

## Treball final de màster

**Estudi:** Màster en Enginyeria Industrial

**Títol:** Assaig virtual d'un panell rigiditzat de material compòsit per una ala d'avió comercial sotmès a càrregues de fatiga.

**Document:** Memòria i Annexos.

**Alumne:** Sergi Coll Castañer

**Tutor:** Albert Turon Travesa/ Laura Carreras Blasco

**Departament:** EMCI

**Àrea:** MMCTE

**Convocatòria (mes/any):** Setembre 2016

## Índex

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introducció .....                                       | 1  |
| 1.1   | Antecedents .....                                       | 1  |
| 1.2   | Objecte.....  | 1  |
| 1.3   | Especificacions i abast.....                            | 2  |
| 2     | Introducció als compòsits.....                          | 3  |
| 2.1   | Introducció.....  | 3  |
| 2.2   | Tipus de materials compòsits .....                      | 6  |
| 2.3   | Mecanismes de dany i aparició de defectes .....         | 7  |
| 2.4   | Delaminació .....                                       | 9  |
| 2.4.1 | Causes de la delaminació.....                           | 9  |
| 2.4.2 | Modes de càrrega .....                                  | 10 |
| 3     | Metodologia de validació.....                           | 12 |
| 3.1   | Introducció.....  | 12 |
| 3.2   | Requisits de l'assaig. ....                             | 13 |
| 3.3   | Mètodes d'inspecció.....                                | 14 |
| 3.4   | Característiques de la proveta .....                    | 16 |
| 3.4.1 | Característiques dels rigiditzadors .....               | 16 |
| 3.5   | Assaig mecànic de tracció d'una proveta d'alumini ..... | 17 |
| 3.5.1 | Resultats .....   | 22 |
| 4     | Metodologia de l'assaig numèric.....                    | 25 |
| 4.1   | Introducció.....  | 25 |
| 4.2   | Variables.....  | 25 |
| 4.3   | Assaig estàtic .....                                    | 26 |
| 4.4   | Assaig a fatiga .....                                   | 27 |
| 4.4.1 | Corba S-N .....   | 29 |
| 4.4.2 | Propagació de la delaminació.....                       | 31 |
| 4.4.3 | Llei de Paris modificada. ....                          | 33 |

---

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.4.4 | Paràmetres de l'assaig de fatiga .....             | 34 |
| 5     | Models a estudiar .....                            | 36 |
| 5.1   | Introducció.....                                   | 36 |
| 5.2   | Propietats dels materials .....                    | 36 |
| 5.3   | Primer demostrador.....                            | 37 |
| 5.3.1 | Geometria .....                                    | 37 |
| 5.3.2 | Configuracions dels assajos.....                   | 39 |
| 5.3.3 | Laminat.....                                       | 42 |
| 5.4   | Segon demostrador .....                            | 43 |
| 5.4.1 | Geometria .....                                    | 43 |
| 5.4.2 | Configuracions dels assajos.....                   | 44 |
| 5.4.3 | Laminat.....                                       | 46 |
| 6     | Estudi dels models d'elements finits .....         | 47 |
| 6.1   | Primer model.....                                  | 47 |
| 6.1.1 | Geometria .....                                    | 47 |
| 6.1.2 | Condicions de contorn .....                        | 48 |
| 6.1.3 | Mallat.....  | 50 |
| 6.1.4 | Interfícies cohesives.....                         | 51 |
| 6.1.5 | Resultats preliminars.....                         | 52 |
| 6.2   | Segon model .....                                  | 55 |
| 6.2.1 | Geometria i elements. ....                         | 55 |
| 6.2.2 | Elements cohesius .....                            | 56 |
| 6.2.3 | Condicions de contorn .....                        | 57 |
| 6.2.4 | Dimensionament i material dels rigiditzadors. .... | 59 |
| 7     | Resultats .....                                    | 65 |
| 7.1   | Assaig estàtic .....                               | 65 |
| 7.2   | Assaig a fatiga .....                              | 72 |
| 8     | Resum del pressupost .....                         | 79 |

---

|          |                           |    |
|----------|---------------------------|----|
| 9        | Conclusions .....         | 80 |
| 10       | Relació de documents..... | 82 |
| 11       | Bibliografia.....         | 83 |
| ANNEX A. | Pressupost.....           | 84 |
| A.1      | Introducció.....          | 84 |
| A.2      | Pressupost detallat. .... | 85 |

# **1 INTRODUCCIÓ**

## **1.1 Antecedents**

Els costos de disseny i desenvolupament d'elements estructurals en materials compòsits per aplicacions comercials és actualment molt elevat. Això es deu, en part, a la manca d'eines d'anàlisi i/o simulació comercials que permetin reduir el nombre i complexitat d'assajos experimentals a realitzar.

En canvi, a nivell de recerca, existeixen diferents eines que poden permetre l'assaig virtual d'aquests elements i anticipar els diferents mecanismes de dany que poden aparèixer i comprometre la seva integritat estructural. Un dels mecanismes de dany més crític és la delaminació. En els darrers anys s'han desenvolupat diversos mètodes d'anàlisi de la delaminació que són capaços de preveure la seva aparició i propagació. Tot i això, la utilització d'aquestes eines en aplicacions reals són encara molt limitades i no es troben, ni de bon tros, integrades durant el procés de disseny i desenvolupament de nous components estructurals.

En aquest context, el grup de recerca AMADE dissenya i incorpora els seus propis procediments de càlcul que permetin fer una predicció de l'aparició i creixement d'esquerdes i la delaminació emprant mètodes numèrics.

## **1.2 Objecte**

L'objecte del projecte és fer un assaig virtual sobre un panell de material compòsit rigiditzat corresponent a una zona de l'ala d'un avió comercial, sotmès a càrregues a fatiga, amb la finalitat de predir la càrrega a la qual apareixeran delaminacions, la superfície afectada i el nombre de cicles que pot aguantar el panell abans no es propaguin les delaminacions. Els resultats obtinguts es mostraran en forma de vídeo on s'hi vegi l'evolució de la delaminació a mesura que s'incrementen els cicles de fatiga. El treball es realitzarà en el marc d'un projecte de col·laboració entre el grup de recerca AMADE i una empresa líder especialitzada en el disseny i fabricació d'aeroestructures.

### **1.3 Especificacions i abast**

Utilitzant el mètode d'elements finits es farà l'assaig virtual d'un panell definit per Aeronnova i representatiu de l'ala d'un avió comercial. Per a fer-ho, s'utilitzarà el programa d'elements finits ABAQUS i s'implementarà una metodologia d'anàlisi proposada pel grup de recerca AMADE. L'estudi també incorporarà modificacions del disseny original per tal d'optimitzar el procés de càlcul seguint els criteris proposats per AMADE.

## **2 INTRODUCCIÓ ALS COMPÒSITS**

En aquest apartat es descriuran breument alguns dels conceptes bàsics necessaris per entendre el contingut d'aquest projecte en relació al càlcul amb elements finits i el funcionament dels materials compòsits.

### **2.1 Introducció**

Un material compòsit consisteix en la combinació de dos o més materials amb propietats físiques o químiques diferents. El nou material resultant d'aquesta unió presenta unes propietats diferents de les dels materials que el constitueixen, essent així possible obtenir unes propietats més bones per a un treball determinat.

Les característiques essencials que fan que una unió de materials sigui considerat com a material compòsit són les següents:

- Un material compòsit ha de tenir almenys un dels seus materials constituents en una proporció igual o superior al 5% del total.
- Cadascun dels materials constituents ha de tenir propietats diferents dels de la resta de materials amb els quals es combina i del material compòsit resultant.
- Tots els materials constituents que formen part del compòsit han de conservar la seva integritat estructural, és a dir, la seva estructura molecular s'ha de mantenir intacte. Cada material constituent ha de ser fàcilment identificable tant a nivell macroscòpic com microscòpic.

Tot i poder estar formats de més materials, la majoria de materials compòsits solen estar formats per dos materials: un material base (matriu) i un altre que millora les seves propietats (reforç).

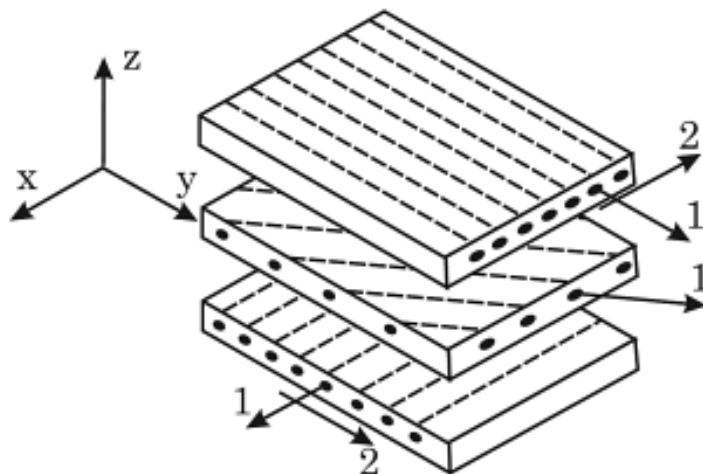
La funció de la matriu és la de suportar i transferir la càrrega. La fase o constituent matriu pot ser de tres tipus: ceràmica, metàl·lica o polimèrica.

El reforç té la funció de millorar les propietats del constituent matriu per poder suportar la càrrega a la que està sotmesa el compòsit i que li arriba a través de la matriu. Generalment, el component reforç és el més rígid i resistent. Existeixen diferents disposicions de reforç: en forma de fibra o partícules de menys de 500  $\mu\text{m}$ . Algunes de les propietats que es poden millorar amb l'ús de reforços són:

- Rigidesa
- Resistència
- Densitat
- Tenacitat
- Resistència al desgast
- Resistència a la corrosió
- Aïllament tèrmic i sonor

Els materials compòsits es generen mitjançant l'apilament de vàries capes de diferents materials i orientacions. En els casos en què els materials compòsits estiguin formats per materials en forma de fibres, les propietats del material seran millors en la direcció de les fibres. Pel que fa a les propietats del material en la direcció perpendicular a les fibres, la matriu té una influència més gran en les propietats del compòsit. Aquest fet fa que les propietats del compòsit en aquestes direccions siguin molt pitjors que en la direcció de les fibres. Per aquesta raó, les capes de material se solen apilar en diferents orientacions per tal d'aconseguir que el compòsit resultant pugui treballar en totes direccions. Aquest apilament de varies capes amb diferents orientacions s'anomena laminat (Figura 1)





*Figura 1: Formació d'un laminat de material compòsit.*

En la Figura 1 es pot veure un exemple d'un laminat on la capa inferior es troba a una orientació paral·lela a l'eix X ( $0^\circ$ ), la capa següent té una orientació de  $45^\circ$  i la capa superior es troba a una orientació de  $90^\circ$ . Les coordenades locals de cada capa tenen en compte la direcció de la fibra. La direcció principal (1) és la direcció de la fibra en la capa, la direcció secundària (2) és la direcció perpendicular a la primera on s'apilen la resta de les fibres i l'última direcció (3) que no apareix representada en la figura és la direcció perpendicular a les dues anteriors i en aquest cas correspondria a l'eix Z de les coordenades globals en totes tres capes.

Les orientacions de les fibres en una sola capa no tenen per què ser sempre úniques, també es poden fabricar amb més d'una orientació o amb orientacions de fibres aleatòries, tot i que són menys habituals.

Els laminats de material compòsit estan units mitjançant un altre material amb una gran capacitat adhesiva que les manté unides. Aquests tipus de materials normalment no es poden distingir a simple vista de la resta del compòsit. Aquests materials s'anomenen materials cohesius. Els materials cohesius tenen les seves pròpies propietats cohesives i poden ser la causa de fallades estructurals independents de les propietats del compòsit.

## 2.2 Tipus de materials compòsits

Els materials compòsits poden ser classificats segons el tipus de material al qual pertany el material matriu:

- Materials compòsits de Matriu Polimèrica o PMC (Polymer Matrix Composites): aquests tipus de compòsits són els més comuns i es basen en una matriu de polímer reforçada amb gran varietat de fibres (vidre, carboni o aramida). Dins d'aquest grup, els més utilitzats són els materials compòsits de fibra de carboni o CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) i els materials compòsits de fibra de vidre o GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics), normalment en la indústria aeronàutica.
- Materials compòsits de Matriu Metàl·lica o MMC (Metal Matrix Composites): utilitzen materials metàl·lics com a matriu, com l'alumini o el titani, i el reforç de fibres de carbur de silici. Utilitzats majoritàriament en la indústria automobilística.
- Materials compòsits de Matriu Ceràmica o CMC (Ceramic Matrix Composites): utilitzen materials ceràmics com a matriu reforçada per fibres curtes o partícules de carbur de silici o nitrur de bor. S'utilitzen per a aplicacions on s'hagin de sotmetre els materials a altes temperatures.

Els materials compòsits es poden classificar en diversos grups segons les seves propietats en múltiples direccions:

- Isotròpic: totes les propietats són les mateixes en qualsevol direcció. Només són necessaris dos paràmetres per definir-los: el mòdul elàstic o de Young ( $E$ ) i el coeficient de Poisson ( $\nu$ ).
- Ortotròpic: presenten simetria en els tres plans ortogonals del material. Són necessàries nou constants diferents per caracteritzar-los:  $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $E_{33}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{31}$ . En la Taula 1 es defineixen aquestes constants.

- Transversalment isotròpic: a més d'existir simetria en els tres plans ortogonals, el material és isotròpic en un pla determinat. Això implica:  $E_{11}$ ,  $E_{22}=E_{33}$ ,  $\nu_{12}=\nu_{13}$ ,  $\nu_{23}$ ,  $G_{12}=G_{31}$ ; i en el pla isotròpic  $G_{23} = \frac{E_{22}}{2(1+\nu_{23})}$ , essent així necessàries només cinc constants per a definir el material.
- Anisotròpic: les seves propietats són diferents en totes les direccions i no existeix cap tipus de simetria. Necessiten vint-i-una constants per a definir totalment el material (totes les constants de la matriu de rigidesa).

| PARÀMETRE  | SIGNIFICAT  |
|------------|---|
| $E_{II}$   | Mòdul de Young del material en la direcció $i$ .                |
| $\nu_{IJ}$ | Coefficient de Poisson que relaciona les direccions $i$ i $j$ . |
| $G_{IJ}$   | Mòdul de tallant que relaciona les direccions $i$ i $j$ .       |

*Taula 1: Nomenclatura de les constants dels materials elàstics.*

## 2.3 Mecanismes de dany i aparició de defectes

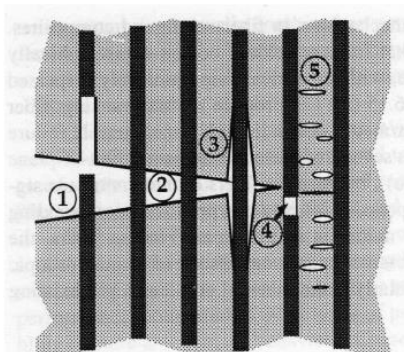
Com que els materials compòsits contenen múltiples components, alguns defectes que no ocorren en materials homogenis poden aparèixer. També hi són presents altres mecanismes de dany i mètodes de falla diferents a els dels materials originals.

La falla de components estructurals de material compòsit és normalment de tipus fràgil, de manera que pot donar lloc a accidents catastròfics fa que no és possible anticipar la seva falla a través de deformacions en l'estructura.

Durant la fase de disseny és important tenir en compte els mecanismes de dany que poden aparèixer en els materials compòsits per tal de preveure el comportament que tindrà l'estructura sota les circumstàncies en que es pugui trobar durant la seva vida útil. Els principals mecanismes de dany, il·lustrats en la Figura 2, són els següents:

- **Trencament del reforç.** Les fibres poden trencar-se a causa d'esforços de tracció, tallant o compressió. El trencament de les fibres disminueix tant la resistència com la rigidesa en la seva direcció.
- **Desfibrament.** La matriu es fractura però les fibres continuen unides, actuant de pont entre els dos fragments de la matriu.
- **Arrencament de les fibres o Pull-out.** Les fibres es desprenen de la matriu esquarterada en comptes de fracturar-se.
- **Fractura de la matriu.** El fet de tenir una matriu malmesa compromet l'estabilitat del material, ja que dona lloc a una distribució de tensions poc uniforme, fet que pot originar noves esquerdes, el trencament de les fibres, delaminació, etc.
- **Pèrdua d'adhesió entre la fibra i la matriu o Debonding.** Quan això succeeix, la matriu no és capaç de transmetre els esforços a les fibres i, per tant, les propietats del material s'empobreixen.
- **Delaminació o pèrdua d'adhesió entre les làmines.** Suposa la separació de les capes del laminat, fet que fa que es perdi la resistència mecànica del material. Aquest dany pot aparèixer a causa de defectes o discontinuïtats en la interfície entre dues làmines, fet que origina una esquerda en el cohesiu que avança i provoca que les làmines quedin parcialment desunides.

El mecanisme principal que es tractarà al llarg d'aquest projecte és la delaminació ja que l'objectiu d'aquest projecte és observar-ne la seva propagació al llarg d'un assaig sota càrregues de fatiga.



*Figura 2: Mecanismes de dany en materials compòsits reforçats amb fibres. (1) Arrencament de fibres. (2) Desfibrament (fiber bridging) (3) Pèrdua d'adhesió entre fibra i matriu. (4) Fractura de les fibres. (5) Fractura de la matriu. [4]*

## 2.4 Delaminació

S'anomena delaminació a la separació que ocorre entre les capes d'un material compòsit a causa dels esforços externs. Els materials cohesius que es troben en les interfícies entre dues capes en un laminat normalment tenen una resistència relativament baixa en comparació a la que té el material compòsit. Per aquesta raó, la delaminació és un dels tipus de dany més comuns que pateixen els materials compòsits durant la seva vida útil.

### 2.4.1 Causes de la delaminació

Les causes que poden provocar la delaminació entre les capes d'un material compòsit són diverses. Per una banda la delaminació pot originar-se per factors aliens al seu ús de disseny, com ara durant la fabricació del material o bé en el seu transport o en el seu muntatge a causa d'impactes que pugui sofrir. Per altra banda també hi ha diversos motius perquè es pugui originar la delaminació durant el servei:

- **Curvatures.** En una secció amb curvatures les tensions normals i tallants en la zona intralaminar poden causar la pèrdua d'adherència entre les làmines.

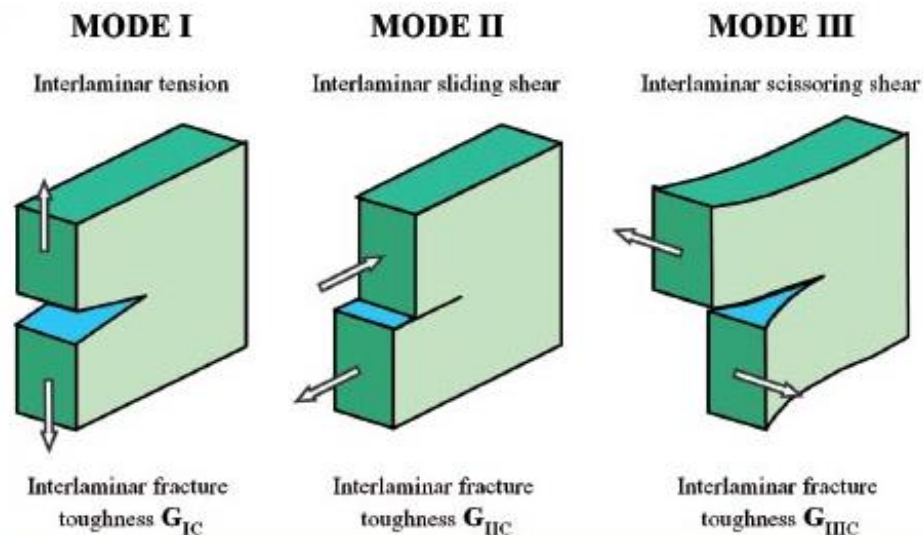
- **Canvis bruscos de secció.** Qualsevol canvi brusc de secció o discontinuïtat en una peça és un lloc propici perquè es generin acumulacions de tensió. En aquestes zones és més probable que puguin aparèixer esquerdes entre capes. Llocs com forats dintre una peça poden ser una font causant de la generació de delaminacions.
- **Temperatura i humitat.** Les tensions internes que es puguin originar en la fabricació del material a causa de la seva contracció natural en refredar-se poden ser causa de delaminació. La humitat en l'ambient també pot provocar l'expansió de la peça, que generarà esforços tallants entre les làmines que poden provocar delaminacions.
- **Impactes.** Les estructures de materials compòsits poden sofrir danys interns a causa de rebre un impacte i poden perdre la seva resistència estructural. Els impactes poden produir delaminacions en el material, disminuint considerablement les propietats mecàniques d'aquest.

#### 2.4.2 Modes de càrrega

La fractura en un material es pot dividir en dues etapes: l'inici del dany i la seva propagació. Una vegada s'ha iniciat el dany, la seva propagació evoluciona depenent de les condicions de càrrega que tinguem i de les propietats del material. Per tant, convé identificar l'existència de tres modes de fractura, que s'il·lustren a la Figura 3. En la realitat molt poques vegades es dona un cas on la delaminació estigui completament definida per un d'aquests modes. En la majoria de casos la separació entre capes es genera amb una combinació dels tres modes d'obertura, que s'anomena mode mixt.

- **Mode I.** El desplaçament relatiu de les superfícies de fractura és normal a les parets de la fissura. En aquest mode de fractura es generen traccions perpendiculars a la superfície de les làmines.
- **Mode II.** Es produeix un desplaçament tangencial de les parets de fissura en la direcció perpendicular a la fissura. En aquest mode es generen tensions tallants.

- **Mode III.** Es produeix un desplaçament tangencial de les parets de la fissura en la direcció paral·lela a aquesta. En aquest mode es generen tensions tallants.



*Figura 3: Classificació dels modes de delaminació.*

El procés de delaminació es pot mesurar numèricament a partir de l'energia acumulada en el material deguda als esforços d'obertura (energia per la fractura) comparant-la amb la tenacitat del material cohesiu. Quan aquesta energia assoleix aquest valor crític que pot suportar el material cohesiu es començaran a generar les esquerdes. L'energia màxima que pot suportar el material cohesiu depèn del mètode d'obertura en què treballi l'estructura.

En els materials més fràgils, el creixement de les esquerdes és precedit per l'aparició d'una àrea amb fractures microscòpiques. Aquestes microfractures ajuden a la propagació de les esquerdes més grans. Les esquerdes més grans són les causants de la falla estructural en propagar-se al llarg del material.

## **3 METODOLOGIA DE VALIDACIÓ**

### **3.1 Introducció**

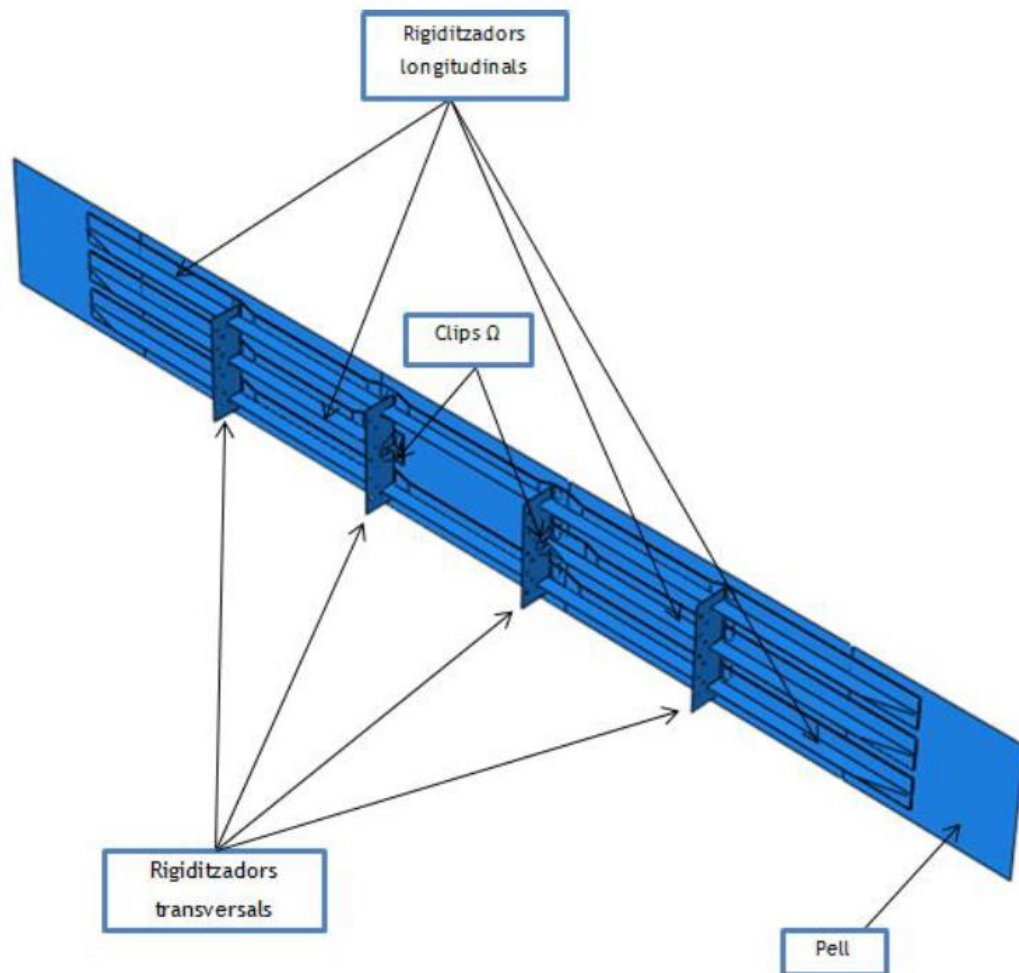
Una configuració típicament utilitzada en estructures aeronàutiques i aeroespacials són els rigiditzadors en forma de T units a panells de material compòsit. La unió entre la pell i el rigiditzador esdevé una regió crítica pel que fa a la delaminació, ja que la diferència de rigideses dels dos elements i les vores lliures la fan propensa a desunir-se.

En condicions normals de servei per a un material sense defectes la desunió entre el panell i el rigiditzador no hauria d'ocórrer, no obstant això sovint es produeixen danys en les plaques dels avions per culpa de col·lisions amb ocells o altres incidents que puguin ocórrer durant el vol.

En els assajos aeronàutics se simulen els impactes que poden sofrir els avions a través d'un assaig d'impacte vertical, que provoca una deformació visible en la proveta. Els assajos de fatiga es fan llavors sobre les provetes amb el dany provocat per l'assaig d'impacte. La zona on ha succeït l'impacte és el lloc on es comença a produir la delaminació, que s'anirà propagant al llarg de la proveta.

