

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Disseny i fabricació d'un util·latge 4ENF per a l'assaig de materials compòsits

**Document:** 1. Memòria i annexos

**Alumne:** Pere Novell i Bosch

**Tutor:** Jordi Renart Canalias / Magdalena Pérez Galmés

**Departament:** Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

**Àrea:** Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

**Convocatòria (mes/any)** Juny 2016

# ÍNDEX

<b>ÍNDEX</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>4</b>
1.1. ANTECEDENTS	4
1.1.1. <i>Peticionari</i>	4
1.1.2. <i>Necessitat del peticionari</i>	4
1.2. OBJECTE	5
1.3. ESPECIFICACIONS I ABAST	6
1.3.1. <i>Especificacions de la petició</i>	6
1.3.2. <i>Abast del projecte</i>	6
<b>2. ESTAT DE LA TÈCNICA</b>	<b>7</b>
2.1. MATERIALS COMPOSTOS	7
2.2. LAMINACIÓ	8
2.3. MODES DE DELAMINACIÓ	8
2.4. ASSAIGS EN MODE II	9
2.4.1. <i>Assaig End Loaded Split (ELS)</i>	9
2.4.2. <i>Assaig End Notched Flexure (ENF)</i>	9
2.4.3. <i>Assaig Mixed Mode Bending (MMB)</i>	10
2.4.4. <i>Assaig Four Point End Notched Flexure (4ENF)</i>	11
<b>3. DISSENY DE L'UTILLATGE</b>	<b>12</b>
3.1. INTRODUCCIÓ	12
3.2. VISIÓ GENERAL	12
3.3. PART SUPERIOR DE L'UTILLATGE	14
3.4. PART INFERIOR DE L'UTILLATGE	17
3.5. ELEMENTS AUXILIARS	19
3.6. ALINEACIÓ I MUNTATGE	20
<b>4. PROCEDIMENT D'ASSAIG</b>	<b>22</b>
4.1. PREPARACIÓ DE LES PROVETES	22
4.2. ASSAIG DE PREESQUERDA	22
4.3. PREPARACIÓ DE L'UTILLATGE I LA MÀQUINA D'ASSAIG	23
4.4. ASSAIG DE LES PROVETES	24
<b>5. MÈTODES DE REDUCCIÓ DE DADES</b>	<b>26</b>
5.1. CALIBRATGE DE LA COMPLIÀNCIA	26
5.2. TEORIA SIMPLE DE BIGUES	28
5.3. ALTRES MÈTODES	28
<b>6. VALIDACIÓ</b>	<b>30</b>
6.1. RESULTATS OBTINGUTS DELS ASSAJOS 4ENF	30
6.1.1. <i>Obtenció de <math>G_{IIC}</math> utilitzant el mètode del calibratge de la compliància</i>	31
6.1.2. <i>Resultats amb el mètode del calibratge de la compliància</i>	33
6.1.3. <i>Obtenció de <math>G_{IIC}</math> utilitzant el mètode de la teoria simple de bigues (SBT)</i>	34
6.1.4. <i>Resultats amb el mètode de la teoria simple de bigues (SBT)</i>	35
6.1.5. <i>Comparació entre el mètode del calibratge de la compliància i el mètode de la teoria simple de bigues</i>	37
6.2. RESULTATS OBTINGUTS DELS ASSAJOS ELS	39
6.3. COMPARACIÓ DE RESULTATS	40
6.4. DISCUSSIÓ DE RESULTATS	41
<b>7. CONCLUSIONS</b>	<b>43</b>
7.1. RESUM DEL TREBALL REALITZAT I CONCLUSIONS	43

