

ESTUDI DE LA VIABILITAT DE LA SUBSTITUCIÓ DE LA FIBRA DE VIDRE PER FIBRES NATURALS EN EL COMPONENT D'UNA MOTO DE COMPETICIÓ.

Pol Vilella Viladés

Departament de Ciència i Enginyeria dels Materials

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Avda. Víctor Balaguer 1. 08800 Vilanova i la Geltrú.

Resum

Projecte sorgit de la preocupació per la preservació del medi ambient i la contribució a reduir les emissions de CO_2 produïdes en la fabricació, utilització i posterior reciclat dels materials compostos reforçats amb fibra de vidre.

L'interès prové, de les notícies recents d'aplicació de fibres naturals com a reforç en components d'automòbils de competició. Es decideix plantejar objectivament la vertadera viabilitat de substituir les fibres de vidre per una fibra natural que garanteixi un comportament similar a l'assolit per les fibres de vidre.

Introduïts els materials compostos, els tipus de fibres, matrius i processos de fabricació més rellevants; s'inicia un estudi comparatiu seleccionant una fibra natural capaç de competir amb la fibra de vidre.

Es fabriquen uns compostos només diferenciats pel tipus de reforç i caracteritzats a partir d'assajos de tracció i flexió. Per a la fabricació d'aquests compostos és important fixar les variables controlables que garanteixin la màxima igualtat entre compostos, amb l'objectiu de reduir les diferències que no siguin producte directament del tipus de fibra utilitzada. Per això la resina i el procés de fabricació emprats són iguals per tots els compostos elaborats en aquest treball.

Gràcies als resultats dels assajos s'avaluen les diferències entre compostos i es determina el potencial de les fibres naturals.

Posteriorment, s'avalua a través de simulacions i anàlisis d'esforços, si és factible aplicar els compostos realitzats en la fabricació de la cúpula de la moto elèctrica de l'equip de competició UPC Vilanova E3 Team.

Per acabar, es detallen totes les consideracions de reciclabilitat i sostenibilitat que objectivament cal tenir en compte en tractar amb aquests materials.

Paraules clau: Materials compostos, fibres naturals, fibra de vidre, fibra de lli, moto elèctrica, competició, sostenibilitat.

Abstract

This project stems from concern for preserving the environment and contributing to reduce carbon emissions produced in the manufacture, use and recycling of fibre-reinforced composite materials.

The interest comes from recent news of natural fibres being applied as reinforcements in race car components. It is decided to objectively establish the proper feasibility of replacing glass fibres with a natural fibre that ensures similar behaviour to that of glass fibres.

Once composite materials, fibre types, matrices, and most relevant manufacturing processes are introduced, a comparative study is started by selecting a natural fibre capable of competing with fibreglass.

The manufacture of composites is differentiated only by the type of reinforcement and is characterised by tensile and flexural testing. For the manufacture of these compounds, it is important to set controllable variables to ensure maximum equality between composites in order to reduce differences that are not directly related to the type of fibres used. This fact is why all the compounds produced in this investigation used the same resin and manufacturing process.

The results of the tests allow us to evaluate the differences between compounds and the potential of natural fibres is determined.

In addition, simulations and effort analysis were conducted to evaluate whether these compounds were feasible for use in the manufacture of electric motorcycle domes for the UPC Vilanova E3 Team competition team.

To conclude, all considerations of recyclability and sustainability that must be objectively taken into account are made.

Keywords: Bio-composites, glass fibers, natural fibers, flax fibers, motorsport, electric motorbike, sustainability.

1. Introducció

En el camp de la investigació, fa dues dècades que es treballa en la possibilitat d'utilitzar elements d'origen natural en l'elaboració de materials compostos. Estudis recents, pronostiquen un creixement anual de l'11% de la producció de materials compostos reforçats amb fibres naturals els pròxims cinc anys [1].

Seguint aquesta tendència, aquest estudi centra l'atenció a entendre les particularitats de les fibres d'origen natural i valorar el seu ús com a substitutes de la fibra de vidre en la producció de materials compostos destinats a components de competició.

A partir de la selecció d'un tipus de fibra vegetal, matriu i procés de fabricació, s'elabora un material compost que s'avaluarà i compararà amb un compost exactament igual però reforçat amb fibra de vidre. La determinació de les propietats dels compostos fabricats, es realitza a través d'assajos de tracció i flexió portats a terme a les instal·lacions del campus UPC de Vilanova i de Terrassa.

Analitzats els resultats dels assajos, es caracteritzen els materials per aplicar-los a la simulació dels esforços als quals el flux d'aire sotmet la cúpula de la moto elèctrica en condicions de competició. Aquests esforços es detallen mitjançant l'anàlisi aerodinàmic previ de la cúpula, simulant el comportament aerodinàmic observat a la carrera al circuit de Motorland, Alcanyís en l'edició 2021.

Finalment, per concloure la comparació, s'han tingut en compte els impactes mediambientals així com la reciclabilitat dels compostos generats i la sostenibilitat de tot el procés en si.