En la Figura 4 es representa l'estructura que presenta un panell d'avió rigiditzat. Aquesta estructura presenta unes dimensions massa grans per tal de poder realitzar un assaig de fatiga al laboratori i la seva fabricació suposaria un cost massa elevat. Per aquesta raó s'haurà de dissenyar un demostrador representatiu d'aquesta placa per tal de poder realitzar l'assaig de fatiga que permeti observar la propagació de la delaminació. Aquest demostrador representatiu a dissenyar ha de ser equivalent a una part o submodel de manera que tingui unes dimensions més petites que la placa original i una geometria més simple.





*Figura 4: Modelat d'un panell rigiditzat amb rigiditzadors de tipus T. [5]*

### 3.2 Requisits de l'assaig.

El disseny de la proveta ha de ser una part representativa d'un panell d'avió rigiditzat. A més a més l'assaig ha de resultar econòmicament viable per tal que es pugui dur a terme, per tant s'intentarà buscar el cost mínim per a realitzar l'assaig. Aquest panell demostrador ha de complir les condicions següents per tal que es pugui considerar vàlid:

- La forma del front de propagació ha de canviar de forma durant l'assaig de fatiga.
- L'àrea de la delaminació ha d'estar continguda entre dues capes (no hi pot haver delaminació fora del pla).

- La geometria ha de ser simple (ha de ser fàcil de manufacturar).
- L'assaig ha de ser reproduïble en el laboratori: tot l'equipament necessari per a dur a terme l'assaig ha d'estar present en les instal·lacions actuals de la universitat.
- L'increment i la forma de l'àrea delaminada ha de ser mesurable al llarg del temps per tal de poder comparar-la amb els càlculs numèrics.

### 3.3 Mètodes d'inspecció.

La proveta que s'ha de sotmetre a l'assaig de fatiga ha de permetre que es pugui observar la delaminació entre les dues capes que es volen separar en qualsevol moment de l'assaig. Com que la delaminació es produeix en una de les capes internes de la proveta, és necessari utilitzar un mètode d'inspecció que permeti veure la proveta per dintre sense malmetre-la.

Actualment es disposen de 2 tècniques no destructives diferents que permetrien observar la delaminació mitjançant aparells de raigs X:

**Radiografies:** La radiografia s'utilitza habitualment en la indústria aeroespacial per a la detecció de fissures en les estructures d'avions, la detecció d'aigua en les estructures i la detecció d'objectes estranys. Les radiografies s'obtenen en exposar el receptor a una font de radiació d'alta energia, normalment es tracta de radiació gamma procedent d'isòtops radioactius (Iridi 192, Cobalt 60, Cesi 137, etc.). En interposar un objecte enfront del receptor i la radiació, les parts més denses de l'objecte apareixen en diferents tonalitats de gris, ja que són capaces d'aturar més quantitat de radiació.

Les radiografies generen una imatge en dues dimensions. En el nostre cas es vol observar la delaminació en tota la superfície de la proveta, per tant el pla a visualitzar ha de ser el normal a la direcció de l'obertura de la proveta. Aquest fet crea l'inconvenient que la radiació passarà primer per la primera meitat de la proveta, després passarà per la zona delaminada i finalment es trobarà amb la segona meitat de la proveta, fet que faria que en la imatge resultant no es pogués observar la zona delaminada, ja que aquesta només estarà omplerta d'aire, que no és capaç d'absorbir radiació.

Com que el gruix de la delaminació no es pot modificar durant l'assaig sense malmetre la proveta, l'única solució és utilitzar un material d'alta densitat que pugui substituir l'aire en les zones delaminades. Actualment existeixen líquids i gasos amb un alt nombre atòmic que permeten omplir les obertures de les plaques, essent així possible visualitzar aquests espais en la radiografia resultant.

En l'assaig de fatiga doncs, seria necessari cada cop que es volgués fer una observació de la delaminació actual, submergir la proveta en aquesta substància i fer la radiografia. Un cop s'ha fet la radiografia la proveta es pot rentar i continuar l'assaig sense alterar els resultats que s'obtindran.

**Tomografia:** la tomografia és una tècnica de representació gràfica d'imatges corresponents a una secció o pla determinat de l'element a representar. Poden estar basades en els raigs X, ultrasons o ressonància magnètica entre d'altres.

En la indústria aeroespacial s'utilitza la reconstrucció tomogràfica en imatges generades utilitzant raigs X. Emprant mètodes matemàtics es pot reconstruir un objecte en tres dimensions composant múltiples imatges en dues dimensions de diverses seccions d'un objecte. Les seccions obtingudes amb una màquina de tomografia no són projeccions com en les radiografies tradicionals, sinó que és capaç d'obtenir la imatge de la secció en qualsevol part desitjada de l'objecte.

Els avantatges de la tomografia en l'assaig a fatiga són per una banda que no és necessari crear un contrast de densitats com en la radiografia, i a més es pot obtenir una representació en tres dimensions de la proveta. Per altra banda l'equipament necessari i els costos d'una tomografia són molt més elevats que els de les radiografies.

### **3.4 Característiques de la proveta**

La proveta de material compòsit ha de poder simular el comportament d'un panell d'avió que hagi estat danyat per un impacte. Per tal de reproduir els efectes de la delaminació creada per un impacte en la placa es generarà una delaminació inicial en la proveta.

La delaminació inicial de la proveta es generarà mitjançant un insert de tefló. El tefló és un polímer inert, impermeable, té un coeficient de fregament molt baix i és altament flexible. El tefló s'utilitza habitualment en la indústria aeronàutica en el revestiment d'avions, ja que és un material molt resistent als canvis de temperatura.

La proveta estarà feta d'una combinació de fibra de carboni i epoxi anomenada IMA/M21E.

#### **3.4.1 Característiques dels rigiditzadors**

Els rigiditzadors de la proveta tenen la funció de rigiditzar una part de la proveta per tal que el front de delaminació prengui una forma no lineal. Aquests rigiditzadors estan units a la proveta

Els rigiditzadors han de complir aquestes condicions:

- Han de ser prou rígids per a influir en la propagació del front de delaminació.
- Han funcionar de manera elàstica durant tot l'assaig. El rigiditzador mai pot plastificar.
- La unió entre el rigiditzador i la proveta s'ha de garantir durant tot l'assaig. No es poden produir delaminacions en els cohesius entre la proveta i el rigiditzador.
- En el cas d'utilitzar radiografies com a mètode d'inspecció, el rigiditzador ha de permetre la visualització de la delaminació. El rigiditzador no pot produir un gran contrast en la radiografia.

Qualsevol rigiditzador que compleixi aquestes condicions és vàlid per a la realització de l'assaig del demostrador. Per aquesta raó s'han considerat, a més de múltiples geometries, diferents materials dels quals pot estar format.

- **Acer:** els rigiditzadors d'acer són un candidat a considerar per a la construcció, ja que és un material d'obtenció fàcil i disposa de múltiples aliatges amb un límit elàstic molt elevat. A més a més el laboratori ja disposa de provetes d'acer que es poden manufacturar fàcilment. L'única condició és que el gruix del fleix d'acer a utilitzar ha de ser d'una mida estàndard.
- **Alumini:** tot i que l'alumini en general té unes propietats més baixes que l'acer, aquesta també pot ser una opció a considerar. L'avantatge principal de l'acer és el seu cost més reduït i que el laboratori també disposa de provetes utilitzables.
- **Material compòsit:** és possible utilitzar el mateix material en els rigiditzadors i la proveta. Construint uns rigiditzadors de material compòsit només seria necessari tenir un gruix extra per tal de rigiditzar la placa. Finalment el fet que el material sigui el mateix que el de la placa permetria que aquest rigiditzador no fos un obstacle en la visualització de les radiografies, mentre que els d'alumini i acer, en tenir una densitat més alta, podrien dificultar la viabilitat de les radiografies.

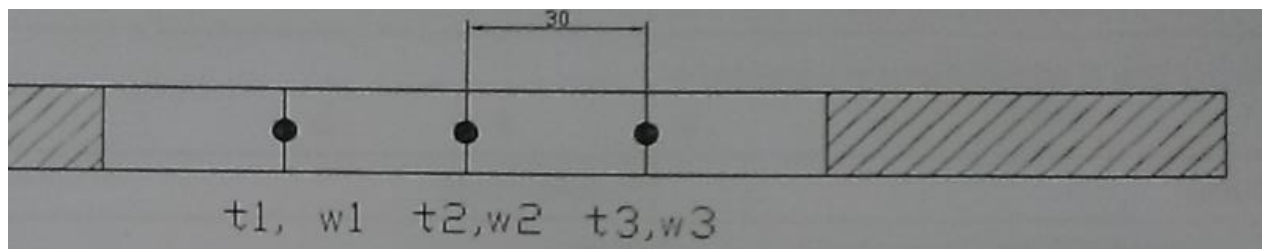
### 3.5 Assaig mecànic de tracció d'una proveta d'alumini

Dels tres materials considerats per al disseny del rigiditzador és necessari conèixer el seu límit elàstic ( $\sigma_y$ ) per tal d'evitar que el rigiditzador pugui plastificar durant l'assaig.

Dels materials actualment disponibles al laboratori per fabricar el rigiditzador, el que sol tenir un límit elàstic més baix és l'alumini. El límit elàstic de l'alumini varia segons el seu contingut d'altres materials en el seu aliatge, per tant farà falta calcular-lo per tal de poder fer la comparació amb el model numèric.

El mètode per calcular el límit elàstic serà un assaig estàndard de tracció. El límit elàstic obtingut en aquest assaig es compararà amb la tensió de Von Mises calculada en les simulacions numèriques per tal de saber si el material plastificarà.

S'utilitzaran tres provetes d'alumini obtingudes del mateix fleix de mides idèntiques (poden haver-hi petites variacions). En la Figura 5 es mostra una representació de les tres provetes i en la Taula 2, les seves dimensions.



*Figura 5: Disseny de les provetes d'alumini*

| PROVETA                 | 1        | 2        | 3        |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| <b>AMPLADA (W) (MM)</b> | 25.66233 | 25.15467 | 24.33467 |
| <b>GRUIX (T) (MM)</b>   | 0.812    | 0.812    | 0.815    |

*Taula 2: Dimensions de les provetes*

L'assaig s'ha realitzat amb una màquina d'assaig universal amb una força màxima de fins a 100 kN.



*Figura 6: Màquina d'assaig utilitzada.*

S'utilitzaran dues galgues extensiomètriques col·locades en el centre de la proveta en la direcció de la tracció (Figura 7). Cada proveta es col·locarà a una banda de la proveta de tal manera que es pugui obtenir una lectura per als dos costats de la proveta. La lectura de la galga que s'utilitzarà serà la mitjana de les lectures de les dues galgues.



*Figura 7: Proveta d'alumini amb les galgues extensiomètriques.*



*Figura 8: Col·locació de les provetes en les mordaces.*

Les provetes s'han col·locat de forma manual en les mordaces sense tenir en compte quina és la tensió mínima necessària. Durant l'assaig s'haurà de comprovar que les provetes estiguin fortament subjectades per evitar que puguin patinar.

L'assaig s'ha realitzat a un desplaçament constant de 2 mm/s. La cèl·lula de càrrega que s'ha utilitzat té només una capacitat màxima de 10 kN, durant l'assaig s'ha comprovat que la força de tracció no excedís aquest valor. En els dos primers assajos, s'ha arribat a un desplaçament suficient per garantir que la proveta estigués treballant en règim plàstic. En l'última proveta s'ha arribat a trencar la proveta. En la Figura 9 es pot veure com ha trencat la tercera proveta. També s'observa que les galgues s'han acabat desenganxant.





*Figura 9: Estat de la proveta al final del tercer assaig.*

Amb una inspecció visual s'ha comprovat que efectivament les provetes no han patinat durant l'assaig (Figura 10). En el cas que la proveta no hagi patinat, les marques que deixa la mordassa sobre la proveta són punts. En el cas contrari en què les provetes patinin de la mordassa les marques que es produirien en la proveta serien ratllades.



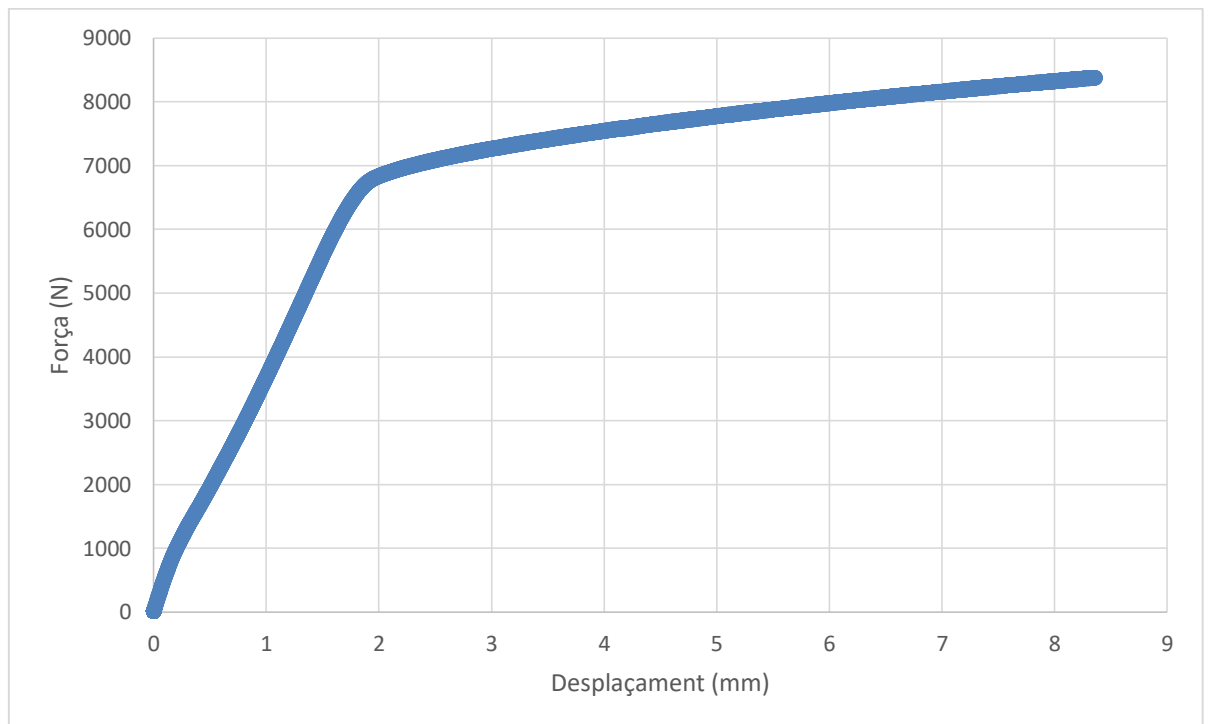
*Figura 10: Marques de les mordaces en la proveta.*

### 3.5.1 Resultats

Els resultats directes obtinguts per la màquina són la força aplicada i el desplaçament del pont (Figura 11). De les galgues se n'ha obtingut la deformació de la proveta. A partir d'aquests valors s'ha calculat la tensió de la proveta en cada instant utilitzant la fórmula de la tensió en seccions rectangulars.

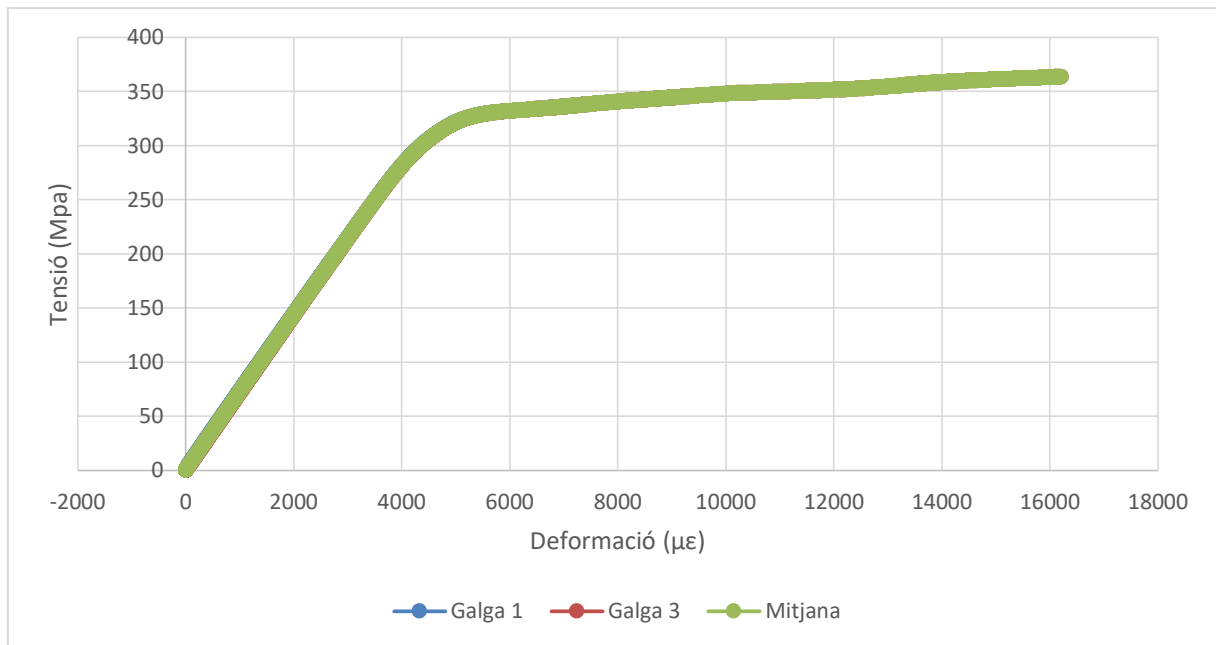
$$\sigma = \frac{F}{w*t} \quad \text{Eq. 1}$$

- $\sigma$ : Tensió de la proveta (Mpa).
- $F$ : Força aplicada per la màquina d'assaig (N).
- $w$ : Amplada de la proveta (mm).
- $t$ : Gruix de la proveta (mm).



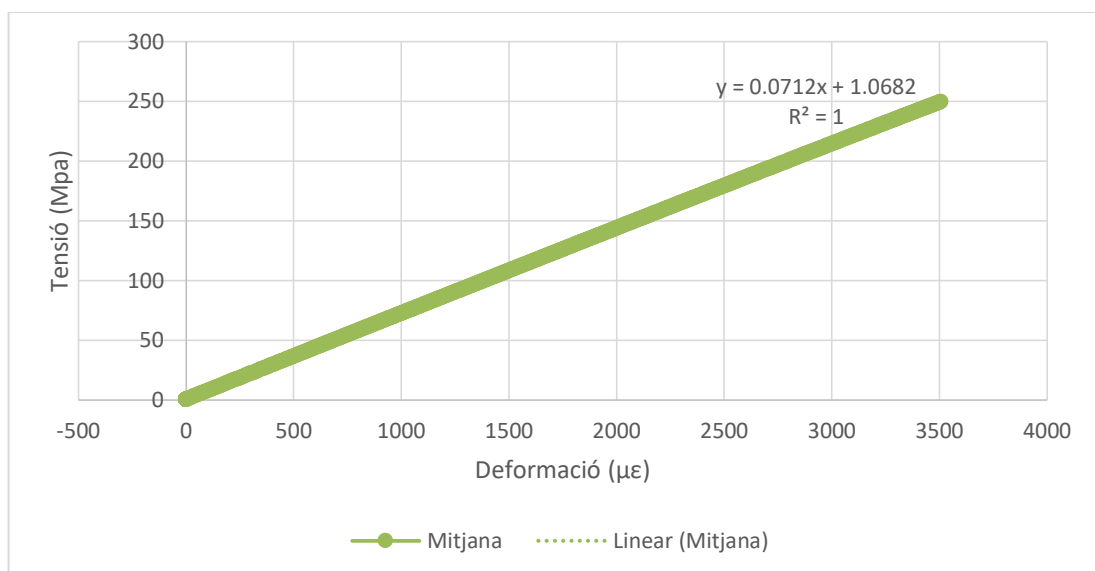
*Figura 11: Força vs desplaçament: primer assaig.*

Les tensions obtingues per les dues galgues a cada cara són molt semblants, fet que fa que les dades de cada galga i la seva mitjana se superposin en els gràfics (Figura 12).



*Figura 12: Tensió vs deformació: primer assaig.*

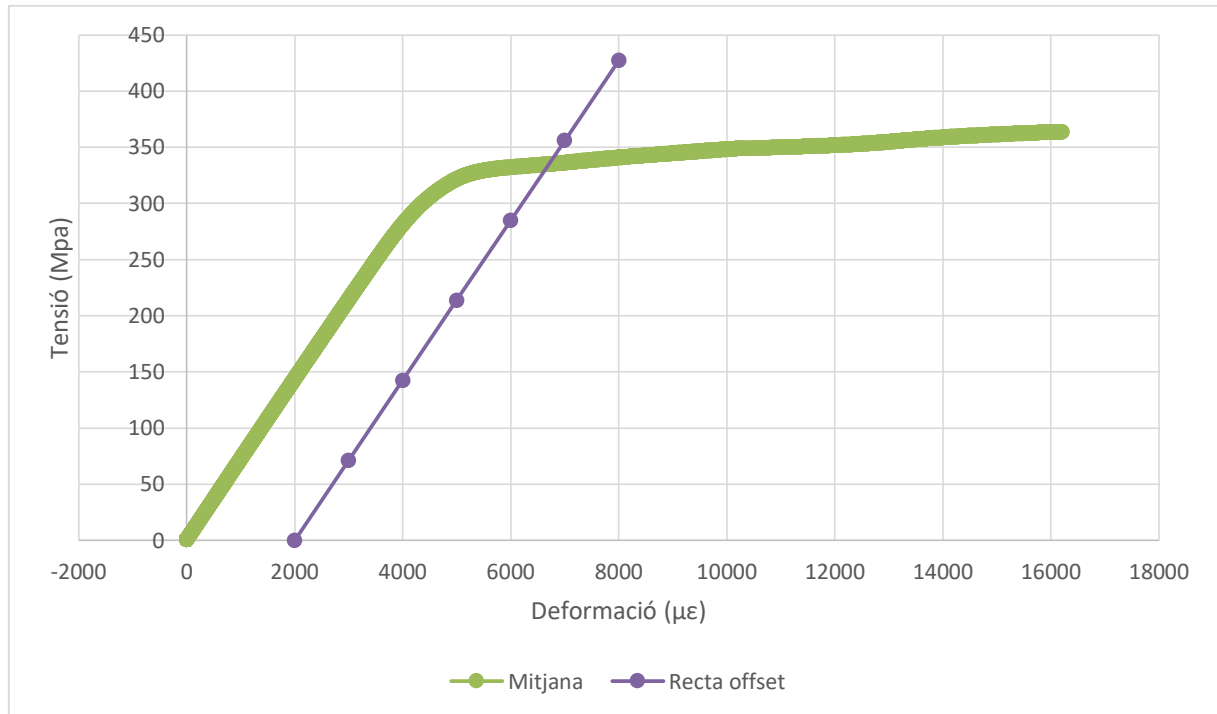
A partir dels gràfics de la tensió contra la deformació s'ha pogut calcular el mòdul elàstic de les provetes. El mòdul elàstic correspon al pendent de la recta corresponent a la part on el material treballa de manera elàstica.



*Figura 13: Regressió lineal: primer assaig.*

Com es pot veure en la Figura 13 el coeficient de determinació lineal  $R^2$  és unitari, per tant el valor obtingut del mòdul elàstic contindrà poc error.

El límit elàstic s'ha calculat utilitzant el procediment descrit en la normativa ASTM E8 / E8M [2] on es descriu el procediment estàndard per a dur a terme assajos a tracció amb materials metàl·lics. El sistema consisteix en la traça d'una línia paral·lela a recta del tram elàstic a una distància del 0.2% de deformacions, que equival a 2000 microdeformacions. La intersecció de la recta paral·lela amb la corba tensió-deformació marca el valor del límit elàstic (Figura 14).



*Figura 14: Càlcul del límit elàstic.*

El resultat dels càlculs pels tres assajos es mostren en la Taula 3. Els valors obtinguts són molt semblants en tots els casos o sigui que es tindran en compte tots els resultats. Es prendrà com a valor definitiu del límit elàstic de l'alumini la mitjana dels tres valors calculats en els assajos.

| ASSAIG                             | 1      | 2      | 3      | MITJANA |
|------------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| <b>E (MPA)</b>                     | 71200  | 71800  | 71200  | 71400   |
| <b><math>\Sigma_y</math> (MPA)</b> | 335.14 | 338.95 | 336.27 | 336.79  |

*Taula 3: Resultats dels assajos a tracció de les provetes d'alumini.*

## 4 METODOLOGIA DE L'ASSAIG NUMÈRIC

### 4.1 Introducció

Per tal d'arribar a obtenir els resultats desitjats en l'assaig de fatiga final, s'han planificat un seguit d'assajos previs per tal de validar les diferents parts del model d'elements finits i poder aplicar les correccions necessàries a on facin falta. Aquests assajos previs permetran obtenir uns millors resultats emprant una quantitat inferior de temps de càlcul, ja que s'utilitzaran models més simplificats que el definitiu.

### 4.2 Variables

Les variables que s'utilitzaran per explicar els resultats són les descrites a continuació.

- U1,U2,U3: Corresponen al desplaçament en cadascuna de les direccions principals. Unitats: mm.
- S11,S22,S33: Tensions en les direccions principals. Unitats: MPa.
- Mises: Tensió de Von Mises. Correspon a l'energia de distorsió calculada a partir de les tensions principals.

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad \text{Eq. 2}$$

- RF1,RF2,RF3: Forces de reacció. Unitats: N.
- SDV1: Variable de dany de la interfície que adopta un valor entre 0 i 1. Representa el percentatge del dany acumulat per tal de trencar la unió entre les interfícies cohesives. La variable és 0 quan els elements no han patit danys i 1 quan estan trencats.
- SDV2: Representa el coeficient entre l'energia acumulada pels elements de la interfície i l'energia crítica per tal de trencar-los. Té el mateix funcionament que la variable SDV1 essent 0 quan els elements estan intactes i 1 quan estan completament danyats.

$$SDV2 = \frac{G}{G_{Ic}} \quad Eq. 3$$

- SDV3: Relació entre els modes d'obertura. Quan la variable pren un valor de 0 significa que el mode d'obertura és mode I pur, i quan pren el valor d'1 és mode tallant (II o III). La resta de valors descriuen quin percentatge de cada mode conté el mode d'obertura mixt.

### 4.3 Assaig estàtic

L'anàlisi estàtic emprant un model d'elements finits és un pas previ necessari abans de poder fer el càlcul numèric de fatiga. La seva utilitat principal és que permet estimar un dels paràmetres necessaris per al funcionament de l'assaig a fatiga sense la necessitat d'utilitzar aquest últim per estimar aquest paràmetre, essent així un estalvi important de temps i recursos respecte a no utilitzar-lo. El paràmetre que és necessari estimar a partir de l'anàlisi estàtic és el valor del desplaçament aplicat en que s'assoleix el valor de l'energia crítica ( $G_c$ ) i es comencen a danyar els elements més pròxims a la delaminació inicial, és a dir, calcular el moment en què es comença a generar el front de delaminació.

