més encarades estan pel seu ús a fora pista, ja que el centre de gravetat de l'usuari està més enrere respecte el centre de la taula. Tot i això es decideix centrar les fixacions respecte del centre per tal de realitzar l'estudi.

D'altra banda, també està la distància entre fixacions, aquesta distància pot ser molt oberta (bona per fer acrobàcies) o bé molt tancada (bona manejabilitat) i estabilitat. Finalment, es decideix utilitzar una distància entre fixacions de 58 cm de centre a centre, és una posició que permetrà tenir bona maniobrabilitat a més de permetre realitzar alguna acrobàcia.

$$Df= 58 \text{ cm}$$

- Amplada central

Abans de definir l'amplada s'ha de tenir en compte la mida de la bota de l'usuari, ja que una taula molt estreta farà que sobresurti molt i serà molt difícil d'arribar a clavar adequadament els cantells que permetran realitzar el gir. Si es té en compte que l'usuari a la qual va destinada té un 45 de peu, la amplada fixada és de:

$$\text{Ample}= 26\text{cm}$$

- Radi de gir

El radi de gir determinarà la curvatura de la trajectòria quan el cantell està totalment recolzat a la neu. Un radi de gir gran definirà corbes grans i ràpides, en canvi un radi de gir petit definirà una corba petita i llarga. S'escull un radi de 8,2m. Aquest és un radi juganer però que permet fer girs amb estabilitat i sense suposar un gran esforç per l'usuari.

$$R_g = 8,2 \text{ m}$$

- Tipus de geometria

Com es vol aconseguir una taula polivalent i a més que sigui fàcil de manejar s'opta per realitzar una direccional, és a dir, que el nose és més ample que el tail. Ambdós han d'estar amb concordança amb tots els altres paràmetres.

- Model 3D

Un cop definits els paràmetres ja es pot procedir a fer un primer model de la taula final. Per realitzar tots els models s'utilitzarà el programa SolidWorks 3D, és un software CAD que permet fer dissenys tant en 2D com en 3D.

Per tal de fer un primer esbós es partirà de la silueta que ha de tenir la plana amb els paràmetres fixats i se li anirà donant forma.

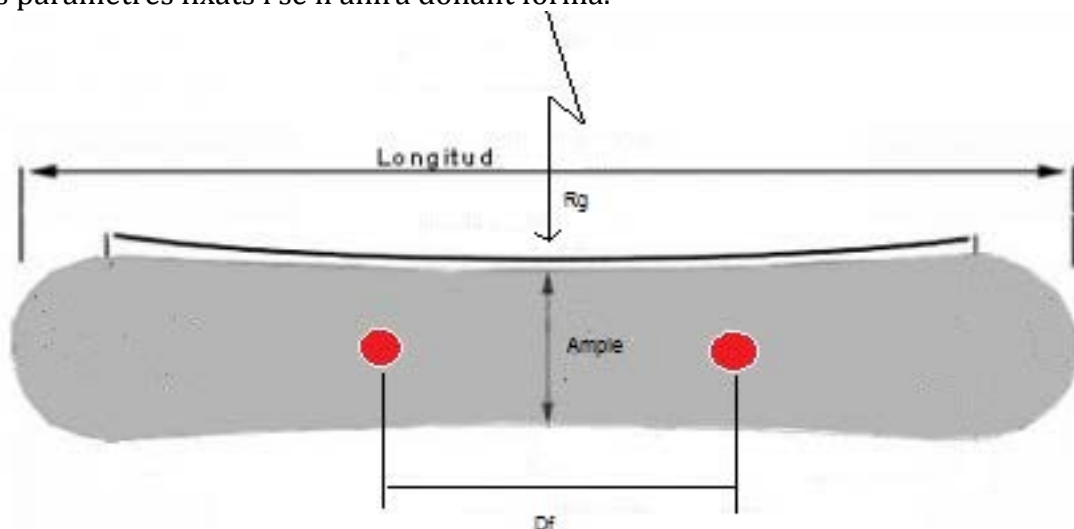


Figura 20: Esquema del predimensionament

Una vegada realitzada el primer model, s'ha de decidir quin tipus de perfil es vol utilitzar. Com ve ja s'ha mencionat anteriorment la finalitat és aconseguir una taula que sigui fàcil de manejar però alhora amb una mica d'energia s'ha afegit un perfil camber. Aquest perfil, com ja s'ha explicat en el punt 5.2, és una elevació de la part central de la taula, és a dir, en repòs només estarà en contacte en dos punts. S'ha decidit que la part central estigui a 1 cm del terra. Aquesta distància és petita, ja que si fos més pronunciada suposaria una pitjor manejabilitat.

D'altra banda s'ha d'escollir la forma geomètrica del tail i el nose. De les diferents opcions que es presenten a la Figura 21, s'escull la PANHEAD. Aquest tipus de geometria és adequada per una taula All-mountain. Els acabats són una secció de cercle que s'ha d'adaptar al radi de curvatura fixat. Aquest procés s'ha realitzat mitjançant tangències dins del propi SolidWorks i a més s'ha fixat un valor de 311,5mm i de 301,5mm pel nose i el tail respectivament per tal que la tangència fos possible tenint en compte que la longitud final ha de ser 167cm



Figura 21: Diferents tipus de puntes del mercat [9]

Finalment s'obté el model que es pot observar a la Figura 22. Aquest model no és un model sòlid, és a dir, no té volum. S'ha decidit realitzar-lo com a superfície per tal de poder importar-lo en format .IGES per després realitzar les simulacions necessàries al programa ANSYS.

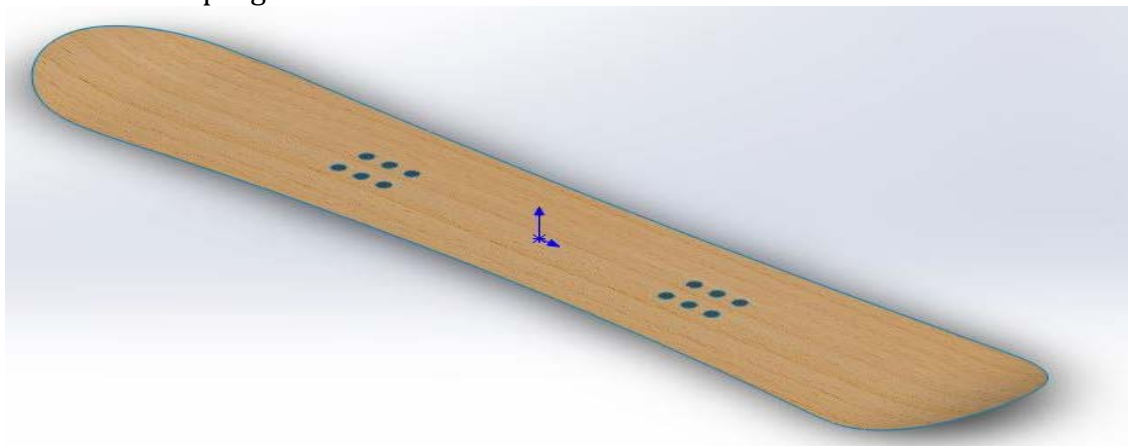


Figura 22: Representació de la taula

8.3 Elecció del material

Un altre paràmetre a fixar és el material amb el qual es fabricarà el nucli de la taula. Principalment s'utilitzen fustes o espumes. En aquest cas s'opta per l'ús de fusta per la construcció del nucli. S'ha descartat les espumes perquè el seu rendiment a llarg termini és menor, encara que aquest sigui més barat.

Dins de les fustes hi ha moltes opcions que s'utilitzen actualment per la construcció del nucli. Les fustes més utilitzades ordenades de més flexible a més rígida són:

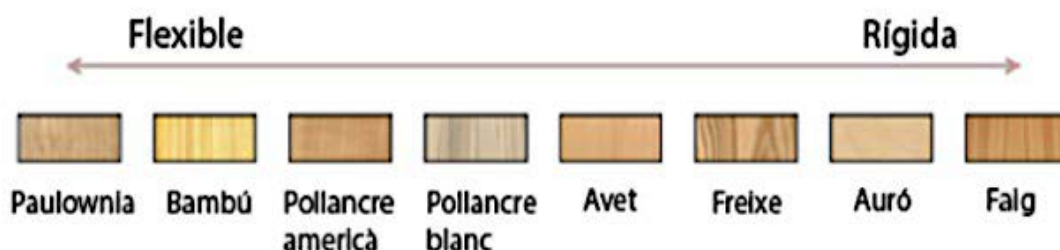


Figura 23: Classificació de les diferents fustes segons la seva flexibilitat

Tot i que la seva rigidesa no és el paràmetre més important a tenir en compte a l'hora d'escollir el material determinarà el comportament de la taula.

Abans d'escollir el material s'ha de tenir clar quin tipus de material es busca. Per tal que sigui un material útil per la fabricació de la taula ha de complir que tingui un mòdul de Young elevat a més de tenir un elevat límit elàstic, ja que en cap moment es vol superar aquest valor.

Material	Mòdul de Young (GPa)	Límit elàstic (MPa)	Densitat (kg/m ³)
Bambú	15-21	161 - 320	600-801
Freixe	12,1 - 15,7	121 - 182	621 - 760
Falg	14,2 - 17,4	107 - 130	681 - 730
Auró	12,5 - 15,4	91,2 - 112	641 - 780
Avet	13 - 14,7	63,5 - 77,7	430 - 530
Pollancre blanc	9,0-11,0	82,1 - 102	430 - 530
Pollancre americà	8,1 - 9,9	48,5 - 59,3	381 - 470
Paulownia	4,38 - 8,10	35,2 - 38,8	282 - 350

Taula 2: Propietats de les diferents fustes

Per tal que l'elecció sigui més visual s'ha utilitzat el CES Edupack, és un programa utilitzat per l'elecció de materials que permet representar gràficament una propietat vers una altra. Mitjançant els diagrames d'Ashby es determinaran quins són els materials més adients per la fabricació.

Com ja s'ha dit interessa un material amb elevat mòdul de Young i alt límit elàstic és a dir, per tal de maximitzar les dues propietats s'estudia el producte de les dues enfront de la densitat del material. El diagrama obtingut és el que es pot observar a la Figura 24.