2. Objectius

Objectius principals en ordre d'esperat compliment:

- Fabricació d'un material compost reforçat amb fibres naturals.
- Determinar, mitjançant assajos de laboratori, quina justificació tècnica pot recolzar l'aplicació d'aquestes fibres en el disseny i manufactura de la cúpula de la moto elèctrica de competició.
- Comparar les propietats del compost reforçat amb fibres naturals amb el mateix compost fabricat amb fibres de vidre.
- Realitzar assajos dels compostos segons normativa estàndard.
- Amb els resultats dels assajos simular el comportament de cada material aplicat a la peça de la cúpula.
- Comprovar si el material reforçat amb fibres naturals és estructuralment vàlid per l'aplicació mencionada.
- Valoració objectiva dels beneficis ecològics de substituir la fibra de vidre per fibra natural.

3. Introducció Als Materials Compostos

Un material compost és tot aquell material resultant de la unió física entre un material que actua com a matriu (aporta la forma, transmet les càrregues i actua com a vincle entre reforços) i d'un o diversos materials que actuen com a reforços (aporten propietats mecàniques com resistència, rigidesa, duresa, etc.).

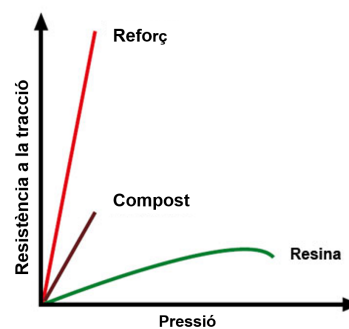


Fig. 1. Gràfica de relació pressió/resistència a la tracció dels materials base i resultant d'un compost [2]

Dins la família de materials compostos, diferenciem entre classes en funció del tipus de reforç utilitzat. A la figura 2 es detallen aquestes classes:

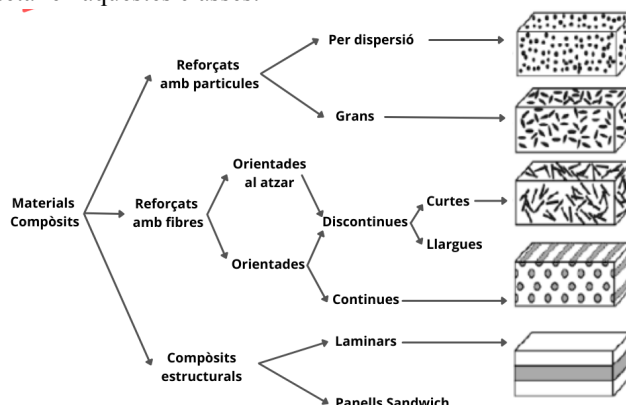


Fig. 2. Esquema classificació materials compostos segons reforç

Aquest estudi es focalitza en els materials compostos reforçats amb fibres orientades contínues. L'altre component imprescindible és la matriu seleccionada, les més emprades actualment són les termoestables, tot i que l'ús de matrius termoplàstiques, sobretot si són d'origen biodegradable, es troba en plena fase de creixement.

Per ampliar informació sobre els tipus de fibres, matrius i processos de fabricació es recomana consultar l'apartat 3: Materials compostos reforçats amb fibres de la memòria d'aquest projecte.

4. Bases i hipòtesi de l'estudi

La hipòtesi inicial contempla que el material reforçat amb fibres naturals obtindrà valors inferiors de mòdul elàstic i, per tant, de rigidesa en comparació a un compost reforçat amb fibra de vidre d'igual teixit i gramatge. S'espera que aquesta inferioritat es vegi compensada pel menor pes de la fibra natural, permetent recuperar el dèficit de resistència estructural amb un redisseny que afegeixi capes i orientacions (segurament de teixit unidireccional) al reforç natural.

En la literatura els valors publicats de propietats mecàniques són molt dispars i no sempre segueixen una normativa que permeti contrastar assajos. Es manifesta la necessitat d'un estudi basat en normatives estàndard per poder fer-ne una comprovació fiable.

5. Material compost reforçat amb fibra natural

d'assaig

Per poder fer una comparació rigorosa, cal seleccionar una fibra natural, una resina (matriu) i un procés de fabricació que compleixin els requisits mencionats a l'apartat 4 de memòria.

Les fibres contemplades són la fibra de bambú, cànem, lli, sisal, jute i kenaf. Es decideix que el lli és el material indicat per realitzar els assajos comparatius amb la fibra de vidre.

A Europa es troba el 85% del cultiu mundial de lli alhora que el temps de cultiu no supera els 100 dies. Aquestes dades mostren que tractem amb una planta d'absolut interès per la indústria europea. De fet, ja s'està impulsant com a alternativa a la fibra de vidre. Algunes empreses productores d'estructures tèxtils disposen de teixits tècnics de fibra de lli al mercat.

Els valors mitjans de resistència de tracció, compressió i mòdul de Young són moderats, amb una forta dependència del teixit seleccionat [3]. Aquestes propietats estan clarament condicionades pel diàmetre de les fibres i la seva distribució dins el tall de la planta; per aquesta raó existeix una gran variació en funció de cada fabricant i cada lot de producció.

Candidat òptim degut principalment a l'existència en el mercat de fibres tècniques.