L'assaig estàtic consistirà del mateix model que el de fatiga amb només les modificacions necessàries per fer-lo funcionar amb aquest tipus d'assaig. Es consideraran correctes els resultats de l'assaig estàtic quan s'aconsegueixi que el front de delaminació hagi avançat suficientment perquè sigui clarament observable i es pugui veure com es produeix un canvi en la seva direcció de propagació en trobar-se amb la zona rigiditzada de la placa.

D'aquesta simulació el valor que s'obtingui del desplaçament del model aplicat que correspongui al moment en què es comenci a generar el front de delaminació serà el valor de desplaçament de cicle màxim que s'haurà d'aplicar en la simulació de fatiga. Per tal d'assegurar que en l'assaig de fatiga els elements s'hagin danyat durant el pas de càrrega, s'utilitzarà un desplaçament lleugerament superior a l'obtingut en un pas de càrrega estàtica que es farà abans de sotmetre la placa a l'assaig de fatiga.

## 4.4 Assaig a fatiga

La fatiga és el debilitament d'un material quan és sotmès sota càrregues cícliques. La fatiga genera un dany estructural que avança de manera continuada en estructures sotmeses una càrrega cíclica. La tensió mínima necessària per tal d'influir un dany estructural sota una càrrega cíclica pot ser molt inferior a la necessària per influir el mateix dany sota una càrrega estàtica.

La fatiga ocorre quan el material es troba constantment en càrrega i descàrrega. Si les càrregues superen un cert valor, es generen esquerdes microscòpiques en el material en els punts on es generin concentracions de tensió. Les esquerdes aniran creixent fins a arribar a un cert límit crític, a partir d'aquest punt les esquerdes propagaran a la resta del material, provocant la fractura de l'estructura. La forma de l'estructura pot afectar de manera important la seva vida útil si conté punts amb concentracions de tensió.

Cada cicle de fatiga conté un interval de tensions que fluctua entre la tensió màxima del cicle ( $\sigma_{max}$ ) i la tensió mínima ( $\sigma_{min}$ ). L'amplitud de la tensió varia al voltant d'un valor mitjà, aquest valor és el promig de les tensions màximes i mínimes en cada cicle.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad Eq. 4$$

L'amplitud de la tensió és diferència entre la tensió mitjana i la tensió màxima o mínima en valor absolut. Es pot expressar aquest valor com a la meitat de la diferència entre la tensió màxima i la mínima.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad Eq. 5$$

A partir de la tensió màxima i mínima es defineix el quocient de tensions R com el quocient entre l'amplitud mínima i màxima. També es pot expressar com el quocient de les deformacions màximes i mínimes si considerem que el material té un comportament lineal. De la mateixa manera també podem expressar aquest valor com a quocient dels desplaçaments.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{\delta_{min}}{\delta_{max}} = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad Eq. 6$$

En la Figura 15 es mostren vàries gràfiques tensió-temps representatives d'un cicle de fatiga habitual on s'hi poden veure els paràmetres descrits habitualment. Es pot veure com per a diferents valors i símbol del quocient R varien tots els valors de les tensions.

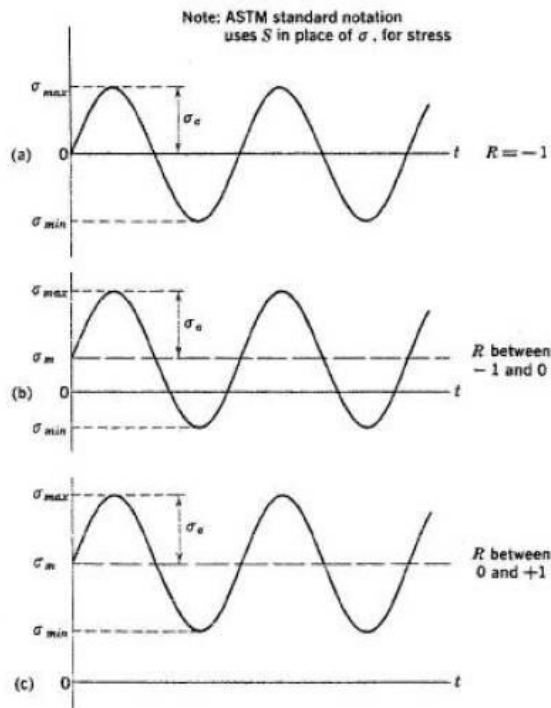


Figura 15: Representació dels paràmetres de fatiga. [3]



#### 4.4.1 Corba S-N

De la mateixa manera que altres característiques mecàniques, les propietats de fatiga dels materials poden ser determinats a partir d'assajos de simulació en el laboratori. L'equip d'assaig ha de ser dissenyat de tal manera que reproduïxi fins a on sigui possible les condicions de servei (nivell de tensions, freqüència, distribució de tensions, etc.).

Una sèrie d'assajos comencen sotmetent la proveta a tensions cícliques amb una amplitud màxima relativament gran, normalment al voltant de dos terços de la resistència estàtica a tracció del material; es registren el nombre de cicles per arribar al trencament de la proveta. Aquest procediment es repeteix en altres provetes amb amplituds màximes progressivament decreixents. Els resultats es representen en un diagrama de tensió,  $S$ , enfront al logaritme del número  $N$  de cicles fins al trencament per a cadascuna de les provetes. Els valors de  $S$  es prenen normalment com a amplituds de la tensió ( $\sigma_a$ ) tot i que en algunes ocasions s'utilitzen els valors de  $\sigma_{màx}$  o  $\sigma_{mín}$ .

S'observen dos tipus de corbes S-N, les quals estan representades esquemàticament en la Figura 16. Tal com s'indica en aquests diagrames, com més gran és la magnitud de la tensió, menor és el nombre de cicles que el material és capaç d'aguantar abans de trencar-se. En alguns materials, la corba S-N es fa horitzontal per a valors grans de  $N$ , és a dir, existeix una tensió límit, anomenada límit de fatiga o resistència a la fatiga, per sota del qual el trencament per fatiga no ocorrerà mai. Aquest límit de fatiga representa el valor de la tensió major fluctuant que no produiria trencament en un número infinit de cicles.

En els materials que no tenen un límit de fatiga, en el sentit que la corba S-N continua decreixent al augmentar  $N$ , el trencament per fatiga passarà independentment de la magnitud de la tensió màxima aplicada. Per a aquests materials, la resposta a la fatiga s'especifica mitjançant la resistència a la fatiga que es defineix com el nivell de tensió que produeix el trencament després d'un determinat nombre de cicles.

Un altre paràmetre important que caracteritza el comportament a fatiga d'un material és la vida a fatiga ( $N_f$ ). Aquest valor és el número de cicles per a produir el trencament a un nivell especificat de tensions tal com s'indica en el gràfic (b) de la Figura 16.

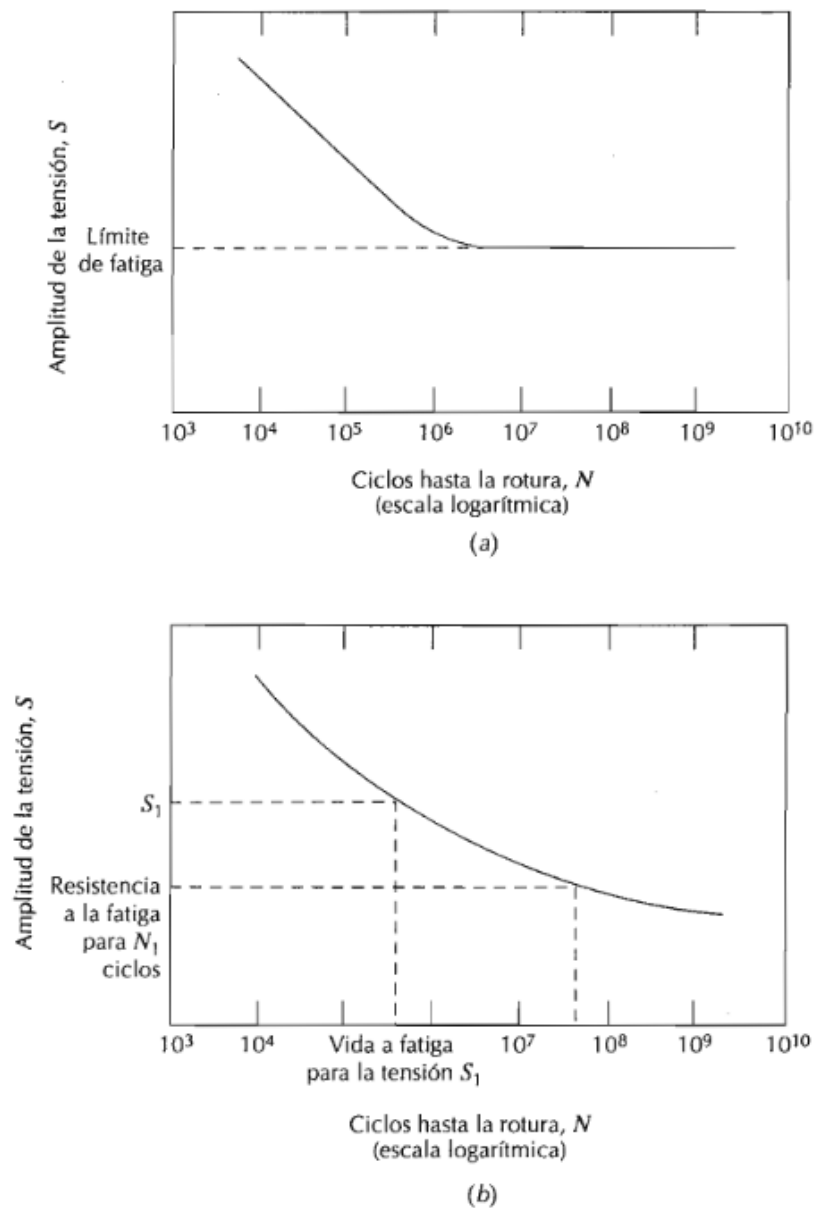


Figura 16: Amplitud de la tensió ( $S$ ) en front del logaritme del número de cicles fins a arribar al trencament ( $N$ ) on (a) és per a un material que presenta un límit de fatiga i (b) és un material que no presenta un límit de fatiga. [3]

#### 4.4.2 Propagació de la delaminació

El procés de trencament per fatiga es desenvolupa a partir la generació d'una esquerda que continua la seva propagació fins al trencament final del material. En el cas dels materials compòsits, el trencament per fatiga no s'inicia amb una esquerda en el material, sinó que la fatiga comença en aparèixer danys en una de les interfícies cohesives que manté unides les vàries capes de laminat del material. Aquest dany que creix i genera la desunió i conseqüent separació entre les capes del material, que en aquest cas és el que anomenem front de delaminació, que seria l'equivalent a un front d'esquerdes per a un material homogeni.

El procés del trencament per a fatiga està caracteritzat per tres etapes diferents: (1) iniciació de l'esquerda, on es forma una esquerda petita en alguna regió d'alta concentració de tensions; (2) propagació de l'esquerda, durant la qual aquesta esquerda avança de forma gradual en cada cicle de càrrega; i (3) el trencament final, el qual ocorre molt ràpidament una vegada que l'esquerda ha arribat una mida crítica. La vida a fatiga  $N_f$ , el número total de cicles fins a la fractura, pot ser considerada com la suma del número de cicles per a l'inici de l'esquerda  $N_i$  i per a la propagació de l'esquerda  $N_p$ .

$$N_f = N_i + N_p \quad \text{Eq. 7}$$

Els resultats dels estudis de fatiga han demostrat que la vida d'un component estructural pot relacionar-se amb la velocitat de creixement de l'esquerda. Durant la segona etapa de la propagació, les esquerdes poden créixer des d'una mida en prou feines detectable a una mida crítica. Existeixen tècniques experimentals que s'utilitzen per a mesurar la longitud de l'esquerda durant l'aplicació de tensions cícliques. Els resultats són registrats i després es representen com una gràfica de la longitud de l'esquerda (a) enfront al número de cicles N.

La velocitat de creixement de l'esquerda  $\frac{da}{dN}$  es pren com el pendent en algun punt d'aquesta corba. És important ressaltar dos resultats: (1) inicialment, la velocitat de creixement és petita, però augmenta en incrementar la longitud de l'esquerda; i (2) el creixement de l'esquerda és major al augmentar la tensió aplicada per a una determinada longitud de l'esquerda.

En el cas de la delaminació la velocitat de creixement de l'esquerda pot no comportar-se d'aquesta manera, ja que no segueix el mateix procés que la generació d'esquerdes d'un material homogeni.

La velocitat de propagació de l'esquerda és una funció no només del nivell de tensió i mida d'aquesta sinó que també de les propietats del material en el cas dels materials homogenis. En els compòsits, la velocitat de propagació de la delaminació depèn de les propietats del material cohesiu. Matemàticament aquesta velocitat pot expressar-se en termes del factor de la intensitat de tensions  $K$  a partir de l'expressió següent:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{Eq. 8}$$

Els paràmetres  $C$  i  $m$  són constants per a un determinat material, els quals depenen també del mitjà, la freqüència el quocient de tensions ( $R$ ). Aquesta relació és la que es coneix com a llei de Paris. En la Figura 17 es mostra un esquema de com del comportament de la velocitat de propagació de l'esquerda, en la pràctica es modela la llei de Paris com a l'interval lineal al centre de la gràfica.

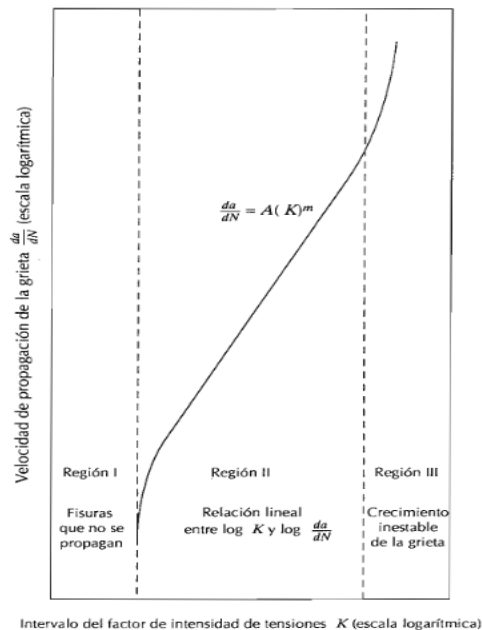


Figura 17: Esquema de la relació entre la velocitat de creixement d'esquerda i el factor d'intensitat de tensions. [3]

La generació d'esquerdes es pot diferenciar en tres regions diferents segons la intensitat de tensions  $K$ .

- Regió I: Per intensitats de tensions massa petites les esquerdes no es propaguen
- Regió II: Les esquerdes es propaguen seguint el comportament descrit per l'equació 8.
- Regió III: Per a intensitats massa elevades les esquerdes creixen de forma descontrolada provocant el trencament del material.

#### 4.4.3 Llei de Paris modificada.

En el modelatge amb elements finits s'utilitzarà una variació de la llei de Paris que utilitza en la seva expressió variables relacionades amb l'energia disponible per la fractura  $G$ .

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{G_{max}}{G_c} \right)^m \quad Eq. 9$$

El factor d'intensitat de tensions passa a expressar-se com al quocient entre l'energia amb l'energia màxima disponible per la fractura  $G_{max}$  i la tenacitat del material  $G_c$ . En aquesta expressió  $G_{max}$  té en compte l'aportació individual dels diferents modes d'obertura a través dels paràmetres  $C$  i  $m$ , els quals varien en funció del mode mixt, que es pot definir amb la següent expressió:

$$\phi = \frac{G_{II}}{G_I + G_{II}} \quad Eq. 10$$

On  $G_I$  i  $G_{II}$  són les energies disponibles per la fractura pels modes d'obertura I i II respectivament.

Les constants  $C$  i  $m$  es van calcular en un projecte anterior utilitzant l'aproximació de Blanco per al creixement de la delaminació en mode mixt per a materials de fibra de carboni sota càrrega cíclica.

$$\log(C) = \phi^2 \log\left(\frac{C_{II}}{C_m C_I}\right) + \phi \log(C_m) + \log(C_I) \quad Eq. 11$$

$$m = \phi^2(m_{II} - m_I - m_m) + \phi m_m + m_I \quad Eq. 12$$

En aquestes expressions  $C_I$  i  $C_{II}$  són els coeficients de la llei de Paris per a mode I i II respectivament,  $m_I$  i  $m_{II}$  són els seus exponents i els paràmetres  $C_m$  i  $m_m$  són paràmetres d'ajust.

Per tal de calcular els paràmetres d'ajust  $C_m$  i  $m_m$  es van calcular varies corbes de creixement d'esquerda en mode II, mode II i dos mode mixt. De cada corba es van calcular quatre punts definits per valors de mode mixt diferents. Els valors de  $\phi$  assajats van ser de 0.5, 0.75.

Cadascuna d'aquestes corbes llavors es va dibuixar per a diferents quocients de tensió (R). En total es disposa dels resultats per a tres configuracions de R diferents: 0.1, 0.3 i 0.5.

#### 4.4.4 Paràmetres de l'assaig de fatiga

L'objectiu de l'assaig a fatiga és veure l'evolució de la delaminació en funció del nombre de cicles. Per a aquest càlcul és necessari conèixer els paràmetres  $C$  i  $m$  de la llei de Paris. Aquests paràmetres estan en funció del quocient de tensions R, per tant tots els assajos es realitzaran amb el mateix valor de R.

L'assaig complet es divideix en dues parts. Primer es realitzarà un assaig estàtic en el qual s'aplicarà un desplaçament constant per tal de generar l'obertura dels primers elements cohesius més pròxims a la delaminació inicial. A partir d'aquest punt es realitzarà l'assaig de fatiga prenent com a desplaçament màxim de cicle aquest valor de desplaçament assolit en l'assaig estàtic per tal de fer créixer el front de delaminació.

L'assaig a fatiga es realitzarà utilitzant un quocient de tensions de  $R=0.1$ . Els paràmetres que s'han trobat per càlcul de la llei de París són els descrits en la Taula 4.

| $C_I$  | $C_{II}$ | $C_m$    | $m_I$ | $m_{II}$ | $m_m$   |
|--------|----------|----------|-------|----------|---------|
| 0.0266 | 0.4806   | 3.17E+04 | 8.394 | 3.62     | -2.3824 |

*Taula 4: Paràmetres de la llei de Paris per a  $R=0.1$*

L'últim paràmetre a determinar és el desplaçament al qual cal arribar perquè el demostrador es vagi danyant progressivament per fatiga. Si l'energia que aporta aquest desplaçament és massa baixa delaminació no avançarà. En el cas contrari que s'utilitzés un desplaçament en el primer pas massa elevat, el dany que s'hauria causat al demostrador seria massa important abans de sotmetre'l a la càrrega de fatiga. El desplaçament que s'aplicarà dependrà dels resultats obtinguts en l'assaig estàtic.

## 5 MODELS A ESTUDIAR

### 5.1 Introducció

En total s'han creat dos models completament diferents. Cadascun del model presenta diversos tipus de modificacions i diferents configuracions per tal d'arribar als resultats desitjats.

### 5.2 Propietats dels materials

La proveta està formada d'un material compòsit anomenat IMA/M21E. Les propietats en funció de la seva orientació són les descrites en la Taula 5.

| <b>E1<br/>(MPa)</b> | <b>E2<br/>(MPa)</b> | <b>E3<br/>(MPa)</b> | <b><math>\nu_{12}</math></b> | <b><math>\nu_{13}</math></b> | <b><math>\nu_{23}</math></b> | <b>G12<br/>(MPa)</b> | <b>G13<br/>(MPa)</b> | <b>G23<br/>(MPa)</b> |
|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 154000              | 8500                | 8500                | 0.35                         | 0.35                         | 0.4                          | 4200                 | 4200                 | 3036                 |

*Taula 5: Propietats del material compòsit IMA/M21E*

Els materials dels quals s'ha proposat construir els rigiditzadors són acer, alumini i el mateix compòsit del qual està formada la proveta. La Taula 6 conté les propietats de l'acer i l'alumini que s'han utilitzat per dissenyar els diferents rigiditzadors.

| <b>MATERIAL</b> | <b>E (MPa)</b> | <b><math>\nu</math></b> |
|-----------------|----------------|-------------------------|
| <b>ALUMINI</b>  | 70000          | 0.33                    |
| <b>ACER</b>     | 210000         | 0.3                     |

*Taula 6: Propietats elàstiques de l'acer i alumini utilitzades.*

Els cohesius utilitzats en la interfície de les capes del laminat tenen les propietats descrites en la Taula 7.

| <b><math>\tau_I</math></b> | <b><math>\tau_{II}</math></b> | <b><math>K</math></b>       | <b><math>G_{Ic}</math></b> | <b><math>G_{IIc}</math></b> | <b><math>\eta</math></b> |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| 10<br>(MPa)                | 30.105<br>(MPa)               | 1e6<br>(N/mm <sup>3</sup> ) | 0.3052<br>(N/mm)           | 2.766<br>(N/mm)             | 2.0514<br>(-)            |

*Taula 7: Propietats dels cohesius*



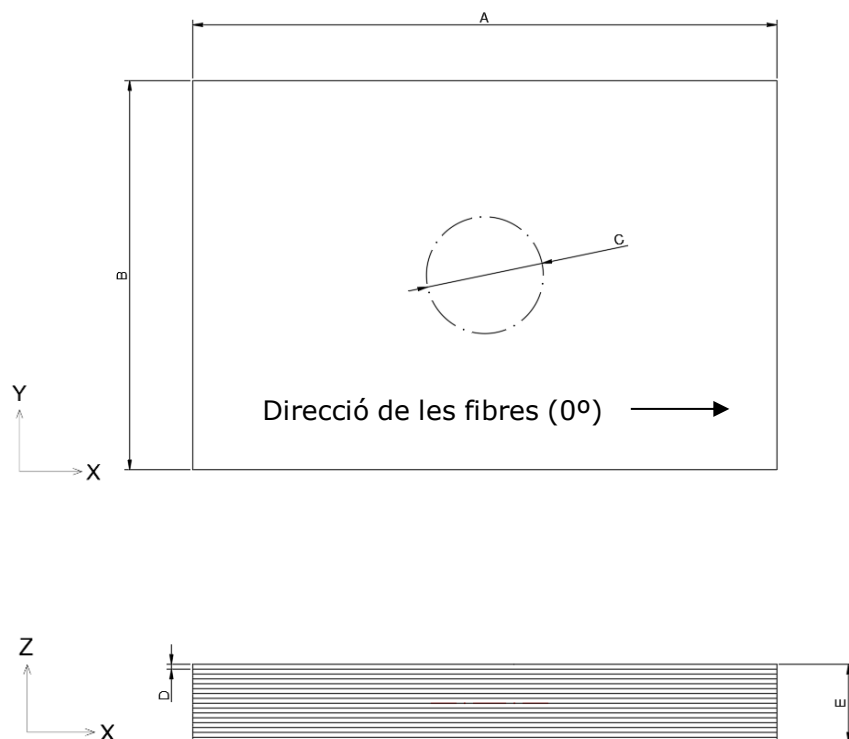
### 5.3 Primer demostrador

Aquest model correspon a la configuració inicial en què es pretenia fer l'assaig.

#### 5.3.1 Geometria

El model consta d'una placa de material compòsit amb un sol rigiditzador de perfil T. El panell presenta una delaminació inicial en el centre de la placa entre les dues capes centrals de dimensions variables.

La simulació es durà a terme amb dos models que presenten un laminat diferent. Un model està format per un laminat de 16 capes mentre que l'altre conté 24 capes. Combinant totes les possibilitats dels diferents laminats i mides de la delaminació obtenim un total de 6 combinacions diferents tal com es mostra en la Taula 8, on s'hi pot veure les dimensions corresponents la Figura 18 i la Figura 19.



*Figura 18: Geometria del model inicial.*

En la Figura 19 es mostra la posició de la delaminació inicial de la placa on anirà col·locat l'insert de tefló.

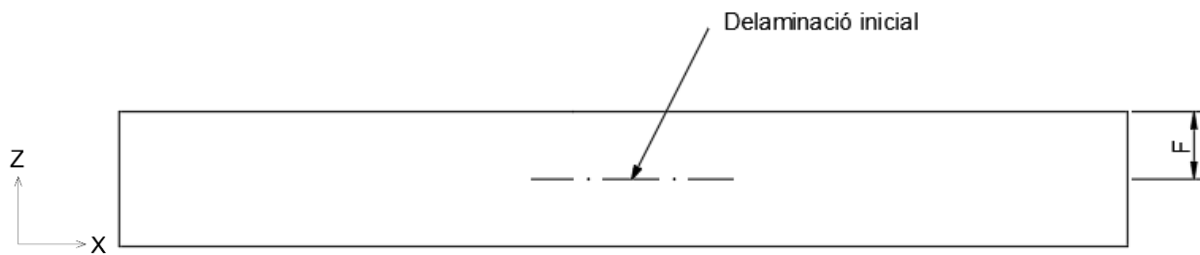
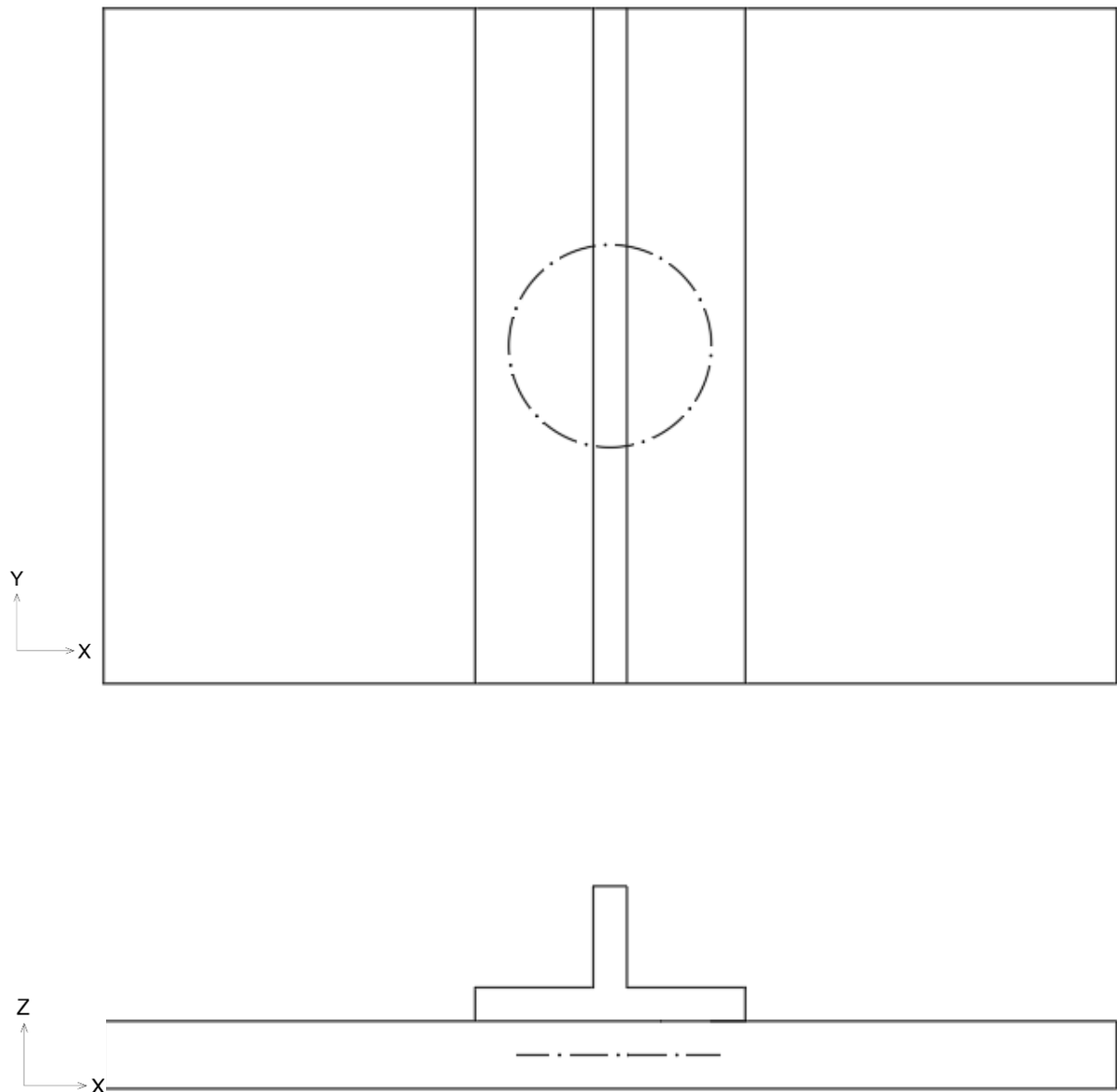


Figura 19: Posició de la delaminació inicial.

|                             | A   | B   | ØC | D     | E     | F     |
|-----------------------------|-----|-----|----|-------|-------|-------|
| <i>Cota/Dimensions (mm)</i> |     |     |    |       |       |       |
| <i>Laminat de 16 capes</i>  | 150 | 100 | 20 | 0.184 | 2.944 | 1.472 |
|                             | 150 | 100 | 30 | 0.184 | 2.944 | 1.472 |
|                             | 150 | 100 | 50 | 0.184 | 2.944 | 1.472 |
| <i>Laminat de 24 capes</i>  | 150 | 100 | 20 | 0.184 | 4.416 | 2.208 |
|                             | 150 | 100 | 30 | 0.184 | 4.416 | 2.208 |
|                             | 150 | 100 | 50 | 0.184 | 4.416 | 2.208 |

Taula 8: Dimensions del model inicial.