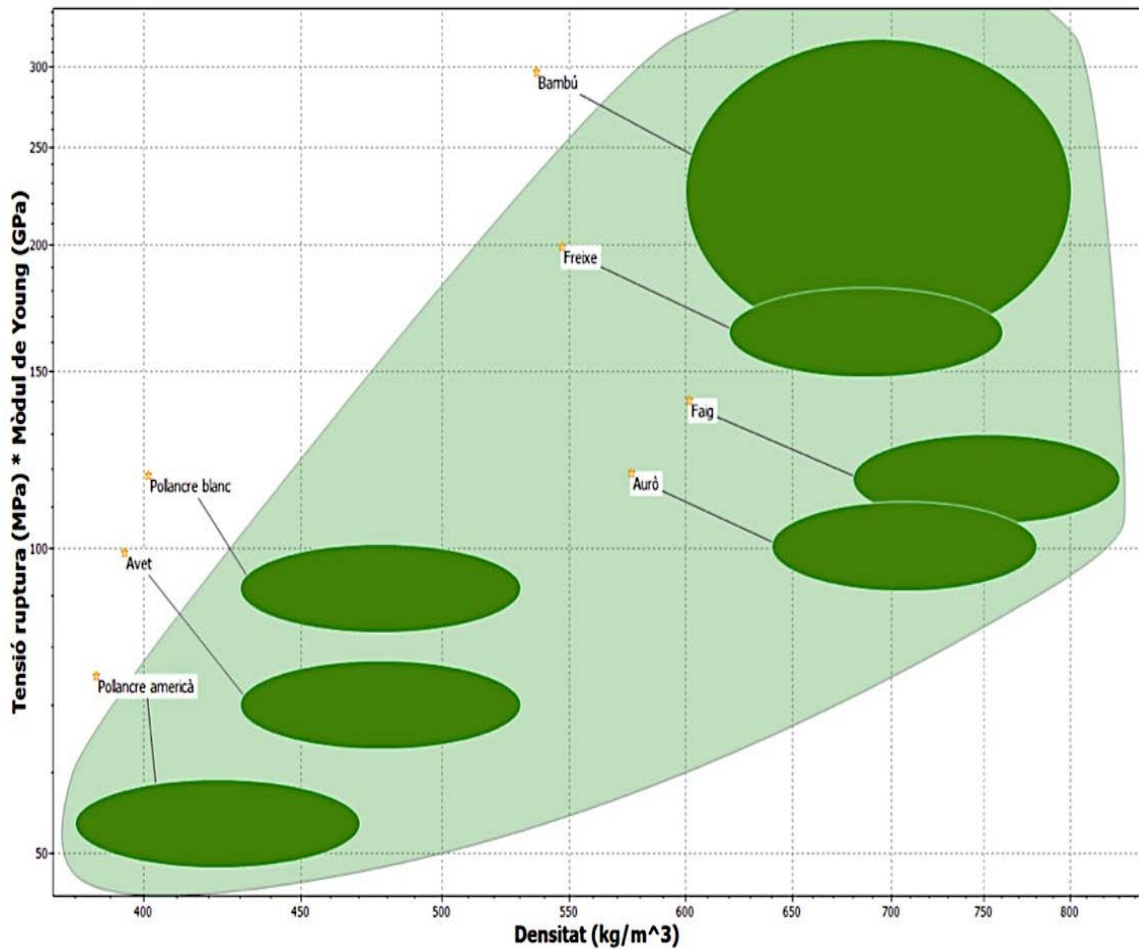


Figura 24: Diagrama d'Ashby

Si no es té en compte la densitat, s'observa que els dos candidats més forts són la família dels bambús i la dels freixes. Aleshores s'ha d'escollir entre aquests dos candidats. Com aquest treball està encarat a una futura fabricació de la taula el següent criteri que s'utilitzarà és el preu de cada material.

	Preu €/m ³
Freixe(taula de 25mm)	1.581
Bambú (taula de 25 mm)	8.563

Taula 3: Preu per metre cúbic

Vist que el preu del bambú 5 vegades superior al del freixe i a més és més difícil de trobar al mercat s'opta per utilitzar la fusta de freixe per la fabricació del nucli.

L'altre material que s'ha de caracteritzar és la fibra de vidre. S'utilitzarà una fibra uniaxial estàndard E-Glass Fiver, que col·locada en la direcció correcta donarà les propietats desitjades. El gruix d'aquests teixits de fibra uniaxials és de 0,25mm cada capa.

Les propietats mecàniques que permetran fer els càlculs següents són:

	Propietat	Unitats	Freixe	Fibra de vidre
Densitat		kg/m ³	680	1.8
Mòduls d'elasticitat	E _x	MPa	12654,9	33189
	E _y	MPa	984,8	7312
	E _z	MPa	1538,75	7312
Coefficients de poisson	v _{xy}	-	0,371	0,26
	v _{xz}	-	0,44	0,26
	v _{yz}	-	0,36	0,26
Mòduls d'elasticitat transversal	G _{xy}	MPa	947,87	6313
	G _{xz}	MPa	1341,8	6313
	G _{yz}	MPa	370,65	631,3
Tensions de ruptura longitudinal a tracció	σ_{r_x}	MPa	130	1062
Tensions de ruptura longitudinal a compressió	σ_{r_x}	MPa	72	743
Tensions de ruptura transversals a tracció	σ_{r_y}	MPa	8,5	60
Tensions de ruptura transversals a compressió	σ_{r_y}	MPa	12,3	118
Tensions de ruptura per cisallament	σ_{r_s}	MPa	10,3	85

Taula 4: Propietats mecàniques per la simulació

8.4 Diagrames d'esforços

Una vegada definits tots els paràmetres i distàncies ja es pot procedir a fer una anàlisi teòric per obtenir tots els diagrames d'esforços als quals estan sotmesos les diferents seccions. S'han estudiat els casos de Flexió i Torsió per separat.

- Flexió

Primerament, per tal d'aconseguir uns resultats més realistes s'ha realitzat una distribució del pes on teòricament van lligades les botes de l'usuari. Aquesta superfície s'ha pres de 10 cm, que és l'amplada aproximada d'una bota de snowboard. Així doncs queda una distribució de forces lineal de valor $\frac{P}{2 \cdot 0,1} \left(\frac{N}{m} \right)$ per cada fixació. Pel que fa a les dues condicions de contorn s'ha considerat un model 2D i s'han utilitzat les habituals en aquests casos d'assajos a flexió; un dels punts de suport només té permesa la rotació en Z i l'altre només té restringit el

desplaçament en Y. A més, per tal de simplificar els càlculs no s'ha tingut en compte la curvatura que provoca el camber del disseny.

Per tal de realitzar l'estudi s'ha dividit la taula en 5 parts per tal que sigui més fàcil de comprendre els diagrames de seccions.

Com des dels punts de contacte amb el terra al centre de la taula i des dels dos punts d'aplicació del pes hi ha la mateixa distància les dues reaccions són de mateix valor com ja s'ha demostrat anteriorment. Amb aquesta geometria i condicions de contorn ja es pot intuir que els diagrames de moments serà simètric respecte el centre de la taula, tot i això es comprova a continuació.

Tram A-B x=[0, 0.3075]

$$T = R_1 \qquad M_z = R_1 \cdot x$$

Tram B-C x=[0.3075, 0.4075]

$$T = R_1 - \frac{P \cdot (x - 0,3075)}{2} \qquad M_z = R_1 \cdot x - \frac{P \cdot (x - 0,3075)}{2 \cdot 0,1} \cdot \frac{(x - 0,3075)}{2}$$

Tram C-D x=[0.4075, 0.8875]

$$T = R_1 - \frac{P}{2} = 0 \qquad M_z = R_1 \cdot x - \frac{P(x - 0,3575)}{2}$$

Tram D-E x=[0.8875, 0.9875]

$$T = \frac{-P \cdot (x - 0,8875)}{2 \cdot 0,1}$$

$$M_z = R_1 \cdot x - \frac{P \cdot (x - 0,3575)}{2} - \frac{P \cdot (x - 0,8875)}{2 \cdot 0,1} \cdot \frac{(x - 0,8875)}{2}$$

Tram E-F x=[0.9875, 1.295]

$$T = -P/2 \qquad M_z = R_1 \cdot x - \frac{P(x - 0,3575)}{2} - \frac{P \cdot (x - 0,9375)}{2}$$

Distribució de moments en funció de la posició x:

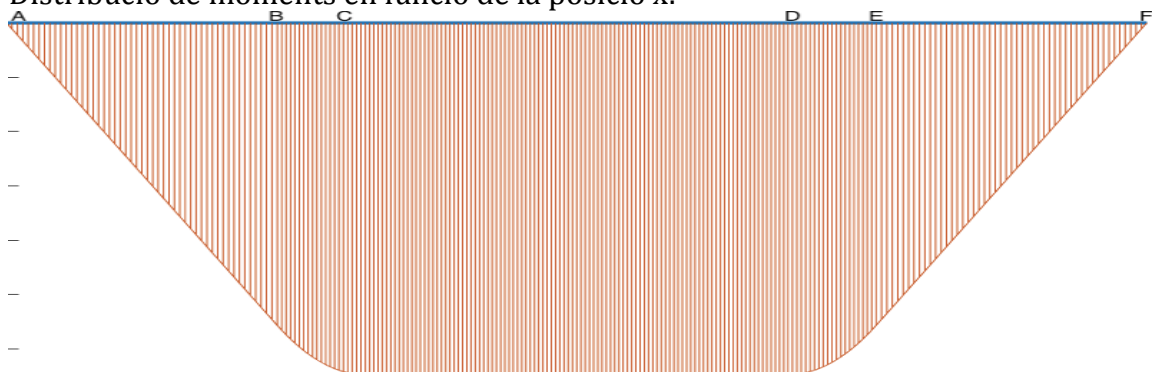


Figura 25: Representació del moment M_z

Distribució de Tallants en funció de la posició x:

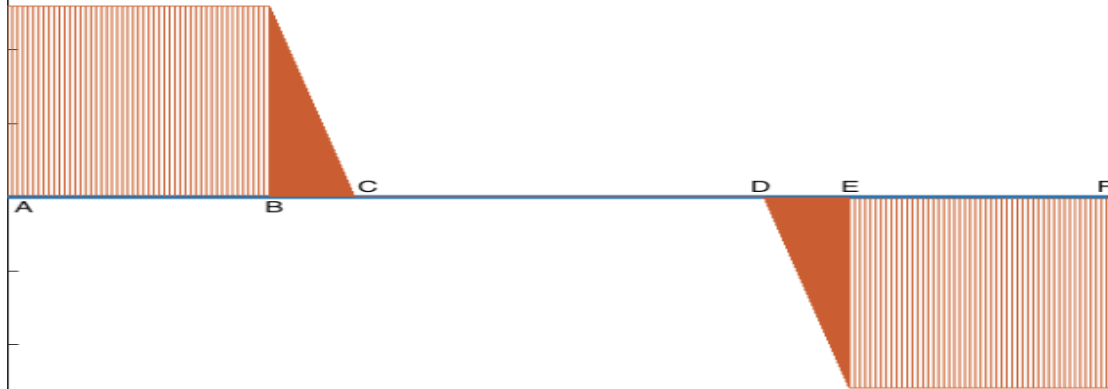


Figura 26: Representació dels esforços tallants T

Si es substitueixen per el seu valor numèric s'obté:

M(N·m)	A	B	C	D	E	F
1g	0	150,83	175,35	175,35	150,83	0
3g	0	452,49	526,06	526,06	452,49	0

Taula 5: Valors dels moments en els diferents punts

S'observa que el valor màxim del moment flector es troba en la part central de taula. Aquest valor és constant entre les dues fixacions. D'altra banda, també es pot veure que al llarg d'aquest tram C-D les forces tangencials són nul·les, és a dir, la peça està sotmesa a una flexió pura en aquest tram. Aquesta secció és important tenir-la en compte, ja que és la que provocarà que apareguin tensions més altes que s'analitzaran en els apartats següents.