Donat el caire ecològic del treball, idealment la resina seleccionada es trobaria dins la categoria dels termoplàstics d'origen biològic. Però la majoria d'estudis anteriors han optat per l'ús de resina epoxi (la de millors propietats) principalment degut a la seva bona i provada compatibilitat amb el lli. [4]

D'acord amb els resultats aconseguits en l'estudi "*Caracterització mecànica de biocompositos basados en residuos de pinocha*" d'A. Mengual, D. Juárez, R. Balart i S. Ferrándiz (referència [5]), on es comprova que en un compost reforçat amb fibres de dacsa (blat de moro) s'obté la millor interfase amb fibres naturals utilitzant resina epoxi GreenPoxy –elaborada a partir de carbó orgànic– es decideix utilitzar aquesta resina.

Per seleccionar el procés de fabricació, s'ha tingut en compte principalment el cost dels utilitatges, sempre a condició de garantir obtenir unes peces homogènies i que depenguin, en la menor mesura possible, de l'operari. Sobre la base dels avantatges i inconvenients dels diferents processos de fabricació, així com per les habilitats i recursos de l'estudiant, s'ha determinat que el procés que permetrà aconseguir unes peces de major qualitat, sense uns costos elevats, és el procés de laminat manual al buit, conegut també com a procés d'infusió.

La fabricació de les peces es portarà a terme al taller dels equips de competició, al laboratori VGA-032. A temperatura ambient i amb un curat de 24 hores. S'espera aconseguir làmines de mínim un 40% en massa de fibra de reforç.

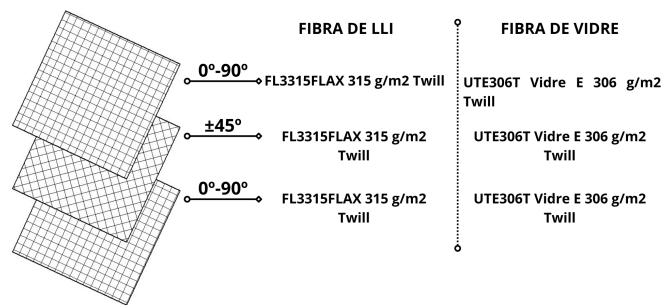


Fig 3. Disseny de l'orientació i número de capes del laminat

6. Assajos

Es consideren els assajos de tracció i de flexió com els més adients per caracteritzar els materials compostos obtinguts. L'assaig de tracció és el que millor permet valorar les diferències entre compostos i l'assaig de flexió corroborarà si el material és efectivament isotròpic, alhora que s'acosta més als esforços als quals estaria sotmès el material en cas d'utilitzar-se per fabricar la cúpula.

Cap normativa vigent fa referència a assajos de compostos reforçats amb fibra de lli. Així doncs, s'ha aplicat al material reforçat amb lli, en la mesura del possible, els mateixos requisits que s'aplicarien si es tractés d'un compost de fibra de vidre.

S'assagen els compostos de matriu GreenPoxy 33 reforçada amb fibres de lli o vidre conjuntament amb un tercer compost de matriu de polièster reforçat amb fibres de vidre per comparar amb el compost utilitzat actualment.

- Els assajos s'han portat a terme d'acord amb les normatives: UNE-EN-ISO 527.1:2020 Plàstics Determinació de les propietats a tracció; Part 1: Principis generals; Part 4: Condicions d'assaig per plàstics compostos isotròpics i ortotròpics reforçats amb fibres.
- UNE-EN ISO 14125: Compostos plàstics reforçats amb fibres. Determinació de les propietats a flexió.



Fig 4. Trencament a tracció d'una proveta de lli

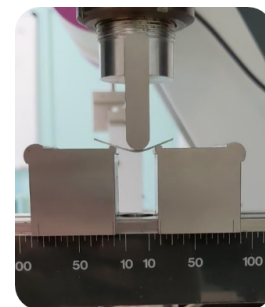


Fig 5. Trencament d'una proveta de lli a flexió

Del tractament i anàlisi de les dades recopilades en l'assaig de cada proveta s'obtenen els següents gràfics d'esforç / deformació:

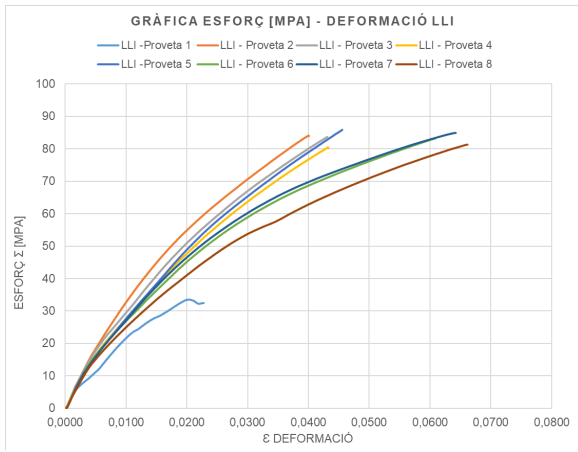


Fig 6. Tracció. Gràfic Esforç / Deformació. Lli - GreenPoxy 33

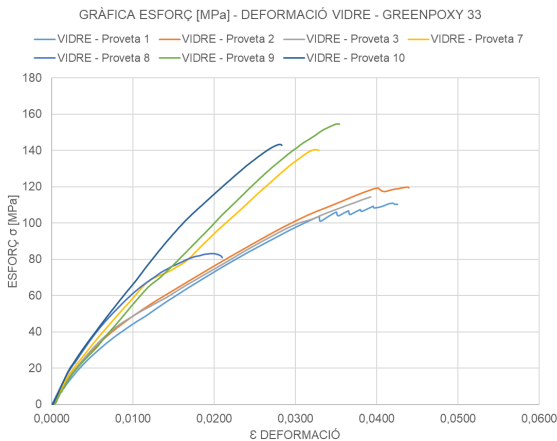


Fig 7. Tracció. Gràfic Esforç / Deformació. Vidre - GreenPoxy 33.