El demostrador també inclou el rigiditzador en el centre de la placa, tal com es mostra en la Figura 20.



*Figura 20: Demostrador complet amb el rigiditzador.*

Amb aquest model es pretén que la delaminació en la capa central es dispersi de forma concèntrica a l'insert de manera que la part de la placa en contacte amb el rigiditzador delamini amb una forma diferent de la zona sense rigiditzar.

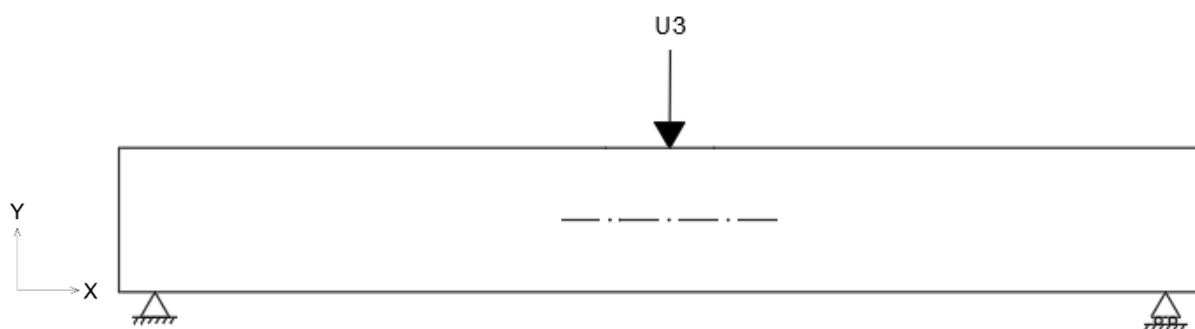
### **5.3.2 Configuracions dels assajos**

S'han configurat diferents tipus de testos per tal de veure el comportament que tindrà el demostrador davant diferents esforços. En total s'han configurat tres assajos diferents. Els assajos es diferencien pel punt d'aplicació i el sentit de la càrrega.

En aquestes primeres configuracions es vol estudiar quin tipus de càrrega provoca una millor delaminació del defecte inicial, per aquest motiu aquests assajos no tenen inclòs el rigiditzador. Excloent el rigiditzador es redueix el temps computacional necessari per a realitzar els càlculs.

### **Configuració 1**

Les plaques se suporten de manera bi-recolzades. La càrrega és un desplaçament puntual en el centre de la placa sobre la pell exterior tal com es mostra en la Figura 21. El desplaçament puntual ha de ser suficient per a veure un creixement suficient de l'àrea delaminada.

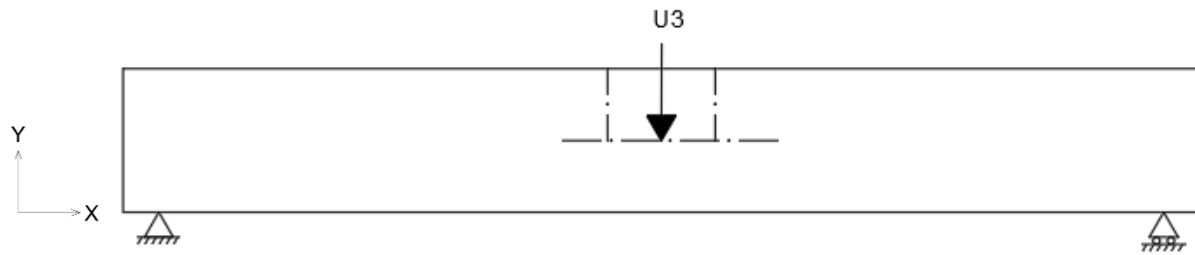


*Figura 21: Configuració 1 del primer model*

En aquesta configuració se sotmet la placa a càrregues de flexió. Utilitzant aquesta configuració la delaminació que es genera en la placa hauria de ser principalment de mode I.

### **Configuració 2**

Consisteix en una configuració similar a la primera però amb la diferència que el desplaçament s'aplica directament sobre l'insert. Per tal de fer l'insert accessible es farà un forat circular de 15 mil·límetres que travessa mitja placa fins a arribar a l'insert.

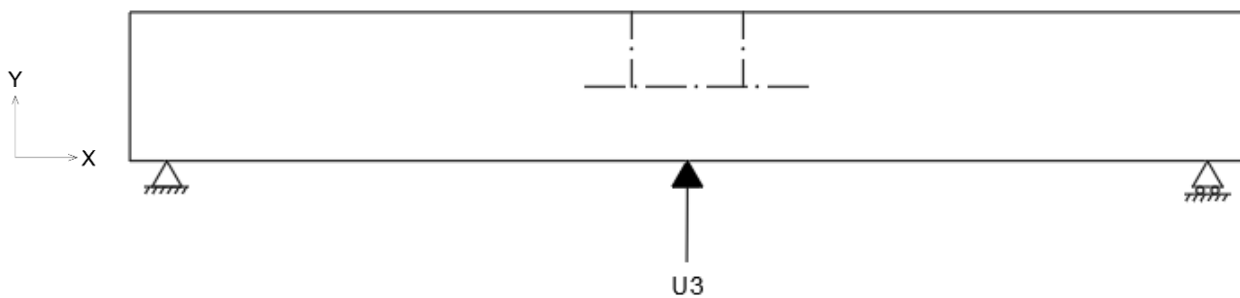


*Figura 22: Configuració 2 del primer model.*

En aquesta configuració l'obertura de la placa hauria de ser similar a la del primer assaig però el desplaçament a aplicar hauria de ser inferior.

### **Configuració 3**

L'última configuració aplica el desplaçament de la placa amb el forat en la part inferior en sentit oposat al de la configuració 2. S'haurà de veure quines diferències sorgeixen respecte a la configuració 2.



*Figura 23: Configuració 3 del primer model.*

### 5.3.3 Laminat

La direcció de les fibres està representada en la Figura 20. La direcció 2 és la direcció perpendicular a les fibres que està continguda dintre el pla. La direcció 3 és la direcció fora del pla del laminat.

Segons el nombre de capes de la placa s'utilitzen dues configuracions del laminat diferents. Totes les làmines tenen un gruix de 0.184 mil·límetres.

- Laminat de 16 capes: Grups de dues capes a  $+45^\circ$  i  $-45^\circ$  seguides d'una capa a  $90^\circ$  i una a  $0^\circ$ . Aquests grups es repeteixen aplicant simetria dues vegades. Notació:  $[\pm 45/90/0]_{2s}$ .
- Laminat de 24 capes: Mateixa configuració que en el laminat de 16 capes. La simetria es repeteix 3 vegades. Notació:  $[\pm 45/90/0]_{3s}$ .

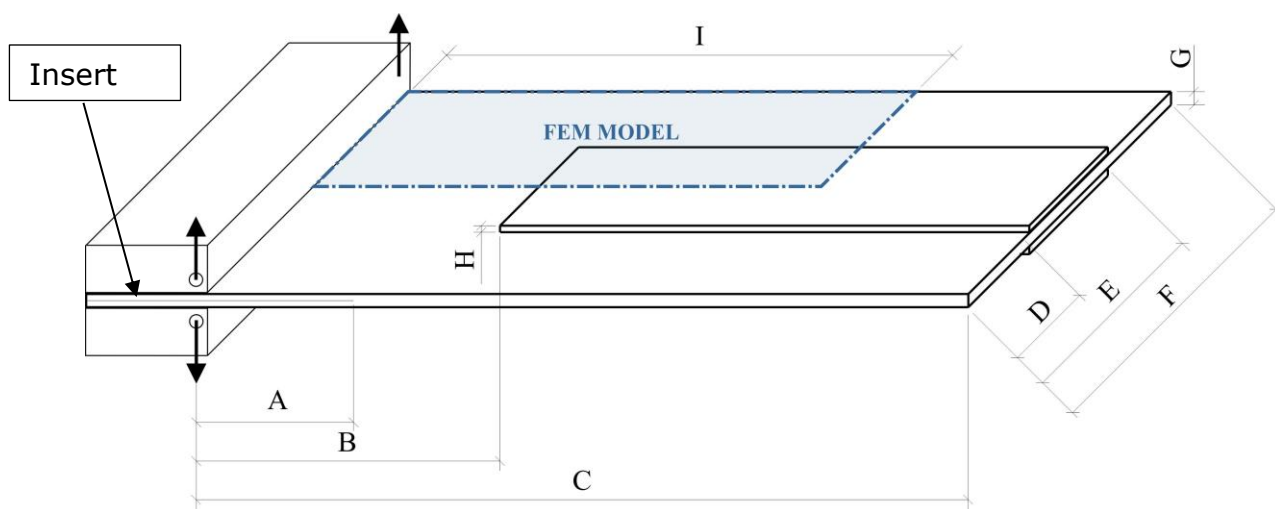
| Capa 1      | Capa 2      | Capa 3     | Capa 4    | Capa 5    | Capa 6     | Capa 7      | Capa 8     |
|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|-------------|------------|
| $+45^\circ$ | $-45^\circ$ | $90^\circ$ | $0^\circ$ | $0^\circ$ | $90^\circ$ | $-45^\circ$ | $45^\circ$ |

*Taula 9: Orientació de les 8 primeres capes. Es repeteix 2 vegades pel laminat de 16 capes i 3 vegades pel de 24 capes.*

## 5.4 Segon demostrador

### 5.4.1 Geometria

El segon demostrador utilitza una geometria encara més simplificada que el primer model. La delaminació inicial de la placa s'ha atribuït a una àrea rectangular en comptes de circular. En la Figura 24 apareix representat el demostrador incloent la posició de les mordasses. Les mides de la placa es tenen en compte a partir del punt de subjecció de les mordasses. Sota el punt de subjecció s'hi troba l'insert de tefló des d'on s'ha de propagar la delaminació.



*Figura 24: Geometria del segon demostrador.*

La mida del rigiditzador per utilitzar durant l'assaig no té unes mides definides. Les mides de disseny del rigiditzador han de permetre que faci l'efecte desitjat sobre l'obertura de la placa sense plastificar, també s'ha d'utilitzar unes mides optimitzades per estalviar el màxim material possible. En aquest model s'utilitzen dos rigiditzadors, un a cada banda de la placa.

Com que dissenyar el rigiditzador utilitzant les seves tres dimensions és una operació amb masses variables s'ha decidit fixar l'amplada i la longitud del rigiditzador, de manera que la variable a optimitzar és el gruix de la placa (Taula 10).

| Cotes (mm) |                     |
|------------|---------------------|
| <b>A</b>   | 35                  |
| <b>B</b>   | 55                  |
| <b>C</b>   | 140                 |
| <b>D</b>   | 17.5                |
| <b>E</b>   | 42.5                |
| <b>F</b>   | 60                  |
| <b>G</b>   | 2.944               |
| <b>H</b>   | Variable de disseny |
| <b>I</b>   | 115                 |

*Taula 10: Dimensions del segon demostrador.*

Per tal de simplificar els càlculs, el model d'elements finits només consistirà de la regió indicada en la Figura 25. Aplicant condicions de simetria en aquesta regió s'aconsegueix un model amb el mateix comportament que el demostrador complet sense la necessitat d'utilitzar tants elements.

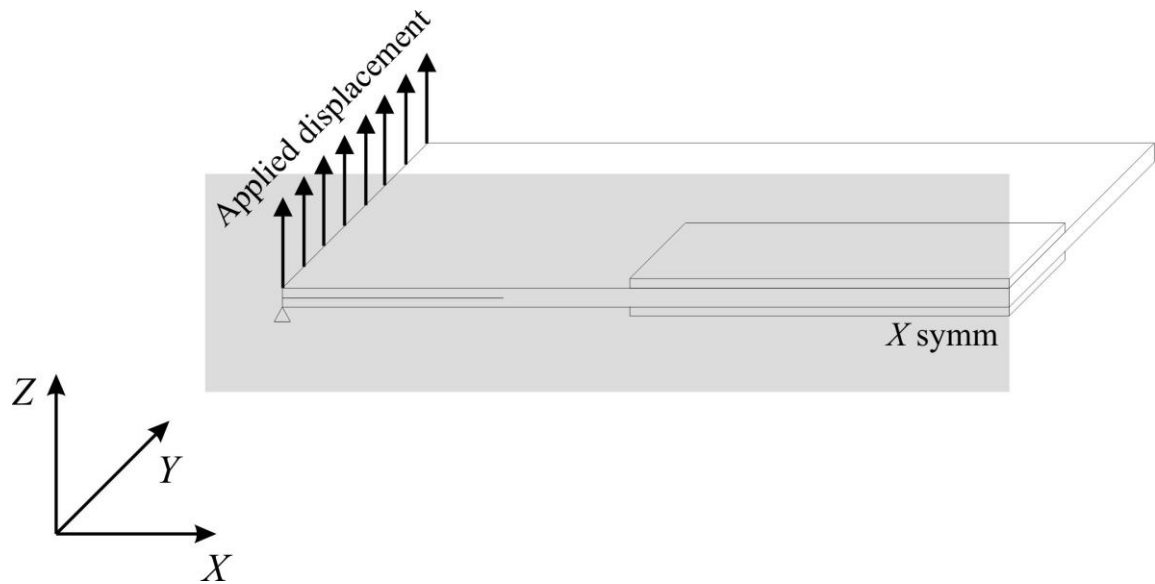
#### **5.4.2 Configuracions dels assajos**

Es realitzaran dues configuracions diferents per tal d'observar el progrés de la delaminació en funció del mètode d'obertura del demostrador. Aquestes dues configuracions pretenen simular les condicions adients per tal d'aconseguir un mètode de delaminació purament en el mode desitjat.

##### **Configuració 1**

Aquesta configuració està pensada per fer que el demostrador delamini principalment en mode I. Les mordasses de l'extrem de la placa exerceixen un desplaçament en direcció Z en la part superior de la placa, mentre que es restringeix el desplaçament en la part inferior. S'apliquen condicions de simetria en l'eix X per tota la placa.

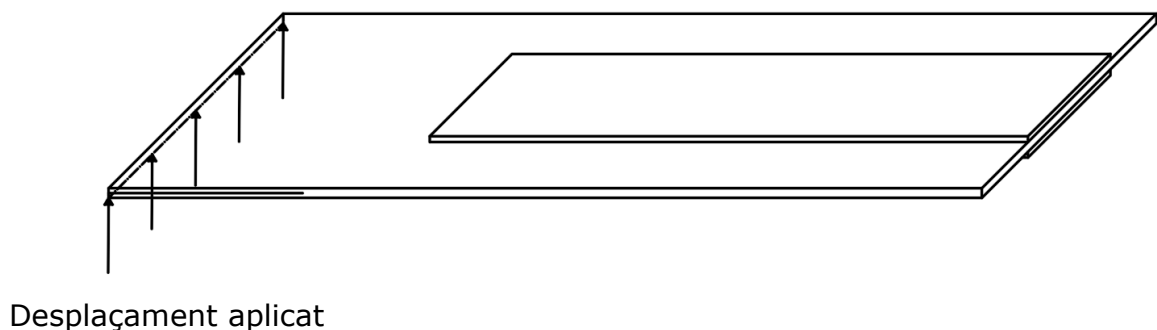




*Figura 25: Configuració 1 del segon demostrador.*

## **Configuració 2**

Aquesta configuració utilitza unes condicions de contorn diferents de les de la primera configuració per tal d'intentar obtenir un mode d'obertura del demostrador en mode II. Aquesta obertura s'aconsegueix aplicant un desplaçament per la part inferior del demostrador en la direcció normal al laminat. L'altra banda del demostrador està encastat de manera que se l'hi restringeix el moviment en la direcció del desplaçament i no es permet que les plaques llisquin fora del pla de contacte entre capes.



*Figura 26: Configuració 2 del segon demostrador.*

El desplaçament aplicat juntament amb la cara oposada encastada només permeten que el demostrador es deformi en flexió. Amb aquesta configuració el dany provocarà que la capa superior del demostrador llisqui sobre la inferior per culpa la deformació en flexió de manera que es produeixi una obertura en mode II.

### **5.4.3 Laminat**

Per aquest demostrador s'ha utilitzat un laminat més simplificat que en el primer cas. Es tracta d'un laminat unidireccional orientat en la direcció llarga de la placa. El gruix de cada capa continua essent la mateixa que en el primer demostrador (0.184 mm). El demostrador s'ha dissenyat amb un laminat de 16 capes unidireccionals.

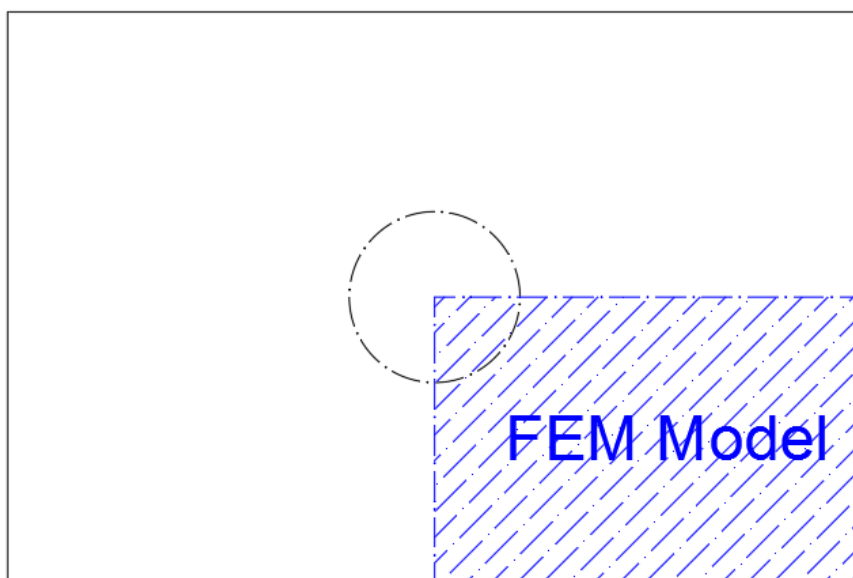
## 6 ESTUDI DELS MODELS D'ELEMENTS FINITS

En aquest apartat es detallen tots els càlculs amb models d'elements finits que s'han anat realitzat al llarg del projecte. A més dels assajos descrits en el capítol 5 també s'han realitzat diversos assajos més petits per tal d'aïllar i corregir diversos errors que han anat apareixent. A partir de les conclusions que s'han extret de cada model s'han fet les modificacions adients per tal de generar nous models amb un comportament més adequat.

### 6.1 Primer model

#### 6.1.1 Geometria

El primer model correspon al primer demostrador dissenyat que s'ha descrit. Al tenir una geometria totalment simètrica s'ha pogut aplicar condicions de simetria en dos eixos en el model. Aquestes condicions de simetria permeten generar un model amb molta menys quantitat d'elements, per tant els càlculs seran més ràpids que si es calculés el model sencer. La Figura 27 mostra la part del demostrador que s'ha utilitzat per construir el model d'elements finits.



*Figura 27: Zona del demostrador del qual s'ha realitzat el model.*

### 6.1.2 Condicions de contorn

#### Configuració 1

S'han aplicat condicions de simetria en els extrems de la placa. El desplaçament s'aplica de manera puntual en una de les puntes del model que correspon al centre de la placa sencera. Finalment s'ha restringit el desplaçament en Z en la part inferior de la placa corresponent al suport.

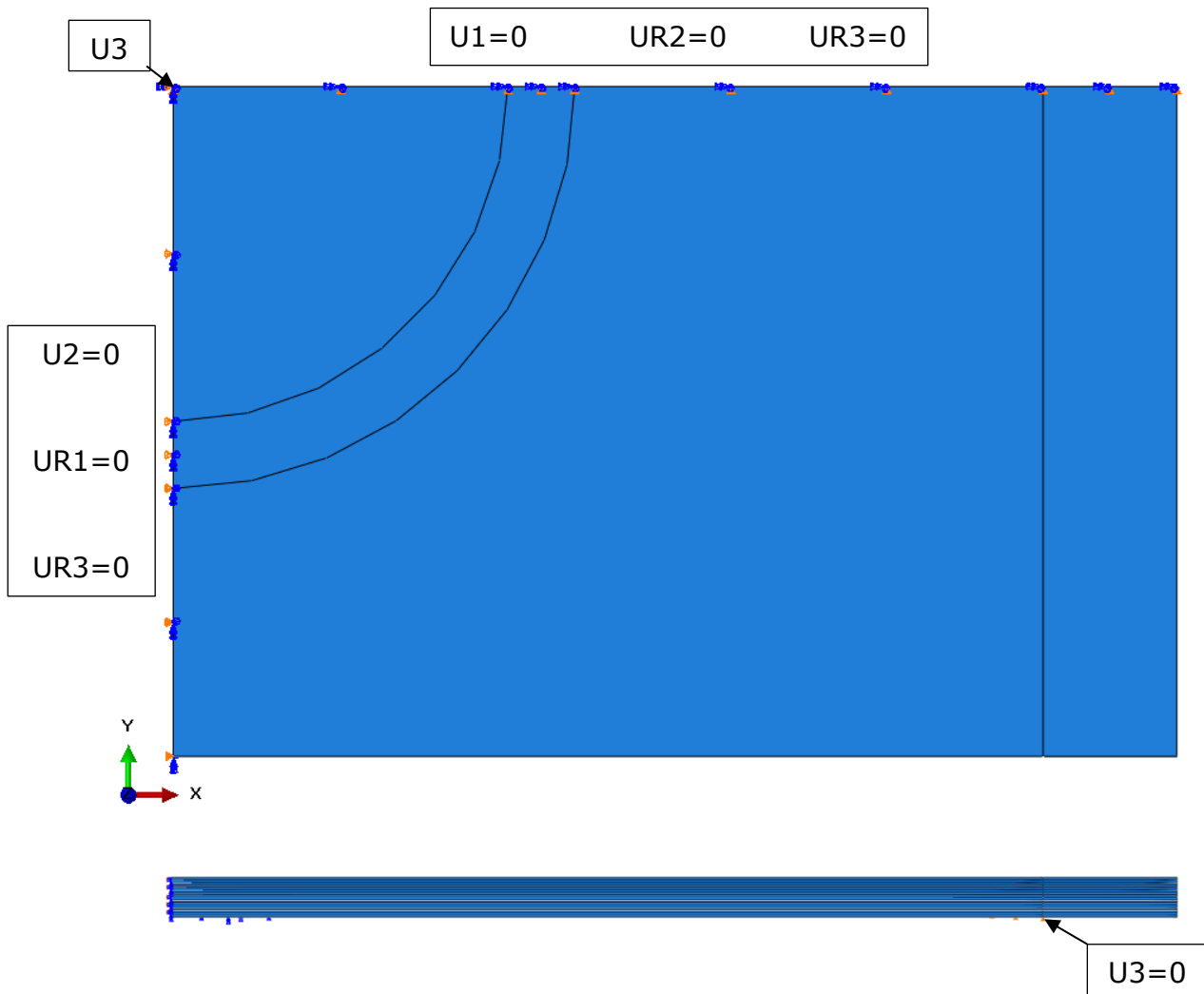
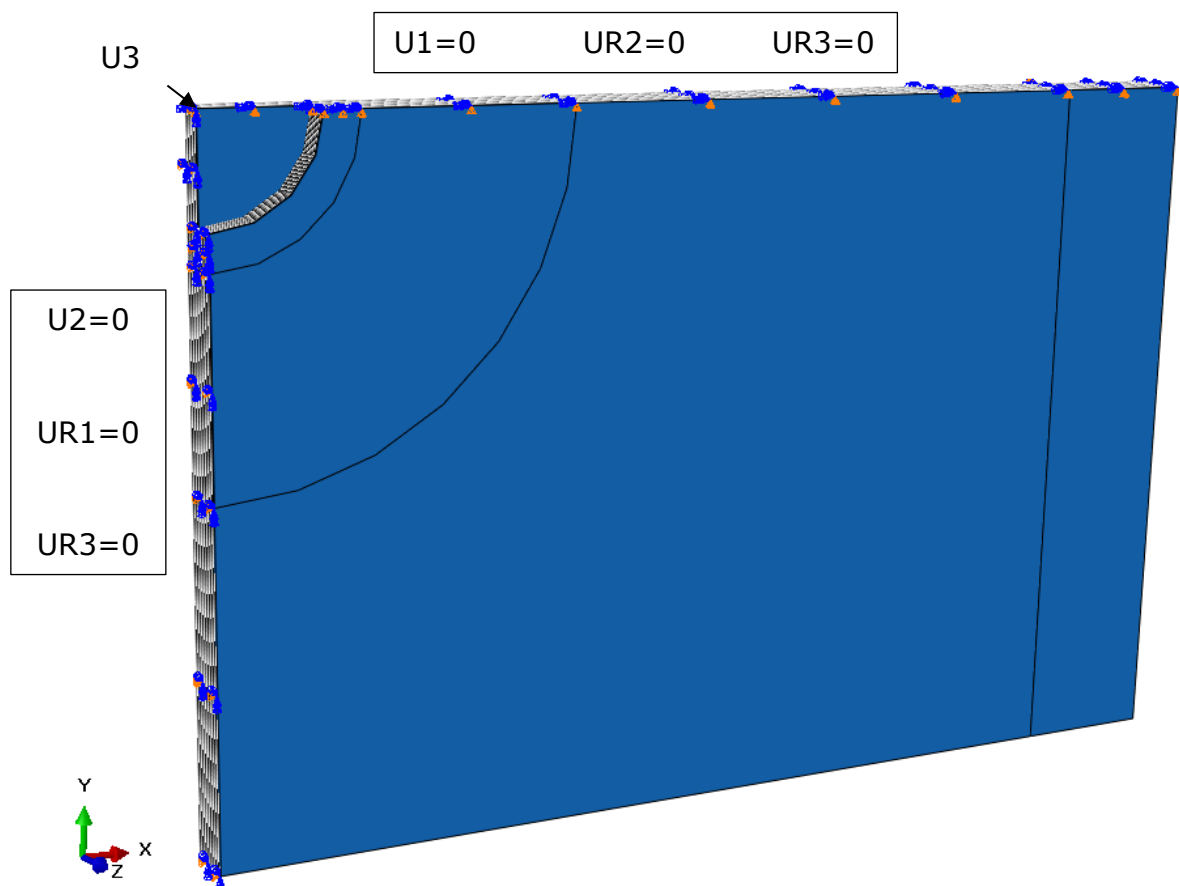


Figura 28: Condicions de contorn del model per la primera configuració.

