

Treball de Fi de Grau

**Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Anàlisi del comportament d'una unió  
cargolada entre dues peces plàstiques  
reforçades amb fibra de vidre**

**MEMÒRIA**

Autor: Jordi Vendrell Gallart  
Director: Jordi Fàbrega Freixes  
Data: Juny 2020



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

En aquest projecte de final de grau es té com a objectiu principal analitzar el comportament a tallant que presenta una unió cargolada entre dues peces de plàstic formades per una matriu de resina de polièster i un reforç de fibra de vidre, és a dir, entre dues peces d'un material compost. Com a context, s'ha considerat el tipus d'unió que es podria trobar en la carcassa d'una aerogenerador eòlic.

En primer lloc, es volien dur a terme uns assajos experimentals, els quals no s'han pogut acabar realitzant degut a l'emergència sanitària global declarada a causa del Covid-19. S'han documentat exhaustivament com si s'haguessin fet però sense obtenir resultats, ja que és un material útil per entendre la resta del projecte.

En segon lloc, s'ha estudiat aquesta unió de dues peces de material compost des d'un punt de vista teòric. Amb aquests càlculs realitzats, s'ha acabat determinant de quina manera fallarà el conjunt.

En tercer lloc, s'ha estudiat també aquesta unió des del punt de vista d'una simulació per ordinador fent servir el conegut mètode dels elements finits. S'ha desenvolupat de forma exhaustiva i també s'ha pogut acabar determinant, amb els resultats obtinguts, de quina manera entrarà en fallada el conjunt.

Ja per acabar, s'ha desenvolupat un petit punt de correlació de resultats per extreure determinades conclusions de l'estudi d'aquest sistema d'una unió cargolada de dues peces de material compost des dels dos punts de vista treballats: el teòric i la simulació.



## Agraïments

En aquest apartat, primerament, voldria donar el meu més sincer agraïment a en Jordi Fàbrega Freixes, que ha estat el director d'aquest projecte. En tot moment m'ha anat guiant i donant coneixements per tal de que pogués anar aprenent i avançant. Ha sigut gràcies a això i al seu suport constant que he pogut desenvolupar aquest treball i introduir-me en tot aquest gran món dels *composites*.

Seguidament, també voldria donar el meu agraïment a en Jordi Capdevila Gonzalez, per haver-me transmès alguns dels seus molts coneixements en simulació amb *Ansys* quan ho he necessitat.

I ja per acabar, i no menys importants, voldria agrair el suport incondicional que sempre em donen els meus dos germans i els meus pares.



# Sumari

Resum . . . . .	3
Agraïments . . . . .	5
<b>1 Introducció</b>	<b>11</b>
1.1 Objectius . . . . .	12
1.2 Abast del projecte . . . . .	12
<b>2 Assaig experimental</b>	<b>13</b>
2.1 Conceptes bàsics . . . . .	14
2.1.1 Unió cargolada . . . . .	14
2.1.2 Material <i>Composite</i> . . . . .	15
2.1.3 Assaig a cisalla de la unió . . . . .	16
2.2 Objectius de l'assaig . . . . .	17
2.3 Material necessari . . . . .	17
2.3.1 Platines de fibra de vidre . . . . .	17
2.3.2 Conjunt cargol-femella-volandra . . . . .	19
2.3.3 Elements de mesura . . . . .	21
2.3.4 <i>Spacers</i> . . . . .	22
2.3.5 Màquina d'assaig . . . . .	22
2.4 Normatives seguides . . . . .	23
2.4.1 ISO EN 1465 . . . . .	24
2.4.2 ISO EN 9664 . . . . .	24
2.5 Descripció del procediment de l'assaig . . . . .	25
2.6 Possibles mètodes de fallada . . . . .	25
2.6.1 Aixafament platina/cargol . . . . .	26
2.6.2 Estripament de les platines . . . . .	27
2.6.3 Tracció/ruptura de les platines . . . . .	27
2.6.4 Cisalladura/ruptura del cargol . . . . .	28
<b>3 Anàlisi teòric</b>	<b>29</b>
3.1 Conceptes previs . . . . .	30
3.1.1 Força $F_t$ d'ajust de la unió cargolada . . . . .	30

3.1.2	Límits elàstics . . . . .	31
3.2	Càlcul dels mètodes de fallada . . . . .	31
3.2.1	Aixafament de les platines . . . . .	32
3.2.2	Aixafament del cargol . . . . .	33
3.2.3	Estripament de les platines . . . . .	33
3.2.4	Tracció/ruptura de les platines . . . . .	35
3.2.5	Cisalladura/ruptura del cargol . . . . .	35
3.3	Anàlisi dels resultats . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Simulació per elements finits</b>	<b>37</b>
4.1	Introducció al mòdul <i>ACP PrepPost</i> . . . . .	38
4.2	Estructura de la simulació . . . . .	39
4.2.1	Càlcul teòric inicial . . . . .	40
4.2.2	Mòdul <i>ACP(Pre)</i> . . . . .	41
4.2.3	Mòdul <i>Static Structural</i> . . . . .	51
4.2.4	Mòdul <i>ACP(Post)</i> . . . . .	55
4.3	Anàlisi dels resultats . . . . .	56
4.3.1	Deformacions . . . . .	56
4.3.2	<i>Contact Tool</i> . . . . .	57
4.3.3	<i>Failure Criteria</i> . . . . .	58
4.3.4	Conclusions extretes . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Correlació de resultats</b>	<b>63</b>
	<b>Estudi econòmic i Planificació</b>	<b>65</b>
	<b>Impacte Ambiental</b>	<b>69</b>
	<b>Conclusions</b>	<b>73</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>75</b>



# Índex de figures

2.1	Vista dimètrica del muntatge d'una unió cargolada. . . . .	14
2.2	Il·lustració d'un <i>fabric</i> QTX de fibra de vidre. . . . .	15
2.3	Esforç a tracció en l'assaig a cisalla d'una unió. . . . .	16
2.4	Vista isomètrica d'una platina. . . . .	18
2.5	Dimensions geomètriques d'una platina. . . . .	18
2.6	Plànol d'un cargol DIN 933. . . . .	19
2.7	Plànol d'una femella DIN 985. . . . .	20
2.8	Plànol d'una volandera DIN 9021 amb el diàmetre exterior modificat. . . . .	20
2.9	Estris de mesura. . . . .	21
2.10	Vistes isomètriques. A l'esquerre, del conjunt platines- <i>spacers</i> , i a la dreta, d'un sol <i>spacer</i> . . . . .	22
2.11	Màquina servo-hidràulica amb control per computador (MTS). . . . .	23
2.12	Vista de l'aixafament d'una platina. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament. . . . .	26
2.13	Vista de l'aixafament del cargol. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament. . . . .	26
2.14	Vista de l'estripament d'una platina. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament. . . . .	27
2.15	Vista de la ruptura d'una platina. . . . .	28
2.16	Vista de la cisalladura del cargol. . . . .	28
3.1	Força $F_t$ de roscat de la unió cargolada. . . . .	31
3.2	Secció fictícia per a l'aixafament. . . . .	32
3.3	Detall de les seccions que treballen a cisalla. . . . .	33
3.4	Distància estudiada. . . . .	34
4.1	<i>Workflow</i> de <i>composites</i> amb <i>Ansys</i> . . . . .	38
4.2	Mòduls de treball utilitzats. . . . .	39
4.3	Posició de les platines en l'inici de la simulació. . . . .	40
4.4	Comportament de la proveta en l'assaig. . . . .	41
4.5	Propietats d'un <i>UD ply</i> versus propietats d'un <i>BIAX ply</i> . . . . .	42

4.6	Geometria importada a l' <i>Ansys</i> . . . . .	43
4.7	<i>Contact Bonded</i> entre una de les platines i un dels <i>spacers</i> . . . . .	44
4.8	<i>Contact Frictionless</i> entre l'aresta del forat d'una platina i tota la superfície externa del cargol. . . . .	45
4.9	Paràmetres ajustats del <i>Contact Frictionless</i> entre l'aresta del forat d'una platina i tota la superfície externa del cargol. . . . .	46
4.10	Detall de la <i>Pinball Region</i> . . . . .	47
4.11	<i>Color Legend</i> del <i>Contact Tool</i> . . . . .	47
4.12	Taula amb els resultats del <i>Contact Tool</i> . . . . .	48
4.13	Mallat definitiu de la geometria. . . . .	48
4.14	Detall de les zones refinades. . . . .	49
4.15	Propietats mecàniques en un diagrama polar. A l'esquerra del <i>Fabric</i> i a la dreta de l' <i>Stackup</i> . . . . .	49
4.16	Apilament de les capes. . . . .	50
4.17	<i>Fabric</i> orientat a 0°. . . . .	50
4.18	<i>Fabric</i> orientat a 45°. . . . .	51
4.19	<i>Section Cut</i> . . . . .	51
4.20	<i>Boundary Conditions</i> . . . . .	52
4.21	Convergència de la Força. . . . .	53
4.22	Convergència del Desplaçament. . . . .	54
4.23	Convergència del Moment. . . . .	54
4.24	Opcions definides en l' <i>ACP (Post)</i> . . . . .	55
4.25	Deformació direccional en x del cargol i la platina de la dreta (la que s'estira). . . . .	56
4.26	Detall de la deformació direccional en x del cargol. . . . .	56
4.27	<i>Contact Tool</i> del contacte entre cargol i platina. . . . .	57
4.28	Índex de <i>Tsai-Wu</i> per a 0,5 mm de desplaçament. . . . .	59
4.29	Índex de <i>Tsai-Wu</i> per a 1,5 mm de desplaçament. . . . .	59
4.30	Índex de <i>Tsai-Wu</i> per a 2,5 mm de desplaçament. . . . .	60
4.31	Índex de <i>Tsai-Wu</i> per a 2,5 mm de desplaçament extret de l' <i>ACP (Post)</i> . . . . .	60
4.32	Índex de <i>Tsai-Wu</i> visualitzat amb l'eina <i>Probe</i> per al <i>Substep 8</i> , transcorreguts 0,4 s. . . . .	61
4.33	Gràfic per determinar la força de fallida del conjunt en la simulació. . . . .	62
5.1	Diagrama de Gantt del projecte. . . . .	66
5.2	Fases del cicle de vida genèric d'un material <i>composite</i> . . . . .	70

# Capítol 1

## Introducció

En els últims temps, quan es parla del món de l'enginyeria i, més concretament, de la resistència de materials, és ja habitual sentir moltes més coses sobre *composites* que no pas sobre altres materials amb anys d'història com són els metalls o les fustes. I és ben cert que des de la invenció de les fibres de vidre (o d'altres tipus) i de les resines plàstiques (o de polièster), els sistemes de fabricació de moltes indústries han evolucionat dràsticament cap a aquests materials. La unió d'aquestes matrius de resines plàstiques amb les fibres de vidre com a reforç potent formen el que se'n diu un *composite*, en català, un material compost. Probablement, els dos camps on actualment s'utilitzen més aquests materials i en els que se'n preveu un *boom* enorme durant els propers anys són, se'ns dubte, l'aeronavegació i l'eòlica. En aquest projecte s'ha volgut centrar l'atenció en aquest últim camp, posant especial èmfasi en els aerogeneradors *offshore*, doncs formen una tecnologia molt puntera arreu del món i no és d'estranyar que s'hagi apostat per la utilització de *composites* per a fabricar-los. Aquest tipus d'aerogeneradors, per qui no n'hagi sentit parlar, són turbines enormes que es situen a alta mar, amb l'objectiu d'aprofitar la força del vent que es produeix en aquest ambient, on arriba a assolir velocitats superiors i més constants que a altres llocs on hi ha camps eòlics, degut a la inexistència de barreres. És per aquest motiu també, que aquests aerogeneradors han d'estar dotats de les últimes innovacions tècniques per tal resistir i no defallir. Per això precisament utilitzen plaques fetes amb matrius de resines plàstiques reforçades amb fibra de vidre, doncs són materials amb una gran resistència i una baixa densitat. I cal dir aquí que la unió més freqüent, i també la més simple de totes, que es fa servir per unir aquestes plaques és la coneguda com unió cargolada. I és totalment per això que s'acaba d'explicar, que en aquest projecte es vol fer un anàlisi acurat d'aquests tipus d'unions de plaques fetes amb *composites* representant les carcasses d'aquests immensos aerogeneradors *offshore*, per tal de veure'n la seva resistència al vent i quin comportament tenen o deixen de tenir.

## 1.1 Objectius

A grans trets, i tal i com es pot extreure del títol d'aquest projecte, l'objectiu principal és dur a terme un anàlisi de la unió cargolada de dues peces plàstiques reforçades amb fibra de vidre per tal de veure quin comportament tenen. Però si s'entra a parlar d'aspectes més tècnics i més detallats, es pot dir que en aquest projecte es pretén analitzar el comportament a tallant que presenta una unió cargolada de dues peces plàstiques quan a aquestes se'ls hi aplica un esforç a tracció pels seus extrems, i tenint en compte que el material que les compon és un *composite* format per una matriu de resina de polièster i un reforç de fibra de vidre. Per tal de veure aquest comportament, s'hauria procedit, en primer lloc, a fer uns assajos experimentals de la unió cargolada, però degut a l'emergència sanitària global declarada a causa del Covid-19, això no ha estat possible. Tot i així, s'ha documentat tot el procediment previ i s'ha suposat un possible resultat del comportament que s'hauria obtingut, el qual ha estat correlat per un anàlisi teòric i una detallada simulació per elements finits amb el programa *Ansys* i el mòdul *ACP PrepPost*. I tal i com s'ha exposat anteriorment, el context en el que s'ha aplicat aquest estudi és en la carcassa d'un aerogenerador *offshore*.

## 1.2 Abast del projecte

Pel que fa a l'abast del treball, per tal de complir amb l'objectiu de predir i veure quin comportament té una unió cargolada de dues peces es poden dur a terme molts assajos diferents i, també, tenint en compte moltes especificacions tècniques diverses. Però en aquest projecte s'ha centrat l'atenció en un únic tipus d'assaig, l'assaig a cisalla. És a dir, s'ha volgut veure únicament com treballa la unió a cisalla i no, per exemple, com podria treballar a tracció o a compressió. D'altra banda, aquest assaig a cisalla s'ha triat també que fos aplicant un esforç de tracció a les platines que formen la unió, i no un esforç a compressió, per exemple. Per tant, es tindrà en compte solament aquest tipus d'assaig.

## Capítol 2

# Assaig experimental

Com s'ha pogut entendre en el capítol introductor, en aquest projecte es pretén estudiar i analitzar quin comportament té una unió cargolada de dues peces d'un material *composite* format per una matriu de resina de polièster reforçada mitjançant un apilament de fibres de vidre, el que és coneix també com un material FRP (*Fiber Reinforced Plastic*). Per tal de predir aquest comportament, la idea inicial era partir dels resultats d'uns assajos experimentals en un laboratori, doncs així s'hagués tingut una base més sòlida perquè s'haguessin obtingut els resultats de la pròpia proveta en estudi, i correlar-los amb un anàlisi teòric i una simulació per elements finits, també d'aquest assaig. Però tal i com s'ha comentat, els assajos experimentals no s'han pogut acabar realitzant per forces de causa major.

Tot i això, en aquest apartat s'exposa de manera detallada totes les instruccions i tota la informació necessària per tal de realitzar l'assaig, ja que també serà molt útil per entendre els següents capítols on es parla de l'anàlisi teòric i de la simulació per elements finits. S'ha tingut en compte un assaig a cisalla del cargol traccionant les dues platines pels seus extrems, fins a veure de quina manera falla el conjunt. S'expliquen tots els punts importants a tenir en compte fins al moment de realització de l'assaig, sense tenir imatges d'aquest ni els resultats que s'haurien obtingut.

## 2.1 Conceptes bàsics

Primer de tot, i per aconseguir realitzar un bon estudi en els assajos, cal entendre alguns conceptes que apareixen en aquest projecte. Si s'observa el títol 'Anàlisi del comportament d'una unió cargolada entre dues peces plàstiques reforçades amb fibra de vidre', veiem que apareixen dos conjunts de paraules claus. D'una banda 'unió cargolada', i d'altra 'peces plàstiques reforçades amb fibra de vidre'. Aquests dos conceptes juntament amb el tipus d'assaig que es durà a terme, assaig a cisalla, és el que s'explica en els tres següents apartats.

### 2.1.1 Unió cargolada

Una unió cargolada consisteix en un sistema Cargol-Femella que permet la transmissió d'un esforç normal a tracció o a compressió entre dues platines de la forma més senzilla i simple que pot existir, i és desmuntable. Per tant, es pot veure que els elements importants en aquest tipus d'unions són el cargol, la femella, dues peces a unir i també, en alguns casos, alguna volandera. En la secció 2.3 s'expliquen més detalladament cada un d'ells.

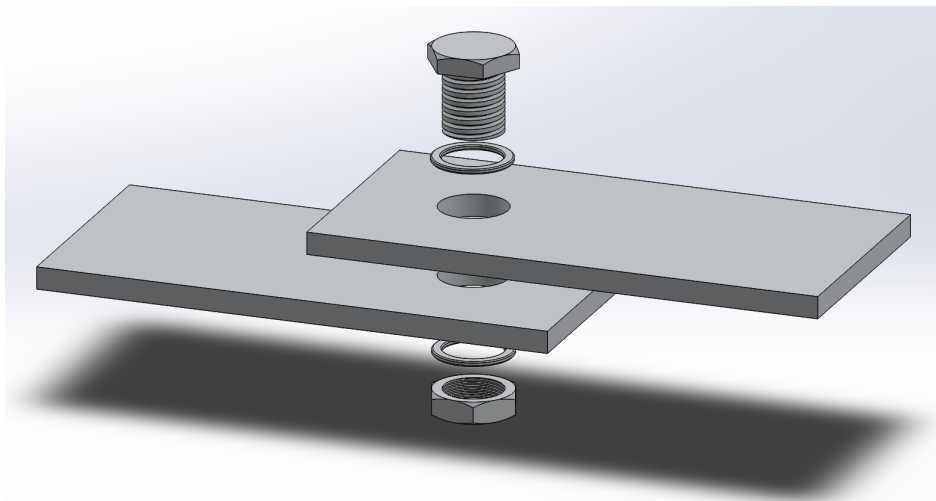


Figura 2.1: Vista dimètrica del muntatge d'una unió cargolada.

Si es centra l'atenció en la tecnologia que s'amaga darrera d'aquestes unions, bàsicament es pot veure que són com una màquina on s'aplica una força petita a la femella amb un recorregut llarg per davant i s'aconsegueix obtenir una força en sentit axial molt gran del cargol. Quan es té aquesta unió muntada, apareixen diferents forces aplicades a les platines unides que tendeixen a separar-les. Aquestes forces separadores, a grans trets, poden ser tant en direcció axial com en transversal i, també, en ambdues direccions a l'hora. I la finalitat de la unió és que estigui cargolada amb un parell prou alt com perquè aquestes forces separadores intervinguin el mínim possible en el muntatge.

## 2.1.2 Material *Composite*

Pel que fa al material, cal entendre bé de quin tipus és el que compon les platines que s'ajunten mitjançant la unió cargolada. Aquestes estan formades de *composite*, és a dir, de material compost, més concretament, són peces plàstiques formades per una matriu de resina de polièster que és reforçada a través de l'apilament de fibres de vidre.

L'objectiu de la creació dels *composites* és el d'aconseguir un material final amb unes propietats mecàniques superiors i millors a les dels 2 o més components que els formen per separat. Entrant més en detall, algunes d'aquestes propietats que es veuen millorades són la resistència a la corrosió, el pes, la rigidesa, la duresa, entre moltes altres. Totes elles propietats que en aquest projecte, tenint en compte el context on es situa, prenen rellevant importància i és interessant que siguin el millor possible.

Si es centra l'atenció en el material en particular que s'estudia, la matriu de resina de polièster reforçada amb fibres de vidre, cal dir que dels 2 components que el formen, el que aporta la major part de les propietats mecàniques és el reforç de fibra de vidre, mentre que la matriu de resina de polièster ajuda, principalment, a que hi hagi una bona transferència d'esforços. Aquest tipus de materials s'anomenen també amb el nom de FRP, és a dir, *Fiber Reinforced Plastic*, i són coneguts per aconseguir tenir una gran rigidesa i resistència presentant un pes molt baix. Per això, són materials ideals per indústries com el transport aeri o l'energia eòlica, degut que interessa molt tenir una bona relació resistència/pes.

Centrant l'atenció ara en les propietats mecàniques, aquestes no només depenen de la matriu i del reforç, sinó que també és interessant tenir en compte la distribució de les fibres que es fa dins de la matriu. En aquest projecte, s'ha agafat el cas on la distribució de fibres es fa de forma quadri-axial (QTX), és a dir, fibres en 4 direccions diferents, a  $0^\circ$ , a  $90^\circ$ , a  $-45^\circ$  i a  $45^\circ$ . I d'aquests blocs o *fabric*s se'n tindran en compte un apilament de 6, és a dir, 6 QTX. En la següent figura es pot veure il·lustrat un QTX.

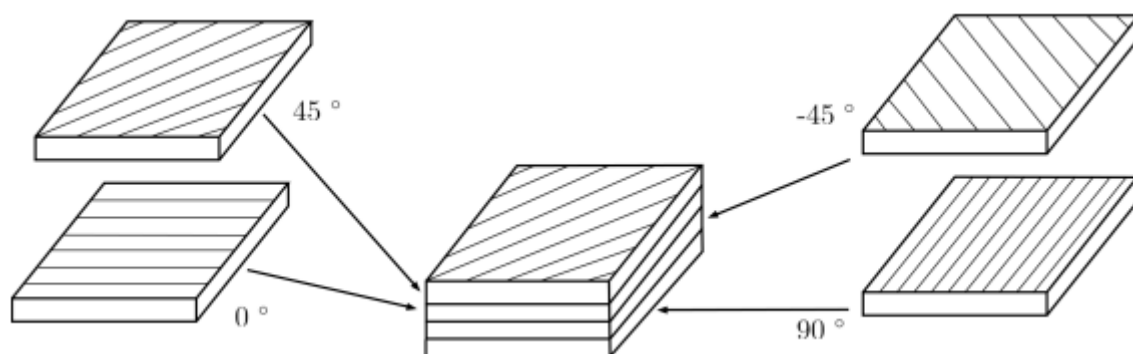


Figura 2.2: Il·lustració d'un *fabric* QTX de fibra de vidre.

### 2.1.3 Assaig a cisalla de la unió

En aquest projecte s'ha decidit realitzar un assaig a cisalla de la unió cargolada per tal de veure'n el seu comportament. Això significa que serà interessant visualitzar com es comporta la unió quan se la sotmet a cisallament, tot aplicant un esforç de tracció a les dues platines que aquesta uneix, tal i com s'observa a la següent figura.

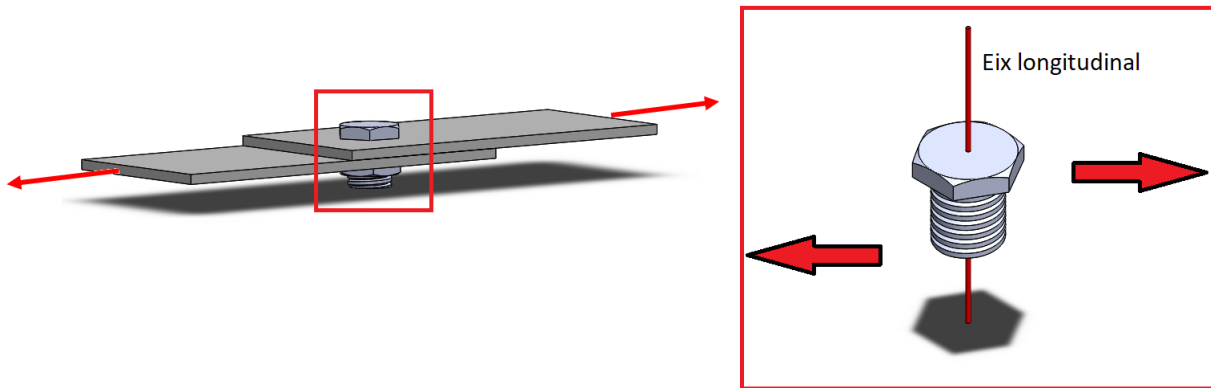


Figura 2.3: Esforç a tracció en l'assaig a cisalla d'una unió.