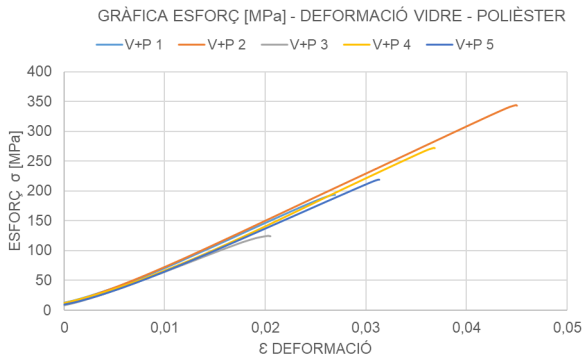


Fig 8. Tracció. Gràfic Esforç / Deformació. Vidre - Polièster.

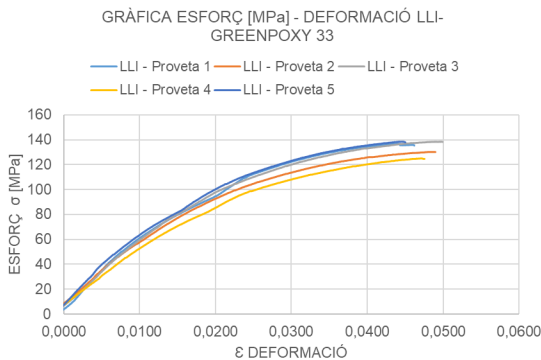


Fig 9. Flexió. Gràfic Esforç / Deformació. Lli - GreenPoxy 33.

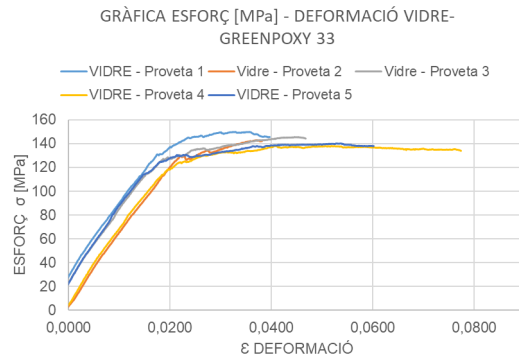


Fig 10. Flexió. Gràfic Esforç / Deformació. Vidre - GreenPoxy 33.

Sense entrar a valorar xifres concretes, el compost amb resina de polièster mostra una gran linealitat entre l'esforç i la deformació a diferència de comportament del compost amb resina GreenPoxy.

En la comparació entre els materials de matriu GreenPoxy, observem una corba de comportament similar en el cas de l'assaig a tracció, mentre que en l'assaig a flexió, l'esforç màxim és similar, però els efectes d'aquests esforços generen patrons desiguals.

7. Avaluació Dels Resultats

L'avaluació se centra a comparar el mòdul elàstic, l'esforç màxim i la deformació màxima de cada compost.

En els laminats de matriu GreenPoxy s'han tallat provetes en les dues direccions principals del teixit per determinar la variació de propietats, si és que n'hi ha.

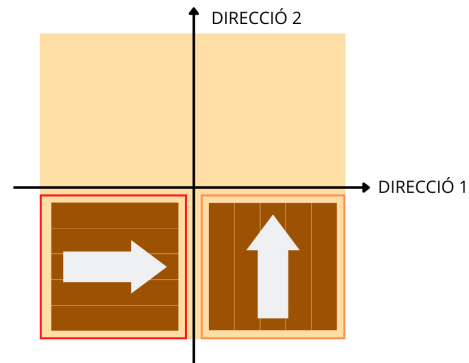


Fig 11. Direccions principals del laminat assajat

Valorant els resultats de la taula 1, en el cas del compost de lli, observem com en la segona direcció principal la deformació ha estat un 32,41% superior a l'obtinguda en la primera direcció, per un esforç de ruptura pràcticament igual de 83 MPa. Tot i això, el mòdul elàstic només varia un 5,02% entre ambdues direccions, aquesta desviació és vàlida per establir una mitjana total de 3,9 GPa.

El teixit de vidre clarament conté imperfeccions provinents del procés d'entramat, afectant directament en l'homogeneïtat de les orientacions, augmentant la variabilitat dels resultats, sobretot en comparació el teixit de lli.