## Configuració 2

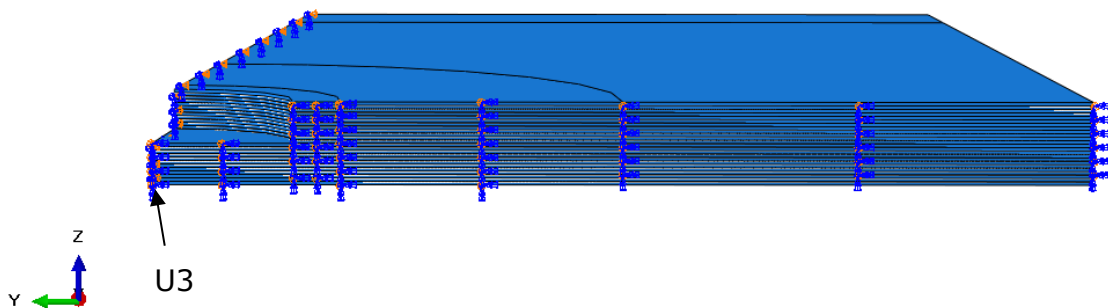
Les condicions de contorn aplicades són molt similars a les de la primera configuració. En aquest model s'hi troba el forat que arriba fins a la delaminació inicial. En l'extrem de la placa en la posició del forat, que correspon al centre del demostrador complet, s'aplica un desplaçament puntual en la direcció Z en sentit negatiu. La resta de condicions no canvien respecte a l'assaig anterior.



*Figura 29: Condicions de contorn de la segona configuració.*

## Configuració 3

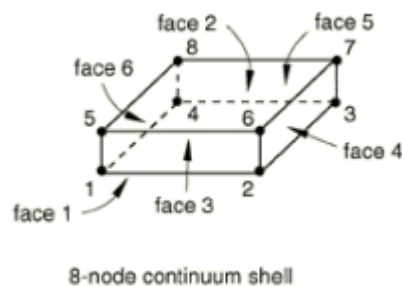
En la tercera configuració s'aplica el desplaçament puntual del model en la seva cara inferior en la mateixa posició que en les altres configuracions. En aquest cas el desplaçament de la placa té un sentit positiu en la direcció de l'eix Z. La resta de condicions de contorn no varien.



*Figura 30: Condicions de contorn de la tercera configuració.*

### 6.1.3 Mallat

Els elements possibles a utilitzar són elements tridimensionals de 8 nodes.

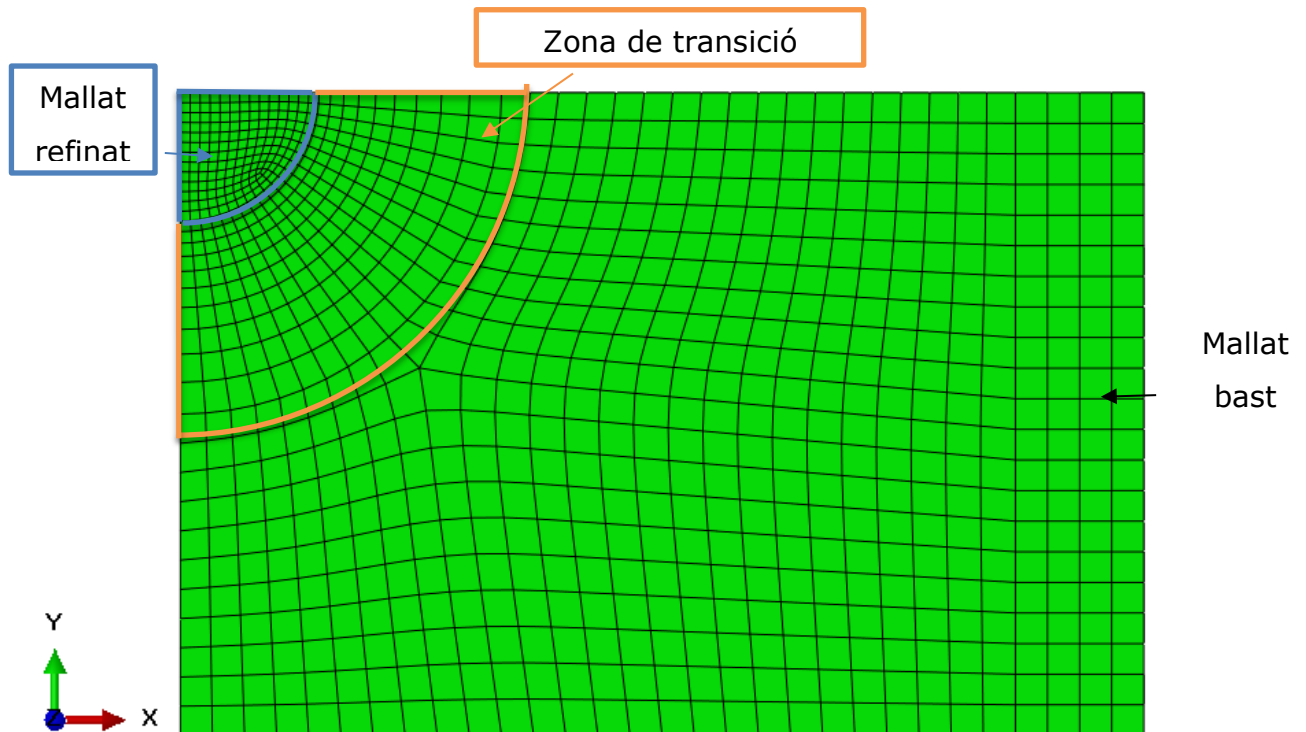


*Figura 31: Element de 8 nodes.*

Cada element té una capacitat diferent de funcionament per desplaçaments fora del pla. Per tal d'assegurar un bon funcionament s'ha d'utilitzar un cert nombre d'elements en el gruix de cada part tal com s'explica en la referència [1].

- Continuum Shell (SC8R): 1 element en el gruix.
- C3D8: 5 elements en el gruix.
- C3D8I: 2 elements en el gruix.

El mallat s'ha generat de manera que en la zona on s'hi ha de produir la delaminació, el mallat és més refinat. A mesura que augmenta la distància a l'insert es van utilitzant elements més grans. Els elements d'aquest model són sòlids 3D de tipus C3D8, ja que aquest model s'ha generat distingint cada làmina individualment i per tant hi haurà com a mínim 16 elements en el gruix.



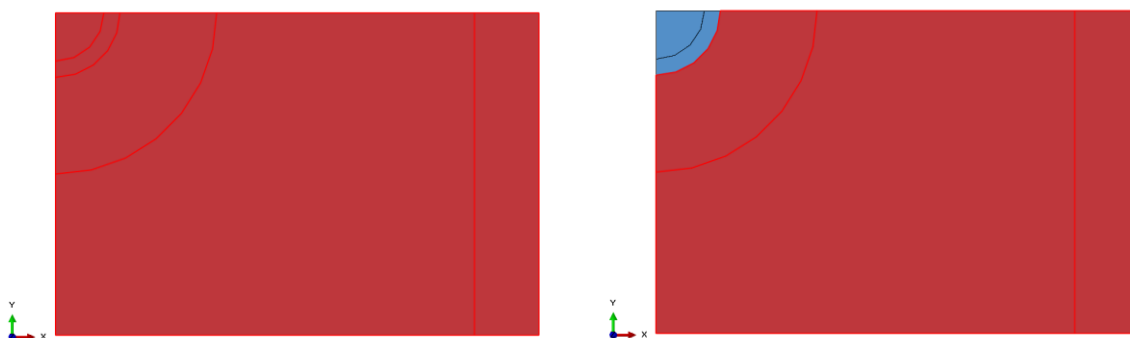
*Figura 32: Mallat del primer model.*

#### **6.1.4 Interfícies cohesives**

El contacte entre les capes del material compòsit s'han definit a través de la subrutina desenvolupada per AMADE anomenada UINTER. En aquesta es defineixen parells de superfícies de contacte on s'apliquen les condicions dels cohesius. De cada parell de superfícies n'hi ha una definida com a superfície mestra i una altra com a superfície esclava. Aquesta distinció a l'hora de definir les superfícies és important, ja que els resultats dels càlculs relacionats amb les interfícies cohesives es calculen per la superfície esclava, és a dir, que la superfície esclava ha de ser aquella on es vulguin visualitzar els resultats de manera més còmode.

Hi ha un parell de contacte de superfícies cohesives per a totes les capes. En total hi ha 15 parells de contactes per als models de 16 capes i 23 parells de contactes pels models de 24 capes. La zona amb l'insert de tefló on se simula la delaminació inicial no conté cap superfície de contacte cohesiva, tot i així, en aquesta zona s'ha definit una superfície de contacte normal sense tenir en compte el fregament. Aquest contacte ha d'evitar que la part de la placa sense cohesius pugui entrar dintre altres parts del model quan volem que es produeixi un contacte entre les capes.

En la Figura 33 es mostra la comparació entre les superfícies cohesives de les capes normals amb la capa on s'hi troba la delaminació inicial.



*Figura 33: Superfície cohesiva d'una capa normal (esquerra) vs la capa amb la delaminació inicial (dreta)*

#### **6.1.5 Resultats preliminars.**

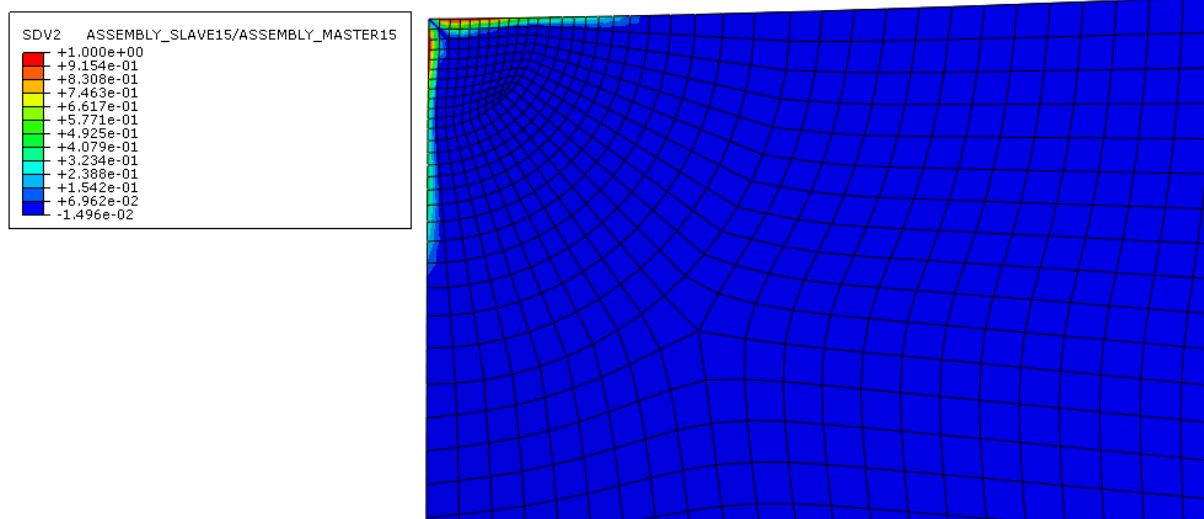
Durant els assajos s'ha trobat que aquest demostrador té un comportament inesperat. Mentre que s'esperava que la delaminació pels assajos succeís primer en la zona amb l'insert introduït, s'ha trobat que hi ha altres capes que comencen a delaminar abans. Quan això succeeix, el model arriba a sofrir grans deformacions sense que la capa central arribi a delaminar mai. Per exemple, en un dels assajos utilitzant la configuració 2 es pot veure si s'observa la variable de dany que la primera interfície en sofrir danys és la que hi ha entre les capes 15 i 16, és a dir, la interfície més externa del demostrador (Taula 11).



| PARELL DE<br>CONTACTE | SDV 2    |
|-----------------------|----------|
| 1-2                   | 5.48E-01 |
| 2-3                   | 2.88E-01 |
| 3-4                   | 5.75E-03 |
| 4-5                   | 9.88E-03 |
| 5-6                   | 6.48E-03 |
| 6-7                   | 1.02E-03 |
| 7-8                   | 4.03E-02 |
| 8-9                   | 1.02E-01 |
| 9-10                  | 8.06E-01 |
| 10-11                 | 4.38E-01 |
| 11-12                 | 3.36E-01 |
| 12-13                 | 2.61E-01 |
| 13-14                 | 5.73E-01 |
| 14-15                 | 5.95E-01 |
| 15-16                 | 1.00E+00 |

*Taula 11: Valors de dany en les interfícies cohesives.*

La delaminació que es genera en aquesta interfície no té una forma que permeti veure el seu creixement clarament i no està influït per la geometria de l'insert de tefló. El seu creixement és molt limitat i només creix la delaminació en els extrems del model.



*Figura 34: Delaminació en la última interfície.*

Per tal de solucionar aquest problema s'ha considerat la possibilitat de desplaçar la delaminació inicial del model en una altra capa diferent de la central per tal que realment sigui la capa amb aquesta delaminació la primera a danyar-se. Amb aquest canvi s'ha de tenir en compte que les diferents configuracions proposades canvien quina és la interfície del model sota més esforços i que per tant cadascuna de les configuracions hauria de tenir la seva delaminació inicial en una capa diferent. Calcular quina capa és la crítica per la delaminació per a cada configuració suposa un temps important, i a més, és possible que durant l'assaig es danyessin altres interfícies properes quan s'ha d'assegurar durant l'assaig que només creixi la delaminació en la capa desitjada.

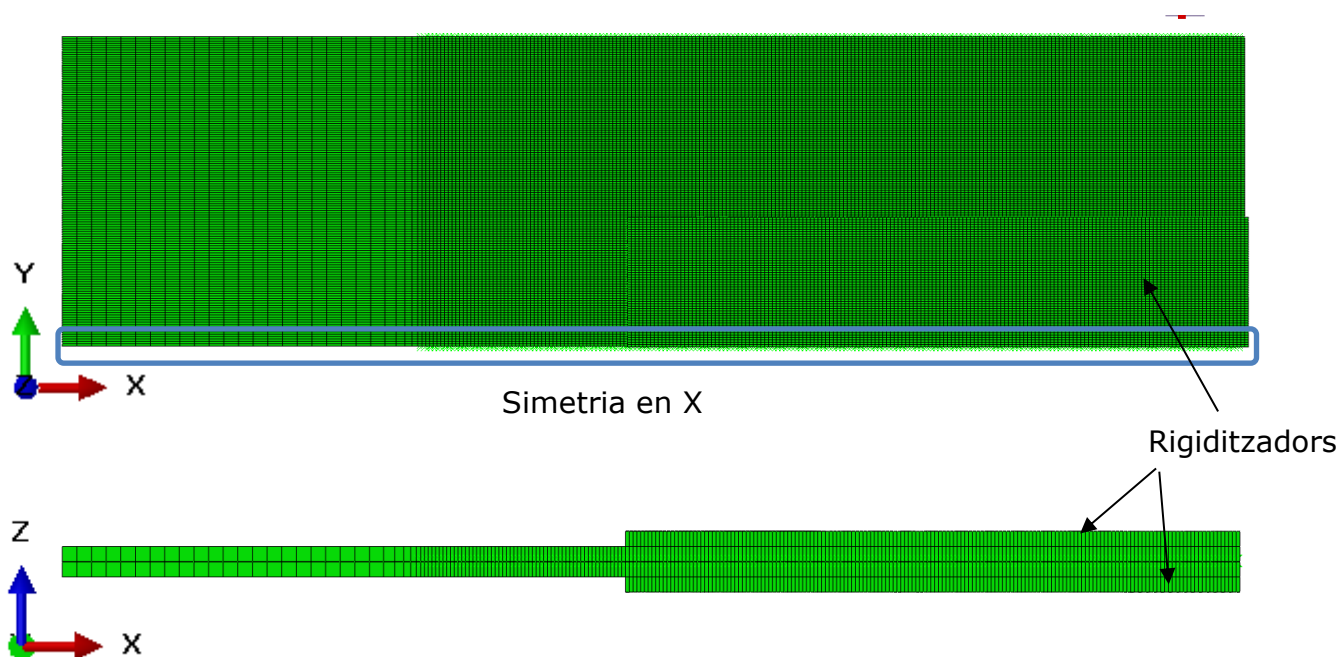
Per aquesta raó i altres problemes que han sorgit en el comportament del model, com ara grans deformacions en els elements i la impossibilitat que alguns models funcionin per la seva mida excessiva, s'ha decidit no utilitzar aquest demostrador. El model del segon demostrador és el que s'ha utilitzat per obtenir-ne els resultats esperats.

## 6.2 Segon model

### 6.2.1 Geometria i elements.

A diferència del primer model, aquest model s'ha generat íntegrament node a node sense utilitzar les eines de modelat 3D d'Abaqus. Per aquesta raó totes les imatges disponibles de la geometria apareixen amb el model mallat.

La geometria del model és la que es pot veure representada en la Figura 24 pintada de color blau. Aquest model abasta la meitat del demostrador de manera que s'hi aplica simetria en l'eix X per tal de simular el demostrador complet.



*Figura 35: Geometria del segon model.*

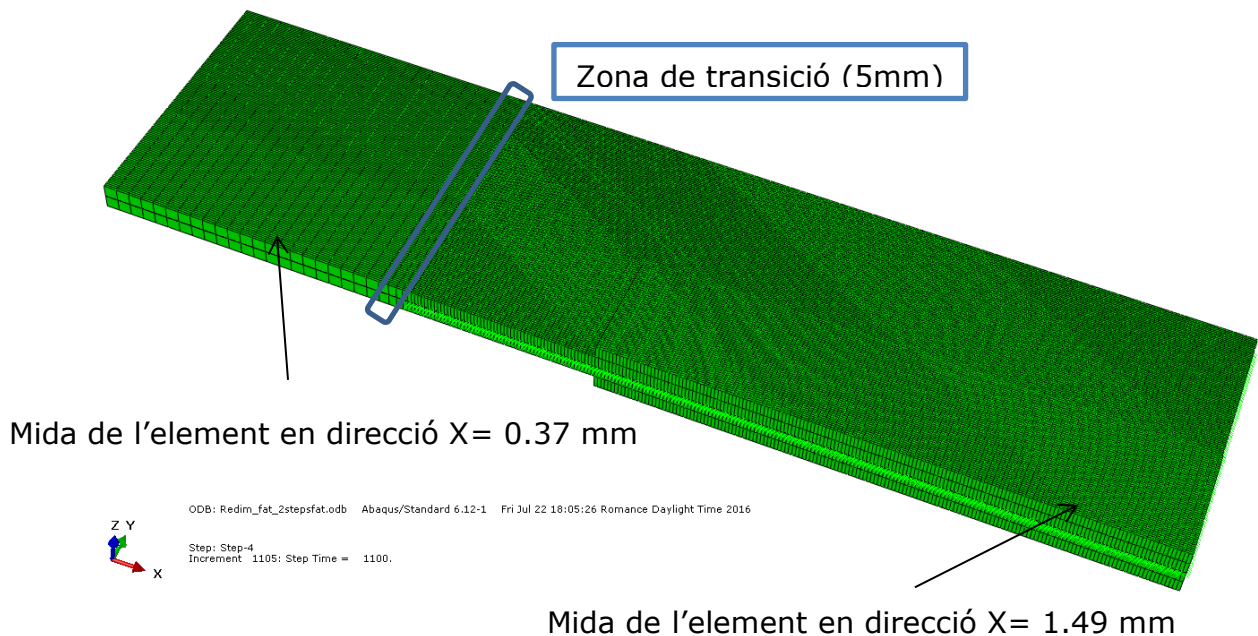
Per tal d'utilitzar la menor quantitat d'elements possibles en el model cada element abasta el gruix de més d'una làmina. Per tal que es puguin captar els desplaçaments fora del pla s'utilitzaran elements tipus SC8R.

Una de les condicions perquè la delaminació es capti correctament és que hi hagi almenys tres elements en la longitud de la zona cohesiva. La longitud de la zona cohesiva es defineix com la distància entre la zona on s'està començant a produir la delaminació i la zona on els cohesius estan totalment trencats. A efectes pràctics significa que la longitud cohesiva és la zona representada per la variable de dany quan pren un valor entre 0 i 1.

S'ha utilitzat un mallat més bast per a la zona amb la delaminació inicial, ja que en aquesta zona no hi ha elements cohesius. La mida dels elements en aquesta zona és de 1.49 mm en la direcció Y i 0.37 mm en la direcció X.

La zona on s'hi troben els elements cohesius s'ha mallat amb una mida d'element de 0.37 mm tant en la direcció X com en Y.

Els 5 mil·límetres anteriors a l'inici de l'aparició dels elements cohesius actuen com a zona de transició entre el mallat més gran amb el mallat refinat. Cada part té un sol element en el seu gruix, havent-hi així dos rigiditzadors amb un element en el gruix i la placa dividida en dues parts amb 2 elements en total.



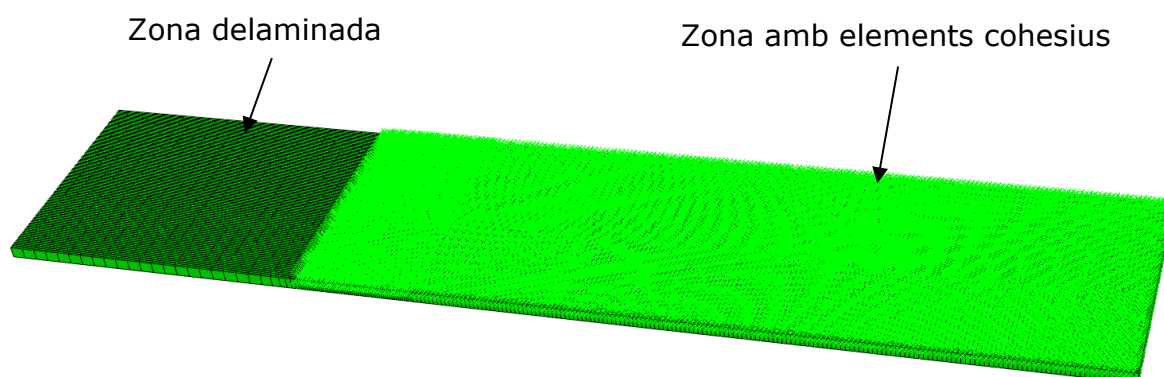
*Figura 36: Mida dels elements del segon model.*

### 6.2.2 Elements cohesius

Per als càlculs dels assajos a fatiga s'ha utilitzat una subrutina desenvolupada per el grup d'AMADE anomenada UEL. En aquesta subrutina les propietats de les interfícies cohesives han de ser definides mitjançant elements de gruix nul.

Els elements cohesius es defineixen completament en el codi del programa i no estan basats en cap element de la llibreria existent. Són elements de 8 nodes sense gruix. En l'Annex A es mostra tot el codi emprat per dissenyar el model on s'hi pot veure la definició dels elements.

La zona delaminada no conté aquests elements cohesius, tal com es mostra en la Figura 37, on s'hi pot veure la part inferior del demostrador on la zona amb els elements cohesius està ressaltada. Com ja s'ha descrit anteriorment no s'ha col·locat cohesius entre les plaques de compòsit i els rigiditzadors per tal de reduir el temps de càlcul necessari.

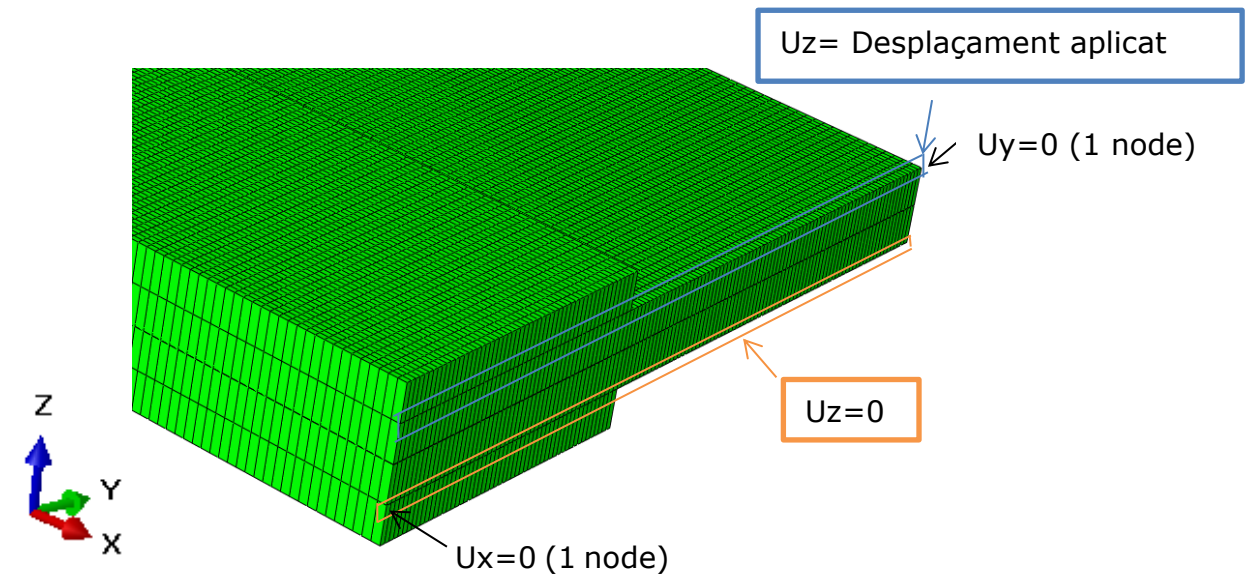


*Figura 37: Situació dels elements cohesius.*

### **6.2.3 Condicions de contorn**

#### Configuració 1: Obertura en mode I.

S'han aplicat les condicions de contorn descrites per la primera configuració. S'ha restringit el desplaçament vertical de l'extrem de la placa mentre que s'aplica un desplaçament vertical en l'extrem superior. L'extrem superior també està restringit en la direcció Y per evitar delaminacions en mode II. Un node de l'extrem inferior s'ha restringit en la direcció X per evitar moviments fora del pla.