- Torsió

Per poder analitzar els esforços als quals està sotmesa la taula s'estudiarà la secció central de la taula. Amb els paràmetres definits anteriorment serà molt fàcil estimar un valor de la torsió. A més es realitza la hipòtesi que la força del pes està aplicada a la part central de la taula.

V= 70 km/h;

Rg=8,2 m

Massa= 100 kg

$\alpha = 0^\circ$

Amplada=260mm

$$P = m \cdot g = 100 \cdot 9,81 = 981 \text{ N}$$

$$F_{centrifuga} = m \cdot \frac{v^2}{Rg} = 100 \cdot \frac{19,444^2}{8,2} = 4610,81 \text{ N}$$

$$R_x = -F_{centrifuga}$$

$$R_y = -P$$

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = 4717,01 \text{ N}$$

$$M_{Torsor} = R \cdot \frac{Amplada}{2} = 612,82 \text{ N} \cdot m$$

8.5 Disseny de la secció

Pel que fa la secció es realitzarà una estructura tipus sandvitx, ja que és la més utilitzada en el món de la neu. En aquest primer punt es proposarà una possible estructura que en els apartats següents es validarà i s'optimitzarà en funció de les seves prestacions.

Respecte al tipus de secció escollida hi han moltes possibilitats. Actualment al mercat s'utilitzen estructures amb un nucli de fusta o espuma reforçades amb fibra en diferents direccions. Com ja s'ha vist existeixen diferents tipus de teixit (Biaxial, triaxial,...) i tots són aplicables en taules de snowboard. Segons la col·locació d'aquest tipus de teixit la taula tindrà diferent comportament al rebre els esforços. A més dels diferents tipus de teixits també s'ha de tenir en compte el material del teixit (fibra de vidre o de carboni).

Les fibres es caracteritzen per tenir una gran resistència a tracció en la direcció de la fibra però molt baixes propietats en les altres direccions.

Per tal de realitzar les primeres simulacions s'ha escollit una malla triaxial de fibra de vidre. Aquesta estructura no és la més comuna en la construcció de taules però s'ha optat per començar per aquest model perquè és el teixit més resistent a l'hora de suportar aquests esforços. Aquest sandvitx té una estructura $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, N]$ s simètrica respecte al nucli. D'altra banda el nucli escollit com ja s'ha vist anteriorment és de fusta i no d'espuma.

S'ha predimensionat la secció i s'obté l'estructura següent:

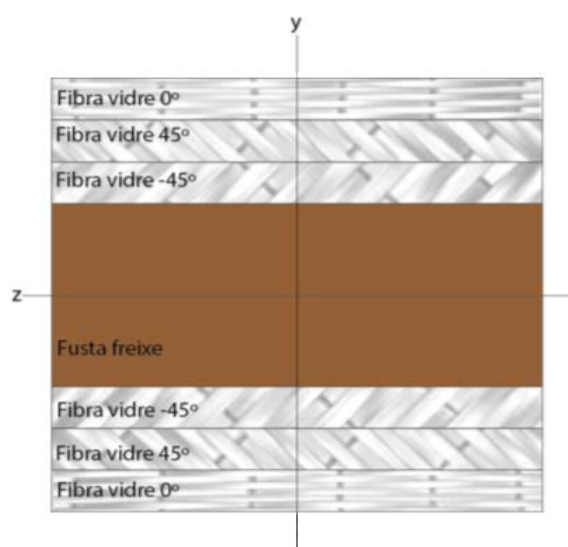


Figura 27: Esquema de la secció

On les alçades de cada material són:

h_{freixe}	10mm
h_{-45°	0,75mm
h_{45°	0,75mm
h_0	1,5mm

Taula 6: Alçades de les làmines

9. Anàlisi físic del disseny

En aquest apartat es duran a terme les simulacions mitjançant el software ANSYS per tal de poder comprovar que els esforços que pateixen les seccions crítiques no són més grans que els seus respectius mòduls resistents elàstics. A més es

calcularan els valors teòrics per tal de comprovar que els valors obtinguts a les simulacions són correctes.

9.1 Paràmetres de la simulació

Abans de realitzar la simulació s'han de fixar com es realitzarà i en finalitzar comprovar que les hipòtesis són vàlides.

Tipus d'element

El tipus d'element escollit per realitzar les simulacions és un element tipus Shell o placa. Aquest elements són molt útils a l'hora de simular peces on el gruix és molt inferior a les altres dimensions. És un element 3D amb la possibilitat d'escollir entre 4 o 8 nodes. Cada node té 6 graus de llibertat. D'altra banda és molt útil per aquesta simulació, ja que permet simular elements amb diferents capes de material i diferents orientacions.

A més a l'hora d'escollir l'element s'ha d'activar l'opció [K8] ("storage of layer data") per tal que s'emmagatzemin tots els càlculs de les diferents làmines.



Figura 28: Esquema d'un element tipus Shell[10]

Caracterització dels materials

Pel que fa els materials com es treballa amb tensions sempre per sota del límit elàstic s'escull un 'Model elàstic', és a dir, amb deformacions lineals. D'altra banda com ambdós materials són ortotròpics s'ha de seleccionar aquesta opció i s'han d'entrar els paràmetres de la Taula 4 per cadascun dels materials.

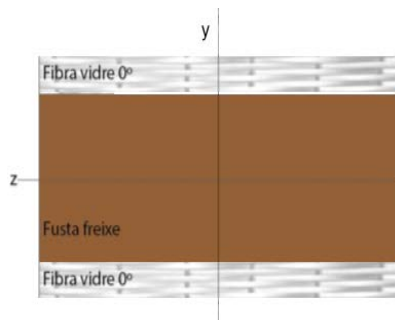
EX	33189
EY	7132
EZ	7132
PRXY	0.26
PRYZ	0.26
PRXZ	0.26
GXY	6313
GYZ	631.3
GXZ	6313

Figura 29: Entrada de dades a ANSYS

Per tal de comprovar que l'entrada del model és correcta s'ha realitzat una verificació amb una simulació a flexió.

- Verificació del model

Per tal de comprovar que el model utilitzat és correcte s'ha realitzat una simulació que té com a únic objectiu comprovar les hipòtesis utilitzades. A més de comprovar que la caracterització del material és correcta.



La secció està formada per dos tipus de materials diferents, el freixe(nucli) i la fibra (reforç). La fibra és afegida a la secció per les seves grans propietats mecàniques a més de la seva lleugeresa. Això fa que al afegir làmines de fibra milloren les propietats mecàniques de la secció però sense modificar gaire el pes de la peça.

Figura 30: Esquema de la secció

L'estructura correspon a una secció tipus sandvitx. Abans de procedir s'ha de saber que aquestes estructures tenen un comportament diferent sobre la distribució de tensions respecte a una secció massissa composta d'un sol material. Com les làmines de fibra tenen propietats mecàniques més elevades que el nucli, aquestes rebran més tensió que no pas el nucli.

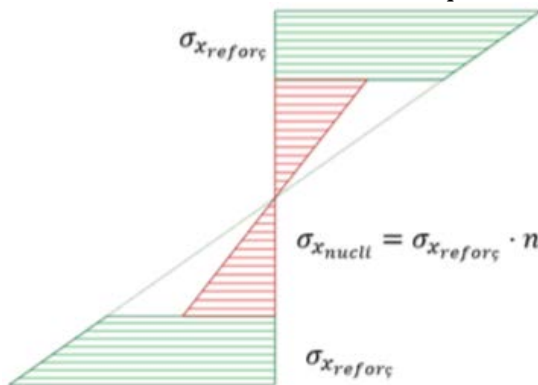
Pel que fa les deformacions en el cas de flexió, la secció continua complint la hipòtesis de Navier on les seccions es mantenen planes i giren al voltant de l'eix neutre ($\sigma_x=0$). Aleshores es compleix que al punt d'unió entre el nucli i la fibra a z_1 :

$$\varepsilon_{x,fibra}(z_1) = \varepsilon_{x,nucli}(z_1) = \varepsilon = k \cdot y \quad (5)$$

Així doncs essent les deformacions iguals en el punt d'unió però amb un mòdul d'elasticitat diferent s'observa que les tensions a l'alçada z_1 és diferent en els dos materials, ja que ha de complir:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (6)$$

S'ha de tenir en compte que si les dues deformacions han de ser iguals, existeix una relació entre les dues tensions que és:



$$n = \frac{E_{nucli}}{E_{reforc}} \quad (7)$$

Figura 31: Distribucions de tensions en una secció composta

Aquesta distribució de tensió es basa en què la secció forma igual per a la fibra que per al nucli.

Per realitzar els càlculs dels valors teòrics s'utilitza el mètode de la secció equivalent per a seccions compostes. Aquest mètode permet calcular les tensions en diferents punts d'una secció tipus sandvitx. El model utilitza la hipòtesi de Navier i que la secció deforma igual. Però aquest model no sempre és vàlid, ja que només és vàlid per petites deformacions i a més els mòduls elàstics no poden tenir una relació superior a 1000, ja que induiria a càlculs erronis.

A continuació es comprovarà que el model de la secció equivalent es pot utilitzar per als càlculs teòrics de les simulacions següents.