La resistència mecànica del compost reforçat amb lli és un 36,17% inferior a la que és capaç de suportar el reforçat amb vidre, mentre que el mòdul elàstic és també un 48,76% inferior respectivament. El compost de lli és doncs menys

resistent i menys rígid alhora que permet un 25,22% més de deformació abans de la ruptura.

En la comparativa entre les resines Greenpoxy 33 i polièster –reforçades ambdues amb fibres de vidre– el compost amb matriu de polièster assoleix una resistència màxima mitjana

de 257,2 MPa. Un 49,22% superior a la que pot assolir la matriu GreenPoxy 33.

Per altra banda, la resina Greenpoxy 33 aconsegueix aportar un 39,17% més de rigidesa al compost. Pel que fa a la deformació, no s'observen diferències considerables inferiors al 9,10%.

Compost	E_T mitjà [GPa]	Desviació [%]	σ_m mitjà [MPa]	Desviació [%]	ϵ_m mitjà	Desviació [%]
Lli - GreenPoxy 33 Direcció I	3,985	3,81	83,55	2,71	0,0432	5,23
Lli - GreenPoxy 33 Direcció II	3,785	5,94	83,14	2,20	0,0639	4,14
Vidre - GreenPoxy 33 Direcció I	6,811	6,93	115,08	3,77	0,044	2,30
Vidre - GreenPoxy 33 Direcció II	8,196	8,24	146,15	5,15	0,034	10,37
Vidre - Polièster	4,629	5,64	257,21	25,86	0,035	21,02

Taula 1. Comparativa entre compostos dels valors d'assaig a tracció

Compost	E_r mitjà [GPa]	Desviació [%]	σ_{fM} mitjà [MPa]	Desviació [%]	S_m mitjà	Desviació [%]
Lli - GreenPoxy 33	6,031	24,79	133,718	4,40	6,0728	4,67
Vidre - GreenPoxy 33	7,271	5,66	143,174	3,21	3,2482	16,56

Taula 2. Comparativa entre compostos dels valors d'assaig a flexió

En contrast a l'observat anteriorment, ara valorant els resultats de la taula 2, el valor mitjà de mòdul elàstic a flexió del compost reforçat amb lli és un 45% superior a l'obtingut a tracció. Una diferència notable que per culpa de l'alt percentatge de desviació entre provetes assajades, juntament amb la bona reproductibilitat dels resultats del mòdul a tracció, obliga a atribuir una major credibilitat i consideració als valors resultants de l'assaig de tracció.

Pel que fa a la resistència a flexió, veiem que el compost reforçat amb lli mostra una de les seves majors virtuts: l'absorció de l'esforç a flexió (amortiment), deformant-se fins a un 46,51% més abans de la ruptura que el reforçat amb vidre.

En la comparativa amb el vidre, el lli és capaç de resistir el 82,95% del mateix esforç.

Per altra banda, és important contrastar com han contribuït les fibres a millorar les propietats de la matriu quantitativament. Basant-se en la regla de mesclades i conegut el valor experimental del mòdul, es compara aquest valor amb el qual obtindríem segons els mòduls teòrics de la fibra i la matriu utilitzada. Per aconseguir-ho cal definir un paràmetre que anomenarem eficàcia del reforç (k_i).

$$E_c = f_m \cdot E_m + f_f \cdot E_f \cdot k_i \quad \text{Regla de mesclades amb paràmetre eficàcia}$$

on:

E_c : mòdul elàstic compost experimental

E_m : mòdul elàstic matriu teòric

E_f : mòdul elàstic fibra teòric

f_m : fracció massica matriu experimental

f_f : fracció massica fibra experimental

k_i : eficàcia del reforç

Per portar a terme el càlcul, s'ha determinat el pes en grams d'una secció de teixit abans del procés d'infusió i s'ha comparat amb el pes d'una proveta d'igual dimensions un cop infusió. Obtenint per associació el contingut de resina (matriu).

Compost	Lli - Greenpoxy	Vidre - GreenPoxy	Vidre - Polièster
Contingut en fibra	45,2 %	73,62%	70,0%

Taula 3. Percentatge de contingut en massa de reforç

Amb aquestes dades i utilitzant els valors de mòdul elàstic extrets de la literatura (il·lustrats a la taula 1 de l'apartat 3.1.2 del projecte), s'ha calculat el mòdul que segons la regla de mesclades hauríem d'haver aconseguit per finalment calcular l'eficàcia del reforç.

Podem afirmar –donant una importància relativament baixa al mòdul teòric dels compostos– que el compost que ha assolit una major eficàcia és el laminat de matriu greenpoxy 33 reforçada amb fibres de lli amb un aprofitament 2,34 vegades superior (57,29% major) al que s'obté amb el reforç de fibres de vidre. Endemés l'ús de matriu greenpoxy 33, en lloc de matriu de polièster es confirma com una solució que permet aprofitar 1,94 vegades més el reforç de vidre pel que fa a la millora de propietats.