*Figura 38: Condicions de contorn del segon model, primera configuració.*

#### Configuració 2: Obertura en mode II.

Tota la cara encastada s'ha restringit en la direcció X i un dels seus nodes en la direcció Y. A més d'aquestes restriccions també s'ha inclòs una tercera restricció en els elements cohesius de la cara encastada. Per evitar que aquests elements es puguin desplaçar s'han restringit en la direcció Z.

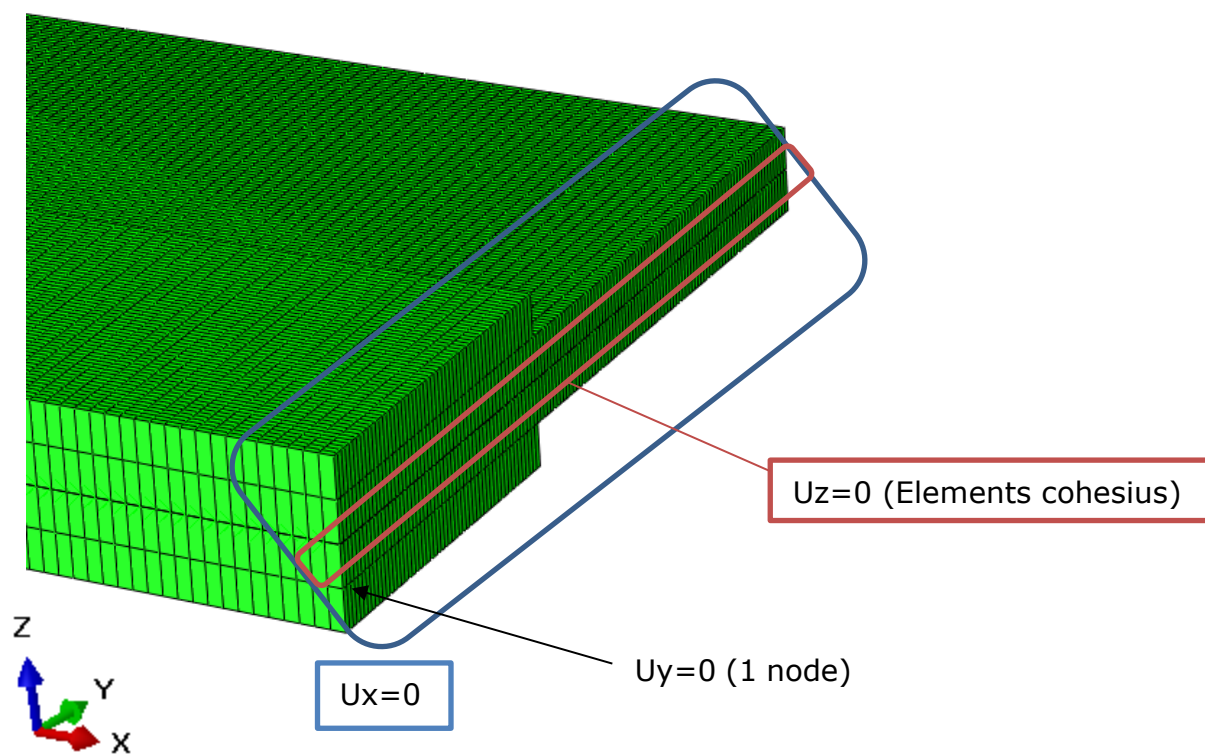


Figura 39: Condicions de contorn la configuració 2 (1)

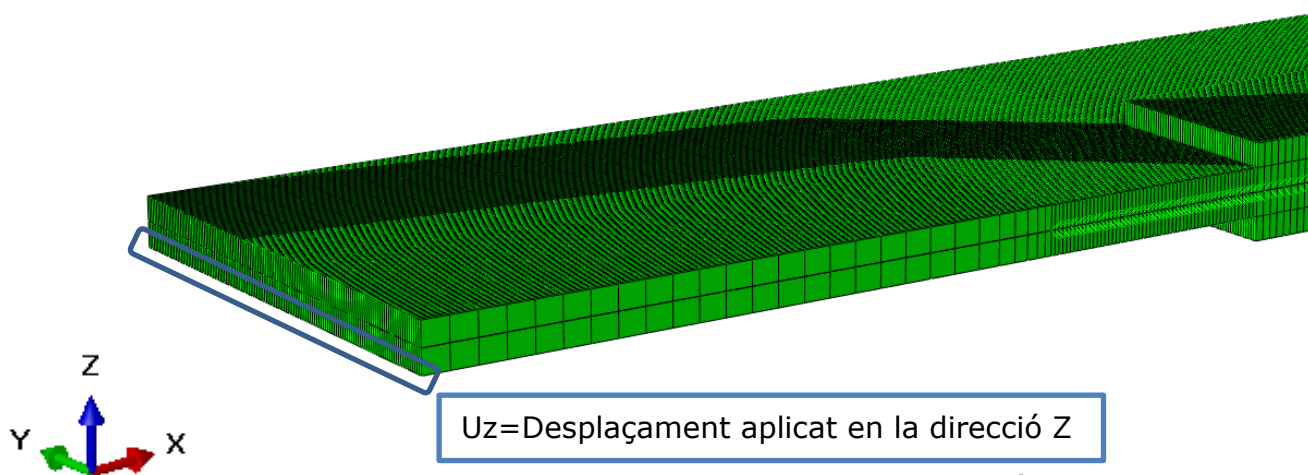


Figura 40: Condicions de contorn la configuració 2 (2)

#### 6.2.4 Dimensionament i material dels rigiditzadors.

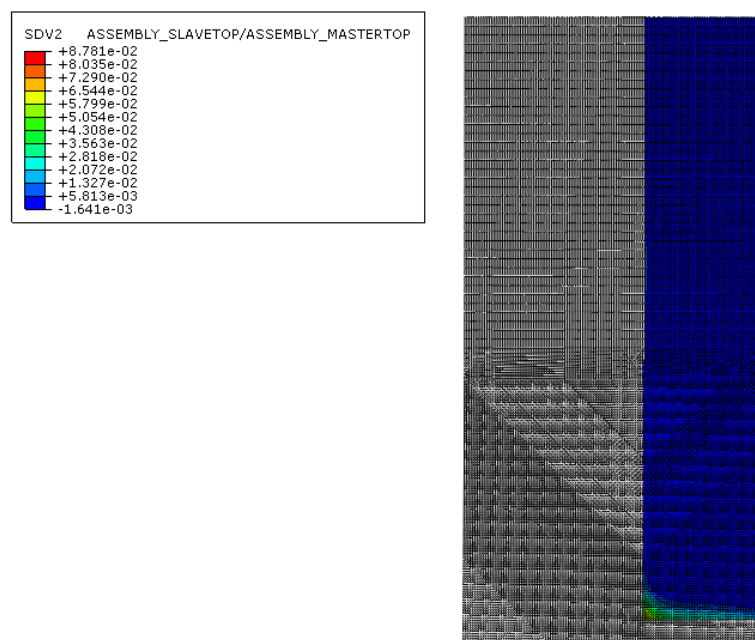
Per tal de dimensionar el gruix dels rigiditzadors s'han dut a terme diversos assajos estàtics. D'aquests assajos se n'ha extret la corba força contra desplaçament i el valor màxim de la tensió de Von Mises.

En primer lloc s'ha assegurat que les tensions que pateixen les interfícies de les plaques no puguin produir delaminacions. Per això s'ha creat un model amb interfícies cohesives entre la pell del panell de material compòsit i els rigiditzadors.



D'aquest nou model s'ha pogut observar com es mostra en la Figura 41 i la Figura 42 com el dany que pateixen els rigiditzadors està concentrat en un dels extrems.

El valor de la variable és molt inferior a la unitat en tots dos casos, el que significa que els cohesius que uneixen els rigiditzadors amb els panells estan molt lluny de danyar-se. D'aquest assaig s'ha extret la conclusió que la delaminació dels rigiditzadors no és un risc a tenir en compte en els assajos amb aquest demostrador.



*Figura 41: Dany màxim durant l'assaig en els cohesius del rigiditzador superior.*



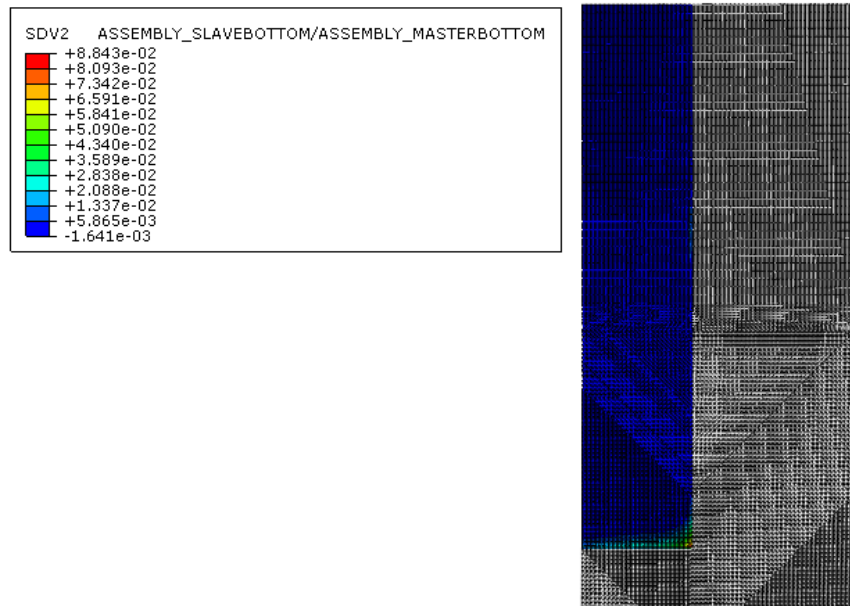


Figura 42: Dany màxim durant l'assaig en els cohesius del rigiditzador inferior.

Un cop assegurat que no es pugui produir la delaminació dels rigiditzadors s'ha procedit a buscar un gruix adequat pels rigiditzadors. S'han calculat tres gruixos diferents, primer utilitzant els rigiditzadors d'acer. Els gruixos estudiats han sigut de 0.5 mm, 0.25 mm i 0.8 mm. En la Figura 43 es mostren les corbes força desplaçament per a aquests tres gruixos.

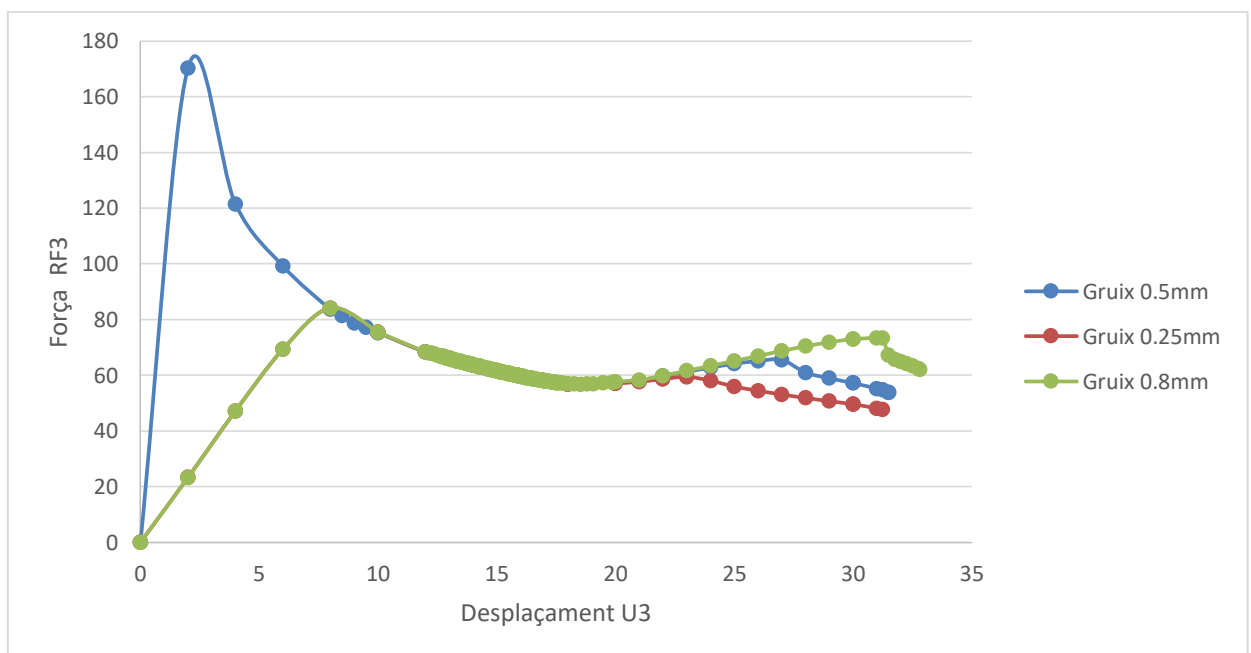
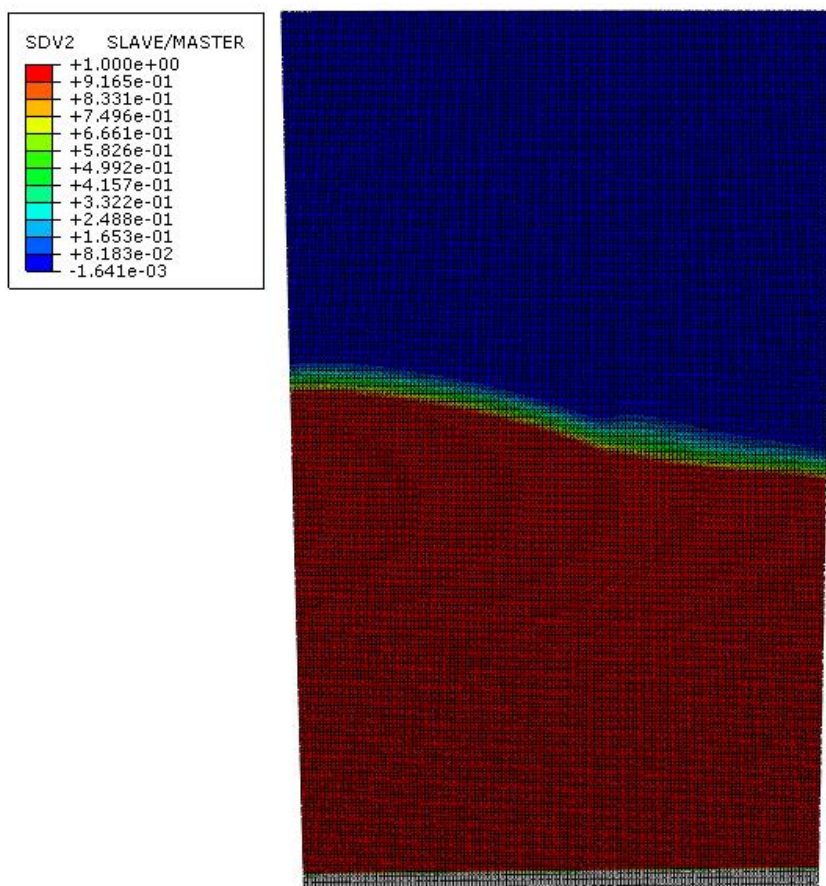


Figura 43: Corbes força-desplaçament per a diferents gruixos dels rigiditzadors.

En tots tres assajos s'ha aconseguit que la delaminació prengui una curvatura de manera que l'obertura de la placa és més gran en la part sense el rigiditzador. La delaminació avança a més velocitat per la part sense rigiditzar tal com es veu en la Figura 44.

La mida de rigiditzador que ha proporcionat els canvis més importants en la direcció del front de delaminació ha estat la de 0.8 mm de gruix.



*Figura 44:Avanç de la delaminació per un rigiditzador d'acer de 0.8mm.*

Seguidament s'ha comprovat si s'excedeix el seu límit elàstic. La tensió que pateixen els rigiditzadors és més elevada pels gruixos més grans. Les tensions de Von Mises calculades són bastant elevades tot i que en cap cas sobrepassen el valor del límit elàstic del material. En el cas de l'alumini la tensió màxima calculada és de 178 MPa mentre que s'ha calculat el seu límit elàstic en 336.79 MPa en l'assaig de tracció.

Aquests valors disten considerablement pel que es considera que els rigiditzadors no treballaran mai de manera plàstica.

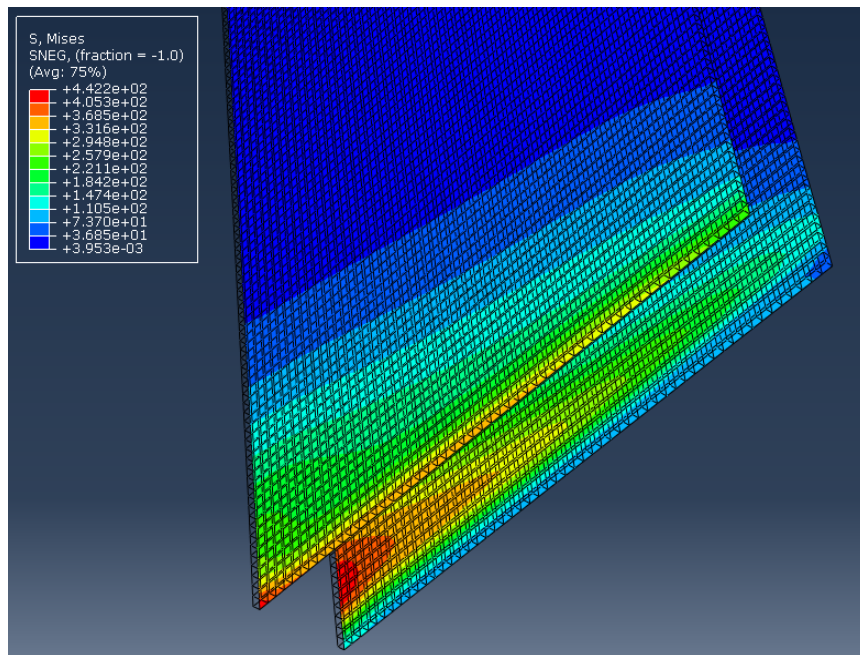


Figura 45: Tensió de Von Mises (MPa) en els rigiditzadors d'acer de 0.25mm.

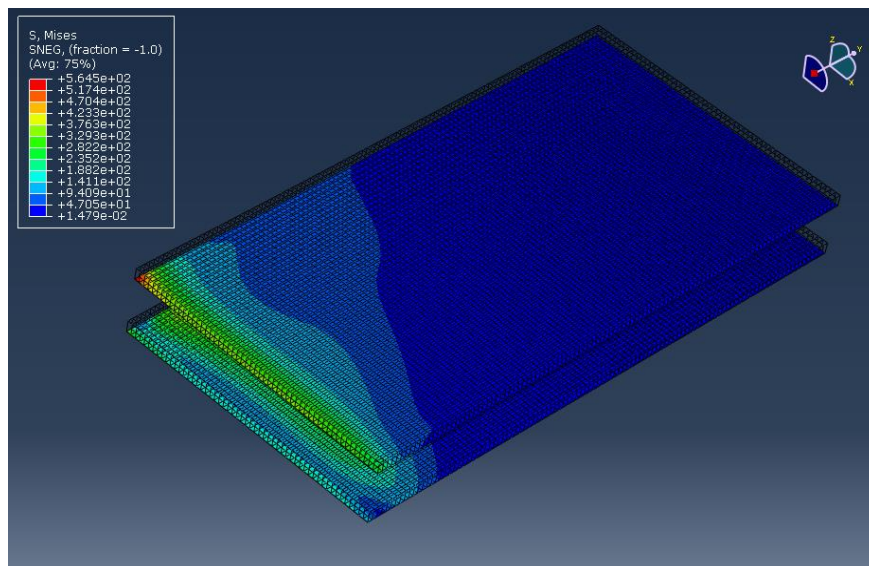
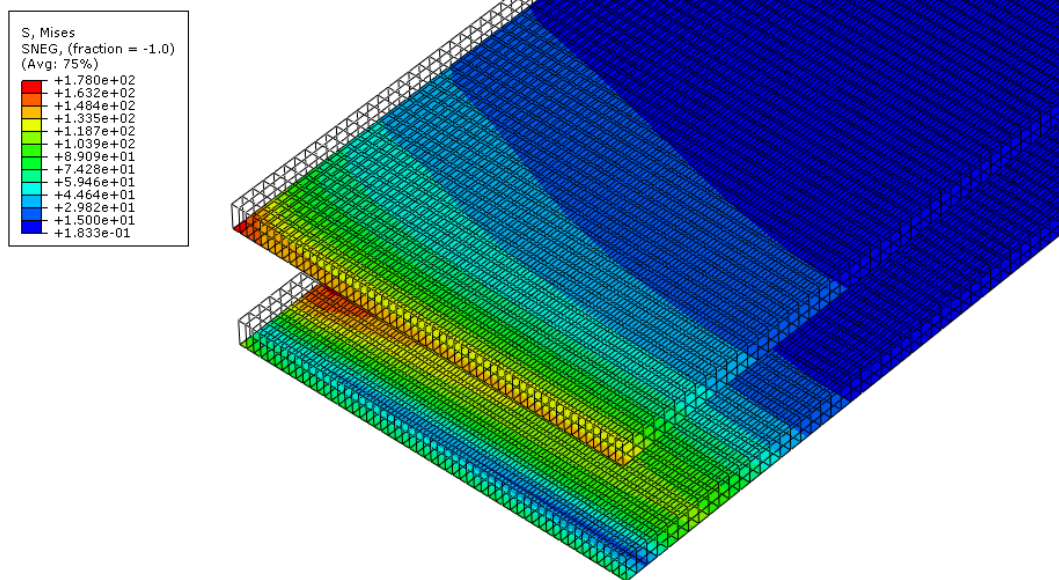


Figura 46: Tensió de Von Mises (MPa) en els rigiditzadors d'acer de 0.8mm



*Figura 47: Tensió de Von Mises (MPa) pels rigiditzadors d'alumini de 0.8mm.*

Pel que fa als rigiditzadors de material compòsit presenten una rigidesa molt més elevada que l'alumini, fet que fa que menys gruix sigui necessari per assolir els mateixos resultats. Els rigiditzadors dissenyats finals són:

- Rigiditzadors d'alumini de 0.8 mm de gruix.
- Rigiditzadors d'acer de 0.8 mm de gruix.
- Rigiditzadors de material compòsit de 0.3 mm de gruix.

El raonament final que s'ha utilitzat està basat en els mètodes d'inspecció que s'utilitzaran en l'assaig del demostrador explicats en l'apartat de mètodes d'inspecció. Les plaques de material compòsit permeten una millor visibilitat al usar radiografies en l'assaig respecte a els altres dos materials. Les plaques de material compòsit també permetran millor visibilitat per les mateixes raons en el cas que s'utilitzi el mètode de la tomografia per a examinar els resultats. Si bé també és possible realitzar la tomografia amb els rigiditzadors dels altres materials, utilitzar rigiditzadors de compòsits permetrà evitar problemes que poguessin sorgir per culpa la interferència amb la radiació dels altres materials. Per aquests motius i que ja es disposa del material necessari per a construir els rigiditzadors, s'ha decidit utilitzar els rigiditzadors de material compòsit.

## 7 RESULTATS

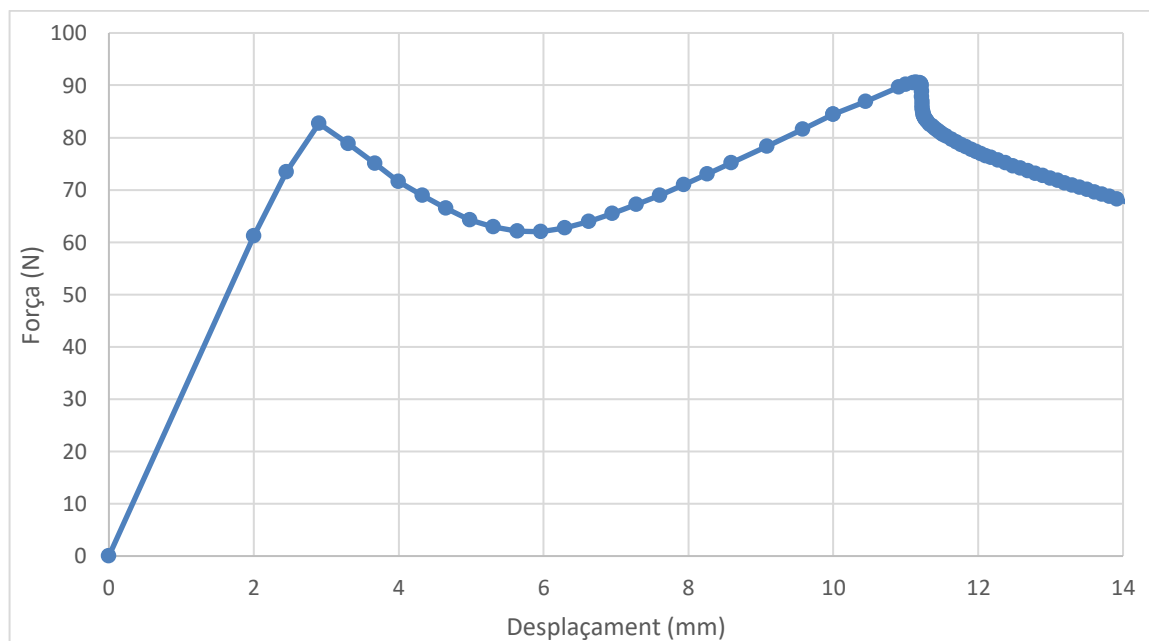
En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts pel model d'elements finits definitiu. El model final utilitzat és el corresponent al segon demostrador dissenyat, que utilitza dos rigiditzadors de 0.3 mm de gruix de material compòsit.

### 7.1 Assaig estàtic

#### Configuració 1

En l'assaig estàtic s'ha realitzat fins a arribar a un desplaçament total de 14 mm. En la corba força-desplaçament de la Figura 54 es pot veure com durant l'obertura la placa segueix un comportament lineal fins a arribar al 2.9 mm de desplaçament. En aquest punt es comença a produir la delaminació i cau la resistència al desplaçament de la placa.

A partir dels 6 mm es comença a produir la trobada entre el front de delaminació i la zona amb els rigiditzadors. En aquest la placa és més rígida i per tant la força necessària per a generar el dany és més elevada.