Per tal de fer la comprovació es realitza la simulació amb una peça prismàtica d'un metre de llarg, 200mm d'ample i una força aplicada al centre de valor 1962N (2g del pes). La secció utilitzada és un nucli de freixe de 15mm d'alçada i dues capes 4 làmines de fibra de vidre (h=1mm) orientades a 0°.

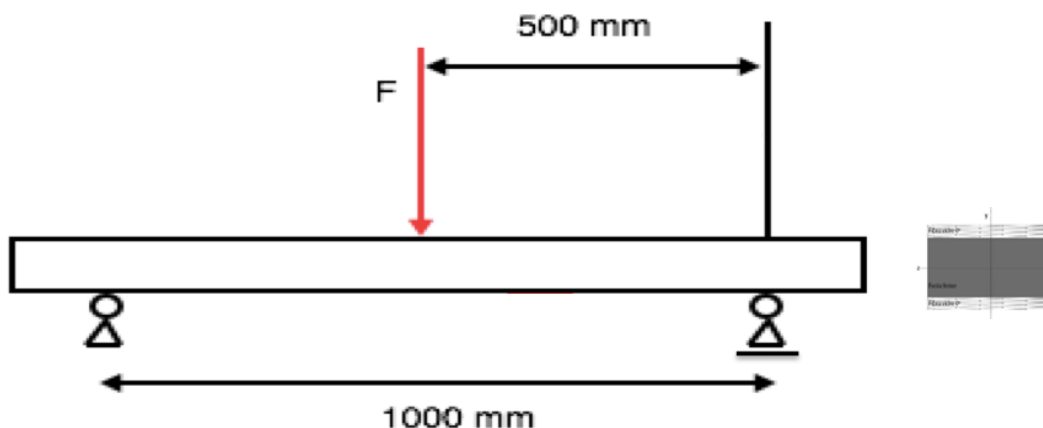


Figura 32: Esquema de la simulació realitzada

Amb aquests valors s'obté que la a la secció crítica (punt d'aplicació de la força) són:

Força	Valor
N	0
T	-981 N
Mz	490,5 N·m

Taula 7: Esforços a la secció crítica

El primer pas per calcular la secció equivalent és calcular la relació entre els dos mòduls elàstics.

$$n_{freixe-fibra.v} = \frac{E_{freixe}}{E_{fibra.v}} = 0,343339$$

El segon pas a realitzar és calcular la inèrcia equivalent. Com que la rigidesa a flexió s'ha de conservar:

$$E \cdot I = E' \cdot I' \rightarrow I' = \frac{E}{E'} \cdot I$$

Com que la secció equivalent es realitza amb fibra de vidre $E'=E_{fivra.v}$

$$I' = n_{freixe-fibra.v} \cdot I$$

Com que no es vol modificar la posició de l'eix neutre l'únic paràmetre que és modifica es l'amplada.

$$b' = n_{freixe-fibra.v} \cdot b = 68,6679\text{mm}$$

$$I_z = 44946,18\text{mm}^4$$

Una vegada obtinguts tots aquests paràmetres ja es pot procedir al càlcul de les tensions en les diferents parts de la peça. Aleshores es parteix del concepte:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_{x,i}}{E_i} = k \cdot y \rightarrow \text{on } k = \frac{-M_z}{E_1 \cdot I}$$

$$\frac{\sigma_{x,i}}{E_i} = \frac{-M_z}{E_1 \cdot I} \cdot y \rightarrow \sigma_{x,i} = \frac{E_i \cdot -M_z}{E_1 \cdot I} \cdot y = n_i \cdot \frac{-M_z}{I} \cdot y$$

On la y és la distància des de l'eix neutre de la fibra, que en aquest cas com és un sandvitx simètric correspon a la distància des del centre geomètric.

Per la fibra s'obté una tensió màxima de a $y=\pm 8,5\text{mm}$:

$$\sigma_{x,fivra} = \frac{-M_z}{I} \cdot y = \frac{490,5 \cdot 1000}{44946,18} \cdot (\pm 8,5) = \pm 92,76 \text{ MPa}$$

Per el freixe les tensions màximes es donen al punt més allunyat del eix neutre $y=\pm 7,5\text{mm}$.

$$\sigma_{x,freixe} = n_{freixe-fibra.v} \frac{-M_z}{I} y = 0,343339 \frac{490,5 \cdot 1000}{44946,18} (\pm 7,5) = \pm 28,10 \text{ Mpa}$$

En primer lloc es pot observar que les tensions a la fibra són molt més grans que no pas al nucli. A més, si es calcula la tensió que aguanta la fibra just per sobre de la fusta es pot observar el salt en la distribució de tensions de la Figura 31, ja que la fibra està treballant a una tensió de 81,84MPa.

A continuació es procedeix a realitzar la simulació per comprovar que els resultats són els correctes.

- Simulació amb ANSYS:

Els primers passos que s'han de fer són: escollir el tipus d'element, entrar el model dels materials, crear la secció i crear la geometria que se simularà continuació. Un cop tenim tot això definit s'ha de crear una malla. La malla permetrà pel mètode dels elements finits calcular tots els esforços que rep la peça, és important escollir una bona mida de malla, ja que els resultats seran més o menys aproximats segons el tipus de malla.

Finalment s'han d'aplicar les condicions de contorn de la simulació. En aquest cas de flexió simple es restringeix el desplaçament en totes les direccions de la línia A i els desplaçaments U_y i U_z de la línia B. D'altra banda també es fixen les en X i Y deixant únicament lliure la rotació Z .

I s'aplica una càrrega als nodes centrals equivalent a la força F fixada anteriorment.

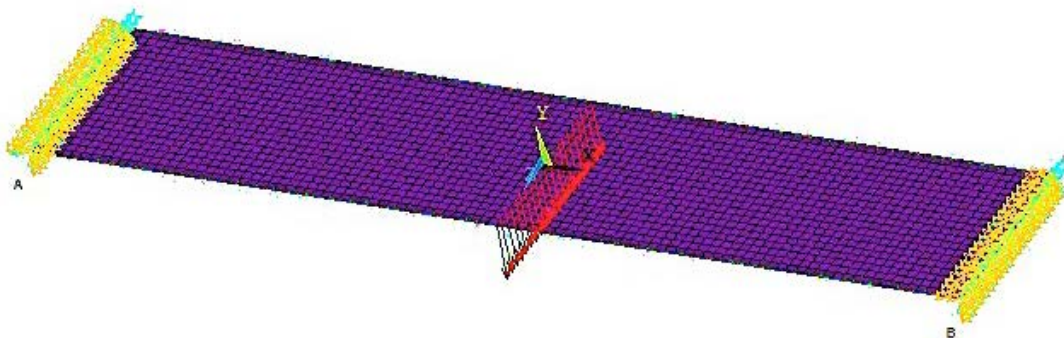


Figura 33: Condicions de contorn de la proveta simulada(ANSYS)

D'altra banda cal destacar, que al final de realitzar la simulació s'hauran de comprovar les reaccions no fos cas que estiguin malament, en aquest cas apareixeran forces/moments resultants que no han de ser-hi.

Resultats obtinguts:

Una vegada s'ha dut a terme la simulació es pot anar a la lectura de resultats. Per tal d'analitzar els resultats obtinguts s'utilitzarà l'opció d'anàlisi per element, ja que els resultats són més acurats.

SMN = -92.6937
 SMX = 92.6937

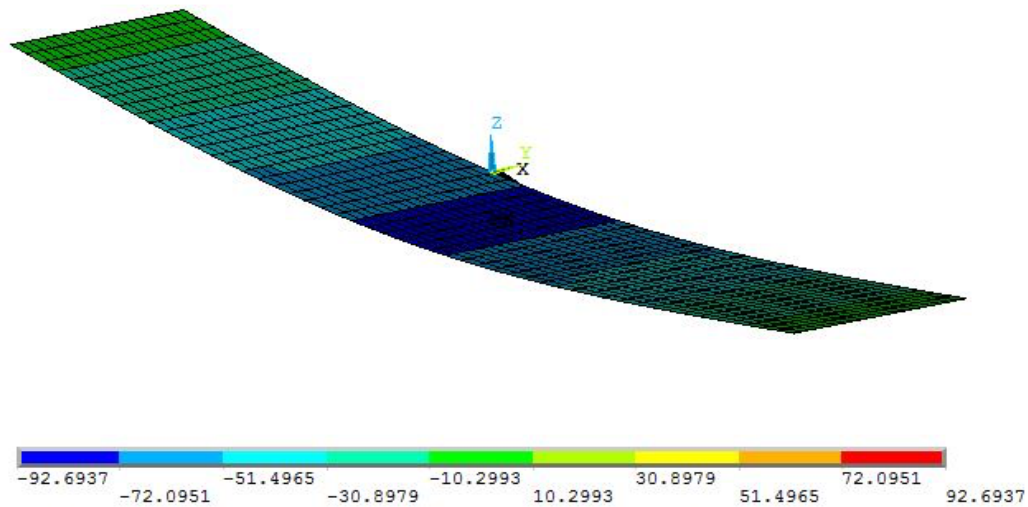


Figura 34: Distribució de tensions en la direcció X

Primerament, a la figura anterior es pot apreciar que el valor màxim de tensions és més gran cada vegada que s'analitza un element més proper a la par central de la proveta. D'altra banda, com era ja d'esperar també, s'observa que les tensions màximes a compressió se situen a la cara de dalt de la peça i les tensions màximes a tracció es situen a la part inferior. El simulador permet representar les tensions per cada capa (layer) en la Figura 34 estan representades totes però per a l'estudi de les màximes tensions a les diferents parts és útil representar únicament una capa determinada. Utilitzant aquest mètode d'anar seleccionant cada capa s'han extret els valors màxims absoluts per comparar-los amb els valors teòrics.

	Experimental (MPa)	Teòric (MPa)	Error(%)
Freixe	28,3214	28,10	0,7879
Fibra de vidre	92,6937	92,76	0,0724

Taula 8: Comparació entre valors teòrics i experimentals

Un cop comprats els resultats obtinguts amb la simulació i els calculats a mà prèviament s'observa que l'error obtingut és inferior al 1%, per tant es dona com a vàlid el model utilitzat pels càlculs següents.

9.2 Càlcul dels valors teòrics

Per tal de realitzar els càlculs teòrics de les tensions a les quals la taula està sotmesa es tornarà a dividir en cas de flexió i de torsió, ja que són dos anàlisis completament diferents.

- Flexió

En aquest anàlisi de flexió es verificarà prèviament abans de fer cap simulació si la secció dissenyada prèviament és capaç de suportar els esforços per tal de no malgastar el temps fent simulacions.