Compost	f_f	f_m	E_m	E_f	E_c (1)	k_i (2)
Lli - GreenPoxy 33	0,452	0,548	3,2	16	8,99	0,297
Vidre - GreenPoxy 33	0,736	0,264	3,2	72,5	54,2	0,127
Vidre - Polièster	0,734	0,266	4,3	72,5	54,4	0,066

Taula 4. Comparativa entre compostos de l'eficàcia dels reforços introduïts

8. Simulacions

L'acció de l'aire, genera una pressió que obliga la cúpula a treballar a flexió amb una distribució de flux i de pressions il·lustrada a la figura 12:

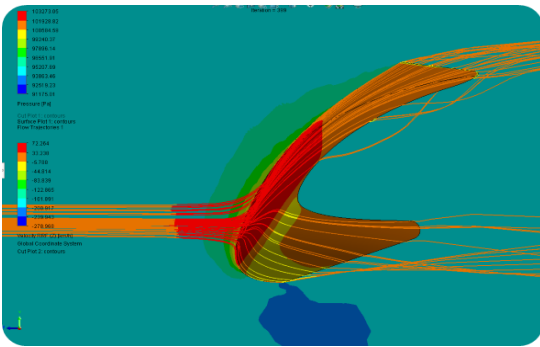


Fig 12. Vista de perfil distribució de velocitats del flux i pressions exercides per l'aire

En el model de cúpula simulat se situen restriccions d'articulació fixa, en els 5 punts de fixació definits i validats en el prototip de moto elèctrica 2021.

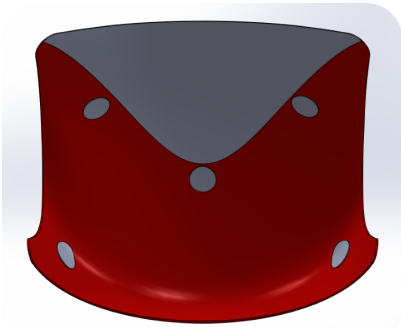


Fig 13. Vista posterior de la cúpula. Posició de les 5 restriccions de fixació

Gràcies als valors experimentals trobats en l'assaig de cada compost, s'han definit els valors característics de les propietats del material per tal de permetre al programari recrear el comportament de la peça en cas de fabricar-se amb aquests materials.

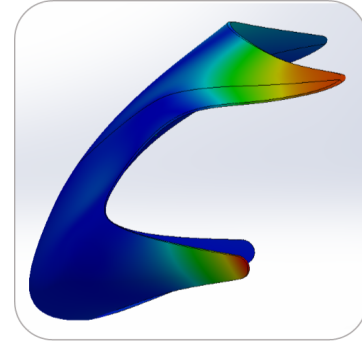


Fig 14. Vista de perfil resultats anàlisi de deformacions

S'aprecia dels valors de tensions obtinguts que no es produirà la ruptura de la cúpula sigui quin sigui el material utilitzat. Referent a les deformacions calculades pel programa, els valors resultants són coherents amb l'observat en la comparativa entre provetes.

El material compost que experimentaria majors deformacions seria el de matriu Greenpoxy 33 reforçada amb fibres de lli –coincident amb l'analitzat en els assajos empírics– seguit de l'emprat actualment de matriu de polièster reforçada amb fibres de vidre.

Compost	Tensió Màx [Mpa]	Deformació Màx [Mm]
Lli - Greenpoxy 33	2,491	1,000
Vidre - Greenpoxy 33	2,921	0,492
Vidre - Polièster	2,647	0,779

Taula 5. Valors de tensió i deformació màxima segons compost

En línia general, substituir la matriu de polièster per la matriu Greenpoxy 33 mantenint el reforç de fibres de vidre, aportaria major rigidesa a la cúpula. En comparar les rigideses dels compostos amb matriu Greenpoxy, es pot xifrar la diferència segons si el reforç amb fibres de vidre o lli en un 50,80% a favor del vidre. Aquesta diferència coincideix aproximadament amb l'analitzada en l'assaig a flexió que resultava en una diferència del 46,51%.

A partir dels resultats, usar el compost reforçat amb lli és viable; la seva capacitat d'amortiment (menor rigidesa) permet absorbir millor les tensions causades per l'acció del flux d'aire, traduint-se en unes menors tensions en les fixacions a canvi d'una major deformació. Aquesta deformació extra a més podria ser rectificada amb la inclusió en el disseny d'uns nervis de reforç en la cara posterior de la cúpula.

9. Reciclabilitat i sostenibilitat

Convertir el cicle de vida de la fibra de vidre en un cicle circular és un problema econòmic i legal de complicada sortida [6]. L'ús de la fibra de vidre a més a més es veu agreujat per les conseqüències sobre la salut tant dels operaris de les plantes d'obtenció i processat, com de l'usuari final, especialment sobre la pell, els ulls i les vies respiratòries. La producció de la fibra de vidre genera un impacte mediambiental desglossat en un consum energètic d'entre 150 i 170 MJ/kg i una petjada de CO_2 d'entre 9,5 i 10,5 kg/kg [7].

Per altra banda, l'aprofitament de fibres vegetals, reciclades de compostos, és viable si es té en compte l'alta variabilitat entre fibres d'un mateix compost; fent pràcticament obligatori convertir-les en pèl·lets abans de fer qualsevol altra operació [8].