*Figura 48: Corba força-desplaçament de l'assaig estàtic per a la configuració 1*



Si s'observa el progrés de la delaminació més enllà dels sis mil·límetres de desplaçament, arriba un punt on l'obertura agafa un canvi sobtat de velocitat. Aquest canvi es produeix entre els 7,7 i 7,8 mil·límetres de desplaçament, en la Figura 49 es mostra el progrés que ha realitzat la delaminació abans del canvi sobtat, i la Figura 50 mostra com queda a partir d'aquest canvi. La zona del front de delaminació que duia una velocitat més lenta gràcies a la rigidesa addicional en la placa proporcionada pels rigiditzadors avança de manera brusca fins a sobrepassar la resta de delaminacions.

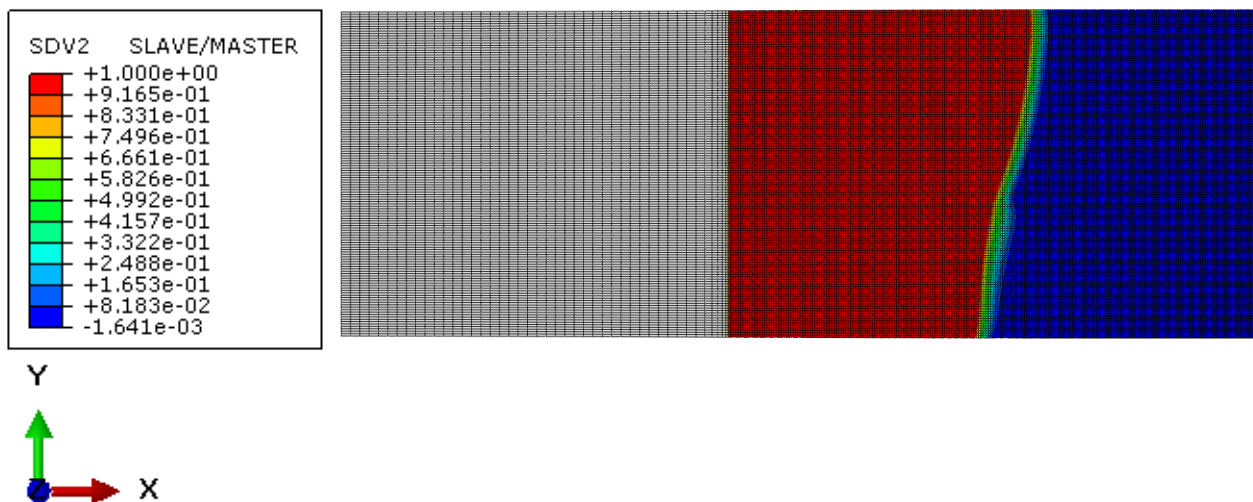


Figura 49: Progrés de la delaminació per un desplaçament de 7.751mm

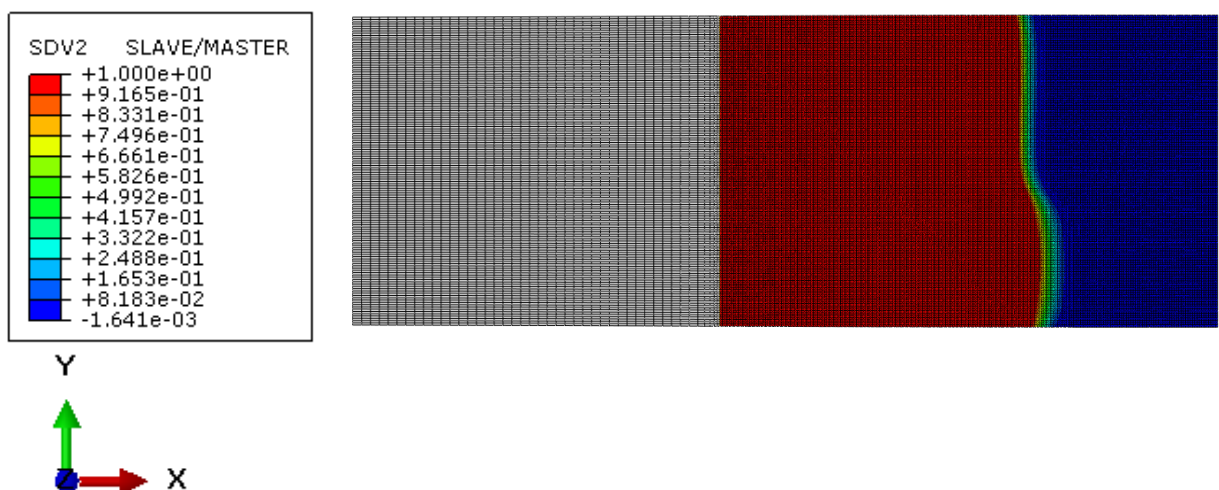
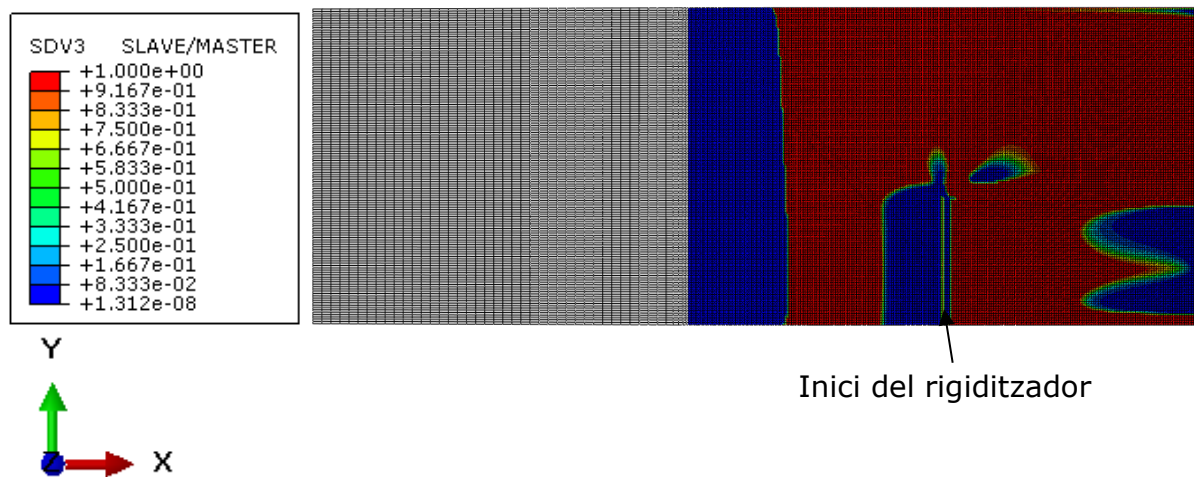


Figura 50: Progrés de la delaminació per un desplaçament de 7.876mm

Aquest comportament és degut al fet que s'ha anat produint una acumulació d'energia en la zona de la placa rigiditzada, ja que no es permetia que la delaminació avancés en aquesta part. Al augmentar l'energia ha arribat un punt on s'ha sobrepassat l'energia crítica per a danyar els elements. Al danyar-se els elements cohesius la delaminació aconsegueix sobrepassar una zona extremadament rígida i l'energia necessària per danyar els elements següents és inferior a l'energia acumulada. D'aquesta manera el front de delaminació pot avançar molt ràpidament fins a tornar a trobar un punt d'equilibri on l'energia crítica torni a ser superior a l'energia actual, que anirà disminuint a mesura que s'obri la delaminació, provocant aquest efecte en el front de delaminació.

En els resultats observats s'ha vist com el front de delaminació realment modifica la seva forma tal com s'havia previst. A continuació s'ha comprovat que l'obertura de la placa ocorre en el mode I tal com es pretenia amb la configuració de l'assaig (Figura 51).



*Figura 51: Mode d'obertura del model per a la configuració 1 (1)*

La variable SDV3 mostra el front de delaminació abans d'arribar a la zona amb el rigiditzador. La major part de la placa està obrint-se en el mode II excepte la zona anterior a l'inici del rigiditzador, el front principal de delaminació i l'extrem de la placa sota el rigiditzador, que estan sota esforços d'obertura en el mode I. A mesura que avança la delaminació el mode d'obertura la placa continua danyant-se majoritàriament en mode I. En la Figura 52 es mostra com continua obrint-se la placa un cop la delaminació ha sobrepassat l'inici del rigiditzador.

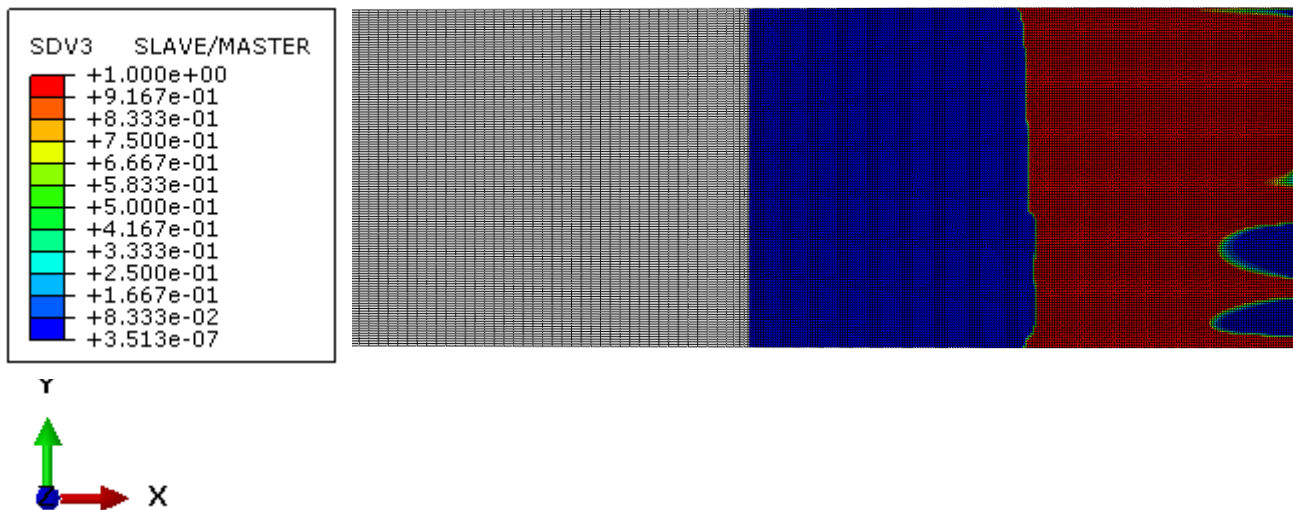


Figura 52: Mode d'obertura del model per a la configuració 1 (2)

Si s'observa el desplaçament vertical de la placa, es pot apreciar que en la zona amb el rigiditzador s'ha desplaçat menys que la resta de la placa a la mateixa longitud, pel que la placa pren una lleugera curvatura amb la mateixa forma que es correspon amb l'avanç de la delaminació. En la Figura 53 es pot veure aquest desplaçament vertical.

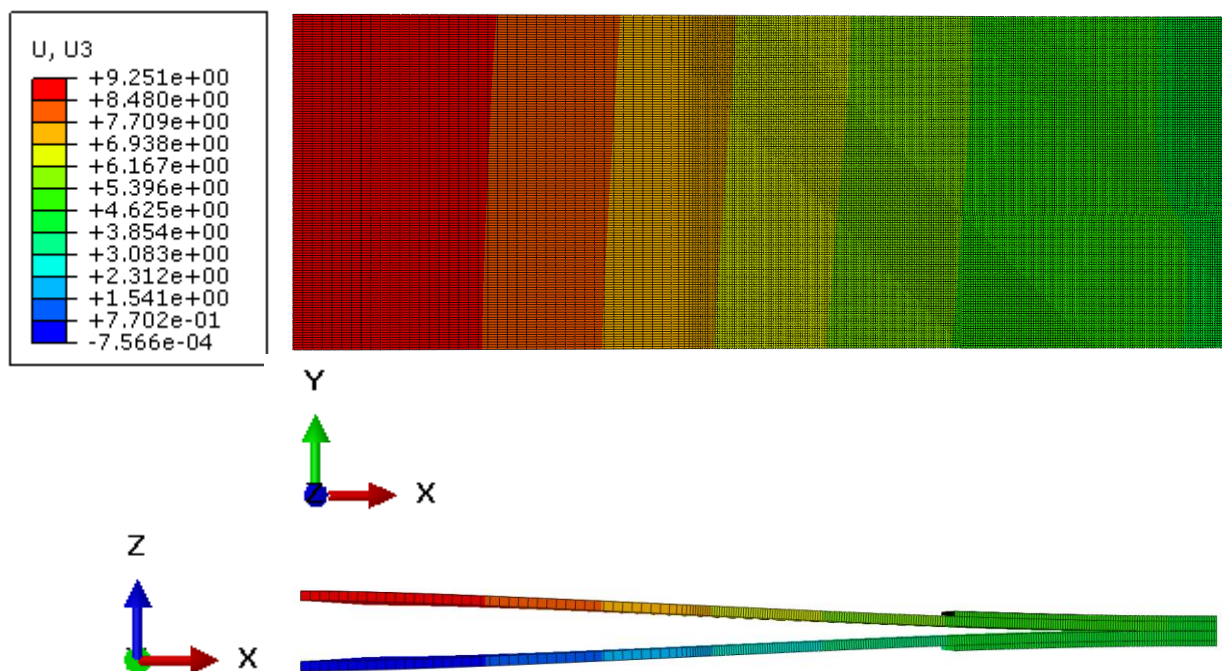


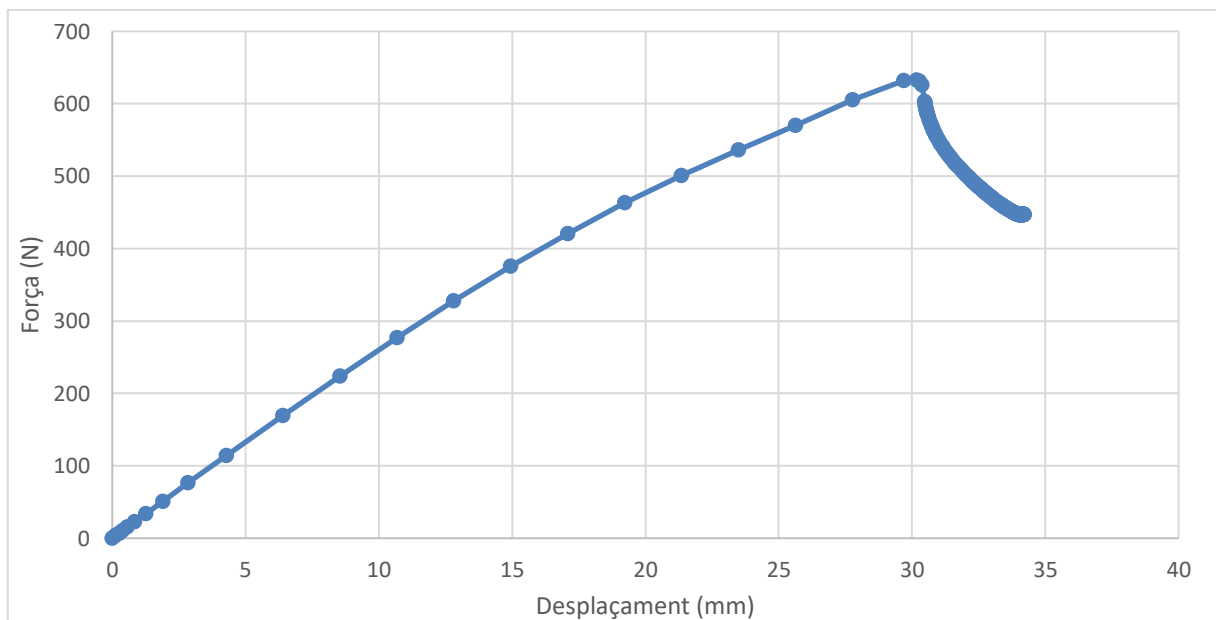
Figura 53: Desplaçament de placa (mm).



## Configuració 2

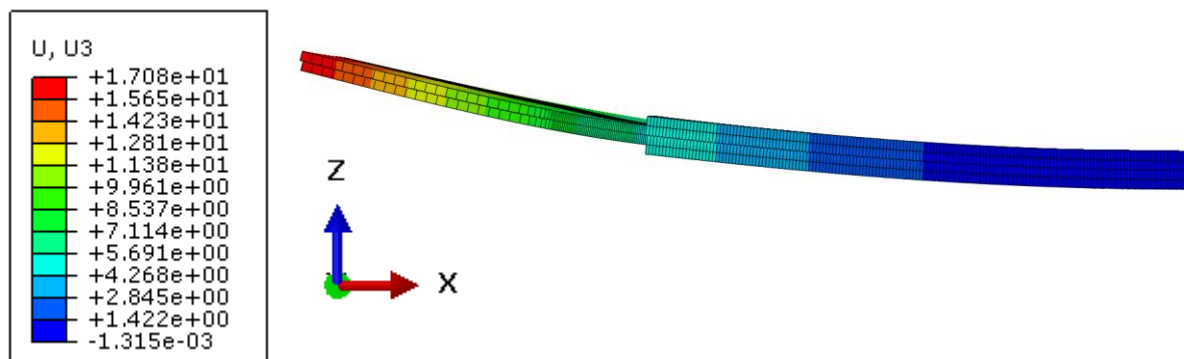
L'assaig estàtic de la segona configuració s'ha realitzat utilitzant la subrutina UEL. Un dels inconvenients d'aquesta subrutina és que les variables de dany no són visibles dins del software ABAQUS sinó que s'han de visualitzar processant els fitxers resultants de la simulació amb Matlab. Per aquesta raó només es disposa de les imatges del dany i no de la variable SDV3.

La corba força-desplaçament presenta un comportament bastant lineal fins als 30 mil·límetres de desplaçament vertical. Passat aquest punt es produeix una caiguda sobtada de la força que indica que les plaques han perdut el contacte cohesiu. Per tant en aquesta configuració l'avanç de la delaminació és més continua que en la configuració anterior. Com es pot veure les forces de càrrega d'aquesta configuració són molt inferiors a les de la primera configuració, essent així necessari aplicar només una càrrega de 630 Newtons per provocar el trencament complet dels cohesius.



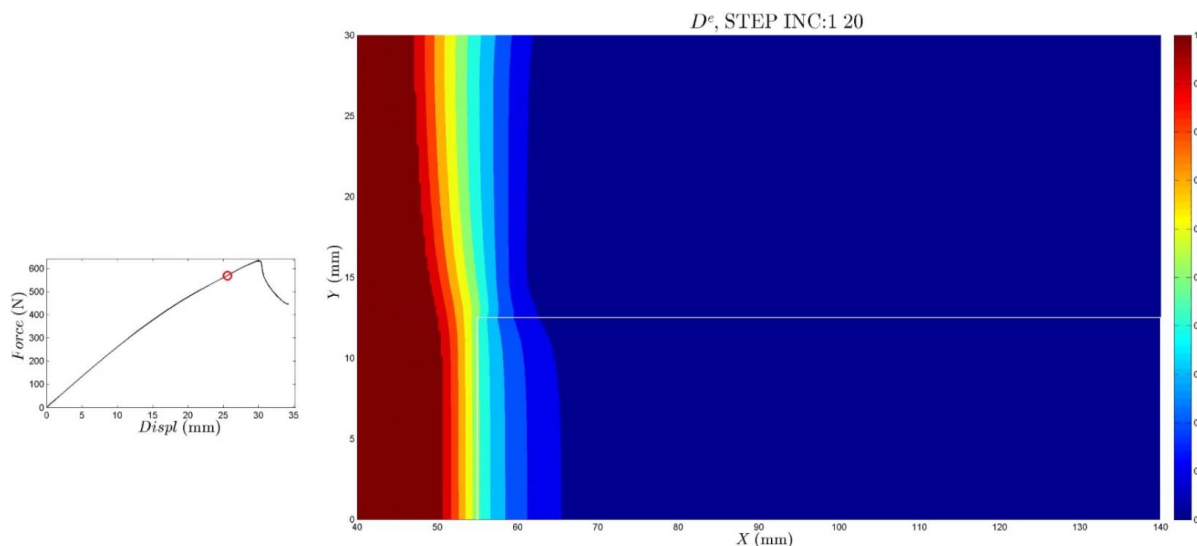
*Figura 54: Corba força-desplaçament de l'assaig estàtic per a la configuració 2*

Es pot veure que realment la placa s'ha obert en mode II visualitzant el desplaçament de la placa. La part superior del model ha avançat per sobre la part inferior de la placa de manera que es generen esforços tallants (Figura 55). D'aquest desplaçament podem deduir que el mode d'obertura serà majoritàriament en mode II.



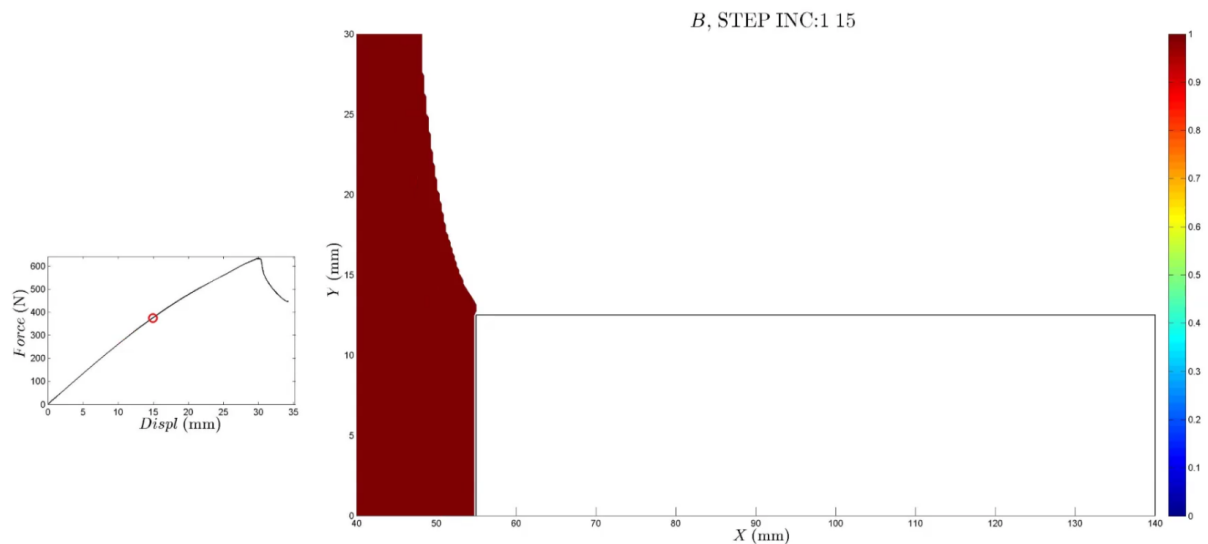
*Figura 55: Desplaçament vertical de la placa en la configuració 2*

El front de delaminació en aquest cas pren la forma contrària a la primera configuració. En la Figura 56 es veu representada interfície de la placa amb els cohesius vista des de sobre. Es pot veure com el front de delaminació s'avança per la zona on hi ha el rigiditzador.



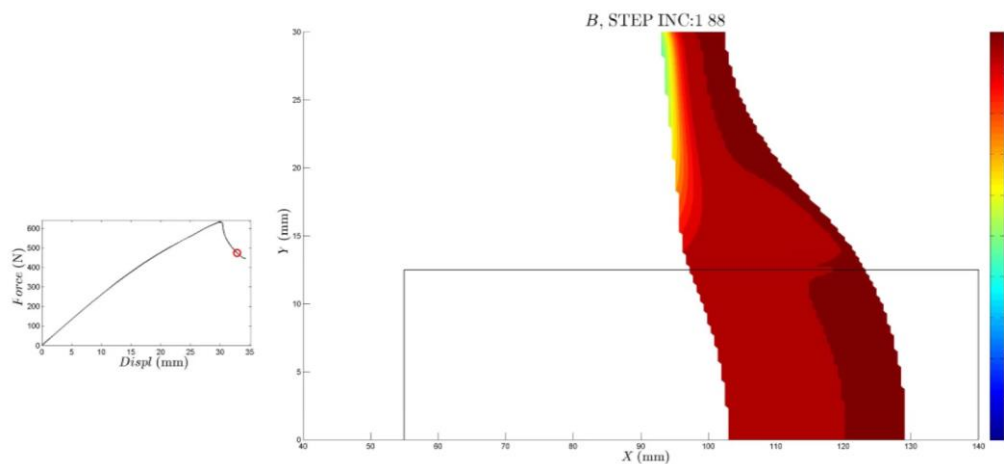
*Figura 56: Front de delaminació per a la configuració 2*

Si comprovem el mode de delaminació, veiem que efectivament és totalment en mode II. En la Figura 57 hi ha representat el mode d'obertura del front de delaminació, en aquest cas, el valor de 0 representa mode I pur i el valor d'1 representa obertura en mode II o III.



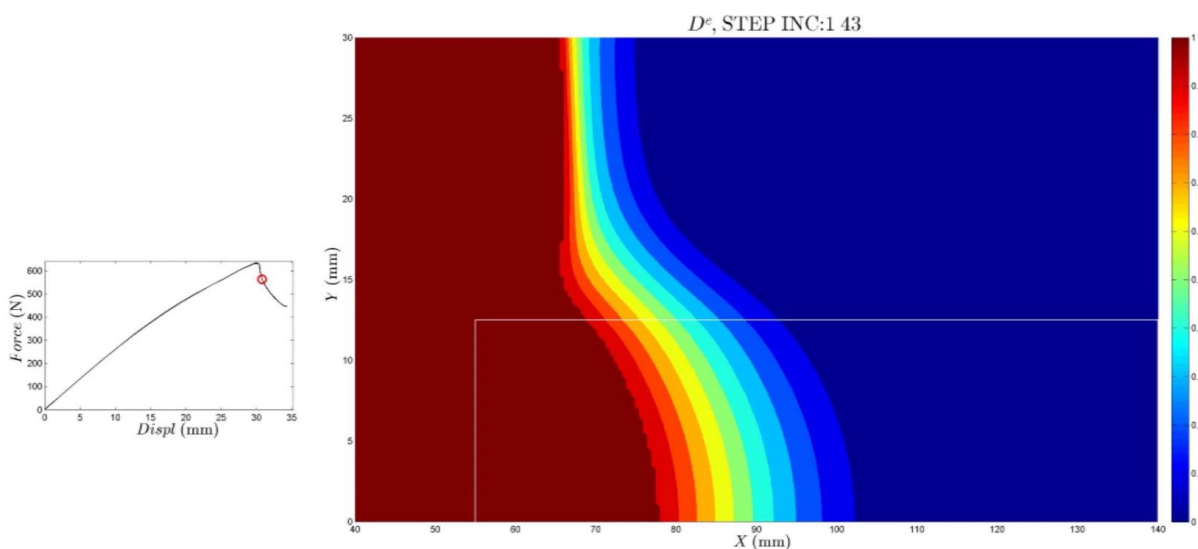
*Figura 57: Mode d'obertura de la configuració 2.*

A mesura que avança el front de delaminació apareixen esforços que causen obertura en mode mixt. Es pot veure en la Figura 58 com el front de delaminació treballa en mode mixt en la zona més allunyada del rigiditzador.