Com ja s'ha demostrat en el apartat 8.4 la taula en la seva part central està sotmesa únicament a una flexió pura, que vol dir, que el únic esforç que rep es un moment

de flexió. Per tant s'analitzarà la secció central de la taula, ja que és on aquesta és més estreta deguda al seu radi de gir.

Característiques de la secció crítica:

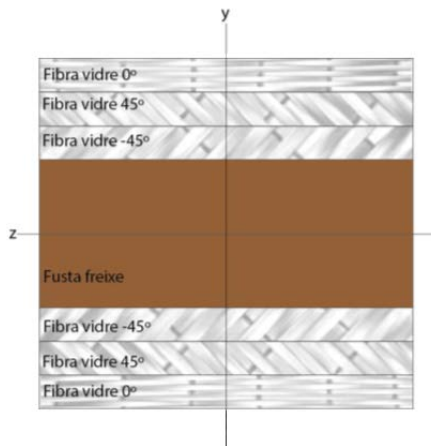


Figura 35: Esquema de la secció

x	0,6475 m
T	0
N	0
Mz	526,06Nm

On les alçades de cada banda són:

h_{freixe}	10mm
h_{-45°}	0,75mm
h_{45°}	0,75mm
h₀	1,5mm

Taula 9: Posició de la secció crítica i dimensions

S'ha escollit aquesta secció per tal de fer un primer anàlisi una vegada realitzats els càlculs i les comprovacions si s'escau s'escolliran unes altres dimensions o un altre tipus d'estructura.

Abans de realitzar l'estudi pel mètode de la secció equivalent s'ha de fer un incís en les fibres que estan orientades a 45°. Aquestes làmines no tenen les mateixes propietats en la direcció normal a la secció que les orientades a 0° sinó que conserven les seves propietats en la direcció que es col·loquen. Així doncs el primer procediment que s'ha de realitzar és quina aportació realitzen aquestes fibres en la direcció normal a secció per això s'utilitzaran les teories aplicades a aquest tipus de material.

El primer pas en aquests casos és calcular la matriu de flexibilitat en la direcció de la fibra i a continuació estudiar les seves propietats en les altres direccions realitzant un canvi de base.

$$[S]_{xyz} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & 0 \\ S_{yx} & S_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & S_{ss} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_x}{E_x} & 0 \\ \frac{-\nu_x}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}$$

$$[S]_{xyz} = \begin{bmatrix} 0,03013 & -0,00783 & 0 \\ -0,00783 & 0,14021 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1584 \end{bmatrix} (GPa)^{-1}$$

Pel que fa el canvi de base s'utilitzen les matrius $[T_\varepsilon]^{-1}$ i $[T_\sigma]$ aquestes matrius vénen definides per l'angle θ que forma la base d'estudi amb la base de la fibra.

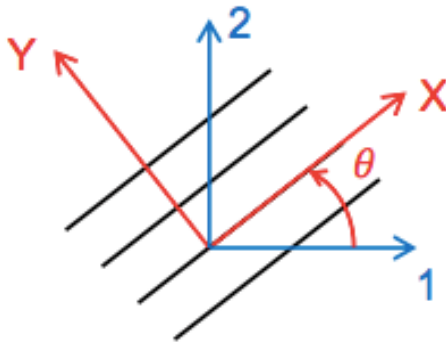


Figura 36: Representació de la orientació de la base de la fibra

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ 2mn & -2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

$$m^2 = \cos^2(\theta)$$

$$n^2 = \sin^2(\theta)$$

$$2mn = \sin(2\theta)$$

$$m^2 - n^2 = \cos(2\theta)$$

Obtenint així les matrius canvi de base per

45°:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix}; [T_\varepsilon]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

I per a -45°:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{bmatrix}; [T_\varepsilon]^{-1} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Com és d'esperar els valors en les direccions 1 i 2 són els mateixos per ambdós angles. Obtenint les matrius de flexibilitat:

$$[S]_{123} = [T_\varepsilon]^{-1} \cdot [S]_{xyz} \cdot [T_\sigma]$$

$$[S_{45^\circ}]_{123} = \begin{bmatrix} 7,849 & -0,0712 & -5,46 \\ -0,0712 & 7,849 & -5,46 \\ -5,46 & -5,46 & 18,689 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} (GPa)^{-1}$$

$$[S_{-45^\circ}]_{123} = \begin{bmatrix} 7,849 & -0,0712 & 5,46 \\ -0,0712 & 7,849 & 5,46 \\ 5,46 & 5,46 & 18,689 \end{bmatrix} \cdot 10^{-2} (GPa)^{-1}$$

Com per aplicar el mètode de la secció equivalent només és necessari el mòdul de Young en la direcció x només s'utilitzarà el valor S_{xx} . Aleshores si S_{xx} es defineix com $\frac{1}{E_x}$ es pot extreure el valor del mòdul elàstic equivalent per aquestes làmines.

$$S_{xx} = \frac{1}{E_x} \rightarrow E_{x,45^\circ} = \frac{1}{S_{xx}} = \frac{1}{7,849 \cdot 10^{-2}} = 12,671 \text{ GPa}$$

Ara si ja es pot procedir a aplicar el mètode de la secció equivalent. Primerament es calcula la relació 'n' entre mòduls elàstics. Com el mòdul elàstic més gran és el de les làmines a 0° l'equivalència es farà respecte d'aquestes. Si b=260mm:

$$n_{fibra.v45^{\circ}-fibra.v0^{\circ}} = \frac{E_{x,fibra45^{\circ}}}{E_{x,fibra0^{\circ}}} = \frac{12,671}{33,189} = 0,38178$$

$$n_{freixe-fibra.v0^{\circ}} = \frac{E_{x,greixe}}{E_{x,fibra0^{\circ}}} = \frac{12,6549}{33,189} = 0,38129$$

$$b'_{fibra.v45^{\circ}} = n_{fibra.v45^{\circ}-fibra.v} \cdot b = 82,628mm$$

$$b'_{freixe} = n_{freixe-fibra.v} \cdot b = 81,354mm$$

Seguidament es calcula la nova inèrcia equivalent a partir de les noves dimensions obtenint un valor:

$$I_z = 59307,7476 \text{ mm}^4$$

I finalment s'obtenen unes tensions màximes:

Per les fibres orientades a 0°:

$$\sigma_{x,fibra.v0^{\circ}} = \frac{-M_z}{I} \cdot y = \frac{526,06 \cdot 1000}{59307,7476} \cdot (\pm 8) = \pm 70,96 \text{ MPa}$$

Per les fibres orientades a 45°:

$$\sigma_{x,fibra.v45^{\circ}} = n_{fibra.v45^{\circ}-fibra.v0^{\circ}} \frac{-M_z}{I} \cdot y = 0,38178 \cdot \frac{526,06 \cdot 1000}{59307,7476} \cdot (\pm 6,5)$$

$$\sigma_{x,fibra.v45^{\circ}} = \pm 22,01 \text{ MPa}$$

Per el greixe:

$$\sigma_{x,greixe} = n_{greixe-fibra.v0^{\circ}} \frac{-M_z}{I} \cdot y = 0,38129 \cdot \frac{526,06 \cdot 1000}{59307,7476} \cdot (\pm 6,5)$$

$$\sigma_{x,greixe} = \pm 16,91 \text{ MPa}$$

Però el valor de les tensions de la fibra a 45° no és del tot real, ja que aquesta no està treballant completament a tracció a causa de la seva orientació. Per tal d'estudiar el valor de les tensions reals a les quals està sotmesa la làmina de 45° s'ha de realitzar un canvi de base.

$$[\sigma]_{xyz} = [T_{\sigma}] \cdot [\sigma]_{123} \rightarrow [\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 22,01 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11,05 \\ 11,05 \\ -11,05 \end{bmatrix}$$

Vist que cap dels valors supera la tensió de límit elàstic es dona per vàlida la secció per realitzar les simulacions a flexió i comprovar si els resultats obtinguts són els desitjats.

- Torsió

Pel que fa l'esforç a torsió apareix quan l'usuari realitza un gir. Aquest estudi és completament independent l'estudi de la flexió.

En estructures tipus sandvitx com el cas de la secció estudiada és molt difícil aconseguir un que representi amb exactitud els esforços que pateix la secció degut

a les propietats dels diferents materials. Així doncs es farà una suposició que es tracta d'una secció massissa composta d'un sol material per tal de poder aplicar les teories estudiades.

Per tal d'estudiar les distribucions de les tensions tallants al llarg de la secció s'utilitzaran els conceptes vistos amb anterioritat a Resistència de materials.

A una peça sotmesa a un moment torsor apareixen tensions tallants que segons la geometria de la secció es distribuïran de manera completament diferent. Les tensions tallants parteixen del centre de la peça amb un valor igual a 0 i augmenten a mesura que es van allunyant del centre, és a dir, són màximes a les capes exteriors de la secció.

Per a una peça de secció massissa es poden aplicar dues teories: la Teoria de Coulomb i la Teoria de Saint Venant. La primera és aplicable en seccions amb simetria circular, en canvi la segona és aplicable en seccions rectangulars o prismes. És a dir, en aquest cas s'utilitzarà la Teoria de Saint Venant, ja que la secció és equivalent a un prisma.

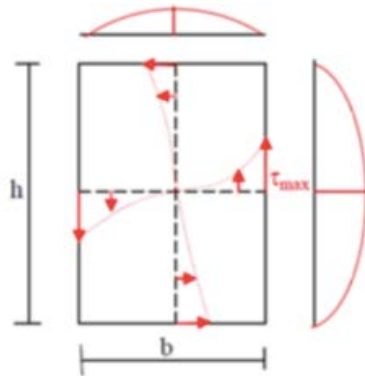


Figura 37: Distribució de tensions tallants segons Saint-Venant

Analitzant les distribucions segons la teoria de Saint Venant s'observa que les tensions màximes en aquest cas es localitzen a la cara superior de la taula.

I el valor màxim d'aquesta tensió es pot calcular mitjançant la fórmula:

$$\tau_{mas} = \frac{M_x}{k_1 \cdot b^2 \cdot h}$$

On k_1 és una constant que depèn del valor de b/h i del coeficient de poisson del material. Aquest valor es pot obtenir mitjançant les taules [11] d'un estudi de distribucions de tensions realitzar, i el valor de k_1 en aquest cas és d'aproximadament 0,3278.