Entrant més al detall, la cisalla en una unió és un esforç que provoca forces perpendiculars a l'eix longitudinal del cargol (veure figura 2.3), aplicades en sentits contraris, com si l'anessin a tallar. Quan apareix aquest esforç a cisalla i es porta la unió al límit, es pot veure quina resistència té i quin és el motiu que hagi entrat en fallida. Les causes de que falli poden ser molt diverses, i poden tenir a veure amb el cargol, amb les platines, amb el material, amb la geometria i amb altres aspectes. Això és el que es voldrà comprovar realitzant aquest assaig.



## 2.2 Objectius de l'assaig

Bàsicament, i resumint aspectes dels que ja s'ha parlat, en aquest assaig a cisalla es pretén conèixer i analitzar quin comportament presenta la proveta en estudi formada per la unió cargolada de les dues peces plàstiques. Per tal de veure això, es tindran en compte diferents mètodes de fallada, tant del cargol com del material de les platines, i depenent de quin dels casos succeeixi, s'arribaran a unes conclusions o a unes altres. D'altra banda, també serà interessant veure aquest comportament a través de la corba tensió-deformació, que es podrà crear mitjançant la corba força-desplaçament. Aquesta última s'obté d'anar mesurant, durant l'assaig, el desplaçament de les platines mentre se li va aplicant cada cop més càrrega fins al moment de fallida.

## 2.3 Material necessari

En aquest apartat s'exposen els diferents materials i estris que intervenen a l'hora de fer l'assaig i se n'expliquen les característiques tècniques i específiques més importants. S'ha tingut en compte, primer de tot, el conjunt d'elements que formen la unió cargolada en estudi, és a dir, tant les dues platines de fibra de vidre, com el cargol, la femella, les dues volanderes i, també, els *spacers*. Aquests elements són els que s'assajaran i, per tant, han d'estar ben descrits tècnicament per poder fer-ne un estudi i anàlisi acurat del seu comportament. D'altra banda, també s'ha tingut present els diferents estris de mesura que hauran de prendre part en l'assaig per poder mesurar les diferents mètriques exposades en l'apartat anterior. I ja finalment, també s'explica la màquina amb la que es durà a terme l'assaig.

### 2.3.1 Platines de fibra de vidre

Pel que es refereix a les platines, cal dir que se'n tenen dues totalment iguals. El material que les forma és una matriu de resina de polièster reforçada amb un apilament de fibres de vidre. Aquest material, que és un *composite*, ja s'ha descrit de forma detallada en l'apartat de conceptes bàsics.

Aquí únicament es fa èmfasi del tipus d'apilament de les fibres per tal d'entendre el gruix de les platines. Aquest apilament de capes de fibra, com ja s'ha dit, és de 6 QTX (quadri-axials), i cal saber que 1 QTX és un bloc monolític de 4 apilaments de fibres UD (unidireccionals) a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $-45^\circ$ . Per tant, sabent que el gruix d'un UD és de 0,23 mm i sabent que en el conjunt de 6 QTX hi ha 24 UD, es pot acabar determinant que el gruix de la proveta és de 5,52 mm. Pel que fa a les altres dimensions, les provetes són platines rectangulars de 208 mm de llargària per 100 mm d'amplada. I en un dels seus extrems, contenen un forat de 28 mm de diàmetre on s'hi col·locarà el cargol per tal de

crear el conjunt de la unió cargolada.

En les següents figures, 2.4 i 2.5, es pot observar una vista isomètrica de les platines i, també, un plànol per il·lustrar i entendre'n millor les característiques tècniques i geomètriques.

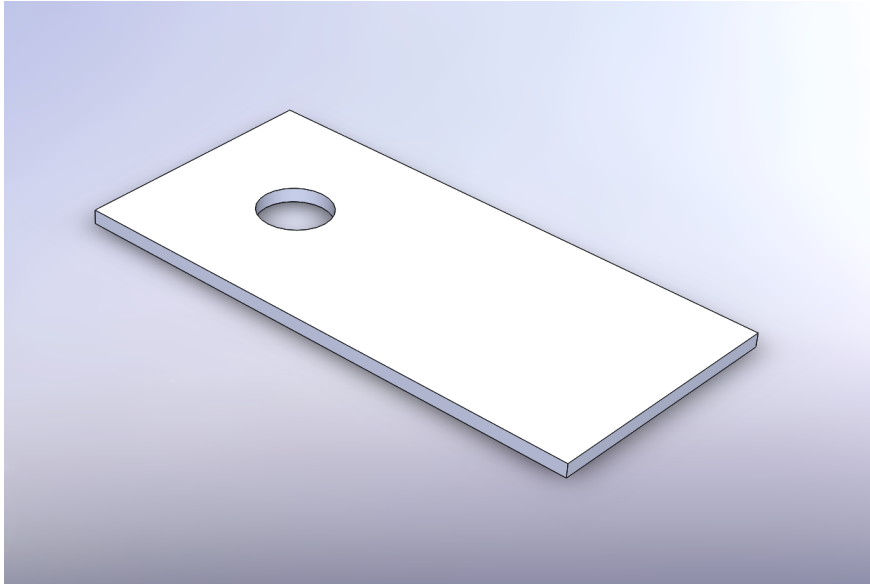


Figura 2.4: Vista isomètrica d'una platina.

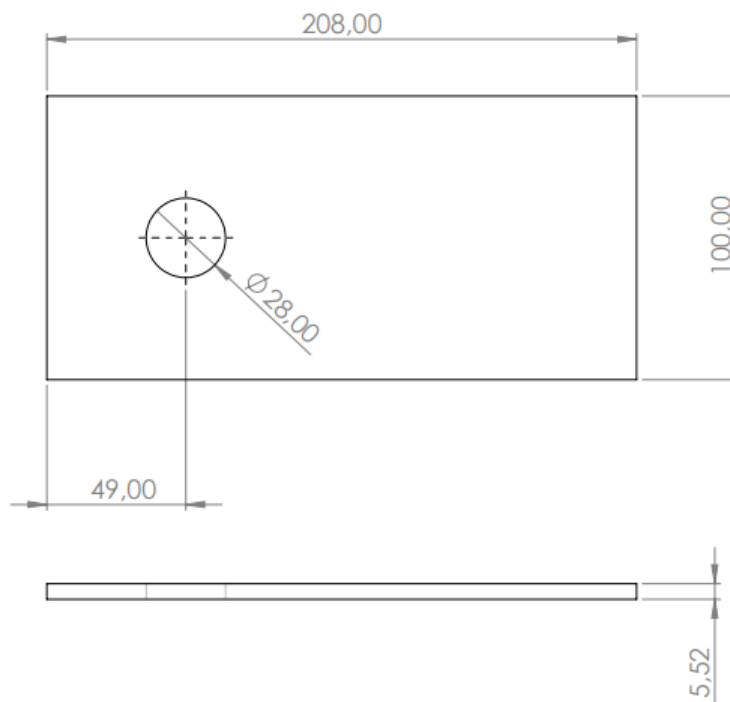


Figura 2.5: Dimensions geomètriques d'una platina.

### 2.3.2 Conjunt cargol-femella-volandra

Un cop entesa tota la geometria de les platines, s'ha d'estudiar la tipologia i les característiques del conjunt cargol-femella-volandra, doncs són també una part molt important de la unió cargolada en estudi. Cal dir que en aquest projecte és tindrà en compte que aquesta unió està formada per un cargol, una femella i dues volanderes, cada una d'elles en contacte amb una de les dues peces plàstiques.

Començant pel cargol, aquest és d'acer inoxidable de qualitat A4 70, doncs són els cargols més bons a nivell corrosió, i això és un aspecte important a tenir en compte en el context d'aquest projecte, que es situa en ambient marí. Més tècnicament, es tractarà d'un cargol DIN 933 A4 70 de mètrica 12. Això significa, a part del que ja s'ha dit, que és de cap hexagonal, de diàmetre del fil de 12 mm i de pas de rosca de 1,75 mm. A la figura 2.6 es mostra un esquema a nivell qualitatiu d'aquesta tipologia de cargols. Per a la mètrica que es té, M12, l'espessor del cap ( $k$ ) és de 7,50 mm i l'amplada d'un vèrtex a l'altre del cap ( $e$ ) és de 19,95 mm.

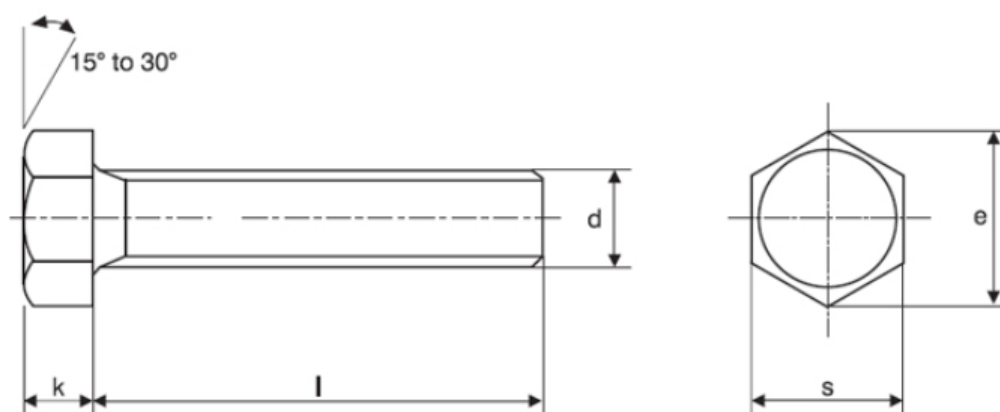


Figura 2.6: Plànol d'un cargol DIN 933.

Centrant l'atenció ara en la femella, aquesta és del tipus DIN 985 A4 70 de mètrica 12. Igual que en el cas del cargol, es pot observar, primerament, que és una femella d'acer inoxidable de qualitat A4 70 pel mateix motiu d'abans relatiu al context del projecte i, seguidament, que la mètrica també és la mateixa que la del cargol, doncs com és de lògica és un conjunt que ha d'encaixar, el cargol s'ha d'unir amb la femella. Pel que fa al tipus de femella, DIN 985, aquesta serà també de geometria hexagonal de 12 mm de gruix ( $H$ ) i una distància ( $E$ ) de 21,1 mm entre cada vèrtex, tal i com es visualitza de forma qualitativa en la figura 2.7. Cal comentar també que aquesta femella porta una junta de *nylon* que la converteix en un element auto-blocant, és a dir, que evita que la

unió s'afuixi i, en cas de fer-ho, evita que la femella surti volant gràcies a que el *nylon* fa que aquesta no es desenrosqui del tot.

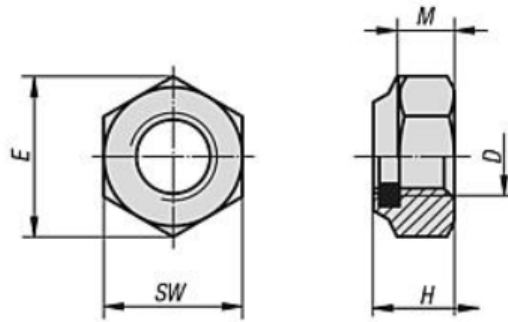


Figura 2.7: Plànol d'una femella DIN 985.

I ja per acabar, parlant de les dues volanderes, són de la tipologia DIN 9021 AISI 316 de mètrica 12. Pel que fa al material i a la mètrica, ambdós paràmetres coincideixen amb els del cargol i la femella, doncs com ja s'ha dit, tot acaba sent un conjunt que es munta i ha d'encaixar. Referent al tipus de volandera, DIN 9021, i tal i com s'observa també de forma qualitativa en la figura 2.8, són volanderes totalment cilíndriques de gruix 3 mm (H) amb dos diàmetres concèntrics, un d'interior (D1) i l'altre exterior (D2). Pel que fa al diàmetre interior, tenint en compte la mètrica 12, aquest és de 13 mm, i el diàmetre exterior hauria de ser aproximadament tres vegades el diàmetre interior, és a dir, al voltant d'uns 36 mm. Però en aquest projecte s'ha considerat un diàmetre exterior de 60 mm, ja que el forat de les dues platines és de 28 mm, i així s'assegura que el cargol no s'hi empassi.

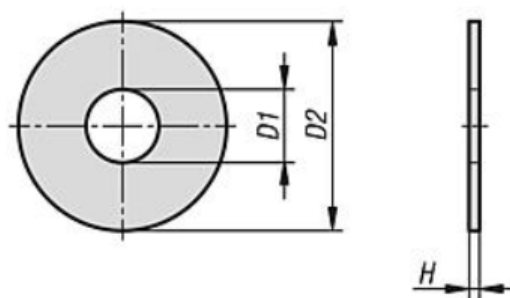


Figura 2.8: Plànol d'una volandera DIN 9021 amb el diàmetre exterior modificat.

### 2.3.3 Elements de mesura

En qualsevol assaig de laboratori sempre són molt importants els elements de mesura. D'una banda per mesurar les dimensions de les provetes assajades i, per l'altra, per mesurar els paràmetres que siguin objectiu d'aquell assaig.

En aquest projecte no s'han pogut arribar a materialitzar els assajos, però si s'haguessin pogut fer, s'haurien d'haver mesurat totes les dimensions geomètriques de les provetes amb un peu de rei, per tal de tenir les mesures reals, doncs sempre varien una mica dels plànols. En la figura 2.9 es mostra el peu de rei que s'hagués fet servir (imatge 1).

A més a més, també cal tenir present que la unió cargolada en estudi és un conjunt d'elements que s'han d'unir. Per tal d'aconseguir la unió d'aquests elements, s'aplica un parell de 45 Nm a la femella per tal de rosca-la al cargol, i això s'aconsegueix mitjançant l'ús d'una dinamomètrica, que apareix a la imatge 2 de la figura 2.9.

Seguidament, sabent que en aquest tipus d'assaig es va aplicant una força a la proveta i que aquesta és important a l'hora de raonar els resultats posteriors, caldrà tenir present també la cèl·lula de càrrega de la màquina d'assaig per tal de mesurar-la.

Ja per acabar aquesta subsecció, l'objectiu d'aquest assaig és, a grans trets, obtenir la corba tensió-deformació per visualitzar el comportament de la proveta. Aquesta gràfica es podrà obtenir mesurant per cada força el desplaçament obtingut de les platines i, aquest desplaçament es podrà mesurar de dues formes diferents. Per una banda, mitjançant galgues extensomètriques situades a la proveta, com les de la figura 2.9 (imatge 3). Però també, fent servir l'ús d'un captador de desplaçament que es pot situar o bé a la proveta (aquesta s'estira), o bé al pistó hidràulic de la màquina (aquest es desplaça).

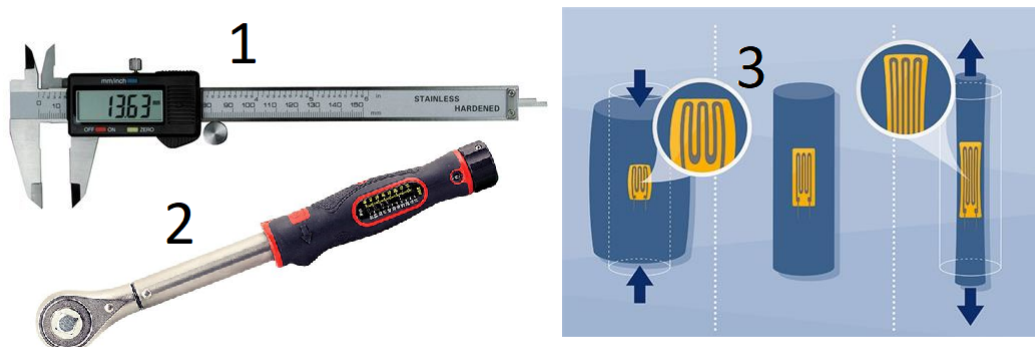


Figura 2.9: Estris de mesura.

### 2.3.4 *Spacers*

En la unió cargolada de les dues platines en estudi, si un s'imagina detenidament el conjunt, es pot acabar fixant en que cada una de les platines queda a una alçada diferent de l'altra, és a dir, queden solapades. Per tal de solucionar aquest problema a l'assaig i aconseguir un cert equilibri i una certa simetria, es situaran a sota de cada una de les platines uns *spacers*, que són unes plaques quadrades de 100 mm de costat i del mateix material que aquestes. Un altre dels objectius d'aquests elements és aconseguir una millor subjecció entre l'actuador i la proveta a l'hora d'assajar-la. En la figura 2.10 es pot visualitzar millor què són els *spacers* i la seva utilitat.

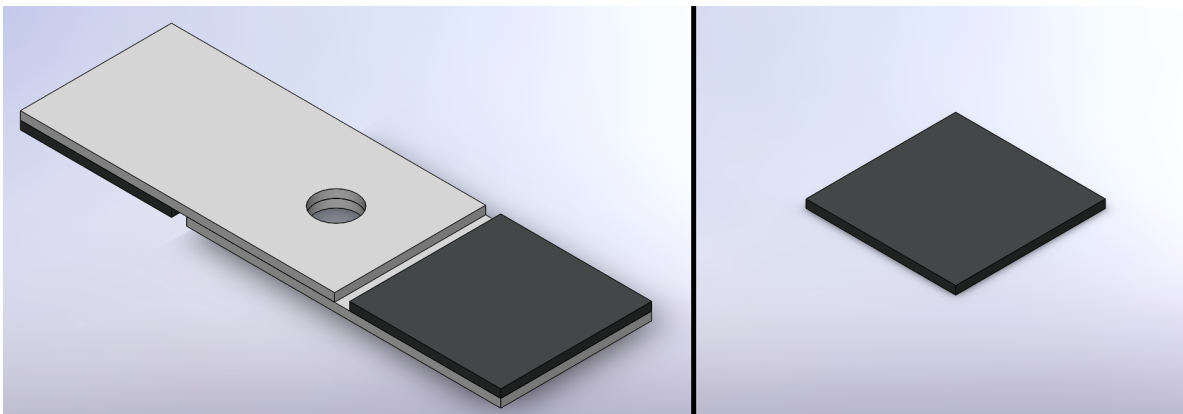


Figura 2.10: Vistes isomètriques. A l'esquerre, del conjunt platines-*spacers*, i a la dreta, d'un sol *spacer*.

### 2.3.5 Màquina d'assaig

En relació a la màquina de realització de l'assaig, aquesta consisteix en una màquina servo-hidràulica amb control per computador, el que es coneix com una MTS. Més concretament, s'hauria fet servir la que hi ha en el laboratori d'elasticitat i resistència de materials de l'ETSEIB, que és el model 810 i presenta les següents característiques:

- Es poden realitzar assajos universals, estàtics i dinàmics. Més detalladament, assajos a compressió, a tracció, a flexió, a fatiga i cíclics.
- Té una capacitat màxima de 250 kN i hi caben provetes de fins a 1100 mm de longitud.
- Com ja s'ha dit, presenta un control mitjançant el computador, cosa que fa que sigui molt precisa i potent.

En el cas d'aquest projecte s'hagués dut a terme un assaig estàtic a tracció del conjunt. Observant la figura adjunta a continuació, 2.11, s'hagués estirat cada una de les platines pels seus extrems en posició vertical.

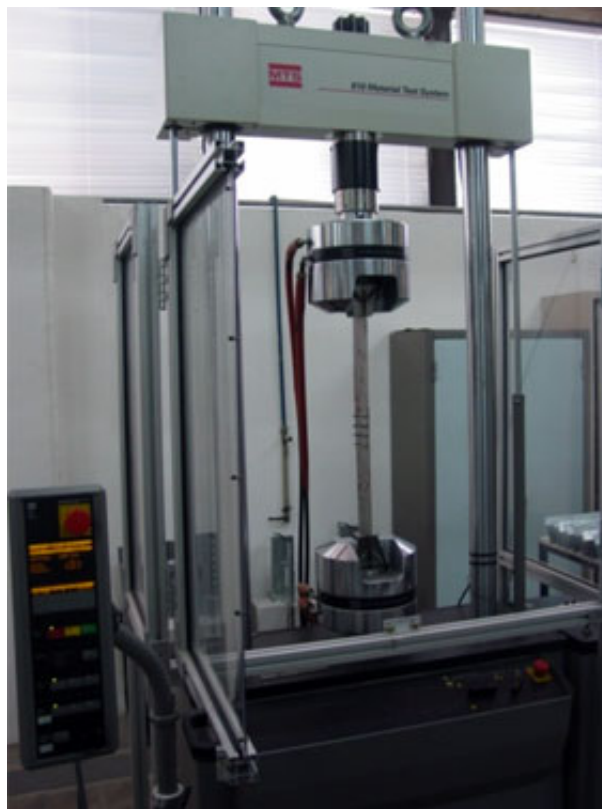


Figura 2.11: Màquina servo-hidràulica amb control per computador (MTS).

## 2.4 Normatives seguides

En qualsevol assaig de laboratori, és important sempre seguir unes especificacions tècniques per tal de garantir, en primer lloc, nivells de seguretat adequats i, en segon lloc, uns estàndards de qualitat que facin que aquell assaig pugui ser considerat correcte i poder així donar com a bons els resultats obtinguts. Aquestes especificacions tècniques són les que apareixen en les normatives o normes UNE. Dependent del tipus d'assaig que s'estigui realitzant, del material emprat, o de qualsevol altre aspecte tècnic, se'n tindran en compte unes o altres. Seguir aquestes normatives vol dir també tenir un compromís ferm amb el medi ambient i amb la seguretat dels tècnics de laboratori, generant així una confiança que, si per exemple, s'està parlant a nivell d'una empresa, és important tenir de cara als clients.

A continuació apareixen explicades les dues normes més presents en aquest assaig a cisalla de la unió cargolada. Cal dir que s'expliquen breument per saber de què van, amb l'únic objectiu de que se'n conegui el seu ús en aquest projecte. I també comentar que s'han consultat en el web de l'Associació Espanyola de Normalització i Certificació (AENOR). [1]

### 2.4.1 ISO EN 1465

Aquesta norma tracta sobre la determinació de la resistència a cisalla per tracció de muntatges units i solapats. És a dir, exactament el muntatge que s'està tractant en aquest assaig, on es vol conèixer la resistència a cisalla del cargol per mitjà de la tracció de les dues platines que uneix i que es solapen una per sobre de l'altra. La norma diu que aquesta força a tracció s'ha d'aplicar paral·lela a l'àrea solapada i en la direcció de l'eix major de la proveta. També parla de les característiques que ha de tenir tant la màquina per realitzar l'assaig com les provetes en estudi. I ja per acabar, també s'hi detalla el procediment a seguir per determinar aquesta resistència i la forma d'expressar els resultats obtinguts en l'informe de l'assaig.

### 2.4.2 ISO EN 9664

El títol d'aquesta normativa és 'Mètodes d'assaig per la resistència a la fatiga per esforç de cisalla d'adhesius estructurals' i, com ja es pot entreveure, descriu un mètode per estimar la resistència a la fatiga per cisallament mitjançant tensió i fent servir provetes estandarditzades amb unes condicions específiques. La norma comença citant definicions i símbols útils en aquesta pràctica, com podria ser tensió de cisallament, cicle de tensió, límit de fatiga o vida útil, entre altres. Seguidament també s'hi explica el principi d'assaig i els aparells utilitzats en aquest, com també una descripció acurada de com han de ser les provetes, acompanyada de gràfics i il·lustracions, i se n'explica la seva preparació. Ja per acabar el document, apareixen les condicions i el procediment d'assaig i s'explica com s'ha de redactar l'informe posterior. Cal dir que aquesta normativa es complementa amb uns annexos que parlen sobre algun altre mètode, eficaç també pel càlcul de la resistència a fatiga.



## 2.5 Descripció del procediment de l'assaig

En aquest apartat s'exposa de manera seqüencial el procediment que s'ha de seguir per tal de realitzar els diferents assajos, ja que la intenció és fer-ne més d'un per tal de validar els resultats obtinguts. Aquest procediment es divideix en dues parts, i a continuació es pot veure.