*Figura 58: Canvi en el mode d'obertura en la configuració 2.*

El front de delaminació arriba a la zona amb el rigiditzador aproximadament als 17 mil·límetres de desplaçament vertical. Un cop la delaminació ha sobrepassat la zona del rigiditzador la seva forma no canvia com en la primera configuració, sinó que continua mostrant una propagació on la zona del rigiditzador delamina abans. Al principi de sobrepassar el rigiditzador la curvatura de la delaminació pren una forma més accentuada que es va mitigant a mesura que s'aproxima al final de la placa.



*Figura 59: Front de delaminació per a la configuració 2 un cop Passat el rigiditzador.*

## 7.2 Assaig a fatiga

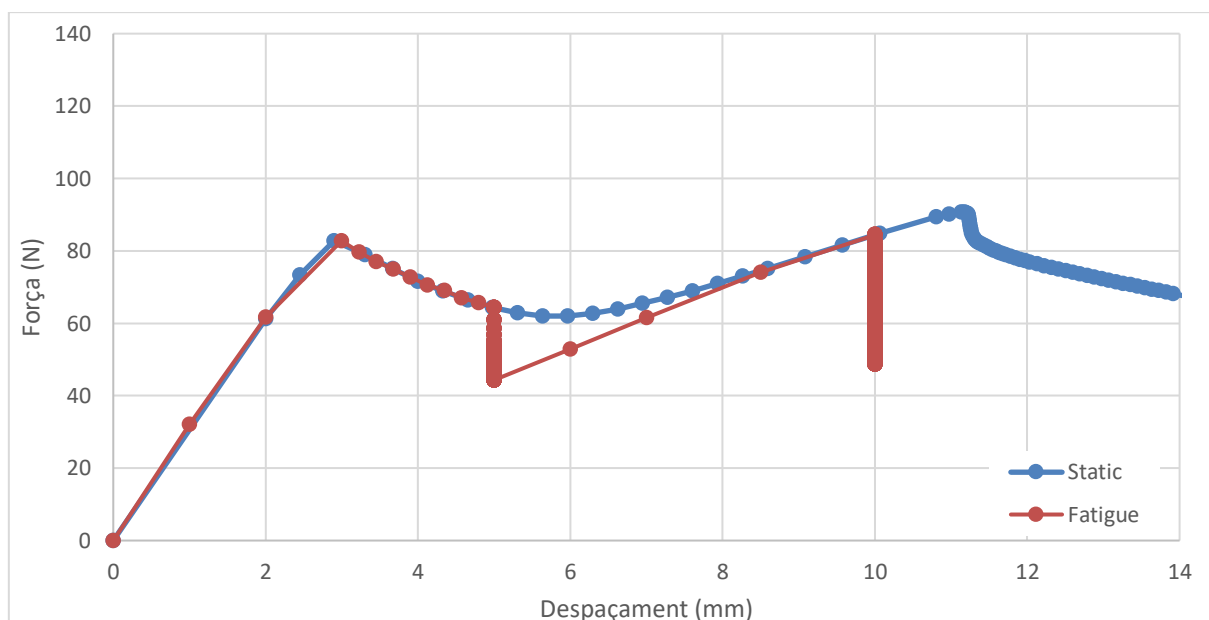
En aquest apartat es presenten els resultats de l'assaig a fatiga de les dues configuracions estudiades.

### Configuració 1

A partir del desplaçament al qual s'ha començat a propagar el front de delaminació en la primera placa s'ha escollit el desplaçament inicial del primer pas en l'assaig de fatiga. Aquest valor a més de superar els 2.9 mm en què s'ha generat el dany en l'anàlisi estàtic tampoc pot superar els 6 mm, que és la distància en què el front de delaminació es troba amb el rigiditzador. Per tant el desplaçament aplicat en el pas de càrrega ha d'estar comprés entre aquests dos valors.

El desplaçament aplicat en el pas de càrrega per tal que es pugui propagar la delaminació en l'assaig de fatiga és de 5 mil·límetres. En la Figura 60 es mostra a quina part de la corba força-desplaçament s'arriba abans de generar la càrrega cíclica. Aquest valor correspon a una càrrega d'aproximadament 70 kN.

Durant l'assaig de fatiga, aquest desplaçament inicial no ha resultat ser suficient perquè la delaminació avancés per tota la placa, de manera que s'ha canviat la configuració de l'assaig a 4 passos. Primer s'ha carregat de manera estàtica el model fins als 5 mm de desplaçament, llavors s'ha deixat que la placa delaminés fins que la velocitat de propagació del dany fos molt petita. La primera part a fatiga ha arribat fins als 2 milions de cicles aproximadament. A partir d'aquest punt s'ha tornat a carregar la placa de manera estàtica fins a arribar a un desplaçament de 10 mm, que és una mica inferior al desplaçament final abans no es danyin tots els cohesius. A partir d'aquest punt s'ha tornat a sotmetre la placa sota càrrega cíclica i s'ha observat el comportament de la delaminació.



*Figura 60: Corba força-desplaçament de l'assaig a fatiga en la configuració 1*

La delaminació durant l'assaig de fatiga pren la mateixa forma què en l'assaig estàtic. La zona en que en l'assaig estàtic es produïa una obertura brusca de la placa ara és un procés continu gràcies al fet que la càrrega de fatiga danya els cohesius sense que puguin emmagatzemar l'energia necessària per danyar els

cohesius de forma estàtica. En la Figura 61 es pot veure com la delaminació ara avança de manera contínua en la zona pròxima al rigiditzador.

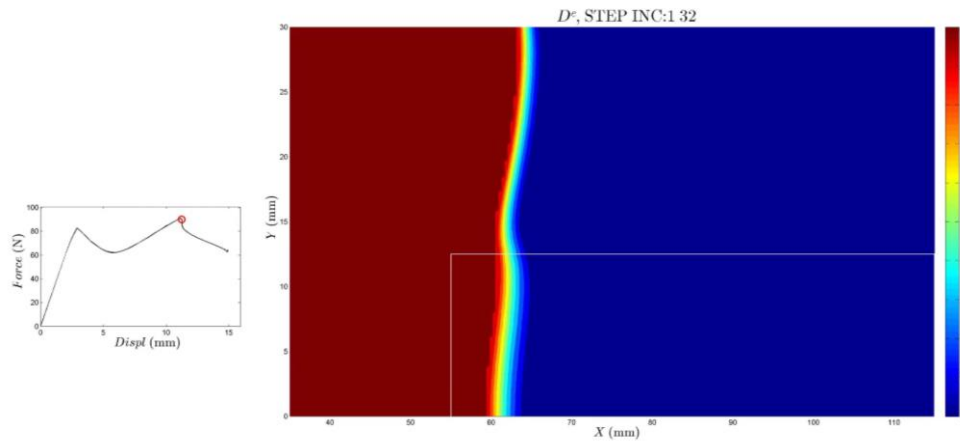


Figura 61: Procés de la delaminació en l'assaig de fatiga.

El nombre de cicles necessaris per arribar a la curvatura màxima vista en la delaminació és de l'ordre de  $2 \times 10^6$  (Figura 62). Aquest és el punt on la delaminació ha parat d'avançar i s'ha hagut de tornar a carregar la placa de manera estàtica. La simulació s'ha continuat fins a aproximadament els  $4 \times 10^6$  cicles, a partir d'aquest valor el front d'esquerra s'ha alentit de manera que ja no es produïen canvis significatius a mesura que avançaven els cicles i s'ha aturat la simulació. Es pot veure el resultat final de la delaminació en la Figura 63.

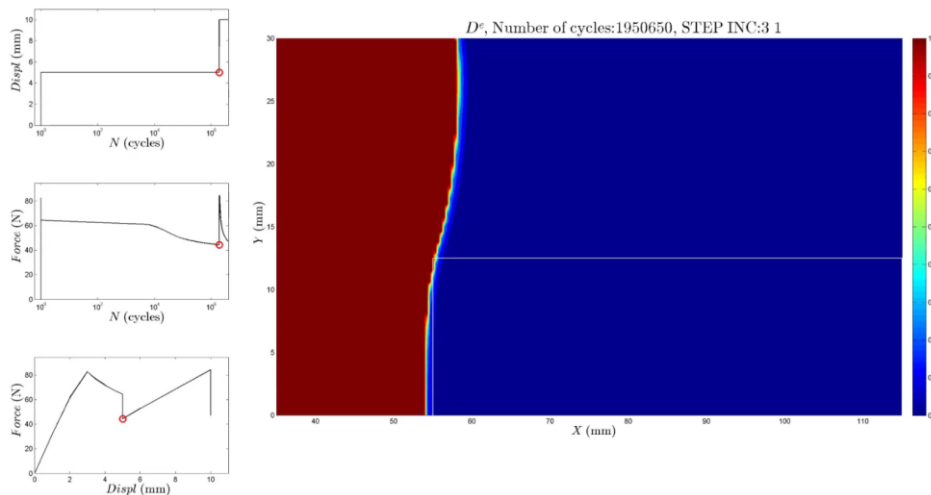
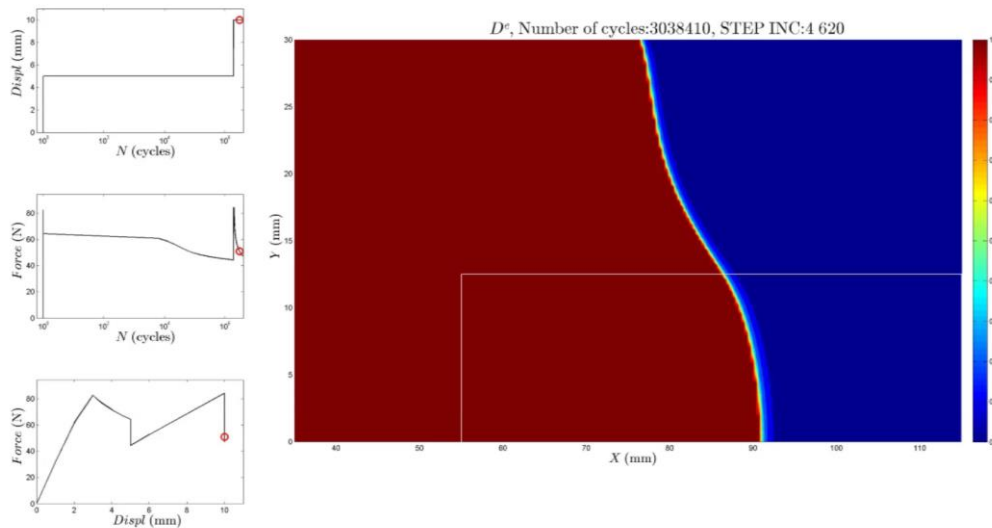


Figura 62: Cicles necessaris per arribar a la curvatura màxima de la delaminació.

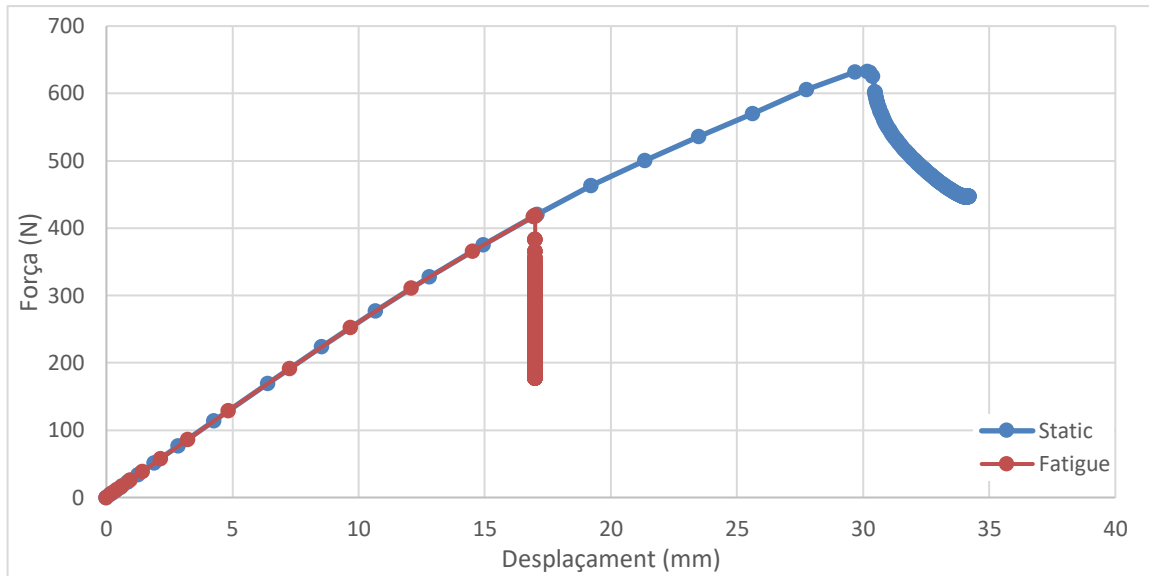


*Figura 63: Delaminació màxima amb l'assaig de fatiga per la configuració 1.*

## Configuració 2

En el mode II la longitud de la zona cohesiva és molt més llarga en la configuració anterior. Per aquesta raó durant els primers cicles en comptes d'avançar el front de delaminació imposat amb l'insert s'estén la zona cohesiva, fet que provoca que la delaminació arribi a la posició del rigiditzador abans no s'hagi format del tot.

La visualització d'aquest efecte és la generació espontània del front de delaminació en un punt a prop del rigiditzador, per tant desconeixem el moment exacte en què la delaminació inicial comença a créixer. El que podem saber és que el front de delaminació s'aproxima al rigiditzador aproximadament als 20 mil·límetres de desplaçament vertical, que correspon a una càrrega de 500 N.



*Figura 64: Corba força-desplaçament per l'assaig de fatiga de la configuració 2.*

S'ha utilitzat un desplaçament màxim de cicle de 17 mil·límetres (Figura 64) per tal d'aproximar-se al moment on la delaminació i el rigiditzador es troben. En aquesta configuració el desplaçament aplicat ha sigut suficient per aconseguir que la delaminació afectés a la majoria de la placa. La Figura 65 mostra el moment en què la curvatura de la delaminació és màxima, que ocorre aproximadament als 35000 cicles de càrrega. Els cicles totals necessaris per arribar a danyar la major part de la placa són aproximadament 110000 cicles (Figura 66).

L'ordre de magnitud dels cicles necessaris per a la segona configuració és bastant més baix que en la primera configuració, fet que caldrà tenir en compte a l'hora d'escollir el disseny final del demostrador.



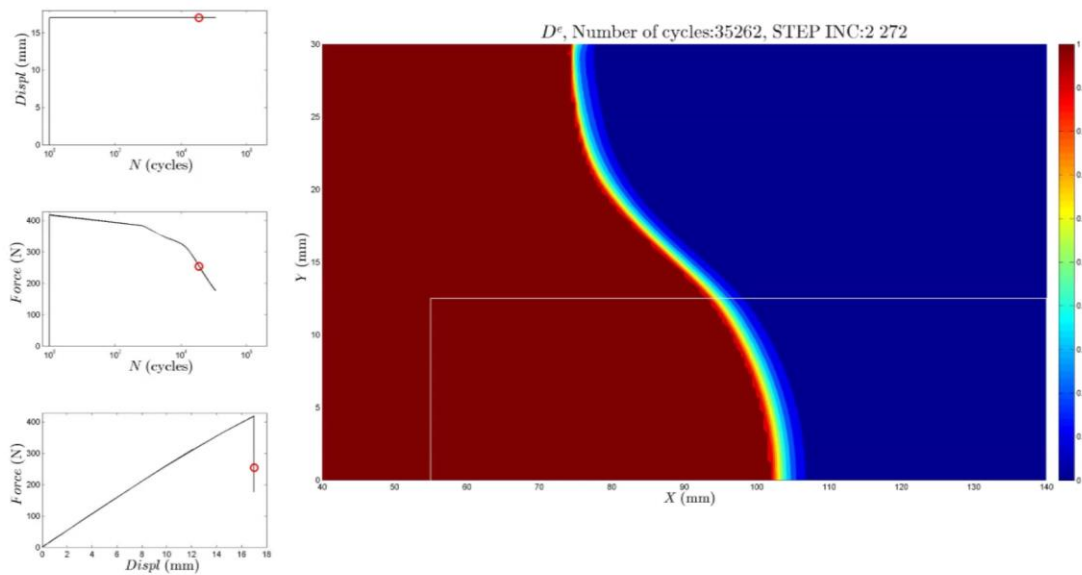


Figura 65: Curvatura màxima de la delaminació en l'assaig de fatiga de la segona configuració.

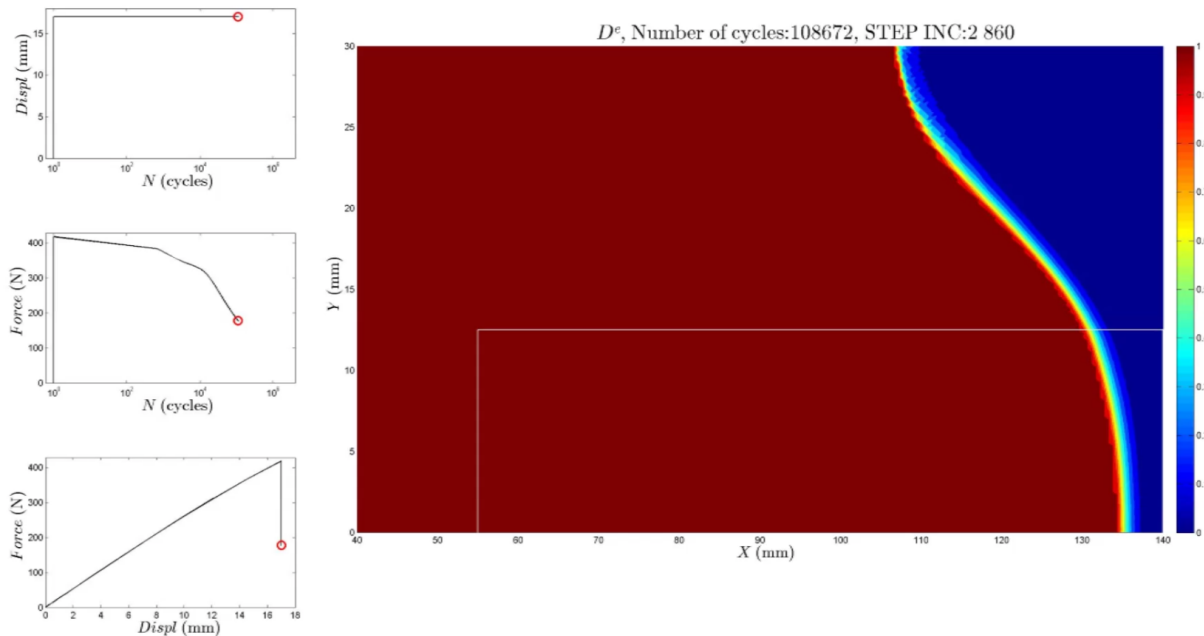


Figura 66: Delaminació màxima en l'assaig de fatiga de la segona configuració.

La Taula 12 mostra un resum dels resultats obtinguts en tots els assajos per a les dues configuracions descrites.

|                             | <i>Configuració 1</i>                |   |                   | <i>Configuració 2</i>   |                              |                     |
|-----------------------------|--------------------------------------|---|-------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|
|                             | Inici de la delaminació (1a càrrega) | Curvatura màxima delaminació (2a càrrega) | Final de l'assaig | Inici de la delaminació | Curvatura màxima delaminació | Final de l'assaig   |
| <i>Desplaçament aplicat</i> | 5mm                                  | 10mm                                      | -                 | 17mm                    | -                            | -                   |
| <i>Força aplicada</i>       | 60kN                                 | 83kN                                      | -                 | 420 N                   | -                            | -                   |
| <i>Nombre de cicles</i>     | -                                    | 2x10 <sup>6</sup>                         | 4x10 <sup>6</sup> | -                       | 3.5x10 <sup>4</sup>          | 1.1x10 <sup>5</sup> |

*Taula 12: Resultats dels assajos.*

## 8 RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost total del projecte ascendeix a un total d'**ONZE MIL DOS-CENTS VUITANTA-NOU EUROS I QUARANTA-CINC CÈNTIMS (11.289,45 €)**, IVA inclòs. Es pot veure el pressupost detallat en l'annex A.

## 9 CONCLUSIONS

En el present estudi s'ha predit el comportament estructural d'un element representatiu d'un panell rigiditzat de material compòsit corresponent a una zona de l'ala d'un avió comercial sotmès a una càrrega de fatiga mitjançant un assaig virtual. Per a la realització de la simulació s'ha utilitzat el programa comercial d'elements finits ABAQUS implementant una metodologia proposada pel grup de recerca AMADE.

S'han dissenyat dos tipus de demostradors diferents amb l'objectiu d'aconseguir un demostrador el màxim de senzill que permeti visualitzar com es va generant un front de delaminació entre les interfícies del material. Per tal de facilitar l'obertura del demostrador pel punt desitjat i també per assimilar el demostrador a un panell de material compòsit que ha estat sotmès a un assaig d'impacte es col·locarà un insert de tefló entre una de les capes de material compòsit.

Dels dos demostradors dissenyats s'ha rebutjat el primer demostrador degut a problemes que han succeït durant el desenvolupament del projecte. El problema principal que ha sorgit amb el primer demostrador és que el dany produït no es genera entre les capes de compòsit desitjades, sinó que varia segons la configuració de l'assaig.

El segon demostrador dissenyat ha sigut el que ha produït millors resultats. Aquest demostrador està compost de setze làmines de material compòsit unidireccional amb l'insert de tefló col·locat en el centre del gruix del demostrador. Es col·locaran dos rigiditzadors adherits a la superfície del compòsit de gruix de 0.8 mil·límetres fets amb el mateix material que les plaques.

L'assaig de fatiga es realitzarà seguint el procediment d'una de les dues configuracions calculades pel segon demostrador. Segons el mode d'obertura que es cregui convenient a utilitzar s'aplicarà el desplaçament inicial a la placa descrit en el projecte abans de sotmetre-la a una càrrega cíclica de  $R=0.1$ .

Seguint aquestes recomanacions es podrà observar com el demostrador s'obre mentre el front de delaminació pren una curvatura a causa de la rigidesa addicional dels rigiditzadors. A partir de l'assaig pràctic es podran determinar la relació entre nombre de cicles al que s'ha sotmès el demostrador i l'avanç del front de delaminació, tanmateix com els esforços que aguanta la placa. La superfície afectada es determinarà a través de radiografies convencionals o una tomografia segons es vegi convenient.

Girona, 5 de Setembre de 2016

Sergi Coll Castañer

## **10 RELACIÓ DE DOCUMENTS**

El projecte en el seu suport digital inclou els vídeos que s'han generat durant les simulacions on s'hi veuen els resultats al llarg de l'assaig.

També s'han inclòs les fotografies que es van prendre durant l'assaig a tracció de l'alumini i que s'han utilitzat en la redacció d'aquest projecte.

Els documents que s'inclouen dins aquest projecte es llisten a continuació:

1. Memòria i Annexos.
2. Vídeos de resultats.
3. Fotografies de l'assaig a tracció de l'alumini.
4. Resum

## 11 BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Soto, E.V. González, P. Maimí, A. Turon, J.R. Sainz de Aja, F.M. de la Escalera (March / 2016). Cohesive zone length of orthotropic materials undergoing delamination. *Engineering Fracture Mechanics* 159. Girona, Spain.
- [2] Strandberg, A. S. T. M *E8/E8M* (2009). Standard test methods for tension testing of metallic materials. West Conshohocken PA: ASTM international.
- [3] Callister, W. D. (202). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Vol. 1. Reverté.
- [4] ANDERSON, T.L., Fracture mechanics. Fundamentals and applications. CRC Press LLC (1995). 2a Ed.
- [5] Santandreu, I. (2015). Assaig virtual d'un panell rigiditzat de material compòsit.
- [6] BARBERO, E. (1998). *Introduction to composite materials design*. Taylor & Francis.
- [7] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2013). *Abaqus 6.13 User's Manual*. Providence, RI.
- [8] Gordić, M. V. (September / 2007). Delamination Strain Energy Release Rate in Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites. *In Materials Science Forum*, p. 515-519.
- [9] Krueger, R. (2008). *An Approach to Assess Delamination Propagation Simulation Capabilities in Commercial Finite Element Codes*. Hampton, Virginia: National Institute of Aerospace.

## **ANNEX A. PRESSUPOST**

### **A.1 Introducció**

Aquest projecte és una anàlisi teòric i per això no conté documents que facin referència a un pressupost, només aquest annex. En aquest annex es detallen totes els costos relacionats amb el desenvolupament d'aquest projecte, l'amortització del software utilitzat i les proves realitzades al laboratori. A continuació s'ofereix una explicació de cadascun dels costos considerats.

- Costos de recerca:

Es consideren costos de recerca tots els costos relacionats amb l'enginyer. S'inclou recerca d'informació, càlculs realitzats i l'anàlisi dels resultats. També s'inclouen els costos dels assajos del laboratori realitzats.

- Costos d'amortització:

Aquesta part fa referència al total d'hores acumulades per a l'amortització del software utilitzat per a realitzar les simulacions. Els softwares comercials que s'han utilitzat en aquest projecte que es tenen en compte per la seva amortització són ABAQUS i MATLAB.

- Costos d'elaboració:

Els costos d'elaboració tenen en compte el temps total que s'ha destinat a la redacció i correcció del document de projecte.



## A.2 Pressupost detallat.

| DESCRIPCIÓ                       | Unitats(h) | Preu (€/h) | COST (€)           |
|----------------------------------|------------|------------|--------------------|
| <b>Desenvolupament i recerca</b> |            |            |                    |
| Anàlisi i recerca                | 10         | 20,00 €    | 200,00 €           |
| Programació i execució           | 170        | 30,00 €    | 5.100,00 €         |
| Anàlisi dels resultats           | 40         | 40,00 €    | 1.600,00 €         |
| Anàlisi de tracció alumini       | 3 unitats  | 100 €/u    | 300,00 €           |
| <b>Amortització</b>              |            |            |                    |
| Software                         | 210        | 4,2 €      | 882,00 €           |
| <b>Elaboració</b>                |            |            |                    |
| Redacció del projecte            | 60         | 12,00 €    | 720,00 €           |
| <b>Subtotal</b>                  |            |            | 8.802,00           |
| Benefici 6%                      |            |            | 9.330,12 €         |
| 21% VAT                          |            |            | 1.959,33€          |
| <b>TOTAL</b>                     |            |            | <b>11.289,45 €</b> |

El pressupost total del projecte ascendeix a un total de **ONZE MIL DOS-CENTS VUITANTA-NOU EUROS I QUARANTA-CINC CÈNTIMS (11.289,45€)**, IVA inclòs.

Girona, 5 de Setembre de 2016

Sergi Coll Castañer