Així doncs es procedeix al càlcul del valor de la tensió màxima esperada:

$$\tau_{mas} = \frac{M_x}{k_1 \cdot b^2 \cdot h} = \frac{612,82 \cdot 1000}{0,3278 \cdot 16^2 \cdot 260} = 28,08 \text{ MPa}$$

Aquesta tensió en la simulació ha d'aparèixer a la capa superior de la taula, s'ha de comprovar que així sigui a la simulació també.

Per tal de poder comprovar que les tensions són s'ha realitzat una primera simulació amb una proveta de les mateixes dimensions que la part central, és a dir, d'amplada 26cm i una alçada de 16 mm.

Per tal de realitzar la simulació s'ha fixat un dels extrems de la proveta restringint tots els moviments. I a l'altre extrem s'han aplicat dues forces puntuals per tal de generar l'extrem desitjat.

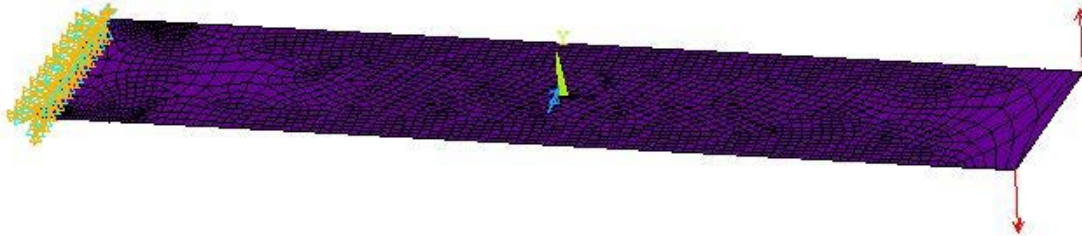


Figura 37: Condicions de contorn a torsió

Un cop fixades les condicions del model es procedeix a analitzar la solució. El primer pas a realitzar és comprovar que el valor de totes les reaccions són correctes. Un cop comprovat es procedeix al anàlisi dels resultats.

En aquest cas al aplicar els valors màxims obtinguts del moment tallant són una mica més grans(29,151Mpa) que el valor teòric (28,08MPa) però s'observa que aquest apareix tot just en els punts d'aplicació de les forces. Aleshores a es procedeix a analitzar una zona una mica més distant a la d'aplicació del moment i així doncs negligint els valors de l'extrem de la proveta s'obté:

SMN = -28.6061
SMX = 28.6061

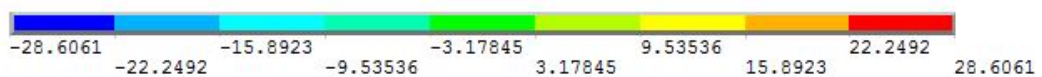
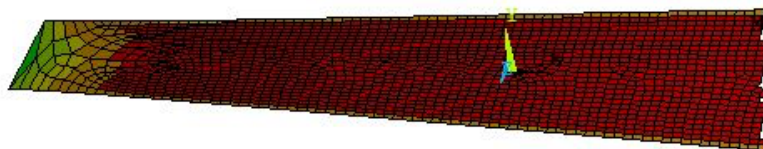


Figura 38: Distribució de tallants en la simulació a torsió

Aquest valor obtingut tot i no ser exactament el valor teòric és un valor més proper. A més si s'analitzen la distribució de tensions, s'observa que les tensions

màximes se situen a la cara superior de la taula tal com s'havia previst anteriorment.

	Experimental	Teòric	Error
Amb extrems	29,151 MPa	28,08 MPa	3,81%
Sense extrems	28,6061 MPa	28,08 MPa	1,85%

Taula 10: Comparació de resultats amb les puntes i sense

S'observa que per ambdós casos els errors respecte al valor teòric és inferior al 5%, tenint en compte que els càlculs teòrics s'ha pres la secció som si es tractes d'una secció massissa es donen per vàlids els resultats de la simulació i es procedeix a analitzar la taula de snowboard.

9.3 Simulació amb ANSYS

Una vegada comprovats que els models utilitzats i les aproximacions són correctes ja es pot analitzar el comportament de la taula dissenyada.

- Flexió

Pel que fa la geometria de la simulació a flexió s'ha importat un arxiu IGES del model construït amb SolidWorks.

En escollir el tipus d'element s'activa l'opció K8 explicada prèviament que permet el càlcul de les tensions a totes les làmines. A continuació s'entren les característiques dels dos materials que com ja s'ha dit anteriorment es tracten de dos materials ortotròpics. A continuació, s'entren les dimensions de cada làmina i la seva orientació.

La secció queda definida com es pot observar a continuació:

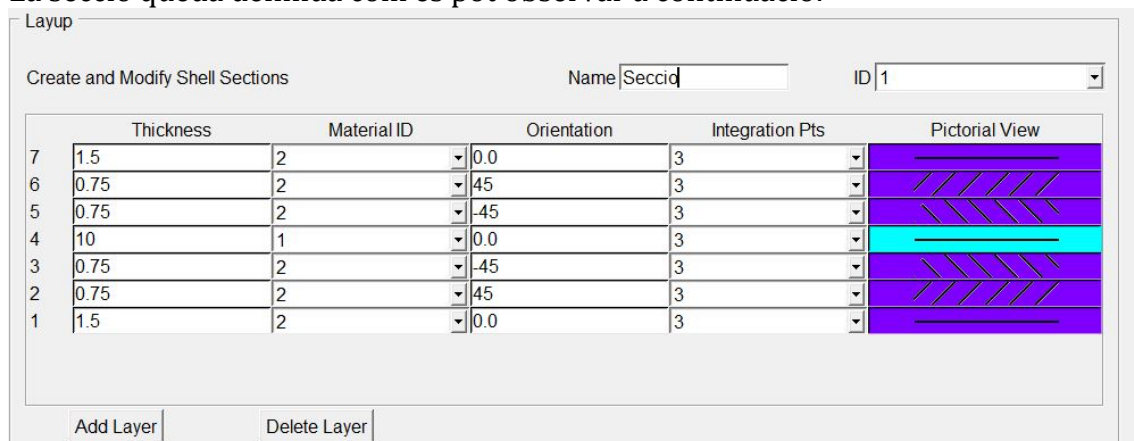


Figura 39: Entrada de les diferents làmines a ANSYS

A la Figura 40 es pot distingir entre dos tipus de material l'1 i el 2. Com és d'intuir el material 2 correspon a la fibra de vidre i el material 1 al freixe, en aquest pas s'ha d'anar amb molta cura a l'hora d'entrar les dades, ja que l'ordre d'entrada determinarà l'estructura de sandvitx. A més s'ha de tenir en compte que les

orientacions estan en graus sexagesimals, per tal d'evitar errors es recomana fer un plot de la secció i comprovar que és correcta.

A continuació s'ha de fixar una malla, aquesta és molt important, ja que determinarà la resolució dels resultats obtinguts. S'han anat provant diferents tipus de malles fins a arribar a una on la variació de les tensions d'una respecte l'anterior ha sigut menor a un 1%. A més no totes les parts de la taula han de tenir el mateix mallat, per exemple el tail i el nose no han de tenir molts elements, ja que no pateixen cap mena d'esforç.

Finalment s'ha fixat per l'anàlisi una malla amb 4962 elements, aquest quantitat d'elements dóna una bona aproximació del resultat i no suposa un gran cost computacional.

D'altra banda, en importar el model des d'un arxiu .IGES ha separat el tail i el nose de l'estructura central de la taula. Aleshores per solucionar aquest problema i evitar que es comportin com dos sòlids diferents s'ha procedit a realitzar couplings entre els nodes de les dues línies d'unió.

Com a condicions de contorn s'han aplicat a la línia de contacte amb el terra del tail restriccions de tots els desplaçaments excepte la rotació en ROTZ. En altre extrem, al nose, s'ha aplicat les mateixes restriccions que al tail deixant lliure a més a més el desplaçament en UX, ja que de fixar-lo podria aparèixer una reacció en X no desitjada que no concordés amb el model.

Finalment, s'han seleccionat els nodes en les franges on anirien les botes de l'usuari i s'hi ha aplicat la força fixada de 3g·m, meitat a cada banda. I s'obté el model simulació següent:

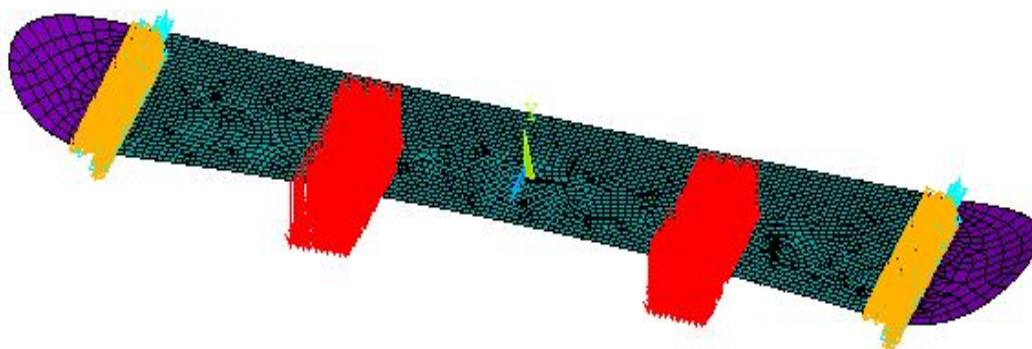


Figura 40: Condicions de contorn simulació a flexió

Una vegada obtinguda la solució el primer pas es comprovar les reaccions i s'observa que la única reacció que és diferent de 0 és R_y i amb un valor de 2943N, és a dir, a priori la simulació és correcta.

Seguidament s'han de comprovar els valors de les tensions per les diferents capes.

	Experimental	Teòric	Error
Fibra 0°	70,75925 MPa	70,96 MPa	0,2829%
Fibra 45°	22,39649 MPa	22,01 MPa	1,7560%
Freixe	17,56155 MPa	16,91 Mpa	3,8531%

Taula 11: Tensions normals suportades per cada làmina

Pel que fa els errors respecte a els valors teòrics s'observa que són molt similars, el valor que més diferent es respecte el teòric és el del freixe i tot i això és un valor inferior al 5%.

D'altra banda s'ha d'analitzar si les distribucions de les tensions són correctes. Per tal d'analitzar-ho s'utilitzarà la distribució de tensions en la capa de fibra amb angle igual a 0°.