7.2. FUTURS TREBALLS	44
<b>8. RESUM DEL PRESSUPOST</b>	<b>45</b>
<b>9. RELACIÓ DE DOCUMENTS</b>	<b>46</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>47</b>
<b>11. GLOSSARI</b>	<b>50</b>
<b>ANNEX A: UTILLATGES I PROCEDIMENTS EXISTENTS. DISSENYS PRELIMINARS.</b>	<b>53</b>
A.1. CARACTERÍSTIQUES DELS UTILLATGES 4ENF UTILITZATS PER ALTRES GRUPS DE RECERCA	53
A.2. ASPECTES A DESTACAR DEL DISSENY D'UN UTILLATGE 4ENF	58
A.3. DISSENYS PRELIMINARS DE L'UTILLATGE 4ENF	60
A.3.1. Disseny A	60
A.3.2. Disseny B	61
<b>ANNEX B: MÈTODES DE REDUCCIÓ DE DADES</b>	<b>63</b>
B.1. MÈTODE 1: CALIBRATGE DE LA COMPLIÀNCIA	63
B.2. MÈTODE 2: TEORIA SIMPLE DE BIGUES	65
B.3. MÈTODE 3: ELEMENTS FINITS	67
B.4. MÈTODE 4: ARRESE I MUJKA	68
<b>ANNEX C: CÀLCULS MECÀNICS DE L'UTILLATGE</b>	<b>71</b>
C.1. COEFICIENT DE SEGURETAT ESTÀTIC	71
C.2. COEFICIENT DE SEGURETAT A FATIGA	74
C.3. FLETXA MÀXIMA	76
C.4. CONCLUSIONS	76
<b>ANNEX D: CÀLCULS AMB ELEMENTS FINITS</b>	<b>77</b>
D.1. PRE-PROCÉS	77
D.1.1. Geometria i dimensions	77
D.1.2. Materials	78
D.1.3. Mallat	79
D.2. SOLUCIÓ	80
D.2.1. Condicions de contorn	80
D.2.2. Tipus d'anàlisi	81
D.3. POST-PROCÉS	81
D.3.1. Resultats	81
D.3.2. Conclusions	89
<b>ANNEX E: PROCEDIMENT D'ASSAIG</b>	<b>91</b>
E.1. PREPARACIÓ DE LES PROVETES	91
E.2. ASSAIG DE PREESSQUERDA	93
E.3. PREPARACIÓ DE L'UTILLATGE I LA MÀQUINA D'ASSAIG	96
E.4. ASSAIG DE LES PROVETES	101
<b>ANNEX F: MÀQUINES D'ASSAIG</b>	<b>105</b>
F.1. MÀQUINA D'ASSAIG MTS BIONIX 858	105
F.2. MTS INSIGHT 5kN (SINGLE COLUMN CONFIGURATION) I 100kN	113
<b>ANNEX G: RESULTATS DELS ASSAJOS ELS</b>	<b>121</b>
<b>ANNEX H: RESULTATS DELS ASSAJOS 4ENF</b>	<b>130</b>

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Antecedents

### 1.1.1. Peticionari

El peticionari del projecte és el grup de recerca AMADE (Anàlisi de Materials Avançats per al Disseny Estructural) de la Universitat de Girona.

### 1.1.2. Necessitat del peticionari

Al laboratori del grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona es realitzen assaigs experimentals per a la caracterització de les propietats elàstiques i a fractura de materials compòsits.

En relació a la fractura dels materials compòsits, entre els diferents modes d'obertura d'esquerda existents, la fallada per tallant en la direcció de les fibres, o mode de fallada II és un dels més comuns, aquest es produeix quan les dues superfícies d'una esquerda llisquen entre elles fent propagar l'esquerda.

Actualment al laboratori es duen a terme diferents assajos en mode II, un d'ells és l'assaig ENF (*End-Notched Flexure*). La finalitat d'aquest assaig és determinar la tenacitat a la fractura crítica ( $G_{IIC}$ ) a partir de la qual es propaga l'esquerda en un material compòsit de laminats de fibra unidireccionals reforçades amb plàstic.