### ***TEST SET-UP***

- Cada test de prova estarà compost de 2 panells de fibra de vidre i 1 conjunt complet cargol-femella-volanderes.
- La connexió entre els panells i l'actuador de la màquina es farà mitjançant els *spacers*, descrits anteriorment, i *clamps*.
- La zona de la unió cargolada estarà condicionada per una tensió uniaxial que s'aplicarà a través d'un parell de roscat.

### ***TEST PROCEDURE***

- S'haurà d'ajustar l'articulació segons el valor de parell establert, que serà de 45 Nm.
- S'aplicarà força de tracció als extrems dels panells, com s'hi es volgués separar la unió cargolada.
- S'anirà augmentant aquesta força fins que la proveta entri en fallida.
- Un cop s'arribi a la fallida, es descarregarà la tracció.
- Finalment, es desmuntarà l'assaig i es farà una inspecció visual per tal d'acabar determinant quin haurà sigut el mètode de fallada.

## 2.6 Possibles mètodes de fallada

Aquí s'expliquen els diferents mètodes pels quals pot fallar la unió cargolada de les dues peces de fibra de vidre durant l'assaig de cisalla. Com es veurà a continuació, n'hi ha que afecten directament a les platines i el seu material, i d'altres que afecten al cargol.

Cal dir que per tal de completar aquest punt s'ha tingut en compte la informació referent al prismatic [2], que és un material multimèdia de la UPC destinat a l'aprenentatge de Resistència de Materials.

### 2.6.1 Aixafament platina/cargol

La fallada per aixafament es pot produir tant al cargol com a les platines. Aquest aixafament es deu, bàsicament, a que la pressió de contacte que hi ha entre la platina i el cargol supera la tensió de límit elàstic a compressió del material de la platina, si l'aixafament es produeix en aquesta, o del material del cargol, si l'aixafament succeeix en aquest. A les figures 2.12 i 2.13 es pot observar una representació gràfica per tal d'entendre millor aquest mètode de fallada, tant en el cargol com en la platina.

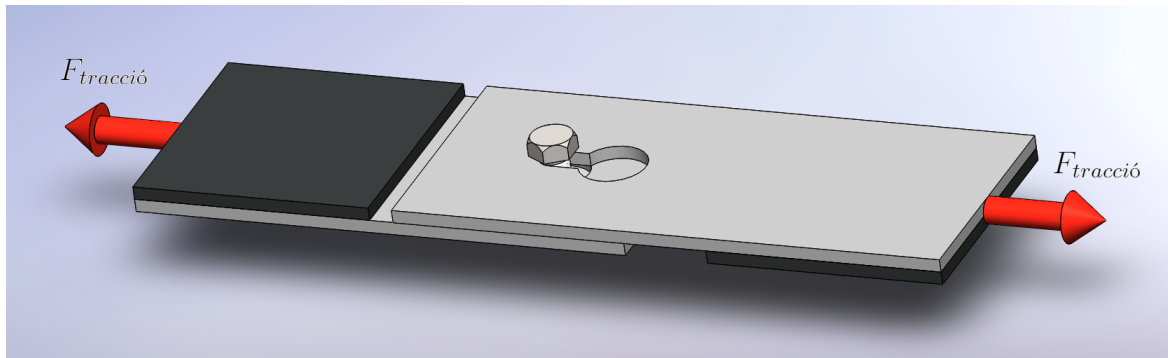


Figura 2.12: Vista de l'aixafament d'una platina. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament.

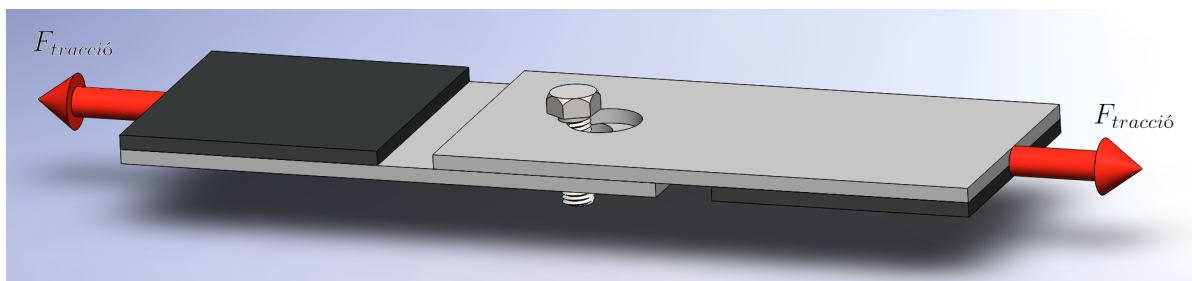


Figura 2.13: Vista de l'aixafament del cargol. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament.

Entrant més al detall, l'esforç en vermell que s'observa en la imatge es transmet de les platines al cargol a través de la superfície semicilíndrica de contacte que hi ha entre ells. En el present projecte, aquest contacte es produiria a mesura que s'anés deformant la proveta, degut que el forat de les platines és major que el diàmetre del cargol. Primer tocaria en un punt i a mesura que s'anés deformant acabaria tocant tota l'àrea que hi ha sota del cargol. Per tant, aquesta superfície de contacte es considera com una secció fictícia que és la projecció del cargol contra la paret del forat.

## 2.6.2 Estripament de les platines

Aquí s'explica un mètode de fallada que només afecta a les platines. Aquestes poden estripar-se (dit de manera col·loquial), tal i com s'observa a la figura 2.14, com a conseqüència de la situació del forat que hi ha en elles, ja que si la distància d'aquest al límit de la platina és massa petita poden patir aquesta fallida. Per tal d'evitar-la doncs, és recomanable que aquesta distància esmentada, compresa des del centre del forat fins a l'extrem de la platina, sigui de com a mínim dues vegades el diàmetre del forat.

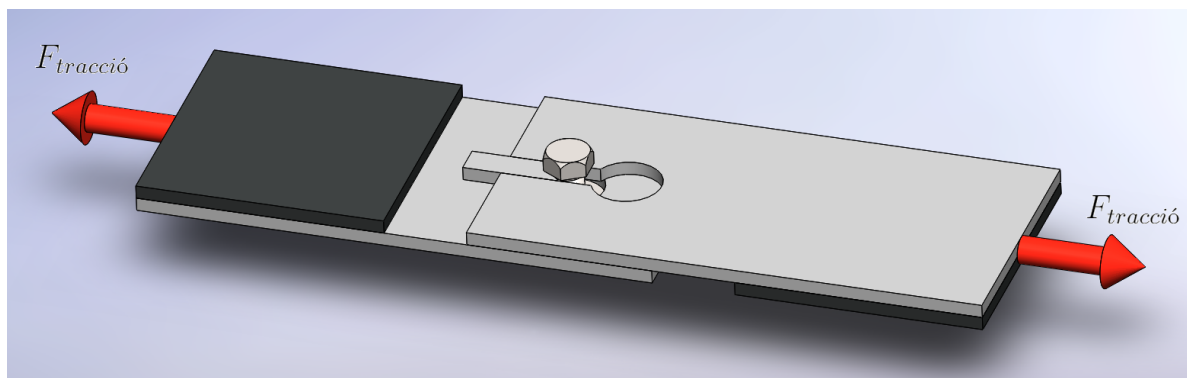


Figura 2.14: Vista de l'estripament d'una platina. En la imatge s'ha suprimit una volandera per tal de que es pugui veure bé aquest comportament.

Dit de forma més tècnica, aquesta fallida es produirà si la tensió de cisalladura és superior a la tensió de límit elàstic a tallant del material de les platines. I com a tensió de cisalladura s'entén l'esforç que pateix el bloc de material que està situat just al darrere de la projecció del cargol. Aquesta tensió es transmet a la resta de la platina a través d'aquest bloc.

## 2.6.3 Tracció/ruptura de les platines

Aquest comportament es refereix bàsicament a que les platines poden defallir per ruptura en alguna de les seves seccions. Però si s'observa detenidament la forma d'una platina, es pot determinar que hi ha una secció que és més crítica que les altres. Es tracta de la secció que conté el forat, i és realment important d'estudiar degut que la distribució de tensions en aquesta zona no és uniforme, doncs a prop del forat les tensions augmenten de forma considerable, i això cal tenir-ho present en el càlcul. En la imatge 2.15 es pot veure aquesta secció crítica i de quina manera podria trencar a causa de la tracció de les platines.

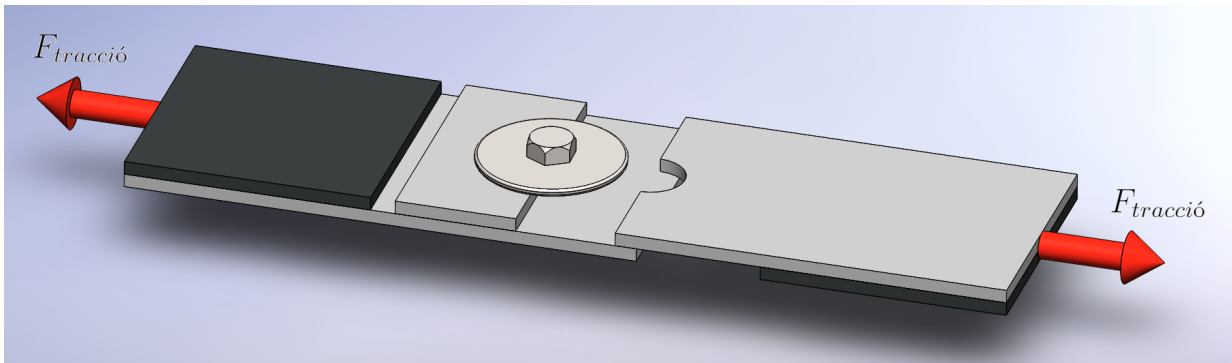


Figura 2.15: Vista de la ruptura d'una platina.

Entrant més en aspectes tècnics, aquest mètode de fallada es produirà en el cas que la tensió de tracció sigui més gran que la tensió de ruptura del material, en aquest cas, de la matriu de resina de polièster reforçada amb un apilament de fibres de vidre.

#### 2.6.4 Cisalladura/ruptura del cargol

La cisalladura (o ruptura, dit de forma més col·loquial) del cargol és un comportament de fallada que pot aparèixer quan la tensió a tallant a la que està sotmès aquest supera la tensió de límit elàstic a tallant del seu material, l'acer inoxidable. En la següent imatge, 2.16, es pot veure més clarament què és el que succeeix.

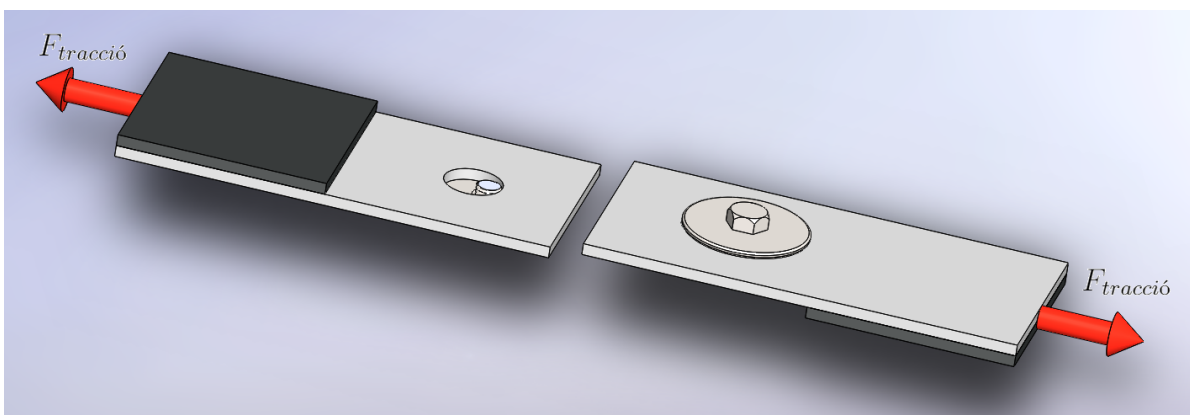


Figura 2.16: Vista de la cisalladura del cargol.

Si s'entra més al detall, aquesta tensió a tallant a la que està sotmès el cargol mai és uniforme, però per al seu càlcul, si el cargol és d'un material dúctil, i en aquest projecte es fa servir l'acer inoxidable que sí que ho és, es pot acceptar la hipòtesi que si que és una distribució de tensions tangencials uniformes.

## Capítol 3

### Anàlisi teòric

En aquest capítol apareixen de forma prou detallada els diferents càlculs teòrics que s'han dut a terme de la unió cargolada de les dues platines de fibra de vidre. Inicialment l'objectiu d'aquest capítol era corroborar els resultats que s'haurien obtingut en el capítol anterior, el d'assajos experimentals. Però com ja s'ha dit, aquests resultats experimentals no s'han pogut obtenir i, per tant, no s'ha pogut veure en la corba tensió-deformació quin hauria sigut el comportament de la fibra de vidre, com tampoc s'ha pogut observar per quin mètode hauria fallat el conjunt en estudi. És per això que en aquest apartat s'ha pres el supòsit de que la fibra de vidre estudiada té el comportament que prendria un acer i, a partir d'aquí, s'han utilitzat les fórmules corresponents per acabar obtenint uns resultats teòrics.

Com es veurà seguidament, aquest capítol s'ha dividit en tres grans punts. El primer d'ells per tal d'explicar conceptes importants a tenir en compte abans de començar amb el propi càlcul teòric. El segon per tal de mostrar els diferents càlculs teòrics realitzats, que cal dir que per tal de desenvolupar-los s'han tingut presents els diferents mètodes de fallada que s'han explicat en el punt 2.6. I el tercer d'ells i l'últim, per tal d'explicar les conclusions que s'han extret dels diferents càlculs duts a terme, i per acabar determinant per quin dels mètodes de fallada descrits seria més probable que falles el conjunt en estudi format per la unió cargolada de les dues platines de fibra de vidre.

## 3.1 Conceptes previs

En aquesta secció s'expliquen dos conceptes que són essencials a l'hora de fer els càlculs teòrics. D'una banda, el càlcul de la força  $F_t$  amb la que s'ajusta la unió cargolada, i de l'altra, els diferents límits elàstics a compressió i a tallant dels materials (tant de les platines com del cargol) que s'han tingut en compte per acabar determinant quin mètode provoca la fallida del conjunt.

### 3.1.1 Força $F_t$ d'ajust de la unió cargolada

Normalment, en una unió cargolada, es calcula el moment de roscat  $M_t$  en funció de l'última força de ruptura, i s'acostuma a treballar a un 80 % d'aquesta. Però en aquest cas, aquest moment  $M_t$  s'obté de forma experimental, decidint que per un cargol M12 és suficient. Per tant, per tal de trobar aquesta força  $F_t$  s'aplica la següent expressió:

$$M_t = \frac{F_t}{1000} \cdot [0,161 \cdot P + 0,583 \cdot \mu \cdot d_2 + 0,25 \cdot \mu \cdot (D_e + D_i)] \quad (3.1)$$

On:

- $M_t$  és el moment citat anteriorment amb valor de 45 Nm.
- $F_t$  és la força que es vol conèixer i que, en la figura 3.1, es pot veure representada.
- $P$  és el pas de rosca del cargol, de valor 1,75 mm.
- $\mu$  és el coeficient de fregament que hi ha entre el cap del cargol i la superfície on aquest toca. Es té en compte amb un valor de 0,08.
- $d_2$  és el diàmetre mitjà de la rosca del cargol obtingut de la normativa ISO 965, a través de la següent equació:

$$d_2 = D_{cargol} - 0,64953 \cdot P \quad (3.2)$$

On  $D_{cargol}$  és el diàmetre del cargol equivalent a 12 mm, i  $P$  és el pas de rosca citat anteriorment. Per tant,  $d_2$  val 10,86 mm.

- $D_e$  equival al diàmetre exterior de la volandera, de 60 mm.
- $D_i$  equival al diàmetre del forat, de 28 mm.

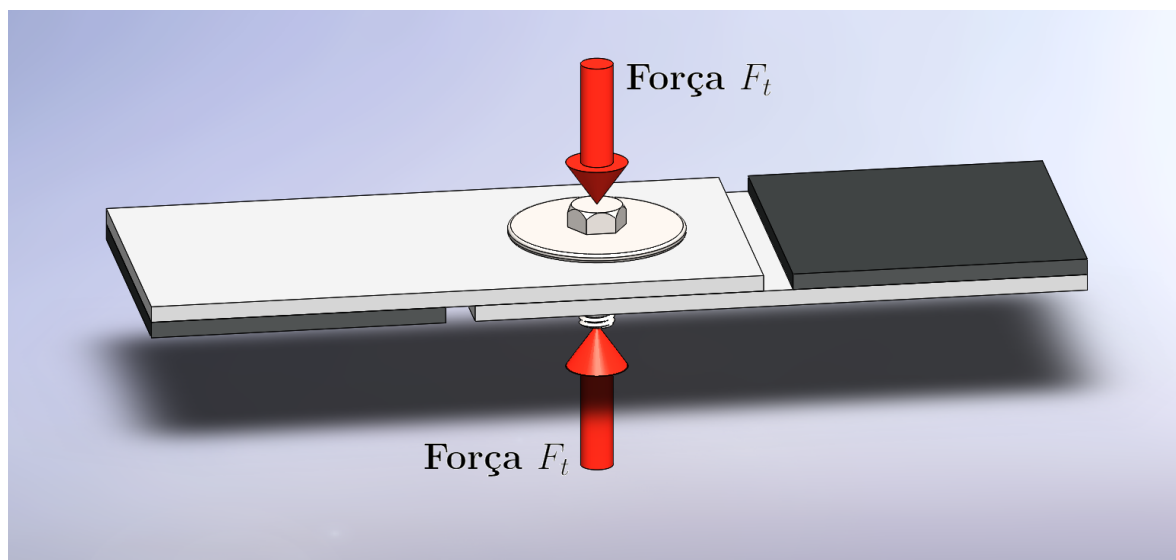


Figura 3.1: Força  $F_t$  de roscat de la unió cargolada.

Resolent la fórmula s'ha determinat que la força  $F_t$  d'ajust de la unió cargolada que es té en compte per al càlcul de l'assaig a cisalla pren un valor de:

$$F_t = 17659N \tag{3.3}$$

### 3.1.2 Límits elàstics

A la següent taula apareixen els diferents límits elàstics que s'han pres com a referència, tant a compressió com a tallant, dels dos materials presents al conjunt en estudi, fibra de vidre de les platines i acer inoxidable del cargol.

Límit elàstic	A compressió (MPa)	A tallant (MPa)
Fibra de vidre	-193	32,8
Acer inoxidable	-450	259,8

Taula 3.1: Taula de límits elàstics.

## 3.2 Càlcul dels mètodes de fallada

En aquest apartat es mostren els diferents càlculs teòrics realitzats. Per tal de fer-ho més fàcil i entenedor, s'ha anat seguint per ordre els diferents mètodes de fallada descrits en l'apartat 2.6 i s'ha anat realitzant els càlculs respectius. A partir d'aquí s'ha pogut anar

determinant quins són els mètodes de fallada que podrien succeir i, també, quin és el més probable de que passi.

Cal destacar que per cada mètode de fallada, el càlcul que s'ha dut a terme ha estat el de buscar quina seria la força de ruptura  $F_{ruptura}$  que el provocaria, entesa aquesta com la màxima força de tracció de les platines que resisteix el cargol a cisalla abans d'entrar en algun comportament de fallada.

### 3.2.1 Aixafament de les platines

Com ja s'ha comentat, aquest aixafament succeeix quan la pressió de contacte que hi ha entre la platina i el cargol supera la tensió de límit elàstic a compressió del material de la platina. Per tant, per poder posar números i fer-ne un càlcul, és necessari primer de tot conèixer com es tindrà en compte aquesta superfície de contacte. Es prendrà com una secció fictícia que és la projecció del cargol contra la paret del forat, tal i com es mostra en la següent figura.

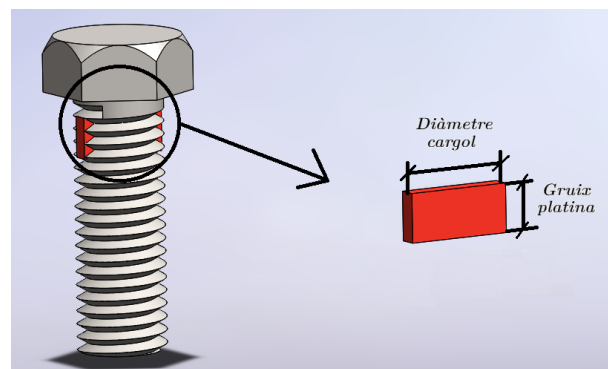


Figura 3.2: Secció fictícia per a l'aixafament.

Una vegada entesa l'àrea que es tindrà en compte, ja es pot procedir a fer el càlcul, mitjançant les següents expressions:

$$\sigma_{\text{contacte}}^{\text{platina/cargol}} \geq \sigma_{\text{compressió}}^{\text{fibra}} \quad (3.4)$$

$$\frac{F_{\text{ruptura}}}{\text{Diàmetre cargol} \cdot \text{Gruixa platines}} \geq \sigma_{\text{compressió}}^{\text{fibra}} \quad (3.5)$$

Pel que fa a la  $F_{ruptura}$ , és la incògnita. Com a  $\sigma_{\text{compressió}}^{\text{fibra}}$ , es farà servir el valor que apareix en la taula 3.1. El diàmetre del cargol és de 12 mm i el gruix d'una platina de 5,52 mm. Amb tot això s'extreu una força de ruptura de:

$$F_{\text{ruptura}} = 12784N \quad (3.6)$$



### 3.2.2 Aixafament del cargol

En aquest cas es té en compte exactament els mateixos paràmetres que en l'aixafament de les platines, però tot referit al cargol. Com a superfície de contacte, aquesta és també la de la figura 3.2. Per tant, les expressions ara queden de la següent manera:

$$\sigma_{\text{contacte}}^{\text{platina/cargol}} \geq \sigma_{\text{compressió}}^{\text{acerinox}} \quad (3.7)$$

$$\frac{F_{\text{ruptura}}}{\text{Diàmetre cargol} \cdot \text{Gruix platines}} \geq \sigma_{\text{compressió}}^{\text{acerinox}} \quad (3.8)$$

Substituint els valors, s'obté una força de ruptura amb el següent valor:

$$F_{\text{ruptura}} = 29808N \quad (3.9)$$

### 3.2.3 Estripament de les platines

Pel que fa al possible estripament de les platines, per procedir al càlcul per a determinar-lo, tal hi com s'ha comentat en l'apartat 2.6, cal tenir en compte dos conceptes diferents: d'una banda, la tensió de cisalladura que es produeix en les seccions de la platina que treballen a cisalla, i de l'altra, la distància del centre del forat a l'extrem més proper de la platina, ja que per aquesta distància hi ha una regla que és interessant estudiar-la.

Primer de tot, pel que fa a la tensió de cisalladura, aquesta apareix en les seccions de la platina que treballen a cisalla. Aquestes seccions, tal i com s'observa en la figura 3.3, són les que delimiten el fragment de material de la platina que queda just darrere del cargol, amb una amplada del diàmetre d'aquest, 12 mm.

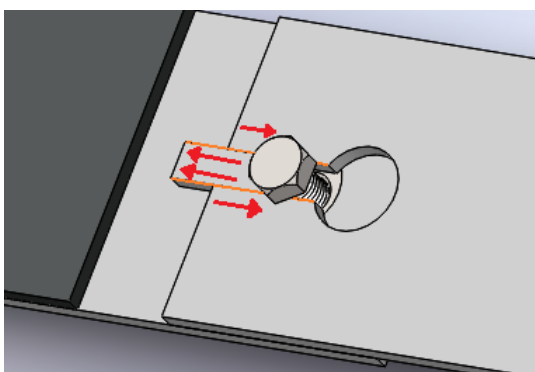


Figura 3.3: Detall de les seccions que treballen a cisalla.