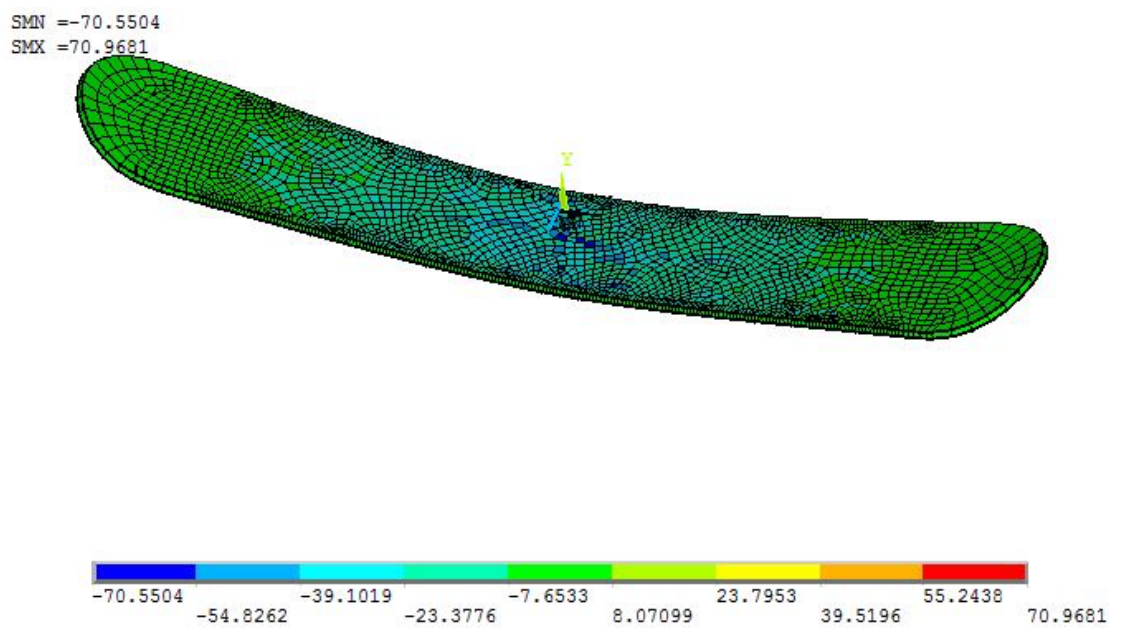


Figura 41: Distribució de tensions en X

Primerament, s'observa que tensions negatives estan a la cara superior i les positives a la cara inferior, és a dir, els signes són correctes. D'altra banda es pot observar la progressió que fa la tensió al llarg de la peça en direcció X. Es pot diferenciar com la zona central de la taula està sotmesa a més tensió que no les parts més allunyades (suports). Aquesta distribució és correcta, ja que els valors màxims del moment M_z es torba entre els dos punts d'aplicació de les forces.

Finalment es donen per bons els resultats obtinguts en aquesta simulació i s'analitzaran més endavant al punt 9.4 per tal de comprovar que els marges de seguretat són adients per la fabricació de la peça.

- Torsió

Pel que fa la simulació a torsió s'ha reaprofitat tots els passos realitzats en l'anàlisi a flexió, ja que la geometria, els materials i la secció són els mateixos.

Aleshores l'únic canvi que s'ha de realitzar són les condicions de contorn del sistema. Com ja s'ha realitzat a la simulació de prova anterior, s'han fixat en totes les direccions tots els nodes de la unió entre la part central de la taula i el tail.

D'altra banda s'ha aplicat el moment torsor a la unió amb el nose, i s'ha realitzat mitjançant dues forces puntuals a cada extrem de la taula en direccions oposades. Com l'amplada de la taula en aquest tram es de 310,18mm la força a aplicar per crear el moment torsor desitjat és de 1975,69N.

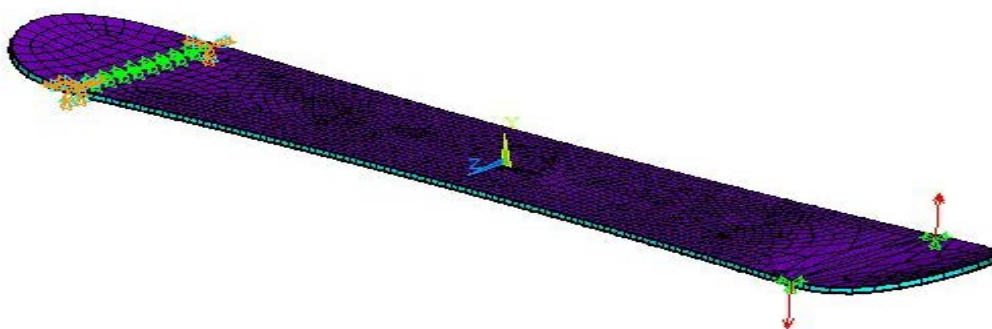


Figura 42: Condicions de contorn simulació torsió

Així doncs ja es pot inicialitzar la simulació i procedir a l'anàlisi dels resultats. El primer pas, com sempre, és comprovar els valors de les reaccions per tal d'analitzar si la simulació és correcta.

Un cop comprovat es realitza l'estudi de la distribució de tallants s'obté:

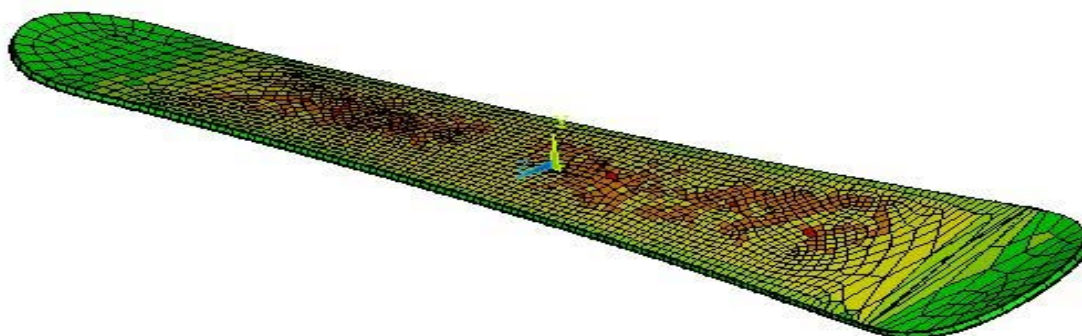


Figura 43: Distribució tallants a torsió

Es pot observar que l'acumulació de tensions a banda d'algun cas puntal s'acumulen a la part central de la taula que és on aquesta és més prima. Per evitar lectures de resultats erronis s'ha procedit a estudiar la part central de la taula on s'ha calculat el valor teòric de les tensions.

SMN = -28.666
SMX = 28.666

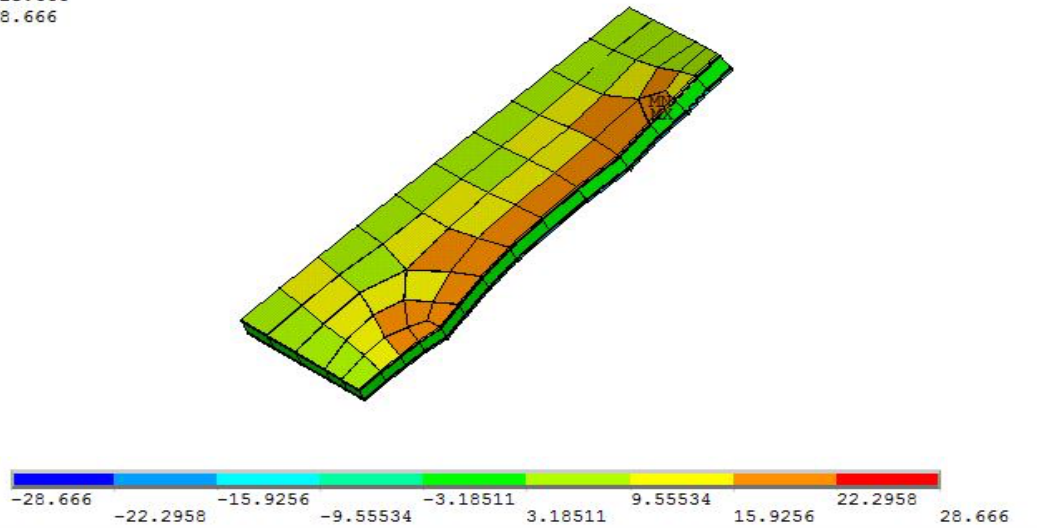


Figura 44: Distribució tallants a la secció central

A la Figura 45 es pot observar la distribució de tallants al llarg de la secció. S'observa que els valors menors en mòdul es localitzen a la zona del nucli i els valors màxims es localitzen a les fibres orientades a $\pm 45^\circ$

Així doncs si es procedeix a calcular el valor màxim de tensió a cada làmina s'obté que les tensions tallants són:

Làmina	Valor
Fibra 0°	22,2958 MPa
Fibra 45°	28,666 MPa
Fibra -45°	26,9271 MPa
Freixe	3,18511MPa

Taula 12: Valor de les tensions a cisallament

A priori, un diria que la tensió màxima a cisallament la rep la fibra a 45° però s'ha de recordar que aquestes làmines estan orientades, és a dir, que si es vol obtenir el valor real de les tensions que pateixen aquestes làmines s'ha de canviar de base el resultat. Es realitza amb el mateix procediment que anteriorment al punt 9.2.

$$[\sigma]_{xyz} = [T_\sigma] \cdot [\sigma]_{123} \rightarrow [\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 28,666 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 28,666 \\ -28,666 \\ 0 \end{bmatrix} MPa$$

Així doncs una vegada finalitzades les simulacions es procedeix a comprovar que les tensions que ha de suportar són assolibles pels materials.

9.4 Anàlisi dels resultats

Per tal d'analitzar si una capa pot o no suportar un esforç determinat s'utilitzarà el coeficient de seguretat. Aquest consisteix en la divisió del valor màxim assolible pel valor de treball. Si aquest valor és major a 1 la peça és capaç de suportar els esforços, en canvi si és menor no. Amb la finalitat que sigui més intuïtiu el càlcul dels coeficients de seguretat s'ha tornat a dividir l'estudi en dues parts, flexió i torsió.

- Flexió

Per les làmines de 0° s'obté:

Com les fibres treballen completament a tracció només interessa estudiar la tracció i compressió

$$\gamma_s = \frac{\min(X, X')}{\sigma_x} = \frac{743}{70,96} = 10,47$$

Per les làmines de 45° s'obté

S'obté després de realitzar el canvi de base: $[\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} 11,195 \\ 11,195 \\ -11,195 \end{bmatrix} MPa$

$$\gamma_s = \frac{\min(X, X')}{\sigma_x} = \frac{743}{11,195} = 66,368; \quad \gamma_s = \frac{\min(Y, Y')}{\sigma_y} = \frac{60}{11,195} = 5,359$$

$$\gamma_s = \frac{S}{\sigma_s} = \frac{85}{11,195} = 7,593$$

Per el freixe s'obté:

$$\gamma_s = \frac{\min(X, X')}{\sigma_x} = \frac{72}{16,91} = 4,258$$

S'observa que el coeficient de seguretat en relació a la flexió en cap cas és inferior a 1, és a dir, la secció suporta els esforços aplicats. A més cal destacar que el material amb un menor coeficient de seguretat és el freixe amb un valor de 4,258.