Aquest assaig, especificat a la norma ASTM D7905 [1], consisteix a aplicar una càrrega centrada a una proveta. La proveta es recolza sobre dos punts equidistants del centre. En un dels extrems de la proveta utilitzada hi ha un insert de tefló a la capa intermèdia i gràcies a això, quan s'aplica la càrrega es propaga l'esquerda. El problema més important que presenta aquest tipus d'assaig és que la propagació de l'esquerda és inestable i només es poden obtenir valors de  $G_{IIC}$  durant la iniciació de la propagació i no durant la propagació pròpiament dita. A la Figura 1 es mostra un esquema de l'assaig ENF.

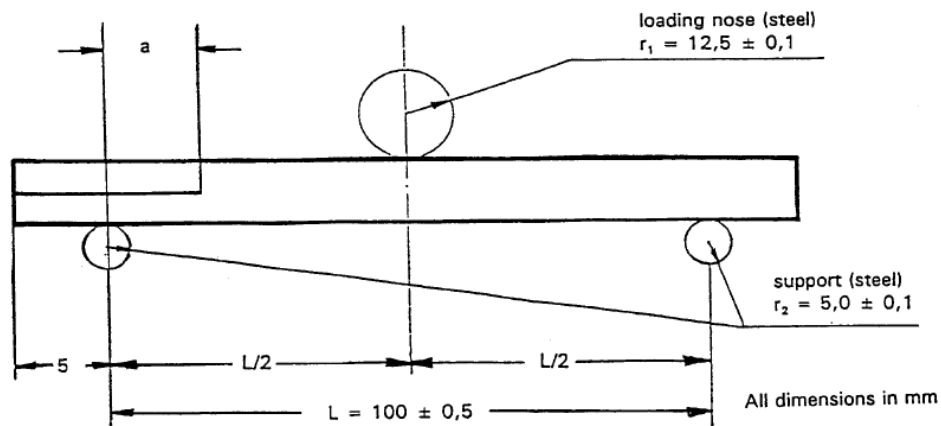


Figura 1: Esquema de l'assaig ENF (End-Notched Flexure) en mode II [2].

Com a alternativa a l'assaig anterior, tot i que no està estandarditzat, existeix un altre mètode, el 4ENF (o *Four End-Notched Flexure*) que podria resoldre aquest problema. Aquest mètode és una variant del ENF en el qual la càrrega s'aplica mitjançant un carro que està recolzat sobre la proveta per dos punts i és capaç de girar lliurement. A la Figura 2 es mostra un esquema de l'assaig 4ENF.

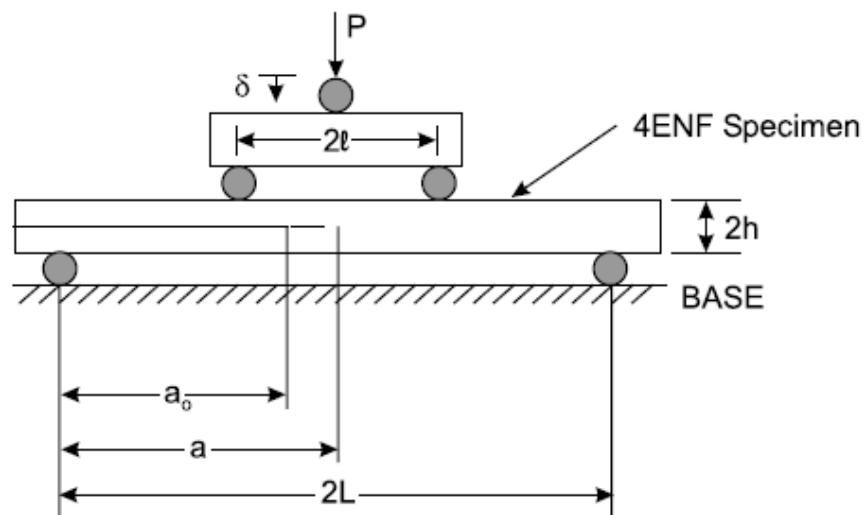


Figura 2: Esquema de l'assaig 4ENF (4 End-Notched Flexure) en mode II [3].