És important doncs conèixer el valor d'aquestes tensions de cisalla descrites, ja que si aquestes superen el valor de la tensió de límit elàstic a tallant de la fibra de vidre, es

produirà aquest comportament d'estripament de les platines. Per a fer-ne el càlcul, es faran servir les següents expressions:

$$\sigma_{cisalladura} \geq \sigma_{tallant}^{fibra} \quad (3.10)$$

$$\frac{F_{ruptura}}{2 \cdot \text{Àrea de cisalladura}} \geq \sigma_{tallant}^{fibra} \quad (3.11)$$

$$\text{Àrea de cisalladura} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{cargol}^2}{4} \quad (3.12)$$

Com a àrea de cisalladura, coneixent que el  $D_{cargol}$  és de 12 mm, es té un valor  $72 \cdot \pi$  mm. Substituint aquest valor a l'expressió 3.11, amb una  $\sigma_{tallant}^{fibra}$  de 32,8 MPa segons la taula 3.1, s'obté una força de ruptura de:

$$F_{ruptura} = 14838N \quad (3.13)$$

D'altra banda, com s'ha comentat, també és important per el càlcul i el disseny de les platines tenir present la distància que va des del centre del forat a l'extrem més proper de la platina. En la figura 4.1 es pot entendre millor de quina distància s'està parlant.

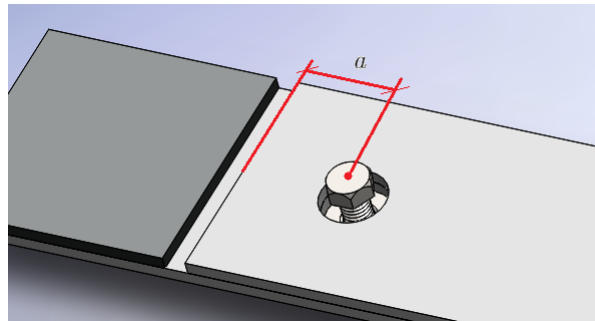


Figura 3.4: Distància estudiada.

Com a regla general, es recomana que aquesta distància  $a$  sigui igual o superior a dues vegades el diàmetre del forat. En el cas del disseny que es té en aquest projecte, aquesta regla no es compleix, ja que el diàmetre és de 28 mm i la distància  $a$  és de 49 mm. Per tant, això és significat de que no s'ha de descartar que el sistema pugui fallar per estripament. No obstant això però, aquesta regla se sap que funciona bé per materials de caire isotròpic com l'acer, però no es té clar si per un material de caire ortotròpic com és la fibra funciona correctament i es pot agafar com a supòsit. Això s'hauria pogut comprovar en els assajos experimentals prenent diferents dissenys de la platina i anar assajant-los fins a poder extreure una relació i mirar si s'assembla o no a aquesta regla general.

### 3.2.4 Tracció/ruptura de les platines

Quan es parla de la ruptura de les platines per efecte de la tracció d'aquestes quan s'aplica una força suficientment elevada, com ja s'ha explicat en l'apartat de mètodes de fallada, cal tenir molt present la secció de la platina on es situa el forat que acollirà el cargol, ja que aquesta és la secció més crítica i la més propensa a patir aquesta ruptura. Per al càlcul doncs, es tindrà en compte aquesta secció i es faran servir les següents expressions:

$$\sigma_{tracció} \geq \sigma_{ruptura}^{fibra} \quad (3.14)$$

$$\frac{F_{ruptura}}{\text{Àrea neta}} \geq \sigma_{ruptura}^{fibra} \quad (3.15)$$

Com a àrea neta, que és la secció crítica esmentada, s'entén tota la secció transversal de la platina, però excloent l'amplada del forat. És a dir, de la següent forma:

$$\text{Àrea neta} = (\text{Amplada platina} - \text{Diàmetre forat}) \cdot \text{Gruix platina} \quad (3.16)$$

Substituint tots els valors, i tenint en compte que la tensió de ruptura de la fibra és equivalent a la tensió de tracció, de valor 394,7 N, s'obté la força de ruptura següent:

$$F_{ruptura} = 156870N \quad (3.17)$$

### 3.2.5 Cisalladura/ruptura del cargol

Ja per acabar aquesta subsecció, toca parlar dels càlculs que s'han fet per determinar si es pot patir una ruptura del cargol per efecte de la cisalla que aquest pateix en l'assaig realitzat. A continuació es mostren les expressions utilitzades:

$$\sigma_{tangencial}^{cargol} \geq \sigma_{tallant}^{acerinox} \quad (3.18)$$

$$\frac{F_{ruptura}}{\text{Secció del cargol}} \geq \sigma_{tallant}^{acerinox} \quad (3.19)$$

Substituint els valors, s'obté una força de ruptura amb el següent valor:

$$F_{ruptura} = 29383N \quad (3.20)$$

### 3.3 Anàlisi dels resultats

Per tal d'extreure unes conclusions sòlides dels resultats obtinguts en els càlculs anteriors, cal fixar-se bé en la força de ruptura de cada mètode de fallada. A continuació es pot veure una taula resum d'aquestes forces obtingudes:

Mètode de fallada	Aixafament platines [1]	Aixafament cargol [2]	Estripament platines [3]	Tracció/ruptura platines [4]	Cisalladura cargol [5]
$F_{ruptura}$ [N]	12784	29808	14838	156870	29383

Taula 3.2: Taula resum de les forces de ruptura per cada mètode de fallada.

Si s'observen bé els resultats de la força de ruptura en cada tipus de comportament de fallada i s'ordenen de menor a major, es té:

$$12784 < 14838 < 29383 < 29808 < 156870 \quad (3.21)$$

D'aquesta desigualtat se'n poden treure diferents conclusions. En primer lloc, es pot observar clarament que hi ha tres mètodes de fallada que succeiran per a forces de ruptura molt elevades, com és el cas de l'aixafament del cargol, de la cisalladura d'aquest i de la ruptura de les platines. Això es pot traduir en que serà molt difícil que el sistema en estudi falli mitjançant aquests tres comportaments.

Si es segueixen observant els resultats, es pot veure també que hi ha dos mètodes de fallada que es produeixen amb una força de ruptura molt similar, com és el cas de l'aixafament de les platines i de l'estripament d'aquestes. De manera més precisa, sembla ser que el mètode de fallada més probable de que succeeixi i, per tant, el cas més extrem, és el de l'aixafament de les platines de resina de polièster reforçada amb fibra de vidre, ja que quan s'arribi a una força de 12784 N aproximadament, aquest comportament ja podrà aparèixer. No obstant això, pel cas de l'estripament de les platines, aquest es produeix quan la força arriba a uns 14838 N aproximadament, un valor molt proper al de la força de ruptura que es necessita en l'aixafament.

Per tant, totes aquestes conclusions extremes caldrà comprovar-les mitjançant la simulació per elements finits amb *Ansys* del capítol següent. Un cop feta aquesta simulació, ja es podrà dur a terme una predicció més acurada i precisa del comportament de la proveta en estudi d'aquest projecte, i determinar si aquests càlculs teòrics es poden prendre com a bons o no. Aquestes conclusions es mostraran en el capítol 5.

## Capítol 4

# Simulació per elements finits

En aquest apartat s'explica de manera molt detallada tota la simulació per elements finits que s'ha realitzat de l'assaig a cisalla de la proveta en estudi. L'objectiu principal d'aquest capítol és tancar el cicle de l'estudi i anàlisi de la proveta, tot corroborant els resultats obtinguts aquí amb els que s'haurien obtingut en els assajos experimentals i amb els resultats dels càlculs teòrics. En segon pla, però no menys important, aquest capítol també té l'objectiu d'ensenyar com es treballa un material *composite* en un programa de simulació per elements finits com és l'*Ansys*, tot mostrant tots els detalls específics que es poden tenir en compte com també tot el procediment acurat que es fa de la creació d'aquest material. Per a desenvolupar aquest punt, s'ha tingut present la guia d'usuari d'*Ansys* on s'explica com utilitzar la metodologia *ACP PrepPost*. [3]

Com s'anirà observant a continuació, aquest capítol s'ha redactat de forma seqüencial, és a dir, tenint en compte l'ordre amb el que s'ha anat creant tota la simulació, per tal d'entendre cada detall i cada pas i així tenir una idea més global del que s'ha fet. Més concretament, el capítol es divideix en tres grans seccions. Una primera per tal d'entendre quina és la metodologia que ofereix *Ansys* per tractar i estudiar els *composites*. Una segona secció on hi ha la part important de la simulació i on s'expliquen detalladament els tres mòduls de treball que s'han fet servir: *ACP (Pre)*, *Static Structural* i *ACP (Post)*. I ja per finalitzar el capítol, apareix una secció on es mostren els diferents resultats obtinguts amb les conclusions que s'han extret.

## 4.1 Introducció al mòdul *ACP PrepPost*

Com ja s'ha comentat, el programari utilitzat en aquest projecte per tal de desenvolupar la simulació per elements finits és l'*Ansys*. Qualsevol usuari d'aquest programa sap que per qualsevol simulació que es vulgui realitzar, el material emprat i totes les seves característiques tècniques es poden introduir en l'apartat d'*Engineering Data* que conté cada mòdul de treball. És tant simple com triar un dels materials que venen donats per defecte a la llibreria d'*Ansys* o crear-ne un de nou i entrar-li els diferents valors de totes les seves propietats, i seguidament, assignar aquests materials als diferents components de la proveta que s'està estudiant. No obstant això, *Ansys* disposa d'uns mòduls específics bastant potents per tal de crear els *composites* de forma molt més detallada i veure'n els resultats posteriors després de simular i resoldre el model creat.

En la imatge que apareix a continuació es mostra la metodologia a seguir quan s'utilitzen aquests mòduls de treball per als *composites*, en forma de *workflow*, i seguidament s'explica quin significat té.

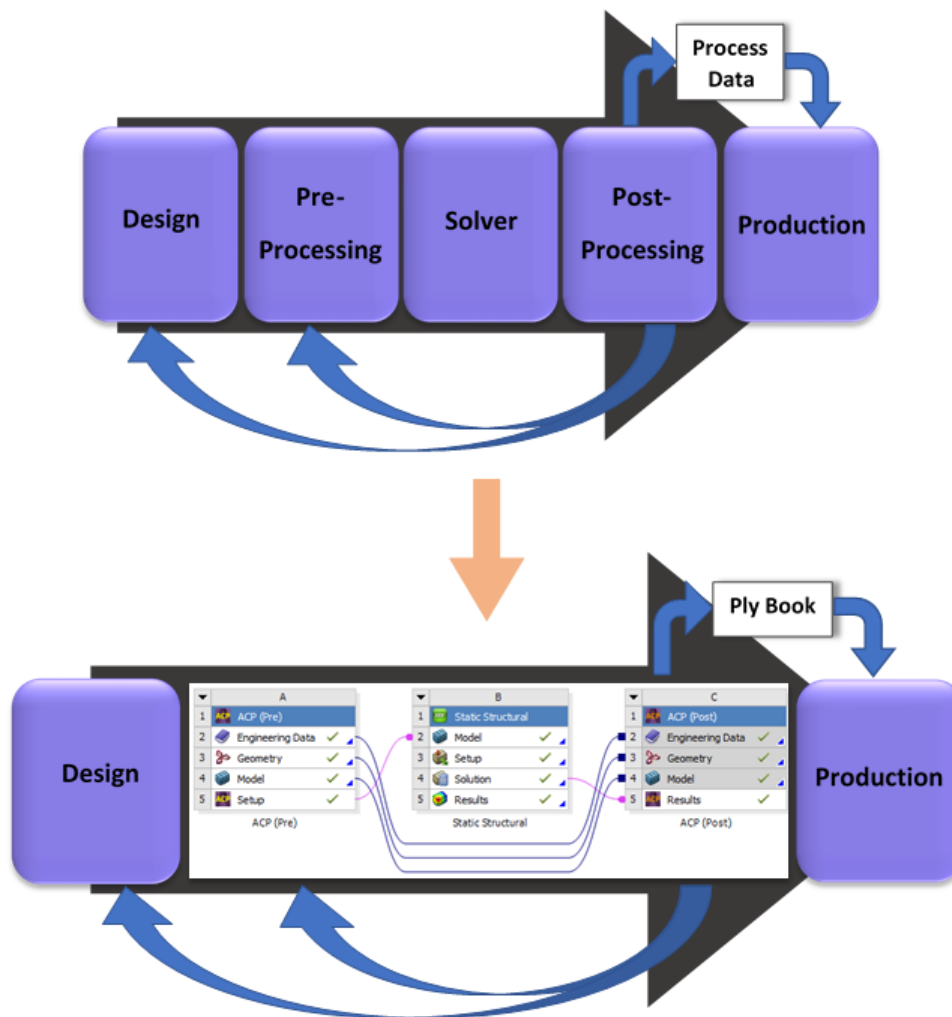


Figura 4.1: *Workflow* de *composites* amb *Ansys*.

Quan es treballen *composites* a l'*Ansys*, un cop creat el disseny que es vol modelar, aquest s'importa al mòdul *ACP (Pre)*, que és la part de *Pre-Processing*, i se'n fa el mallat. Un cop fet això, es passa a treballar dins la cel·la *Setup*, on es pot definir el material compost. Aquí es poden crear les diferents capes de fibres (i les seves direccions) que s'aniran apilant per tal de crear el gruix del material. És de les parts més potents que conté aquest mòdul *ACP PrepPost*.

Un cop definit tot el model, es passa a introduir el mòdul d'anàlisi on es solucionarà el model. En el cas d'aquest projecte, un mòdul *Static Structural*. La cel·la *Model* d'aquest mòdul s'enllaça amb la cel·la *Setup* del *ACP (Pre)* per tal de transferir totes les propietats definides de la fibra. En aquest mòdul s'introdueixen les *Boundary Conditions*, es defineixen els ajustos del *Solver* i es soluciona el model. Un cop solucionat aquest, en aquest mòdul es poden veure els diferents gràfics de colors de les solucions que es vulguin estudiar.

Però la gràcia de treballar amb l'eina *ACP* és que aquesta conté un mòdul a part de *Post-Processing*, l'*ACP (Post)*, on es poden visualitzar els resultats particulars de la fibra, des del mode de falla, les tensions en cada capa, o d'altres. Aquest procés es va repetint tantes vegades com faci falta, tot fent ajustos en el disseny del model, el mallat o les condicions de contorn, fins que s'aconsegueixen els resultats desitjats i es pot donar la simulació per acabada.

## 4.2 Estructura de la simulació

En aquesta secció s'exposa de manera molt detallada tota la simulació que s'ha realitzat, des de la creació del model i el mallat, passant per la creació de les fibres, la definició dels contactes entre peces i de les condicions de contorn, fins a la resolució del model i la forma de visualitzar els diferents resultats. En la següent imatge es mostren els tres mòduls de treball utilitzats en l'*Ansys Workbench* i, a continuació, en les subseccions que apareixen, s'explica de forma seqüencial com s'ha anat completant aquesta estructura. La metodologia seguida en tot moment és la que s'ha comentat en la secció anterior, la 4.1.

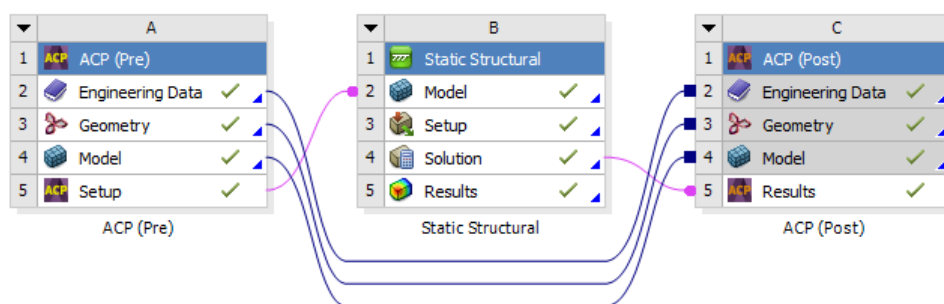


Figura 4.2: Mòduls de treball utilitzats.

### 4.2.1 Càlcul teòric inicial

Abans de començar amb la pròpia simulació en si, cal dir que s'ha procedit a realitzar un càlcul teòric inicial per tal de simplificar aquesta simulació. Aquest càlcul teòric ha consistit en determinar quina serà la força de tracció en l'assaig de cisalla a partir de la qual la pretensió del cargol deixarà de fer efecte, les platines superaran la fricció que hi ha entre elles i aquestes lliscaran fins a tocar amb el cargol. En la figura 4.3 es pot observar del que s'està parlant.

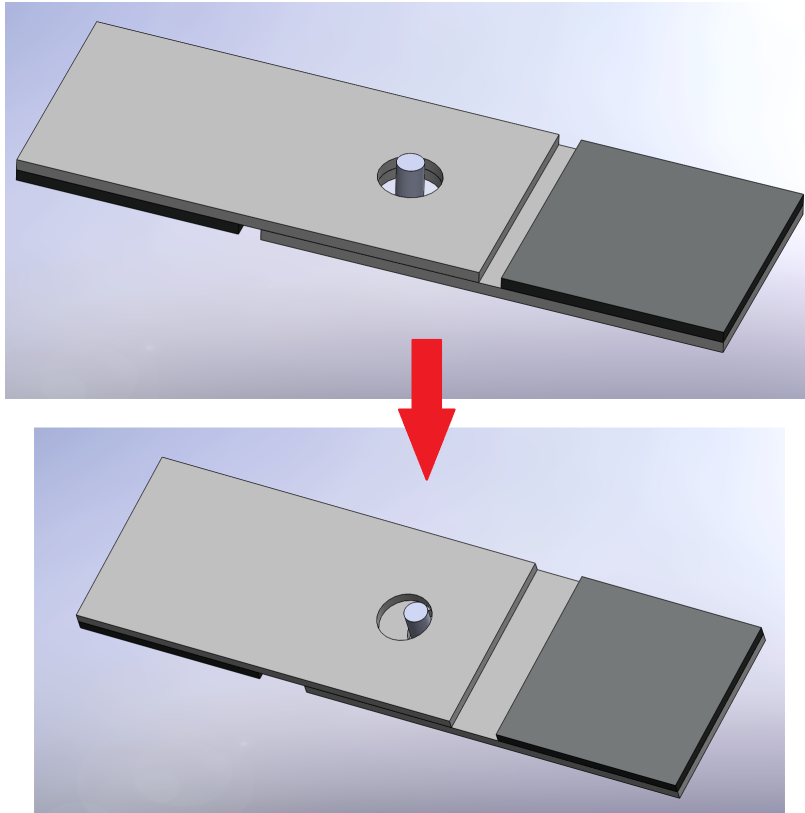


Figura 4.3: Posició de les platines en l'inici de la simulació.

Per realitzar aquest càlcul teòric s'ha tingut en compte la força de pretensió o d'ajust del cargol, calculada en l'apartat 3.1.1, i un coeficient de fricció de la fibra de 0,3. A continuació es mostra el càlcul i el resultat obtingut:

$$F_{tracció} = F_t \cdot \mu_{fibra} = 17659 \text{ N} \cdot 0,3 = 5298 \text{ N} \quad (4.1)$$

Es pot observar que quan s'arriba a una força d'uns 5300 N aproximadament, les platines començaran a lliscar fins a tocar-se amb el cargol. Aquest càlcul també s'ha fet per assegurar des d'un principi que l'*Ansys* detecti el contacte que hi ha entre l'aresta de les platines i el cargol, per tal d'assegurar una bona simulació. En el següent gràfic es mostra



aquest comportament de forma qualitativa, on bàsicament es veu que la força de tracció de l'assaig de cisalla anirà creixent fins als 5300 N aproximadament sense que la proveta es desplaci. Un cop superats aquests *Newtons* de força, la pretensió aplicada al cargol amb el parell de 45 Nm i la fricció de les platines deixaran de tenir efecte, i les platines lliscaran fins a tocar. En aquest moment és quan el cargol començarà a treballar a cisalla i, per tant, començarà a notar la força de tracció aplicada. A partir d'aquí, la proveta s'anirà deformant i tindrà un cert comportament, que és el que s'acabarà determinant amb la simulació.

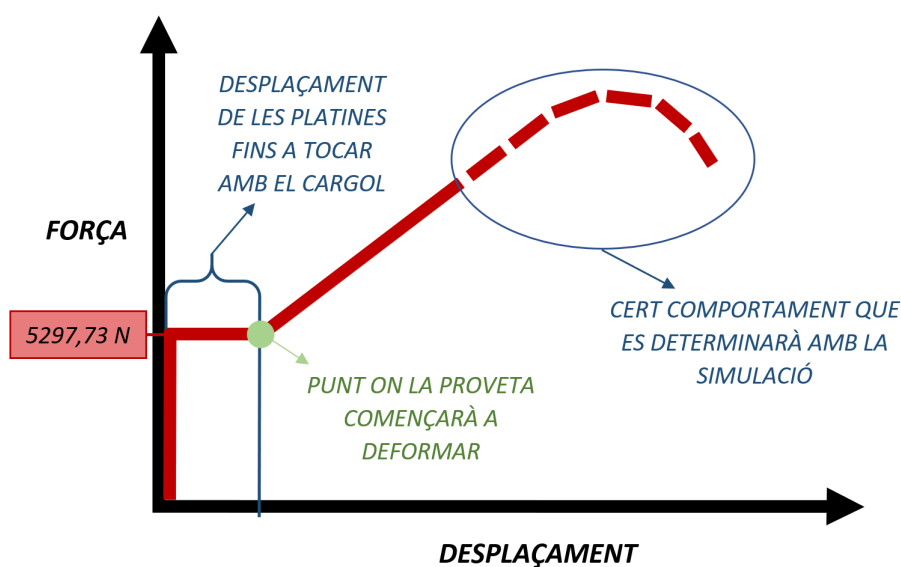


Figura 4.4: Comportament de la proveta en l'assaig.

#### 4.2.2 Mòdul *ACP(Pre)*

En aquesta subsecció ja es comença a parlar de la pròpia simulació. El mòdul del que es parla, l'*ACP (Pre)*, és el primer mòdul de treball de la simulació realitzada, i en la figura 4.2 correspon al mòdul A. Tal hi com s'observa, hi ha 4 cel·les per definir aquest mòdul, que són la 2 d'*Engineering Data*, la 3 de *Geometry*, la 4 de *Model* i la 5 de *Setup*. Aquests quatre punts són els que es tracten i s'expliquen detalladament a continuació.

##### *Engineering Data*

En aquest punt s'introdueixen els diferents materials que componen la proveta simulada: l'acer inoxidable i la fibra de vidre. Pel que fa a l'acer inoxidable, aquest s'ha introduït directament seleccionant-lo de la llibreria de materials definits per defecte de l'*Ansys*. Però pel que fa a la fibra de vidre, s'ha creat un nou material amb les propietats desitjades i requerides.

D'una banda, se l'hi ha assignat un comportament ortotròpic i s'han definit les diferents components en x, y i z pel que fa a les propietats de *Young's Modulus*, *Poisson's Ratio* i *Shear Modulus*. Cal recordar aquí que la composició de fibres que es té en aquest projecte és l'apilament de 6 *QTX* (quadri-axials), i que cada *QTX* és un bloc monolític de fibres en 4 direccions diferents, a 0°, a 90°, a -45° i a 45°. Però a l'hora de fer la simulació, s'ha decidit crear aquests blocs monolítics amb dues capes de fibres *BIAX* (biaxials), una a 0° i l'altra a 45°, en comptes de fer la composició de les 4 direccions *UD*. El motiu d'això ha sigut per equilibrar els valors de les propietats esmentades anteriorment i per assegurar que la component transversal aportí resistència al disseny, tot aconseguint de la manera més propera possible el comportament monolític que tenen aquests blocs a la realitat. Tot aquest disseny de les direccions de la fibra s'explica més detenidament al punt *Setup*, que és on s'ha definit, ja que aquí només es tria el comportament del material i totes les seves propietats. La comparativa entre els valors de les propietats esmentades pel que fa a una capa de fibres *UD* versus una capa de fibres *BIAX* es mostra a la següent taula.