La manipulació dels teixits de lli és pràcticament com treballar i tallar una peça de roba sense cap mena de dificultat operacional ni mesura de seguretat específica necessària. En aquest cas la problemàtica rau a separar les fibres de la matriu. El reciclat actualment se centra en la combustió per generar energia o la separació química i física per aprofitar la resina per a noves matrius, mentre el residu de fibres es destina a aplicacions com el farciment de panells com a aïllant acústic, adob agrícola i compactació en forma de pèl·lets per a combustió en calderes domèstiques i industrials. [4]. Les fibres naturals es consideren optimistament matèries amb una petjada de CO_2 neutre, a la vegada que el cost energètic de la seva producció oscil·la entre els 4 i 15 MJ/kg [3].

Mètode	Recuperació
Combustió	Energètica
Llit fluent	Energètica i de fibres
Piròlisi	Olis de resines i fibres
Hidròlisi en aigua supercrítica	
Separació química	Fibres
Separació mecànica	

Taula 7. Mètodes de reciclat i subproducte recuperable compost epoxi - fibres de vidre [9]

Per reciclar el compost de resina epoxi reforçat amb fibra de lli, els processos esmentats en el reciclatge del vidre no són del tot aplicables per l'excessiva degradació que produeixen a les fibres. Almenys si l'objectiu és reutilitzar les fibres en nous compostos.

Referent al reciclatge de la matriu (resina), investigacions recents portades a terme pel centre d'investigació del plàstic, amb seu a Jaén, han aconseguit avenços en el desenvolupament d'un mètode de reciclatge anomenat solvòlisi. L'estudi demostra la viabilitat de fer servir fins a un 30% de resina reciclada, en l'elaboració d'un nou material compost sense perdre propietats físiques i mecàniques en comparació a si utilitzéssim resina nova totalment [10].

10. Conclusions

Es va iniciar aquest projecte esperant obtenir un compost reforçat amb fibres naturals, aquest objectiu s'ha vist complert amb la fabricació i assaig del compost reforçat amb fibra de lli.

Les propietats mecàniques obtingudes amb el reforç de lli són inferiors a les que ofereix el reforç de fibra de vidre. Aquest resultat era contemplat, però s'esperava que aquesta inferioritat fos compensada pel conjunt d'avantatges que teòricament oferiria la fibra de lli (un 43% més lleugera, baix cost de la matèria primera, recurs renovable, biodegradable, etc.). La realitat de la fabricació i dels assajos reflexa que els avantatges no són tals, sobretot sorprèn el canvi pel que fa a lleugeresa; el teixit de lli va absorbir el doble de resina del que es contemplava, aconseguint uns laminats que –amb el teixit sec la diferència de pes entre el teixit de vidre i de lli era només d'aproximadament 3 grams per proveta– un cop realitzada la infusió de la resina, el pes d'una proveta de lli era pràcticament el doble que el d'una proveta de vidre.

El suposat menor cost de les fibres naturals tampoc és cert del tot; el cost del teixit de lli és molt superior al cost del teixit de fibra de vidre. Com bé diu la literatura, és cert que la matèria primera (la fibra) resulta molt més econòmica, però la complexitat del processament de les fibres encareixen el cost del teixit. El sobrecost del producte de lli suposa pagar un 88% més en comparació a l'adquisició del teixit de vidre.

Tot i no millorar el compost de vidre en cap propietat, les simulacions mostren que el compost reforçat amb lli podria ser aplicat en la fabricació de la cúpula sense originar problemes estructurals. Però aquest canvi de material en l'aplicació no té cap justificació tècnica, i encara menys quan es tracta d'un component de competició on el principal objectiu és la reducció de pes. El canvi només es justifica objectivament en l'apartat del reciclatge i sostenibilitat, àmbits en els quals el lli si suposa una reducció de la petjada de CO_2 considerable.

Tot i la no idoneïtat de la matriu utilitzada –perseguint unes millors propietats mecàniques– la reciclabilitat del compost de lli requereix menys esforços energètics que el reciclatge del compost reforçat amb fibres de vidre (tenint en compte que la diferència no és tan exagerada com es vol fer creure o podria semblar).

En definitiva, perquè els avantatges d'apostar per l'ús del compost reforçat amb fibra de lli siguin clars, caldria substituir la matriu greenpoxy 33 per una matriu biodegradable que potenciés els avantatges mediambientals d'emprar aquestes matèries primeres.

Per altra banda, en els estudis previs a l'actual, els assajos no segueixen una norma ISO i dificulten establir uns valors estàndard de les propietats mecàniques de les fibres naturals. Els més recents encara mostren variabilitat entre resultats, però amb els assajos fets en aquest estudi, es troben similituds amb els valors dels estudis més recents. Podem concloure doncs, que aquest estudi permet avançar en el camí cap a l'estandardització de les propietats mecàniques de la fibra de lli.

11. Accions De Futur

Sobretot cal homogeneïtzar el comportament esperable i millorar la baixa resistència interfacial, alta absorció d'humitat, baixa resistència al foc, limitada durabilitat ilimitada temperatura de servei (en cas d'emprar resines orgàniques i renovables).