- Torsió

Per a les làmines de 0° s'obté:

$$\gamma_s = \frac{S}{\sigma_s} = \frac{85}{22,958} = 3,702$$

Per les làmines de 45° s'obté:

$$\gamma_s = \frac{\min(X, X')}{\sigma_x} = \frac{743}{28,666} = 25,919; \quad \gamma_s = \frac{\min(Y, Y')}{\sigma_y} = \frac{60}{28,666} = 2,093$$

$$\gamma_s = \frac{S}{\sigma_s} = \frac{85}{0} = \infty$$

Pel freixe s'obté:

$$\gamma_s = \frac{S}{\sigma_s} = \frac{10,3}{3,1851} = 3,234$$

Pel cas de la torsió s'observa que el valor més crític és per a les làmines de 45° amb un valor de 2,093.

Així doncs analitzant tots els coeficients de seguretat calculats s'observa que el coeficient mínim és dona quan l'usuari realitza un revolt a les làmines de 45°. Tot i que aquest coeficient no és molt alt encara dona marge de maniobra en cas que és superes la càrrega aplicada. Però cal destacar que l'estudi s'ha realitzat ja en unes condicions que no són condicions habituals de treball.

10. Optimització del disseny

Una vegada dissenyada i comprovada la geometria i la secció s'ha decidit intentar optimitzar el disseny modificant la geometria de la taula o bé reduït el material utilitzat.

En una primera instància es va pensar a utilitzar alguna làmina de fibra de carboni per augmentar les propietats mecàniques del disseny i aconseguir eliminar algunes làmines de vidre però es va arribar a la conclusió que no, ja que el preu de les làmines de fibra de carboni és molt més elevat que no pas el de les altres.

D'altra banda s'ha intentat reduir el gruix d'algunes làmines del sandvitx però a cada modificació el coeficient de seguretat de les fibres a 45° s'aproximava a un valor molt proper a 1 i fins i tot en alguns casos menor a 1.

Així doncs s'ha intentat eliminar massa d'allà on els esforços eren menors. Com bé ja s'ha vist anteriorment es localitzen al tail i al nose. Algunes marques sobretot d'esquí ja realitzen molts models amb petites perforacions/porositats al llarg de tota estructura.

Es realitzen quatre perforacions, dues a cada extrem, a una certa distància dels punts de recolzament i de la part més exterior.

A continuació s'ha realitzat la simulació on s'ha assajat la peça a flexió i els resultats obtinguts són:

	Experimental
Fibra 0°	71,2008 MPa
Fibra 45°	21,9317 MPa
Freixe	18,1523 MPa

Taula 13: Resultats simulació amb forats

S'observa que els valors de les tensions han variat respecte l'última simulació però són molt propers. Aquestes variacions són degudes al fet que la malla utilitzada no és la mateixa que en les altres anàlisis.

Així doncs la taula final obtinguda és la que es pot apreciar a la Figura 46.

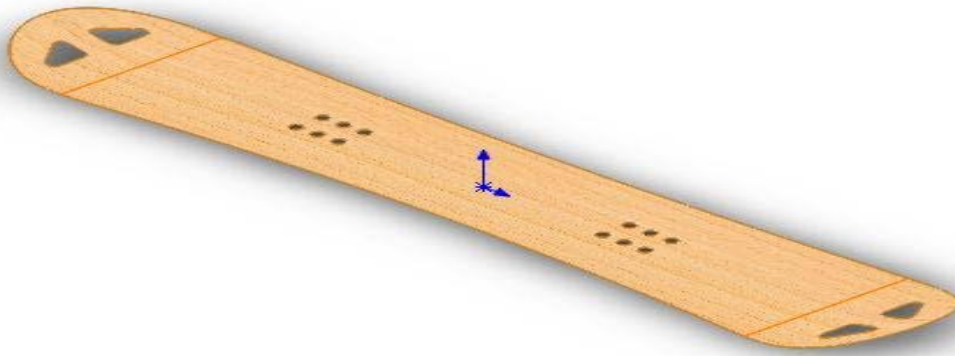


Figura 45: Disseny final de la taula

11. Impacte mediambiental

Pel que fa l'impacte mediambiental s'ha de tenir en compte tant els materials com els processos de fabricació que s'han d'aplicar per tal de poder obtenir la taula final.

Tots els materials a excepció del freixe són materials processats que s'obtenen a partir de processos industrials.

Per la fibra de vidre durant la seva fabricació es generen gasos deguts a la combustió, a més es generen residus de combustió, per exemple SO_2 i alguns òxids de nitrogen.

D'altra banda, durant la fabricació de les taules es genera un gran consum d'electricitat per tal de poder fer funcionar les màquines (premses, retalladores,...) que permetran obtenir la peça final.

A més es generen residus durant la fabricació, ja que no tot el material comprat acabarà formant part de la taula.

Un cop finalitzada la vida útil de la taula principalment existeixen dues opcions per minimitzar l'impacte mediambiental.

En primer lloc, és poden reciclar gairebé tots els components. Però el procés de separació és molt laboriós i finalment no s'acaba reciclant tot el material. A més una vegada enviats a reciclar només una mínima part es pot reciclar, ja que han estat sotmesos a processos químics i mecànics durant la seva vida útil.

En segon lloc, es pot reutilitzar amb una mica d'imaginació. És a dir, donar-li una altra utilitat a la taula. Fent una mica de recerca es poden torbar idees originals que permeten reutilitzar la taula donant-li un altre tipus d'ús. A continuació es mostren alguns exemples.



Figura 46: Alguns exemples de reutilització originals

12. Pressupost

El pressupost que és mostra a continuació només té en compte les hores destinades i els recursos utilitzats fins al moment. No té en compte la mà d'obra per la fabricació ni els recursos empleats en aquesta. Els preus per hora utilitzats corresponen a un preu mitjà d'un estudiant en pràctiques, que és equivalent a 14€/h. A més cal destacar que el preu de les llicències són el preu que un hauria de pagar per poder utilitzar-les tot i que durant l'execució d'aquest projecte s'han utilitzat llicències per a estudiants.

	Quantitat	Unitat	Preu per unitat€/u	Cost total
Investigació i estudi del projecte	120	h	14	1680€
Càlculs	140	h	14	1960€
Disseny	60	h	14	840€
Llicència SòlidWorks	5	Mesos	3024	15.120€

Llicència Ansys	5	Mesos	283	1.417€
Consum elèctric	320	h	0,03	9.6€
Accés a internet	5	Mesos	24	120€
Total				21.146.6€

Taula 14: Presupost del disseny

13. Conclusions

Reprement els objectius d'aquest projecte que eren realitzar un estudi que permetés la fabricació d'una taula de snowboard apta per a l'ús propi mitjançant els coneixements adquirits al llarg de la carrera, finalment s'ha aconseguit dissenyar una taula que suportés els esforços que un ha de realitzar durant la pràctica d'aquest esport.

Cal destacar que tot i tenir la gran majoria de coneixements que s'han anat aplicant al llarg del treball s'han posat en pràctica i aprofundit en la gran majoria de temes, en utilitzar materials compostos, els comportaments mecànics no són els mateixos que en les estructures estudiades.

A més per tal d'aconseguir simular materials compostos se li ha dedicat un gran nombre d'hores, ja que en les primeres simulacions els resultats obtinguts eren inversemblants i no concordaven amb les distribucions desitjades. Però finalment s'ha aconseguit realitzar les simulacions amb èxit.

D'altra banda cal destacar una part del disseny, l'optimització. En aquest apartat s'han realitzat unes perforacions a la part del nose i del tail que a l'hora de la construcció poden ser difícils de realitzar. Com el fet que hi siguin o no mecànicament gairebé no influeix al construir-la un decidirà si realitzarà les perforacions segons el treball que s'hagi d'emprar.

Per concloure, el resultat d'aquest projecte ha estat més que satisfactori, ja que permetrà en un futur realitzar una taula personal amb disseny propi. A més s'ha pogut aprofundir en l'estudi del comportament de la taula que un mai havia observat des d'aquest punt de vista.

14. Bibliografia

Roure Fernández, Francesc. Apunts de l'assignatura de Resistència de Materials (2017)

Roure Fernández, Francesc. Apunts de l'assignatura de Ampliació de Resistència de Materials (2018)

[1] TACTICS, Snowboarding size Chart & buying guide (2018) <https://www.tactics.com/info/snowboard-size-chart-and-buying-guide>

[2] Rodríguez, Luis. Materiales (Instituto superior de esquí i snow) (Febrer 2016) <https://www.slideshare.net/LuisGmez76/esqui-y-snowboard>

[3] M² Terrasa. Tejido Roving (2018) <http://www.m2terrassa.com/productos/fibra-de-vidrio/tejidos/tejido-silione-copia/>

[4] El Rincón de las Tablas. Construcción tablas Arbor. (2015) http://www.elrincondelastablas.com/blog/17_construccion-tablas-arbor.html

[5] Michael J O'Shea. Snowboard jumping, Newton's second law and the force on landing. 2004

- [6] Horton, Jason, Snow de récord (Agosto 2015)
<https://www.redbull.com/bo-es/records-mundo-snowboard-mas-impresionantes-velocidad-altura-longitud>
- [7] Decathlon. ¿Cómo elegir la tabla de snow?
<https://www.decathlon.es/eces/static/guias-consejo/consejos-snowboard/como-elegir-la-tabla-de-snowboard.html>
- [8] Mechanics of Sport. Snowboard (2018)
<http://www.mechanicsofsport.com/snowboarding/equipment/snowboards.html>
- [9] El Rincón de las Tablas,
http://www.elrincondelastablas.com/blog/17_construccion-tablas-arbor.html
- [10] Bonada Bo, Jordi, Apunts d'Anàlisi de Components Estructurals i Mecànics pel MEF (2018)
- [11] Sanmartín, Avelino. Distribución de tensiones tangenciales en bigas de sección constante bajo esfuerzos cortantes
http://oa.upm.es/35059/1/SAMARTIN_170.pdf

PLANÒLS