UD ply (1xQTX → 4xUD) (1200 g/m <sup>2</sup> → 300 g/m <sup>2</sup> )			BIAX ply (1xQTX → 2xBIAx) (1200 g/m <sup>2</sup> → 600 g/m <sup>2</sup> )		
YOUNG'S MODULUS [MPa]	X direction	38250	YOUNG'S MODULUS [MPa]	X direction	26378
	Y direction	14150		Y direction	26378
	Z direction	14150		Z direction	14150
SHEAR'S MODULUS [MPa]	XY	2590	SHEAR'S MODULUS [MPa]	XY	2590
	YZ	2590		YZ	2150
	XZ	2590		XZ	2150
POISSON'S RATIO	0,29		POISSON'S RATIO	0,29	
TENSILE [MPa]	X direction	789.4	TENSILE [MPa]	X direction	394.7
	Y direction	70.5		Y direction	394.7
COMPRESSIVE [MPa]	X direction	-597	COMPRESSIVE [MPa]	X direction	-298.5
	Y direction	-193		Y direction	-298.5
SHEAR [MPa]	XY	32.8	SHEAR [MPa]	XY	32.8
THICKNESS [mm]	0,23		THICKNESS [mm]	0,46	

Figura 4.5: Propietats d'un *UD ply* versus propietats d'un *BIAX ply*.

D'altra banda, per acabar de definir la fibra, s'ha triat com a tipus de capa (*Ply Type*) que aquesta sigui regular. És la composició més senzilla, ja que aquesta opció també permet triar, per exemple, que la capa sigui com un teixit (*woven*) o que sigui com un niu d'abelles (*Honeycomb core*), entre d'altres. Un cop entrades totes aquestes propietats, s'ha passat a definir els límits de tensió, *Stress limits*. Els valors que s'han tingut en compte per una capa *BIAX* apareixen a la taula anterior.

I finalment, s'ha caracteritzat els criteris de fallada per aquest material compost. S'han introduït les constants del criteri de fallada de *Puck*, que apareixen per defecte quan es tria l'opció *Glass*, ja que les fibres en aquest projecte són fibres de vidre. I també s'han introduït les constants del criteri de *Tsai-Wu*, el qual s'explicarà més endavant, ja que és el criteri de fallada que s'ha tingut en compte per visualitzar la fallada del conjunt un cop solucionat el model i acabada la simulació.

### **Geometry**

En aquesta cel·la del mòdul s'ha importat la geometria creada que serà la que es modelarà i s'acabarà analitzant amb l'*Ansys*. Aquesta geometria s'ha creat fent servir el programari *SolidWorks* i s'ha guardat com un fitxer *.SAT* per tal de poder ser importada a l'*Ansys*. A la figura 4.6 se'n pot veure el disseny.

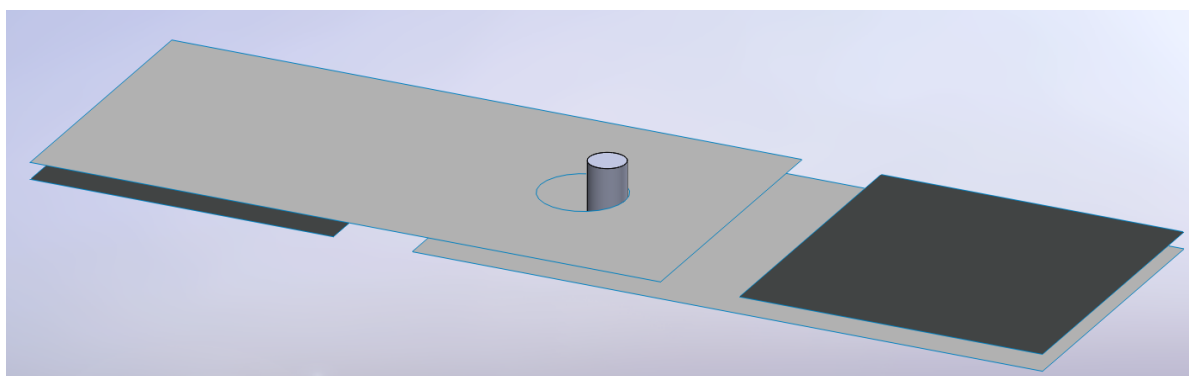


Figura 4.6: Geometria importada a l'*Ansys*.

Com es pot observar, les platines i els *spacers*, que són els components de la proveta d'estudi que estan formats pel material compost, s'han creat com a superfícies. El motiu d'això és perquè el gruix s'acabarà definint a la cel·la *Setup* amb la creació de les capes de fibra, tal hi com es veurà. Pel que fa al conjunt cargol-femella-volandra, aquest s'ha simplificat únicament amb el cargol com un cilindre, per evitar errors de mallat i de càlcul. També com s'observa a la figura, s'ha tingut en compte la geometria inicial comentada en el punt 4.2.1 amb les provetes un cop ja han lliscat.

### **Model**

En aquest punt es treballa amb l'*Ansys Mechanical*. Dins d'aquest programa, en primer lloc, s'ha assignat cada material a cada component: l'acer inoxidable al cargol i la fibra a les platines i *spacers*. Aquests dos últims components, al ser importats com a superfícies, se'ls hi ha d'assignar un espessor per tal de completar la geometria. S'ha posat el gruix final de les platines, de 5,52 mm, per veure com acabarà sent el model. Però cal dir que aquest gruix és fictici, és a dir, és merament per poder seguir completant el *Mechanical*,

i s'hagués pogut triar un valor d'1 mm per exemple, ja que el gruix real de cada zona i el material compost en sí seran definits en el *Setup*, tal hi com ja s'ha anat comentant.

Un cop completada tota la geometria, s'ha passat a definir les diferents *connections* entre elements. Al ser la proveta en estudi un assemblatge de diferents components (dues platines, dos *spacers* i un cargol), cal que els contactes entre aquests estiguin molt ben definits si es vol que el model acabi tenint el comportament desitjat. Cal comentar que alguns d'aquests *contacts*, al importar la geometria amb el fitxer *.SAT*, ja s'introdueixen per defecte degut a les condicions que s'han posat a l'hora de fer l'assemblatge dels components amb el *SolidWorks*, però cal tocar i canviar alguns paràmetres per tal d'assegurar que l'*Ansys* tingui controlats tots aquests contactes de forma correcta i des del principi.

En total s'han definit 5 *contacts* diferents. D'una banda, un *Bonded* per cada platina i el seu *spacer* corresponent, per tal de simular que els *spacers* estan enganxats a les platines i es mouen solidaris a aquestes. D'altra banda, un *contact No Separation* entre les dues platines, per simular que aquestes no poden separar-se, però sí que poden lliscar una respecte de l'altra. Aquí cal comentar que, com ja s'ha dit en l'apartat del càlcul inicial realitzat abans de la simulació, s'ha començat a simular el model des de la posició on les platines ja han lliscat. Per tant, en cap moment s'ha hagut de definir el contacte entre elles com a *frictional* ja que aquesta fricció per a la posició inicial ja s'ha superat. En la següent imatge es pot observar un dels dos *contact Bonded*, on es pot tenir una idea de com s'ha definit.

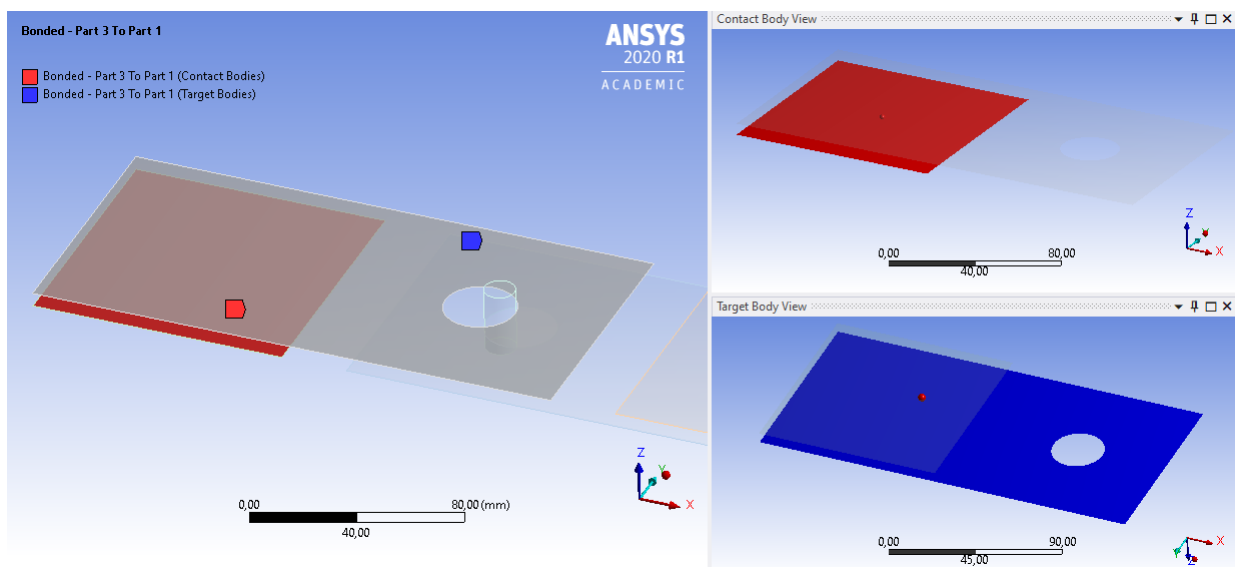


Figura 4.7: *Contact Bonded* entre una de les platines i un dels *spacers*.

Per a tots aquests *contacts* citats anteriorment cal esmentar que tots els possibles paràmetres que es poden ajustar s'han deixat per defecte com a *Program Controlled*, és a dir, que ho controli el programa, ja que són contactes molt simples i fàcils de que

funcionin. D'altra banda, també dir que a l'hora d'escollir els *Contact Bodies* i els *Target Bodies*, aquests s'han definit tenint present que dos *Contacts* no poden manar mai a un mateix *Target* dins d'un mateix contacte, ja que si fos així, el programa donaria error.

Seguint amb el tema de les *connections*, dels 5 contactes totals que s'han definit només se n'han esmentat 3. El motiu d'això és que els 2 que falten s'han tractat amb especial cura i a part dels altres, degut que són els 2 *contacts* que s'han hagut d'anar modificant mitjançant els paràmetres de disseny per tal de que finalment l'*Ansys* els detectés. I, per tant, se'n vol fer una explicació més exhaustiva. En la següent figura es mostra de quins *contacts* s'està parlant. Només n'apareix un degut que l'altre és exactament el mateix però simètric a l'altra platina.

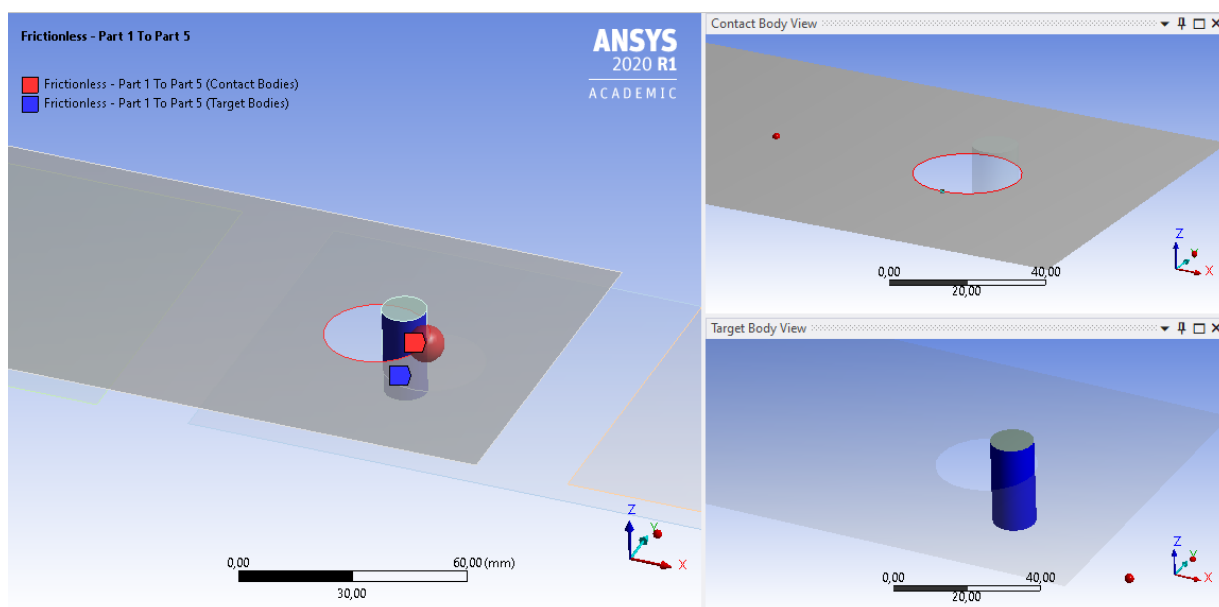


Figura 4.8: *Contact Frictionless* entre l'aresta del forat d'una platina i tota la superfície externa del cargol.

Aquest *contact*, com es pot llegir en el peu de la figura, és el que hi ha entre l'aresta del forat de les platines i la superfície externa del cargol. A part de ser un contacte important ja que aquesta serà la zona crítica a l'hora de resoldre el model, és un contacte delicat perquè els elements que en formen part són l'aresta d'un element *shell* amb la superfície exterior d'un element sòlid. Per tant, s'han anat ajustant els paràmetres de disseny per assegurar el contacte. Després de fer diferents proves, en la figura 4.9 es poden observar els paràmetres definitius que s'han ajustat per aconseguir fer funcionar el contacte. Pel que fa als *Contact* i *Target Bodies*, no se'n comenta res ja que anteriorment ja s'ha explicat amb detall de com s'escullen, i aquí és el mateix procediment. Com a tipus de contacte, aquest s'ha definit com a *Frictionless*, ja que és un contacte sense fricció.

Details of "Frictionless - Part 1 To Part 5"	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	2 Edges
Target	2 Faces
Contact Bodies	Part 1
Target Bodies	Part 5
Shell Thickness Effect	No
Protected	No
<b>Definition</b>	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
<b>Advanced</b>	
Formulation	Augmented Lagrange
Small Sliding	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Factor
Normal Stiffness Factor	1,
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0,
Thermal Conductance	Program Controlled
Electric Conductance	Program Controlled
Pinball Region	Radius
Pinball Radius	5, mm
Time Step Controls	None
<input type="checkbox"/> Restitution Factor	1
<b>Geometric Modification</b>	
Interface Treatment	Adjust to Touch
Target Geometry Correction	None

Figura 4.9: Paràmetres ajustats del *Contact Frictionless* entre l'aresta del forat d'una platina i tota la superfície externa del cargol.

Pel que fa a la *Formulation*, s'ha decidit optar per una *Augmented Lagrange*, ja que el contacte que es té entre el cargol i el forat és de comportament no lineal, i la formulació seleccionada és adequada per aquests casos. Seguint amb els paràmetres modificats, també s'ha ajustat el *Normal Stiffness* amb un factor d'1. Aquest factor normal de rigidesa bàsicament controla el grau de penetració entre el *Contact* i el *Target* en el contacte. Els valors alts d'aquest factor normal de rigidesa disminueixen el grau de penetració del contacte però poden conduir en errors a la matriu de rigidesa global (matriu utilitzada en el mètode de resolució de la simulació, el mètode dels elements finits) i a dificultats de convergència de la solució. Per contra, valors molt baixos d'aquest factor poden portar a una certa quantitat de penetració i causar que la solució sigui inexacta. Per tant, s'ha triat un valor predeterminat d'aquest factor, un valor d'1, per tal d'assegurar una penetració petita però suficient per tal de que el problema es comporti correctament en temes de convergència a l'hora de solucionar-se.

Seguint amb els paràmetres que s'han ajustat, cal parlar ara de la *Pinball Region*. Aquest paràmetre és una eina molt potent i útil quan es té un disseny amb un contacte delicat com és el cas d'aquest projecte. D'aquest contacte entre el cargol i l'aresta de la platina se'n vol tenir un control precís, per tal d'assegurar-lo, i la millor eina per fer-ho és definint aquesta *Pinball Region* amb un *Pinball Radius* determinat. Aquest radi, després de diverses proves, s'ha acabat triant de 5 mm, doncs ja és suficient perquè englobi tota

la regió de contacte. En la figura 4.10 es pot observar aquesta regió, que normalment es pinta com una esfera de color vermell. Realment és un forma molt visual d'entendre què fa aquesta *Pinball Region*. I ja per acabar amb els paràmetres, falta parlar de l'*Interface Treatment*, que pren rellevant importància. Aquest paràmetre s'ha definit com a *Adjust to Touch*, que vol dir que el programa pren un valor automàtic per a la configuració de desplaçament necessari perquè el contacte no quedi obert i s'acabi de tancar del tot, és a dir, ajusta els dos elements del contacte fins que aquests es toquen. És realment una eina molt útil quan es té una geometria tangent però no de forma perfecta com és el cas, ja que el cargol a l'inici només és tangent a l'aresta de la platina per una part.

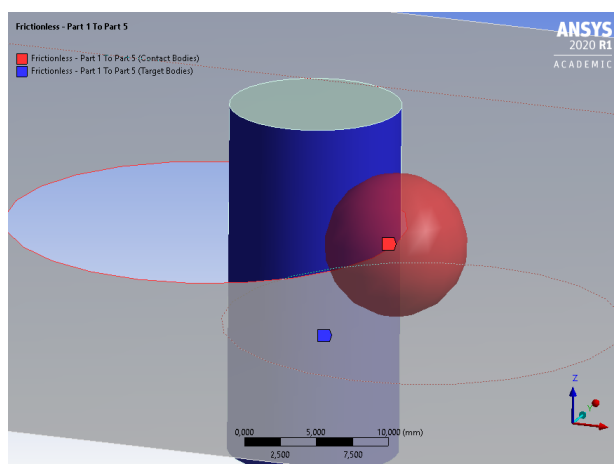


Figura 4.10: Detall de la *Pinball Region*.

Ja per acabar amb els *contacts*, cal saber que per tal d'assegurar que aquests funcionessin correctament i, a partir d'aquest moment, poder seguir endavant amb la simulació, s'ha fet ús d'una eina que disposa l'*Ansys* per tal de poder-ho veure. Aquesta eina és el *Contact Tool* i en les dues següents imatges es pot observar el seu funcionament. D'una banda, a la figura 4.11 apareix la llegenda de colors per tal de saber quin estat té el contacte i, de l'altra, a la figura 4.12 apareix una taula amb els diferents *contacts* tractats en aquest projecte un cop ja s'han aconseguit que funcionin tots. Això es pot observar en el fet que cap *contact* està remarcat d'algun dels colors de la llegenda, ja que si no fos així seria senyal d'alarma de que n'hi ha algun que no està funcionant correctament, i que tots estan amb l'estat de *closed*, és a dir, detectats i funcionant de forma correcta.

Red	The contact status is open but the type of contact is meant to be closed. This applies to bonded and no separation contact types.
Yellow	The contact status is open. This may be acceptable.
Orange	The contact status is closed but has a large amount of gap or penetration. Check penetration and gap compared to pinball and depth.
Gray	Contact is inactive. This can occur for MPC and Normal Lagrange formulations. It can also occur for auto asymmetric behavior.

Figura 4.11: *Color Legend* del *Contact Tool*.



Name	Contact Side	Type	Status	Number Contacting	Penetration (mm)
Bonded - Part 2 To Part 4	Contact	Bonded	Inactive	N/A	N/A
Bonded - Part 2 To Part 4	Target	Bonded	Closed	400,	2,8422e-014
Bonded - Part 3 To Part 1	Contact	Bonded	Closed	400,	5,6843e-014
Bonded - Part 3 To Part 1	Target	Bonded	Inactive	N/A	N/A
No Separation - Part 1 To Part 2	Contact	No Separation	Closed	426,	2,8422e-014
No Separation - Part 1 To Part 2	Target	No Separation	Inactive	N/A	N/A
Frictionless - Part 1 To Part 5	Contact	Frictionless	Closed	1,	6,813e-006
Frictionless - Part 1 To Part 5	Target	Frictionless	Inactive	N/A	N/A
Frictionless - Part 2 To Part 5	Contact	Frictionless	Closed	1,	6,22e-006
Frictionless - Part 2 To Part 5	Target	Frictionless	Inactive	N/A	N/A

Figura 4.12: Taula amb els resultats del *Contact Tool*.

Finalment, en aquesta cel·la *Model* de l'ACP (*Pre*), que es treballa com ja s'ha dit amb l'*Ansys Mechanical*, s'ha introduït el mallat del disseny perquè es pugui resoldre la simulació mitjançant el mètode dels elements finits *FE*. En la següent imatge, la figura 4.13, es mostra el mallat que s'ha pres com a bo per a la visualització dels resultats finals, però cal dir que per aconseguir-lo s'han anat fent diferents proves fins aconseguir una bona resolució dels resultats obtinguts.

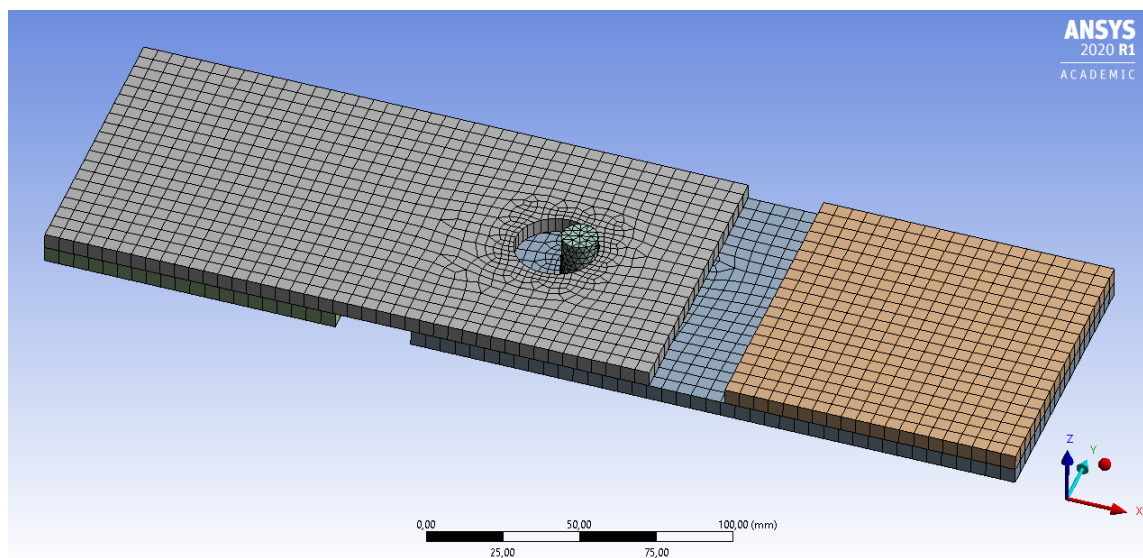


Figura 4.13: Mallat definitiu de la geometria.

Aquest mallat final s'ha creat amb un *Body Sizing* dels diferents components de la proveta amb un *Element Size* de 5 mm. Cal comentar també que s'ha procedit a fer un refinat de la zona propera al forat i del cargol, ja que seran les zones més crítiques a l'hora de resoldre el model. Un detall d'aquest refinat es pot visualitzar en la següent imatge.



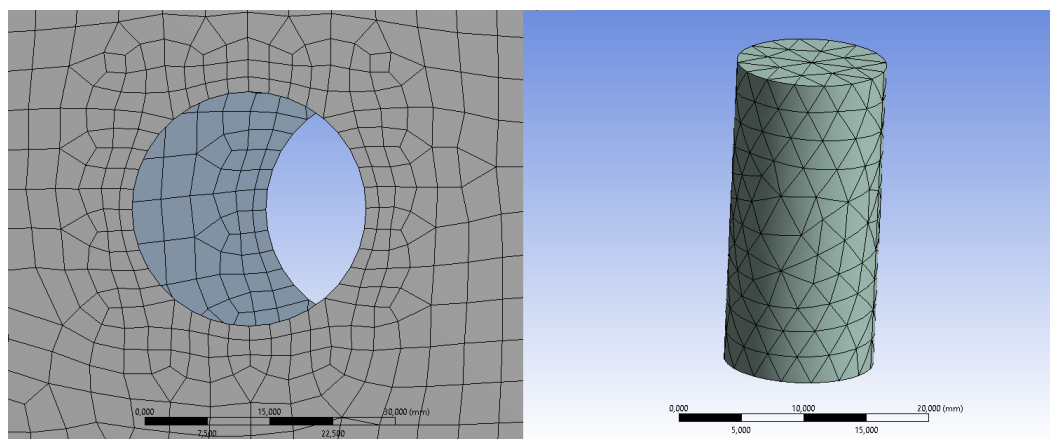


Figura 4.14: Detall de les zones refinades.