Per solucionar les diverses problemàtiques, en línia amb les conclusions de la referència [1] es proposa seguir amb algunes de les vies d'estudi recomanades a continuació:

1. Millorar i estandarditzar la qualitat obtinguda en l'extracció de fibres.
2. Millora de les propietats d'interfase matriu-fibra.
3. Millorar la durabilitat del compost biodegradable: reduir l'absorció d'humitat, efectes de la temperatura i els rajos UV.
4. Assajos fiables sobre degradabilitat i vida útil.
5. Investigar nous i millorats biopolimers per substituir de manera definitiva les matrius extretes del petroli.
6. Expansió dels nanocomposites, aplicacions de nanofibres de cel·lulosa.
7. Hibridització: Variant utilitzada per aconseguir propietats combinades entre l'ús de fibres naturals i sintètiques conjuntament. Aquesta composició busca optimitzar i millorar les propietats mecàniques amb el menor cost possible. Es recomana envoltar la fibra més dèbil amb la més resistent, combinació més resistent a la degradació [11].

13. Agraïments

A Martin Vargas pels seus coneixements i ajuda en la fabricació dels materials compostos.

A Teo Muniategui, Maite Baile i Enric Martin, del departament de ciència i enginyeria de materials del campus UPC de Vilanova, per l'ajuda en totes les fases del projecte, presa de decisions i la realització d'assajos de tracció amb l'equipament del departament.

A José Ignacio Velasco i Marcelo De Sousa Pais Antunes, del departament de ciència i enginyeria de materials del campus UPC de Terrassa, per el consell en la preparació de les provetes i sobretot per la realització dels assajos de tracció i flexió dels compostos de lli i vidre amb matriu epoxi en les instal·lacions de Terrassa.

14. Bibliografia

[1] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Progress report on natural fiber reinforced composites [en línia]. *Macromolecular Materials and Engineering*, volum 299, n^o1, 9-26.

[Consulta 25/06/2022] Disponible a: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mame.201300008>

[2] Gazechim composites iberica. Composite: Resina polièster y fibra de vidrio [en línia]. Article publicat a 2 d'octubre de 2013.

[Consulta 10/03/2022]. Disponible a: <https://www.gazechim.es/noticias/actualidad/propiedades-resina-poliester-y-fibra-de-vidrio/>

[3] Pozo Morales, A. *Materiales compuestos de fibras naturales* [en línia]. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Madrid. Escola tècnica superior d'enginyeria aeronàutica i de l'espai.

Departament de materials i producció aeroespacial. 2019. [Consulta 17/03/2022]

Disponible a: https://oa.upm.es/55053/1/ANGEL_RENATO_POZO_MORALES.pdf

[4] Oliver Borrachero, B. *Estudio de la utilización de fibras naturales en materiales compuestos laminados para fabricación de componentes de automoción* [en línia]. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València. Departament d'enginyeria mecànica i de materials. 2021 [Consulta: 15/03/2022]. Disponible a: <https://riunet.upv.es/handle/10251/165809>

[5] A. Mengual, D. Juárez, R. Balart, S. Ferrándiz. *Caracterización mecánica de biocomposites basados en residuos de pinocha* [en línia]. *Cuadernos de investigación en la ingeniería Vol I: Avances en el área de materiales y sus procesos*, 45-52. Alcoy, Área de innovación y desarrollo, S.L. 2016. ISBN: 978-84-946684-9-4. [Consulta 17/04/2022] Disponible a: <https://www.3ciencias.com/libros/libro/cuadernos-investigacion-ingenieria/>

[6] T. Mari Dell'Olmo. *Análisis del impacto ambiental del reciclaje de las embarcaciones construidas en fibra de vidrio* [en línia]. Treball final de grau, Universitat Politècnica de Catalunya. Facultat de Nàutica de Barcelona. 2019 [Consulta 25/06/2022]. Disponible a: [Enllaç al treball a UPC Commons](#)

[7] CES EDUPACK. *Material compuesto GFRP isotrópico (Matriz Epoxídica Reforzada con fibra de vidrio)*. Fitxa tècnica. CES EDUPACK 2016. [Consulta 17/04/2022]

[8] M.D. Salvador, V. Amigó, A. Nuez, O. Sahuquillo, R. Llorens, F. Martí. *Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticos* [en línia]. Institut de tecnologia de materials, Universitat Politècnica de València. 2008. [Consultat 30/05/2022]. Disponible a: http://www.upv.es/VALORES/Publicaciones/CNM08_Fibras_naturales.pdf

[9] J.J. Manso. *Aprovechamiento integral de los composites fuera de uso* [en línia]. Article. *Canales sectoriales Interempresas*. Publicat a 18/02/2013. [Consulta 25/06/2022] Disponible a: <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/105966-Aprovechamiento-integral-de-los-composites-fuera-de-uso.html>

[10] MundoPlast. *Avances en el reciclado de resinas epoxi reforzadas con fibras* [en línia]. Article 30/05/2022. [Consulta 25/06/2022] Disponible a: <https://mundoplast.com/andaltec-reciclado-resinas-reforzadas-fibras/>

[11] Petrucci R, Santulli C, Puglia D, Sarasini F, Torre L, Kenny J. *Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion* [en línia]. *Revista materials and design* 49, 728-735, Editorial Elsevier, 2013. [Consulta 10/04/2022]. Disponible a: [Enllaç article a ScienceDirect](#)