### Setup (ACP)

Un cop s’han completat les cel·les d’*Engineering Data*, de *Geometry* i de *Model* i s’han actualitzat totes elles per tal de que surti un *tick* i poder donar-se per tancades, ja s’ha pogut procedir a definir i completar la última cel·la de *Setup*.

Primerament s’ha creat un *Fabric* que correspon a una capa de fibres *BIAx*, i se li ha assignat com a material la fibra definida en *Engineering Data* i un gruix de 0.46 mm. Aquest *Fabric* s’ha fet servir seguidament per crear un *Stackup*, ja que aquest està format per el conjunt de dos *Fabrics*, un orientat a  $0^\circ$  i l’altre orientat a  $45^\circ$ . Aquest *Stackup* és el que durant el projecte s’ha anat anomenant com a *QTX*. En la següent figura, la 4.15, es poden visualitzar les propietats mecàniques en un diagrama polar d’aquests dos elements creats.

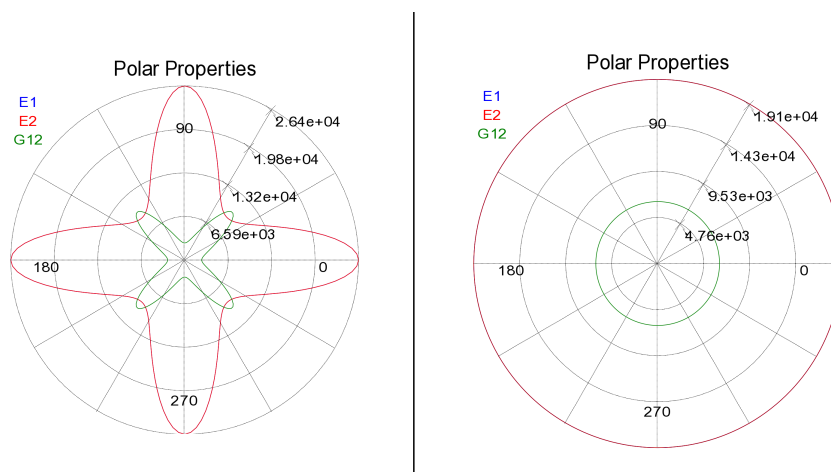


Figura 4.15: Propietats mecàniques en un diagrama polar. A l’esquerra del *Fabric* i a la dreta de l’*Stackup*.

A continuació s’ha procedit ha definir l’apilament de capes de fibra. Per a fer-ho, s’ha definit primer de tot un *Oriented Selection Set* amb la direcció de l’eix z positiu com a

predeterminada per a fer aquest apilament, i un *Rossette* per tal de crear les diferents direccions de les fibres. Un cop fet això, ja s'ha passat a crear el propi apilament de capes. S'ha fet un apilament de 6 *Stackups*, simulant els 6 *QTX* que es tenen en tot el gruix de la platina. Com es pot observar en la imatge 4.16, s'han creat 6 *Modeling Ply*, des del P1 fins el P6, i cadascuna d'aquestes capes està formada per dues capes més que representen els *Fabrics*. És a dir, amb conceptes no tant tècnics, s'ha creat un apilament de 6 capes quadri-axials, i aquests capes quadri-axials s'han creat amb dues capes de fibres biaxials, tal hi com s'ha explicat en detall al punt 4.2.2.

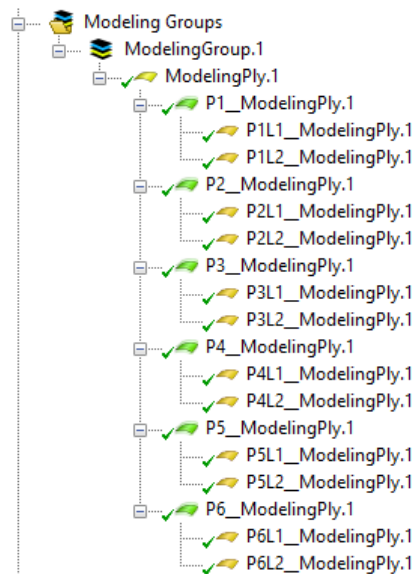


Figura 4.16: Apilament de les capes.

Per entendre millor aquest apilament creat, en les dues següents imatges, la 4.17 i la 4.18, es pot observar un *Fabric* orientat a  $0^\circ$  en la primera, i un *Fabric* orientat a  $45^\circ$  en la segona. L'apilament de 12 vegades aquesta seqüència de dues capes és el gruix final de la platina.

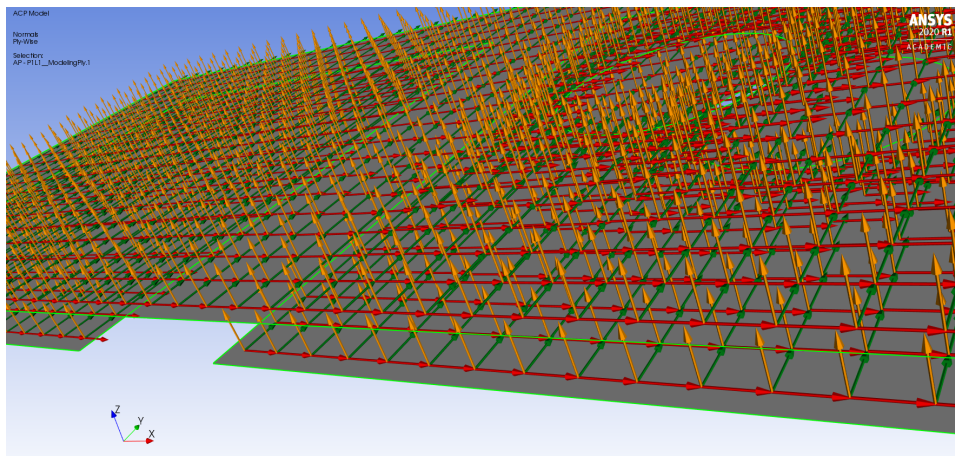


Figura 4.17: *Fabric* orientat a  $0^\circ$ .

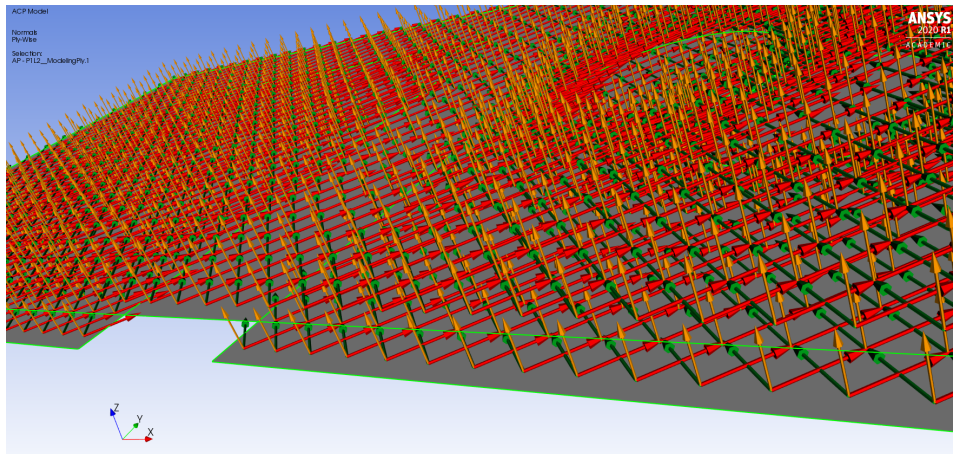


Figura 4.18: *Fabric orientat a 45°.*

Finalment, per acabar de caracteritzar aquesta cel·la, s'ha definit una *Section Cut* per assegurar que l'apilament s'ha creat correctament. Aquesta es visualitza en la següent imatge, i en ella es pot comprovar com en cada *Shell* hi ha un apilament de 12 capes que en total fan el gruix de 5,52 mm desitjat. Aquestes capes es poden veure amb les línies de color verd, que si es compten n'hi ha 12.

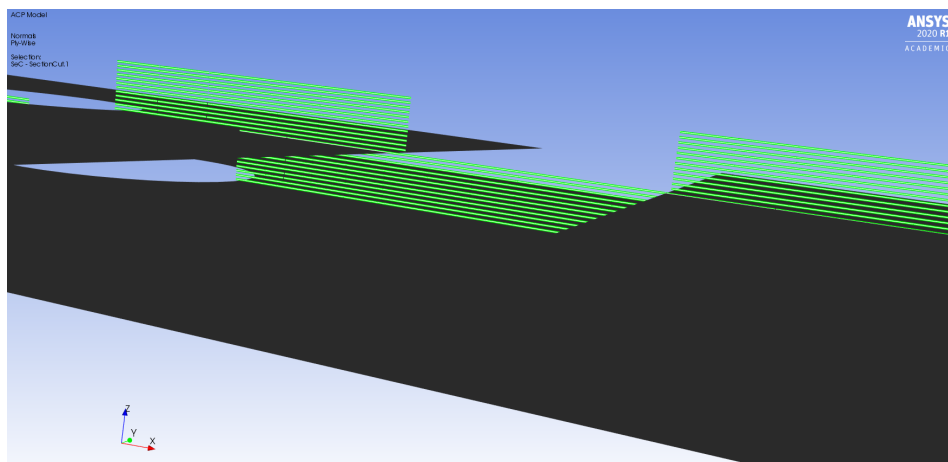


Figura 4.19: *Section Cut.*

### 4.2.3 Mòdul *Static Structural*

Un cop completat tot el mòdul *ACP (Pre)*, s'ha passat a introduir el mòdul de treball on s'introdueixen les diferents condicions de contorn i es soluciona el model. Aquest mòdul és l'*Static Structural*, i és el que s'explica en aquesta secció. Cal esmentar que per tal de que totes les característiques definides en l'*ACP (Pre)* es transmetin a aquest mòdul de treball, s'ha d'enllaçar la cel·la *Setup* de l'*ACP (Pre)* amb la cel·la *Model* de l'*Static Structural* tot triant l'opció de *Transfer Shell Composite Data*, és a dir, que es transfereixin totes les dades de les superfícies de material compost.

Un cop creat aquest enllaç entre mòduls, ja es pot passar a definir la cel·la *Model*. Aquesta, com en el cas del mòdul *ACP*, també es manipula a través de l'*Ansys Mechanical*. Primerament s'han definit les condicions de contorn del model. De manera molt breu comentar que s'han realitzat diferents càlculs amb diferents condicions fins que s'ha aconseguit trobar la configuració que més acosta el model al comportament desitjat. Aquestes condicions de contorn definitives són, d'una banda, la fixació de les dues arestes de l'extrem esquerre de la proveta, corresponents a la platina i l'*spacer* esquerres, d'altra banda, l'aplicació d'un *Remote Displacement* en l'aresta circular inferior del cargol, aconseguint que aquest només tingui moviment lliure en direcció x, ja que els altres dos moviments com també les tres possibles rotacions queden fixades. A més a més, també s'ha fixat el moviment en l'eix z tant de les platines com dels *spacers*, però ambdós elements sí que es poden moure lliurement tant en direcció y com en x. I finalment, s'ha aplicat la condició de contorn que fa que el model es mogui: un desplaçament a les dues arestes de l'extrem dret de la proveta, corresponents a la platina i l'*spacer* drets. Aquest desplaçament, després de dur a terme diferents proves, s'ha acabat fixant de 2,5 mm ja que s'ha considerat suficient per tal d'observar la força i el comportament de fallada del conjunt, tal hi com es veurà més endavant.

Totes aquestes *Boundary Conditions* citades anteriorment es poden veure en la figura que apareix a continuació. Cal comentar que pel que fa a la *Bolt Pretension* simulant la pretensió d'ajust del cargol, aquesta no s'ha hagut de tenir en compte i, per tant, no s'ha hagut de definir, degut que per a la posició inicial de simulació, aquesta pretensió ja ha estat superada i no té cap efecte.

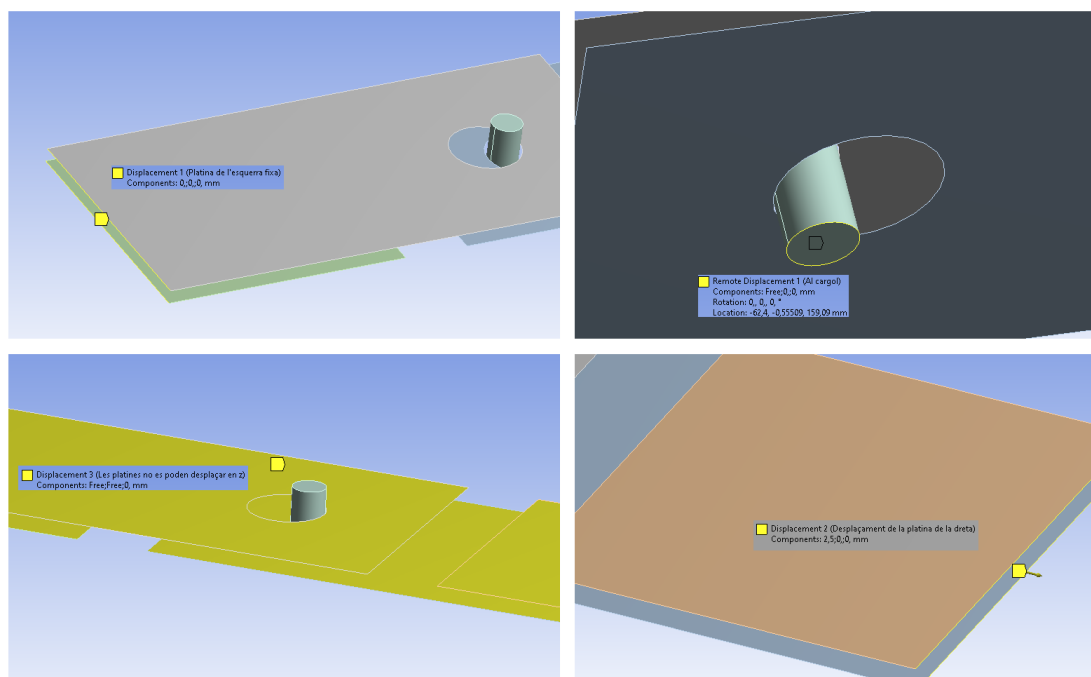


Figura 4.20: *Boundary Conditions*.

Un cop definides totes les condicions de contorn, s’ha passat a caracteritzar els ajustos de l’anàlisi. Aquí bàsicament s’ha escollit que el model es solucioni amb 20 *substeps*, és a dir, amb 20 passos de càrrega. Aquest número s’ha triat així per tal de tenir suficients valors per poder-ne treure conclusions i fer-ne algun gràfic, tal hi com es mostrarà en la secció 4.3. D’altra banda, també s’ha decidit resoldre el model a través d’un càlcul no lineal, ja que des d’un principi s’ha considerat que la fibra estudiada tindrà un comportament d’aquest tipus.

Quan ja s’ha definit tots els ajustos de l’anàlisi desitjats, s’ha passat a solucionar el model amb el *Solve*. Per tal d’anar visualitzant el procés de resolució, s’ha consultat en tot moment els tres gràfics que apareixen en les tres imatges següents: la convergència de forces (5.2), la convergència de desplaçaments (4.22) i la convergència de moments (4.23). Si es para atenció en ells, es pot veure que el model a convergit en els 20 *substeps* definits (línies discontinues de color verd) i que aquesta convergència s’ha produït, en tots tres casos, per valors dels paràmetres de força, desplaçament i moment relativament petits. Fins i tot, com es pot observar en el cas de desplaçaments, aquesta convergència s’ha produït per valors d’un ordre de magnitud tant petit que es pot considerar pràcticament 0. Amb això, doncs, s’ha pogut arribar a la conclusió que aquesta solució ha convergit de forma correcta i que els resultats que s’han obtingut poden ser considerats com a prou exactes per seguir endavant amb el seu anàlisi.

Ja per acabar amb la part de la resolució del model, comentar en forma de curiositat que per resoldre aquest sistema definit amb un possible comportament no lineal i, per tant, amb la necessitat de realitzar un càlcul no lineal, l’*Ansys* fa servir el mètode de la discretització per elements finits de *Newton-Raphson*, que és un procés de resolució iteratiu per resoldre equacions no lineals.

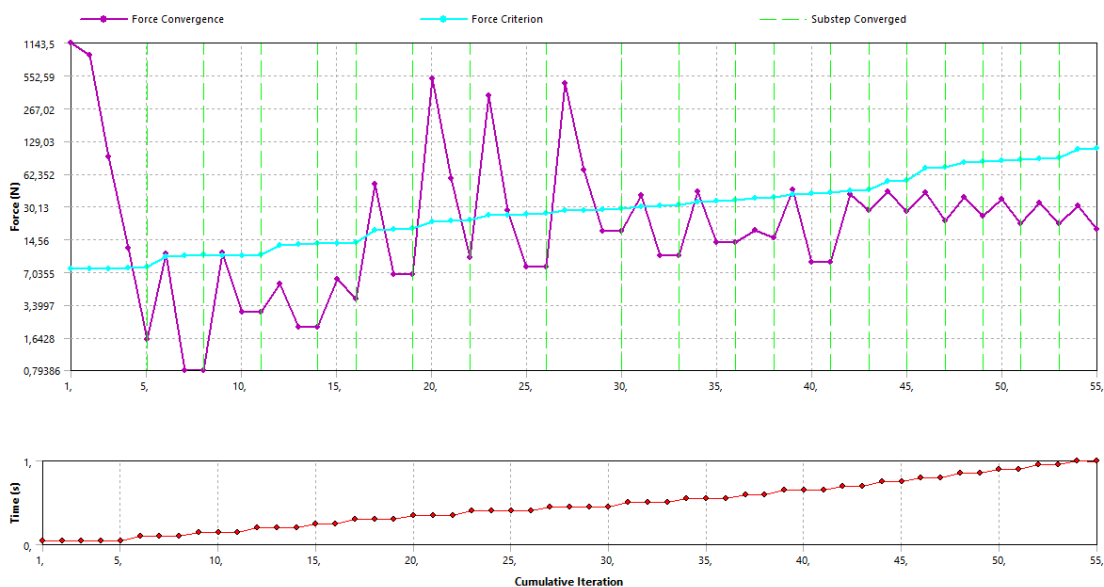


Figura 4.21: Convergència de la Força.

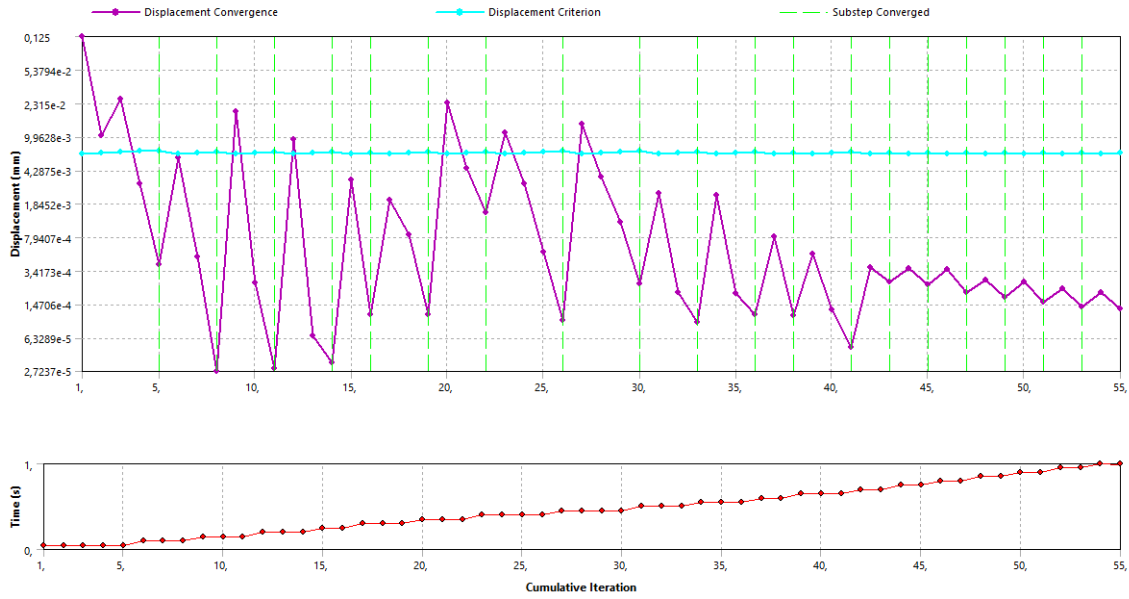


Figura 4.22: Convergència del Desplaçament.

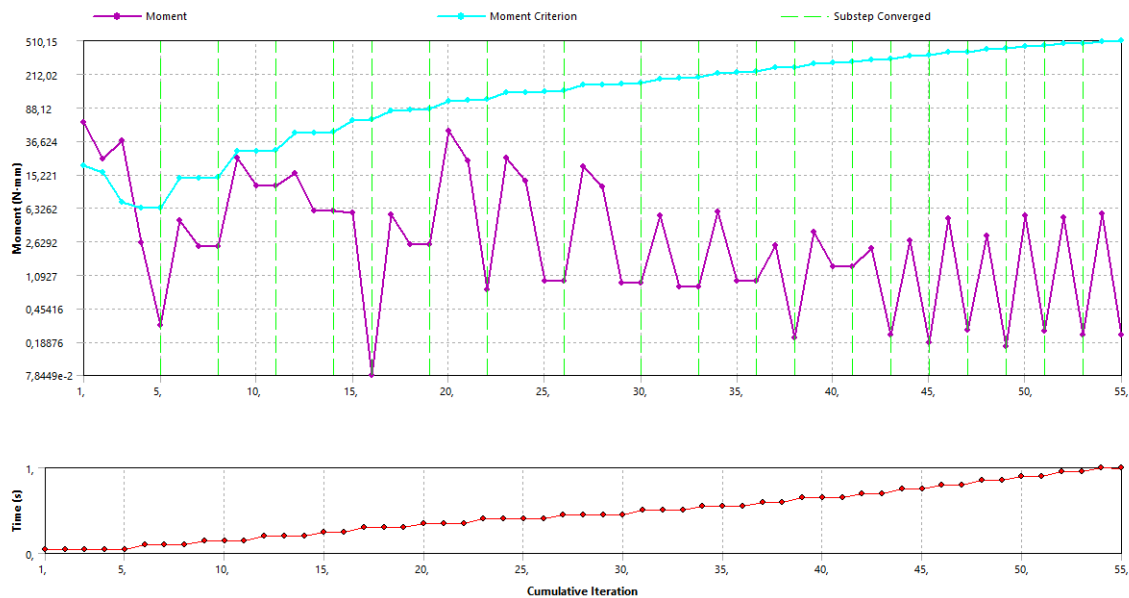


Figura 4.23: Convergència del Moment.

Quan s'ha aconseguit solucionar amb èxit el model, ja s'ha pogut passar a visualitzar els diferents gràfics de colors dels resultats obtinguts. Aquests gràfics dels resultats però, es mostren en el punt 4.3, ja que s'ha volgut donar especial èmfasi a tots ells i per això s'ha creat un punt a part únicament amb tots els resultats i la seva discussió.



#### 4.2.4 Mòdul *ACP(Post)*

Un cop definits els mòduls d'*ACP (Pre)* i d'*Static Structural*, s'ha procedit a completar l'últim mòdul que apareix a la figura 4.2 mostrada anteriorment a l'inici d'aquest apartat, el mòdul *ACP (Post)*, i així tancar aquest cicle d'anàlisi de *composites* amb *Ansys*.

Aquesta opció de *post processing* que ofereix el fet de treballar amb *ACP PrepPost* és una eina realment molt potent, degut que amb la visualització de resultats que ofereix en si l'*Static Structural*, aquests no es poden veure segons la capa de fibra que s'estigui considerant. En canvi, fent servir aquest mòdul *ACP (Post)*, es disposa de la funcionalitat de poder fer un *mapping* per visualitzar els diferents resultats de cada capa de fibra creada. És a dir, recordant que s'ha creat un apilament de 12 *Fabrics* simulant les capes *BIAX*, es pot veure el nivell de tensió, la deformació i la fallada en cada una d'aquestes capes i veure, per exemple, quina és la més crítica.

Per tal de configurar correctament aquest mòdul, a l'hora d'introduir-lo al *Workbench*, cal deixar-lo anar a sobre de l'*ACP (Pre)*, perquè així totes les dades de les cel·les *Engineering Data*, *Geometry* i *Model* queden transferides i completament definides en aquest nou mòdul. Per tant, únicament aquí s'ha passat a completar l'última cel·la, la de *Results*. Aquest punt es treballa amb la mateixa finestra que la cel·la *Setup* de l'*ACP (Pre)* i, per tant, apareix el mateix desplegable d'opcions a ajustar. Per tal de visualitzar els resultats, únicament s'ha completat els dos camps que es mostren en la següent imatge, 4.24.

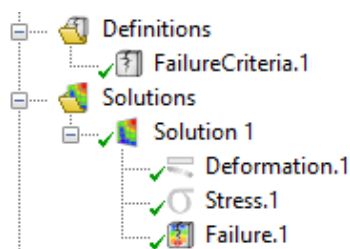


Figura 4.24: Opcions definides en l'*ACP (Post)*.

D'una banda, s'ha creat un gràfic per la deformació, un per la tensió i un per la fallada. Cal comentar que tots aquests gràfics es poden veure per cada capa de fibres creada, com també, per cada *substep* de càrrega convergit. És a dir, que es pot anar veient de forma seqüencial els diferents resultats obtinguts a mesura que s'ha anat deformant el model. Per definir la fallada, cal crear abans el *Failure Criteria*. Tal hi com s'ha explicat en l'apartat 4.2.2, per acabar visualitzant les zones de fallada, s'han definit 2 mètodes de fallada diferents: *Puck* i *Tsai-Wu*. Però aquí, s'ha decidit optar per el segon d'ells, el *Tsai-Wu*, tot i que la definició d'aquest i en què consisteix s'explica en la secció 4.3.

Pel que fa als gràfics dels resultats, com en el cas de l'*Static Structural*, aquests es mostren en la secció que ve a continuació, per tal de fer-ne una discussió acurada i donar-li la importància que aquesta té.

## 4.3 Anàlisi dels resultats

En aquesta secció s'ha procedit a realitzar una acurada discussió dels resultats obtinguts, tant amb l'*Static Structural* com amb l'*ACP (Post)*, un cop solucionat el model. Per tant, en els apartats següents es van mostrant els diferents gràfics de colors consultats i les diferents conclusions extretes.

### 4.3.1 Deformacions

Primer de tot, un cop solucionat el model, s'ha volgut comprovar de forma visual que aquest tingués el comportament desitjat. Això s'ha fet a través dels gràfics de colors de deformacions. D'una banda, s'ha consultat la deformació direccional en l'eix x pel que fa a la platina que s'estira juntament amb el cargol, i de l'altra, s'ha visualitzat únicament la deformació en x del cargol. Són les imatges que es mostren a continuació, la 4.25 i 4.26. Cal dir que per tal d'exagerar la deformació i tenir una millor visió de què està passant, per aconseguir aquests gràfics s'ha solucionat el model amb un desplaçament de 10 mm.

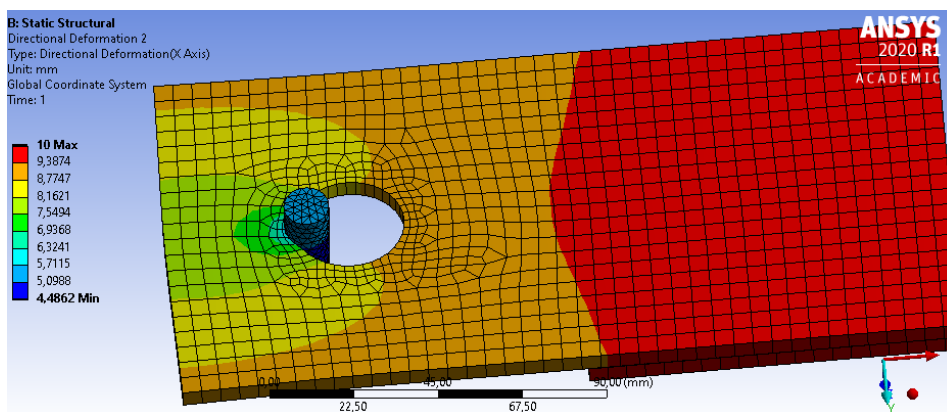


Figura 4.25: Deformació direccional en x del cargol i la platina de la dreta (la que s'estira).

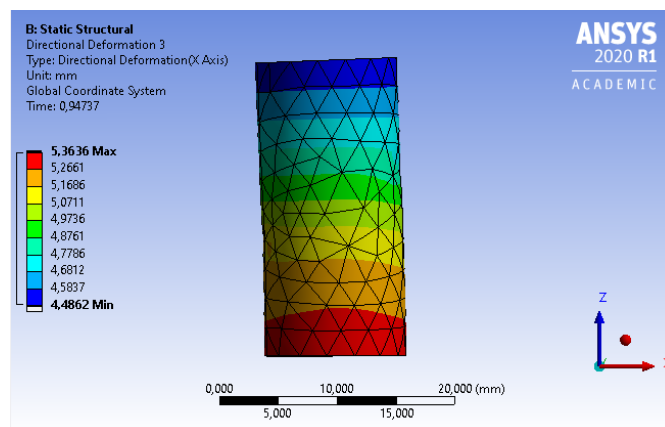


Figura 4.26: Detall de la deformació direccional en x del cargol.



En les dues figures es pot veure com el forat comença a deformar per efecte de la pressió que hi fa el cargol i, per conseqüència, el cargol també deforma. A la llegenda de colors es poden consultar també els diferents valors de deformació aplicats.

### 4.3.2 *Contact Tool*

En aquesta part de resultats també s'ha volgut tornar a comprovar, mitjançant l'eina *Contact Tool*, que el contacte crític entre l'aresta del forat de la platina amb la superfície exterior del cargol funciona correctament durant la simulació. En la següent imatge, la 4.27, es pot veure com el contacte funciona tal i com es desitja.

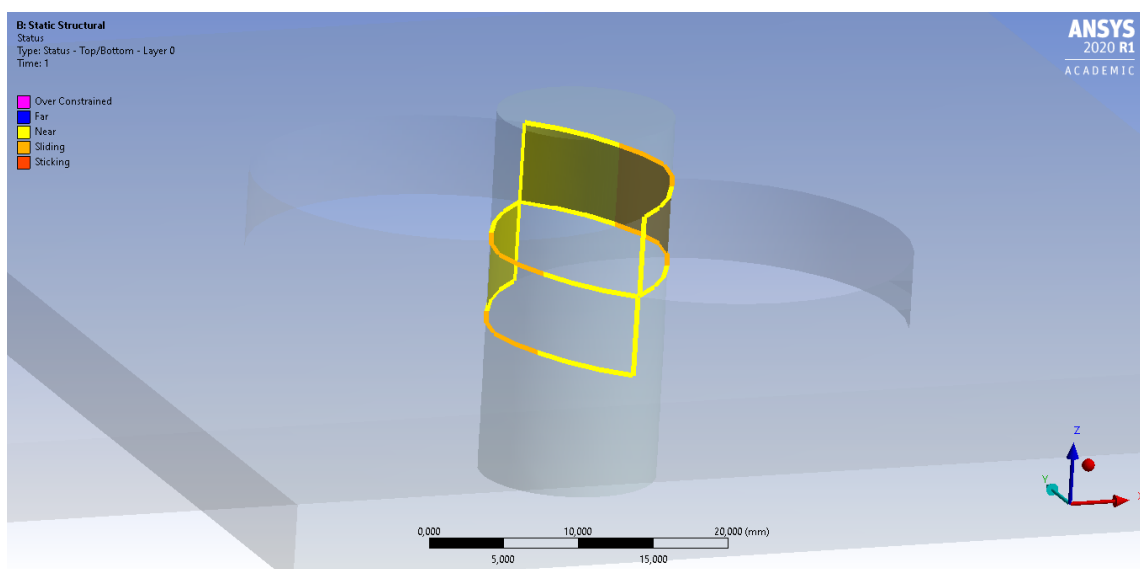


Figura 4.27: *Contact Tool* del contacte entre cargol i platina.

De color taronja apareix la zona de punts de contacte *sliding*, que és la zona entre cargol i aresta de la platina tangent, i de color groc apareixen les zones de punts de contacte *near*, és a dir, que estan propers a tocar.

Per tant, s'ha acabat determinant amb seguretat que el contacte funciona de forma exacte i, que per tant, els resultats obtinguts en aquesta zona crítica es poden considerar com a bons. Cal fer però un incís aquí, ja que és interessant saber que els valors obtinguts en els elements que estan just tocant al cargol en tota la seva trajectòria de desplaçament, poden donar valors inexactes i poc propers a la realitat ja que aquests punts són punts de singularitat.

### 4.3.3 *Failure Criteria*

Un cop s'han vist els resultats anteriors i s'ha comprovat que el model funciona correctament i té el comportament esperat, s'ha procedit a estudiar, tal hi com s'ha fet també en l'anàlisi teòric, tot el criteri de fallada per tal d'acabar determinant per quina força i per quin mètode fallarà el conjunt en la simulació. Això és el que es mostra en aquesta secció.

Primer de tot, cal entendre el mètode de fallada que s'ha fet servir per acabar extraient les conclusions que s'aniran mostrant al llarg d'aquest apartat. Tal hi com s'ha comentat en la secció 4.2.4, aquest mètode de fallada s'ha decidit que sigui el mètode de *Tsai-Wu*, i consisteix en un criteri de fallada que s'utilitza per els casos on es tenen materials ortotrópics amb diferents resistències a tracció i a compressió. És un mètode molt utilitzat en el cas de *composites*, i prediu la fallida quan l'índex de *Tsai-Wu* en una capa de laminat arriba a valors d'1 o superiors.

Aquest criteri de fallada es pot consultar tant en l'*Static Structural* com en l'*ACP (Post)*, per mitjà de gràfics de colors dels diferents valors de l'índex de *Tsai-Wu* per als diferents elements de la malla. En les figures 4.28, 4.29 i 4.30 es poden visualitzar els gràfics dels que s'està parlant.

L'objectiu de posar les tres imatges seguides és el d'observar el procés de càrrega de la proveta. Per entendre-ho, cal recordar que la simulació s'ha ajustat a 20 *Substeps* i que entre el primer i l'últim ha transcorregut 1 s de temps. Amb això, es pot veure que la figura 4.28 equival al *Substep* 4 de càrrega, on hi ha aplicat un desplaçament de 5 mm transcorreguts 0,2 s. Pel que fa a la figura 4.29, aquesta correspon al 12è *Substep* quan han transcorregut 0,6 s i la proveta s'ha desplaçat 1,5 mm. I finalment, en la figura 4.30 es pot veure l'últim *Substep* de càrrega, que equival, com és d'esperar, a 1 s de temps i a 2,5 mm de desplaçament.

Si es contempen acuradament de forma seqüencial, es pot acabar determinant un possible comportament de la proveta i la possible fallada d'aquesta. A mesura que la simulació va avançant i es van completant els diferents *Substeps* de càrrega, el model va tendint cada cop més a un possible aixafament de la platina de fibra de vidre, començant en la zona de contacte quasi tangent entre el cargol i l'aresta del forat, i avançant en direcció del moviment en x, tot completant aquesta deformació per aixafament. No obstant això, observant l'última imatge de totes, la que correspon a l'últim *Substep* de càrrega i, per tant, a un desplaçament de la proveta en x de 2,5 mm, es pot contemplar una certa tendència de la fibra a estripar-se just per la zona en direcció x que queda tangent al moviment rectilini del cargol.

Per tant, ja es pot assegurar de moment, que la proveta fallarà o bé per l'aixafament de la fibra o bé per l'estripament d'aquesta.

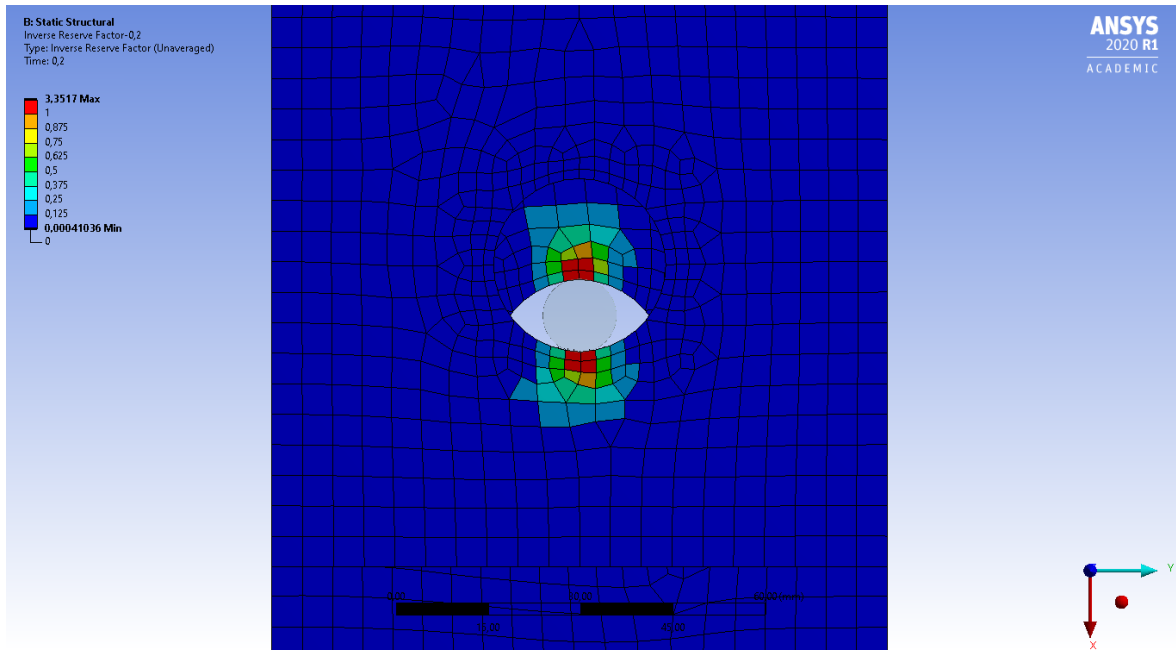


Figura 4.28: Índex de *Tsai-Wu* per a 0,5 mm de desplaçament.

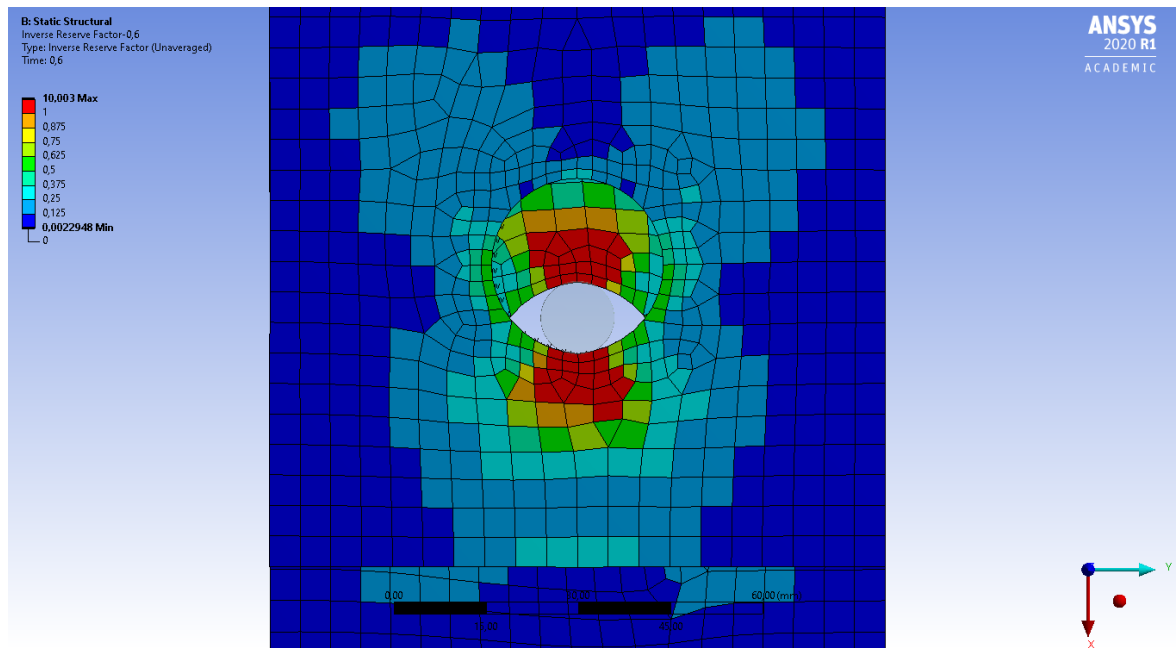


Figura 4.29: Índex de *Tsai-Wu* per a 1,5 mm de desplaçament.

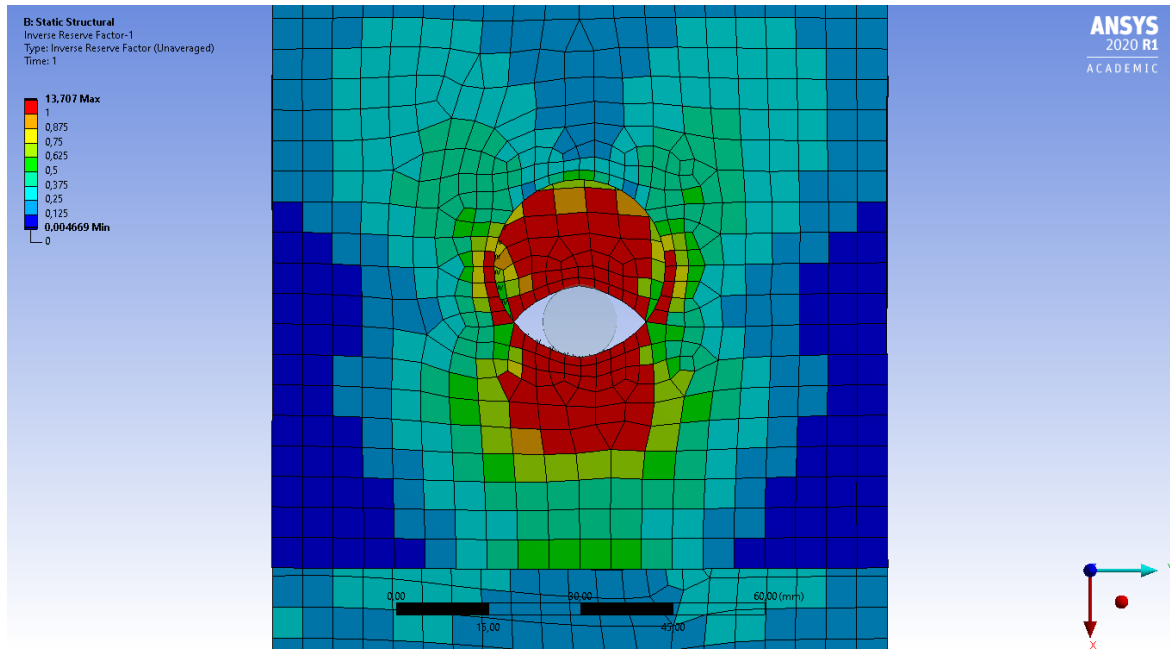


Figura 4.30: Índex de *Tsai-Wu* per a 2,5 mm de desplaçament.

Com a curiositat, amb el mòdul *ACP (Post)* es pot predir a més a més, en quina capa de l'apilament de fibres de vidre succeirà la fallida. En la següent imatge apareix el gràfic de colors de l'índex de *Tsai-Wu* en el cas de l'últim *Substep* de càrrega, i en ella es pot visualitzar que, a la zona crítica, les capes de fibres que fallaran seran la 1 i la 2. Això apareix indicat amb l'expressió *tw(1)* i *tw(2)* en els diferents elements del mallat. Si es recorda com s'ha creat aquesta fibra, aquestes dues capes corresponen a les capes *BIAX* del primer *QTX* de l'apilament.

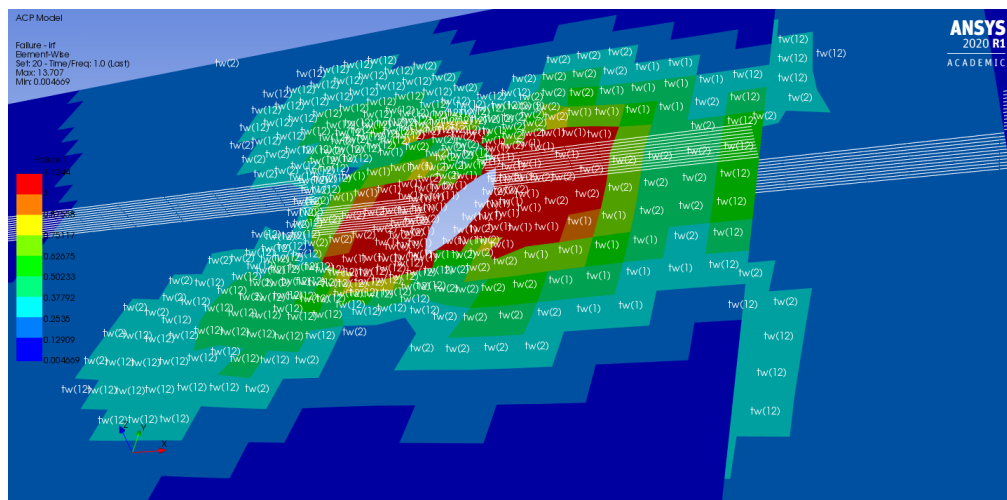


Figura 4.31: Índex de *Tsai-Wu* per a 2,5 mm de desplaçament extret de l'*ACP (Post)*.

A més a més, també cal saber que per tal de conèixer els diferents valors de *Tsai-Wu* que prenen els diferents elements del mallat, s’ha fet servir l’eina *Probe* per anar-los visualitzant. En la següent figura, la 4.32, es poden visualitzar.

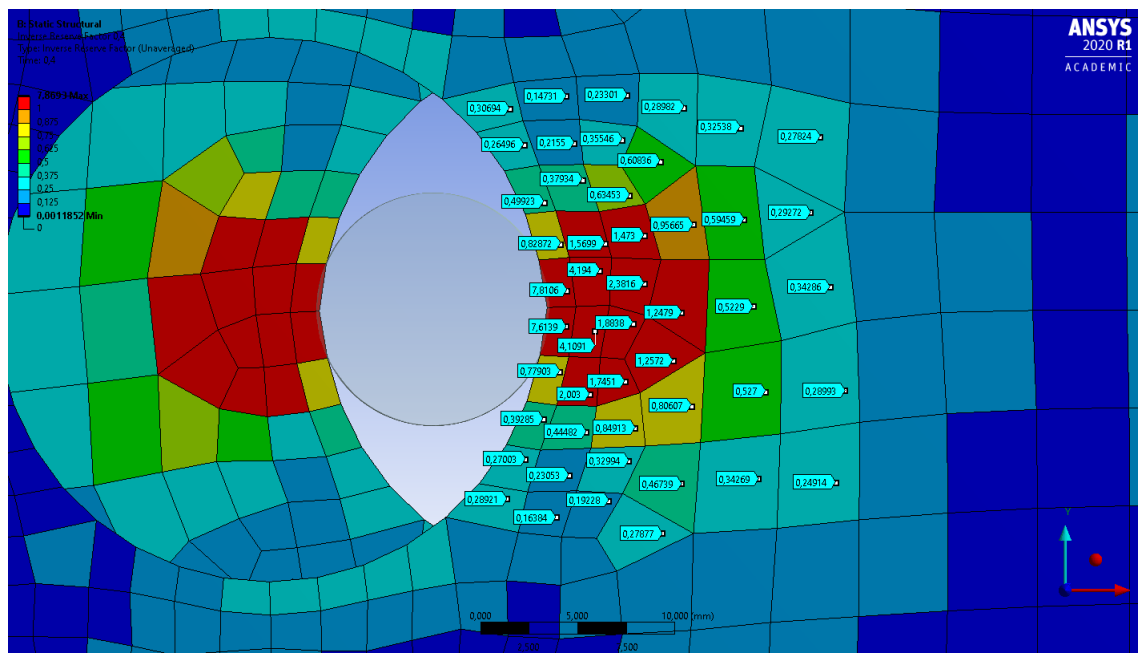


Figura 4.32: Índex de *Tsai-Wu* visualitzat amb l’eina *Probe* per al *Substep* 8, transcorreguts 0,4 s.

### 4.3.4 Conclusions extretes

Aquest possible comportament predit de forma visual però, s’ha corroborat per mitjà dels valors numèrics obtinguts en la simulació i de la creació d’un gràfic. A continuació apareix la taula de valors utilitzats.

Temps [s]	Substep	Desplaçament [mm]	$F_x$ [N]	<i>Tsai-Wu</i>
0,2	4	0,5	1565,4	0,19
0,4	8	1	4541,2	0,53
0,6	12	1,5	8790,2	0,90
0,8	16	2	13278,0	1,35
1,0	20	2,5	17846,0	1,74

Taula 4.1: Taula de mètriques dels resultats.

Aquesta taula s’ha completat, primerament, amb l’ajuda de l’eina *Force Reaction* per tal de determinar quina força de reacció, que equival a la força de tracció aplicada a les platines en l’assaig a cisalla, apareix en la direcció x. I en segon lloc, i com ja s’ha comentat anteriorment i s’ha vist en la figura 4.32, amb l’ajuda de l’eina *Probe*, per tal d’anar visualitzant els diferents índexs de *Tsai-Wu* en els diferents elements de la malla

estudiats. Cal dir aquí, que els elements que s'han estudiat corresponen als que pertanyen a l'arc de circumferència que hi ha just després del punt de singularitat que s'ha comentat en la secció de *Contact Tool*, i que s'ha agafat com a valor final d'índex de *Tsai-Wu* la mitjana dels diferents índexs que prenen tots aquests elements.

En el gràfic que apareix a continuació, s'ha graficat, d'una banda, l'índex de *Tsai-Wu* respecte de la força, i de l'altra, el desplaçament aplicat respecte també de la força.

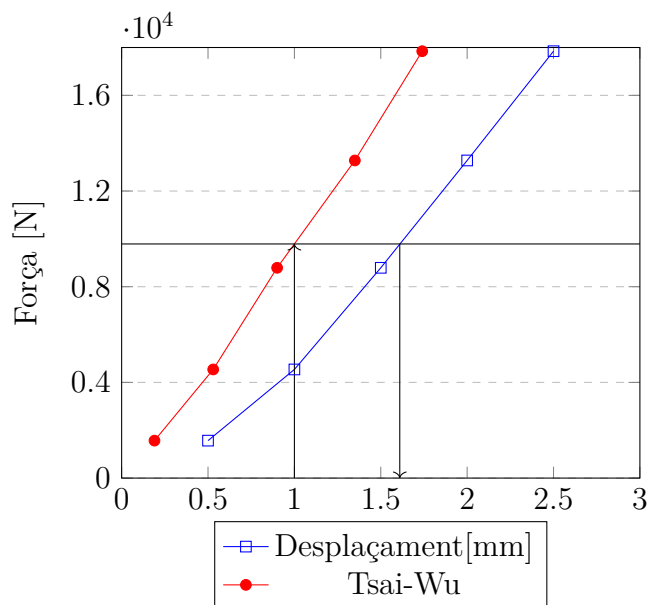


Figura 4.33: Gràfic per determinar la força de fallida del conjunt en la simulació.

En aquest gràfic es pot acabar de determinar la força de fallada del conjunt. Per fer-ho s'ha partit de l'índex de *Tsai-Wu* extrem (valor d'1), s'ha buscat quina força equival a aquest punt, i s'ha procedit a determinar el màxim desplaçament abans de fallar. El valor de la força on es té aquest *Tsai-Wu* de 1 és de 9787,49 N i el valor del desplaçament màxim corresponent a aquesta força és de 1,61 mm.

## Capítol 5

### Correlació de resultats

En aquest capítol s'exposa de manera breu i clara una comparativa dels resultats obtinguts en l'anàlisi teòric i la simulació per elements finits.

D'una banda, si es recorden les conclusions i els resultats extrets en l'anàlisi teòric, s'ha obtingut que la proveta acabarà fallant per aixafament del material compost amb una força de ruptura aproximadament d'uns 12785 N. No obstant això, també s'ha comprovat que la força de ruptura per a l'estripament és molt propera i, per tant, la proveta també podria fallar inesperadament per aquest mètode de fallada primer. D'altra banda, si es recorden els resultats obtinguts en la simulació per elements finits de l'assaig a cisalla de la proveta, en aquests també s'han pogut extreure conclusions similars al càlcul teòric, ja que s'ha pogut visualitzar que la proveta també acabarà fallant per aixafament de la fibra, tot i que també s'han vist indicis d'un possible estripament d'aquesta.

En conclusió, s'ha pogut veure que des dels dos punts de vista de l'anàlisi de la proveta, hi ha una coherència en el mètode de fallada que es creu que passarà amb les condicions d'assaig a cisalla fixades.

Seguint ara amb la correlació dels valors numèrics obtinguts en els dos punts de vista, el teòric i la simulació, es pot veure en la següent taula que hi ha una diferència notable en la força de ruptura. Aquest però, és un resultat lògic i esperat, ja que en el càlcul teòric s'han fet servir fórmules per a materials isotròpics, tot i utilitzar les propietats mecàniques de la fibra, a diferència de la simulació on sí que s'ha tingut en compte aquesta anisotropia del material. Per tant, en el càlcul teòric s'ha considerat que treballa tot el gruix de la fibra, i per això surt un valor de força de ruptura més elevat.

Teoria [N]	Simulació [N]	Diferència absoluta [N]	Diferència relativa [%]
12784,32	9787,49	2996,83	23,44

Taula 5.1: Diferència entre la força de fallida segons el càlcul teòric i la simulació.





# Estudi econòmic i Planificació

En aquest apartat es detalla, d'una banda, la planificació que s'ha anat seguint a l'hora de crear aquest projecte i realitzar-lo i, de l'altra, el cost econòmic que aquest a suposat. El projecte ha estat completat en un període d'unes 17 setmanes aproximadament, si es té en compte des de tota la fase inicial de pensar la idea a desenvolupar fins a la data de finalització de la memòria. Aquesta informació es pot veure en el diagrama de Gantt que apareix a la Figura 5.1.

## Planificació

Per a la planificació del projecte, s'ha fet una divisió de les tasques en sis grans línies de treball:

- **Estudi inicial de la idea a desenvolupar**

En aquesta fase s'ha fet un estudi de les diferents idees per les que es podia començar a desenvolupar el projecte, fins a triar-ne una i fixar-ne els objectius i l'abast del treball.

- **Recerca i aprenentatge**

En aquesta fase s'ha fet una recerca exhaustiva de diferents conceptes a conèixer abans de la pròpia realització del projecte. Per exemple, s'ha estudiat els *composites*, les unions cargolades i, també, els aerogeneradors *offshore*. D'altra banda, també s'ha après a treballar la fibra amb el programa *Ansys*, tot fent servir el mòdul *ACP PrepPost*.

- **Assajos experimentals**

Aquí, tot i no haver-se pogut realitzar els assajos a causa de l'emergència sanitària global declarada deguda al Covid-19, si que s'ha fet un procés exhaustiu de creació d'un protocol d'assaig que serveix per entendre la resta de punts desenvolupats.

- **Càlculs teòrics**

En aquesta fase s'ha fet, en primer lloc, un estudi de quins eren els possibles càlculs teòrics a realitzar per determinar la possible fallada del conjunt assajat, i en

segon lloc, el desenvolupament dels propis càlculs teòrics que s'han considerat com a interessants.

- **Simulació per elements finits**

En aquesta fase s'ha creat una simulació molt completa i acurada del model estudiat per tal de veure quin comportament té aquest conjunt de la unió cargolada de les dues peces de fibra.

- **Documentació**

En aquesta fase del projecte s'hi engloba tota la feina relacionada amb la redacció de la memòria.

Per fer una planificació en una línia temporal de totes les tasques a realitzar en aquestes 6 grans línies de treball, s'ha creat un diagrama de Gantt que ho esquematitza.

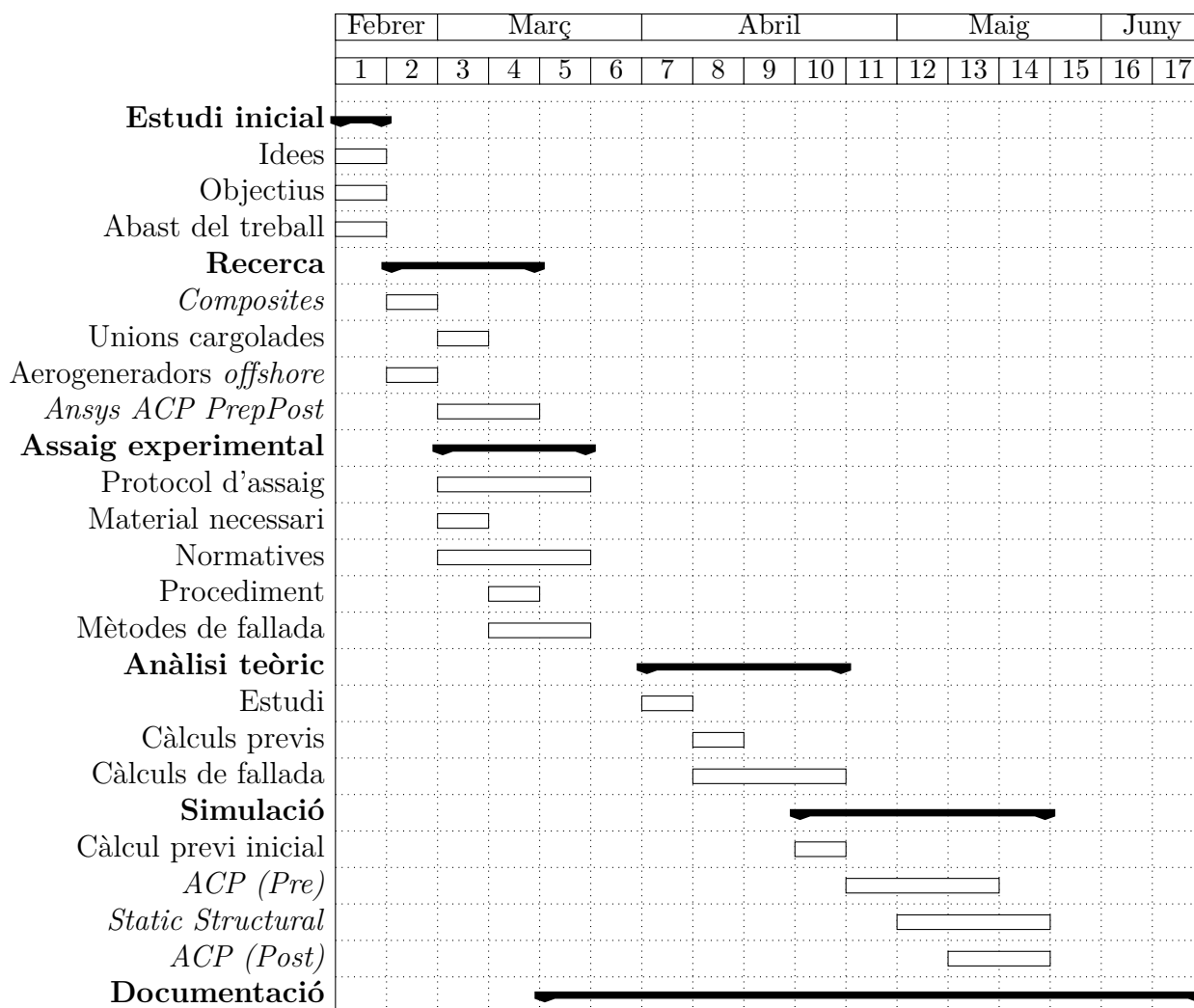


Figura 5.1: Diagrama de Gantt del projecte.

## Costs

Per tal de calcular els costs del projecte, aquests s'han dividit en els costs de recursos materials i els costs de recursos humans.

### Costs de recursos materials

Els recursos materials consumits estan formats pel programa de simulació *Ansys Workbench*, un ordinador per fer el còmput de la simulació amb el programa i els recursos energètics consumits.

- **Recursos de software:** Aquests han tingut un cost de 0 € degut que el programari utilitzat és la versió amb llicència d'estudiant totalment gratuïta.
- **Recursos de hardware:** S'ha fet servir un ordinador i s'ha tingut en compte que aquest té una vida útil de 4 anys i un mètode d'amortització lineal. Fent el càlcul, s'obté aquest cost de hardware:

Concepte	Cost unitari (€)	Vida útil	Amortització (€)
Ordinador	550	4	137,5

Taula 5.2: Taula d'amortització dels recursos de hardware.

- **Costs indirectes:** Aquests costs estan directament relacionats amb els costs d'energia elèctrica, d'instal·lacions i els costs administratius per l'ús de material d'oficina. Per fer-ne el càlcul, s'ha considerat que aquests costos són aproximadament d'un 15% del cost total del projecte.

### Costs de recursos humans

Per calcular el cost de recursos humans s'han desglossat els diferents tipus de feina per tal d'imputar el cost horari corresponent.

Tipus	Concepte	Dedicació (h)	Cost horari (€/h)	Cost total (€)
Tipus 1	Enginyeria	125	30	3750
Tipus 2	Simulació	200	30	6000
Tipus 3	Administratiu	75	20	1500
Tipus 4	Estudiant	100	10	1000
Total		500		12250

Taula 5.3: Taula de costs dels recursos humans.

### Costs totals

Tenint en compte els diferents tipus de costos desglossats als apartats anteriors, es pot trobar el cost total del desenvolupament del projecte.

Tipus de despesa	Cost (€)
Recursos humans	12250
Amortització hardware	137,5
Subtotal	12387,5
Costs indirectes (15%)	1858,1
Total	14246

Taula 5.4: Taula de cost total del projecte.

# Impacte Ambiental

El desenvolupament d'aquest projecte ha suposat un consum de recursos de material i energia que cal analitzar per saber quina és la seva repercussió sobre el medi ambient. En ser un estudi teòric i una simulació del comportament d'una unió cargolada entre dues peces plàstiques reforçades amb fibra de vidre, l'únic consum imputable de forma directe és el de l'energia elèctrica consumida per l'ordinador, però també es farà un anàlisi de l'impacte del material *composite* tractat per veure quines implicacions té sobre el medi ambient en el seu cicle de vida.

## Energia elèctrica

Per quantificar l'energia elèctrica consumida s'ha considerat, seguint el que s'ha determinat a la planificació del projecte, que s'han treballat unes 500h i s'estima que s'ha utilitzat l'ordinador en totes elles. L'ordinador i el monitor consumeixen uns 150W de potència per funcionar, de manera que surt un consum energètic de 75 KWh. Per tal de calcular les emissions de  $CO_2$  equivalents s'ha utilitzat el mix elèctric peninsular d'aplicació per aquest any [4], que és de  $241 \text{ g } CO_2/KWh$ . Surt una petjada de carboni associada de:

$$\text{emissions } CO_2 \text{ equivalent} = 75KWh \cdot 241g \text{ } CO_2/KWh = 18,075 \text{ kg } CO_2$$

## Cicle de vida del material

Pel que fa a l'estudi de la unió cargolada, el material analitzat ha estat un *composite* format per una matriu de resina de polièster reforçada amb fibra de vidre, que es pot catalogar com un GFRP (*glass-fiber-reinforced-polymer*). Per tal d'analitzar el seu impacte ambiental, s'ha fet un anàlisi basat en les diferents etapes del seu cicle de vida [5].

Les etapes del cicle de vida d'un producte passen per la fabricació d'aquest, el seu ús i el reciclatge al final de la seva vida útil. En cadascuna d'aquestes etapes es poden generar residus i emissions que tenen un impacte sobre el medi ambient i es poden quantificar segons les emissions equivalents de  $CO_2$ .

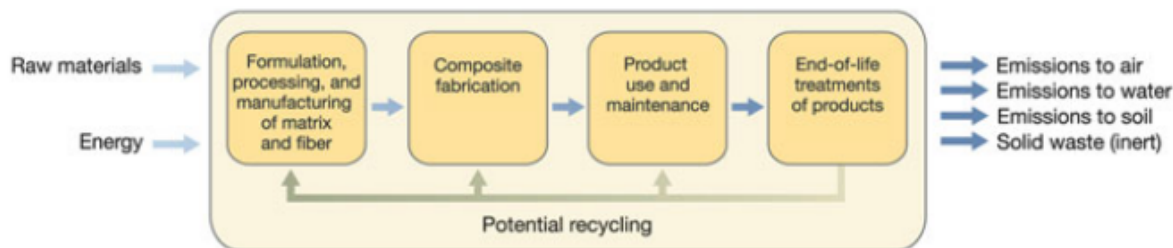


Figura 5.2: Fases del cicle de vida genèric d'un material *composite*.

## Processat i fabricació

Per una banda, es pot estimar l'impacte corresponent a les fases del cicle de vida de processat dels materials per a la matriu de polièster, les fibres de vidre per reforçar-la, i del procés de fabricació del *composite*. Pel que fa al procés de fabricació, la petjada depèn del que es faci servir, així que s'ha considerat un dels valors màxims que es troben en la fabricació d'aquest tipus de *composites*.

Fase del cicle de vida	emissions equivalents [ $kg CO_2/kg$ ]
Processat de la matriu de polièster	2,3
Processat del reforçament fibra de vidre	2,6
Procés de fabricació del <i>composite</i>	1,2
Total	6,1

Taula 5.5: Emissions de  $CO_2$  equivalents en el processat i fabricació del material *composite*.

## Fase d'ús i manteniment

Pel que fa a la fase del cicle de vida d'ús del producte, cal considerar que no hi ha dades concretes de l'impacte ja que el seu pes en l'impacte global és baix i el seu impacte és més aviat indirecte. El que es pot considerar és que el fet d'utilitzar aquest material en front d'acers comporta una reducció de la petjada de carboni que pot assolir fins el 45% d'estalvi a causa de que és menys pesant, de manera que requereix menys material i menys energia, dura més i té necessites de manteniment gairebé nul·les.

També cal remarcar que l'objectiu de validar aquesta unió cargolada és evitar possibles fallades que poden tenir un impacte ambiental elevat com seria que caiguin residus de *composite* al mar. A més, aquesta unió que es troba a la carcassa també pot fer de contenció de líquids de possibles pèrdues de components interiors que, en cas de fallida, comportarien un vessament de productes nocius al medi ambient.

### Final de la vida útil

La fase del final de vida del material és un altre punt crític en l'impacte ambiental. Aquest serà de diferent magnitud segons quin sigui l'escenari al final de la seva vida ja que existeixen diferents mètodes per reciclar el material.

Per a materials GFRP els escenaris més comuns són el reciclatge mecànic o l'incineració del *composite*. En el cas del reciclatge no és possible recuperar les fibres individuals i el que es fa és fragmentar i triturar el *composite* per tal d'obtenir fraccions de materials riques o bé en fibra o bé en polímer. Aquestes fraccions s'incorporen a nous *composites*, però segons la proporció de material reciclat les seves propietats mecàniques es poden veure fortament afectades, i per això és considerat *downcycling* i s'utilitza per aplicacions que requereixen menys qualitat de material. En el cas de l'incineració, les fibres de vidre són incombustibles i dificulten el procés, cosa que implica consumir més energia per dur a terme el reciclatge.

A la següent taula es pot veure la petjada de carboni equivalent per cada escenari.

Escenari	emissions equivalents [ $kg CO_2/kg$ ]
Reciclatge mecànic	0,4
Incineració	0,9

Taula 5.6: Emissions de  $CO_2$  equivalents en el processat i fabricació del material *composite*.

Tenint en compte totes les fases, es pot saber la petjada de carboni equivalent global al llarg del cicle de vida del *composite* de matriu de polièster reforçada amb fibra de vidre tenint en compte el pes del material utilitzat.





## Conclusions

En aquest projecte s'ha presentat l'anàlisi acurat i exhaustiu de l'assaig a tallant d'una unió cargolada formada per dues peces plàstiques d'una matriu de resina de polièster reforçades amb un apilament de fibres de vidre. Cada part desenvolupada fins a arribar als resultats finals, s'ha treballat de forma independent.

Primerament, tot i no poder-se complir l'objectiu de realitzar aquest anàlisi a través del punt de vista experimental amb la realització d'uns assajos de laboratori, com ja s'ha anat comentant al llarg del projecte, degut a l'emergència sanitària global declarada a causa del Covid-19, aquests assajos s'han pogut documentar i crear-ne un protocol previ que ha servit d'introducció i d'inici del treball, per tal d'entendre tots els components, totes les característiques tècniques i, en definitiva, totes les parts que hi han pres joc.

En segon lloc, s'ha pogut fer una recerca dels diferents càlculs i paràmetres teòrics que són interessants de conèixer per tal predir el comportament d'aquest tipus d'unions estudiades a tallant. Un cop s'ha tingut clar quins càlculs fer, s'han desenvolupat de forma detallada fins a poder tenir uns resultats sòlids i poder arribar a unes conclusions de fallada del conjunt. Aquest ha sigut un dels dos anàlisis de resultats de què disposa aquesta memòria, des del punt de vista teòric.

Seguidament, s'ha passat a desenvolupar aquest assaig a tallant del conjunt d'estudi en un programa de simulació per elements finits. Aquí s'ha pogut aprendre a treballar el material compost de les dues peces plàstiques en un programa de simulació com és l'*Ansys*, amb l'ajuda del mòdul de treball de *composites ACP PrepPost*. D'aquest altre punt de vista, el de la simulació, també se n'ha pogut extreure un anàlisi de resultats i una possible teoria de per quin mètode fallarà el conjunt i, per tant, arribar a unes conclusions des d'un altre punt de vista de treball.

Finalment, aquests dos anàlisis de resultats realitzats, el d'un punt de vista teòric i el d'un punt de vista simulat, s'han comparat l'un amb l'altre, i s'ha pogut acabar establint una correlació i coherència tant en el mètode de fallada, que serà l'aixafament de la fibra, com en el valor numèric de la força de ruptura, que surt menor en la simulació que el l'anàlisi teòric degut a la diferència en la consideració de l'anisotropia en els càlculs.



## Bibliografia

- [1] Associació Espanyola de Normalització i Certificació (AENOR). [Consulta: 10 d'abril de 2020]. Disponible a: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas>.
- [2] M. Magdalena Pastor i Francesc Roure. Prismatic per a l'aprenentatge de resistència de materials [en línia], Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, ETSEIB, UPC. Barcelona, Gener 2009. [Consulta: 20 de abril de 2020]. Disponible a: <https://www.upc.edu/prismatic/inici.htm>.
- [3] Inc. ANSYS. Ansys composite preppost user's guide [en línia], Novembre 2013. [Consulta: 20 de abril de 2020]. Disponible a: [https://www.academia.edu/25099111/ANSYS\\_Composite\\_PrepPost\\_Use](https://www.academia.edu/25099111/ANSYS_Composite_PrepPost_Use).
- [4] Oficina Catalana del Canvi Climàtic. Nota informativa sobre la metodologia d'estimació del mix elèctric per part de l'oficina catalana del canvi climàtic [en línia], Febrer 2020. [Consulta: 29 de maig de 2020]. Disponible a: [https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04\\_ACTUA/Com\\_calcular\\_emissions\\_GEH/factors\\_emissio\\_associats\\_energia/200211\\_Nota-metodologica-mix\\_cat.pdf](https://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/04_ACTUA/Com_calcular_emissions_GEH/factors_emissio_associats_energia/200211_Nota-metodologica-mix_cat.pdf).
- [5] J.R. DUFLOUD et Al. Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? a life-cycle-assessment-based study [en línia], MRS Bulletin, Volume 37, Abril 2012. [Consulta: 29 de maig de 2020]. Disponible a: [https://pdfs.semanticscholar.org/b685/51c8ab8357d57674feb6400a79a134ffd28f.pdf?\\_ga=2.39517665.333577407.1592632776-184337527.1592632776](https://pdfs.semanticscholar.org/b685/51c8ab8357d57674feb6400a79a134ffd28f.pdf?_ga=2.39517665.333577407.1592632776-184337527.1592632776).