## 1.2. Objecte

L'objecte del present projecte és el desenvolupament d'un sistema d'assaig per a l'assaig 4ENF. A partir de la informació publicada sobre l'assaig 4ENF es pretén dissenyar i fabricar un utillatge

que permeti realitzar assajos 4ENF al laboratori. Un cop fabricat l'utillatge s'assajaran provetes per tal de validar-lo comparant els resultats amb els obtinguts amb altres mètodes d'assaig.

### 1.3. Especificacions i abast

#### 1.3.1. Especificacions de la petició

Es requereix que l'utillatge fabricat sigui compatible amb les màquines d'assaig del laboratori d'AMADE, també és necessari que l'utillatge tingui una alta rigidesa i permeti assajar amb diferents configuracions (distàncies entre corrons, diàmetre dels corrons, etc.). En la mesura del possible, els materials han de ser resistents a l'oxidació ja que el laboratori també contempla la possibilitat d'assajar a diferents condicions de temperatura i humitat.

Per altra banda, es requereix que l'utillatge disposi d'espai suficient per poder muntar correctament elements de mesura com ara inclinòmetres o extensòmetres.

#### 1.3.2. Abast del projecte

L'abast del projecte va des del disseny de l'utillatge fins a l'entrega d'aquest un cop verificat el seu funcionament.

Concretament el projecte inclou el disseny mecànic de l'utillatge i la seva fabricació. Un cop fabricat es verificarà el seu bon funcionament mitjançant una campanya experimental amb provetes de laminats de fibra unidireccionals reforçats amb plàstics (FRP). Finalment es compararan els resultats obtinguts durant els assajos amb els resultats d'altres assajos en mode II del mateix tipus de laminat. També s'inclou el desenvolupament i redacció del procediment d'assaig corresponent així com tota la documentació necessària.

## 2. ESTAT DE LA TÈCNICA

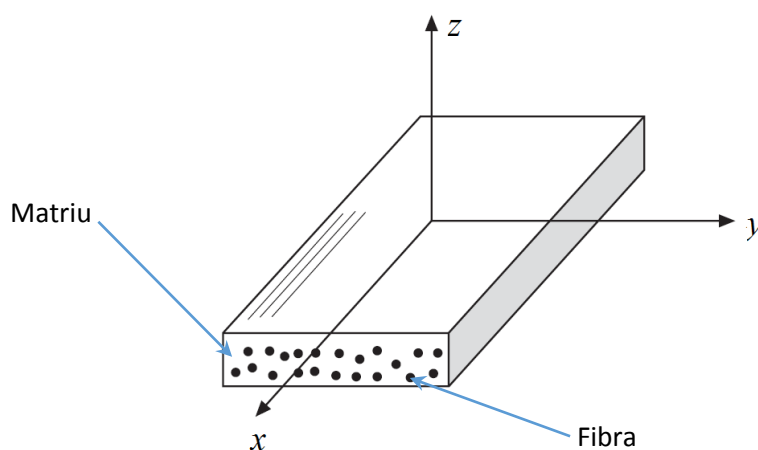
### 2.1. Materials compostos

Un material compost està format per dos o més materials distingibles físicament que, combinats, presenten unes propietats diferents a les individuals de cada component per si sol. Amb això es busca obtenir combinacions inusuals de rigidesa, resistència, pes, etc.

Entre els materials compostos, els formats per matrius polimèriques i reforçats amb fibres llargues són molt interessants degut a les seves bones propietats mecàniques. Aquests materials presenten una excel·lent relació resistència – pes i per això són cada cop més utilitzats per la indústria aeronàutica i automobilística, entre d'altres, on el pes és un factor determinant.

Un dels materials que presenta les propietats elàstiques i de resistència més elevades és el de matriu d'epòxid i reforç de fibra de carboni (CFRP). Es tracta d'un material ortotròpic, on l'orientació de les fibres és un aspecte determinant en les propietats del material. Si s'orienten totes les fibres en la mateixa direcció, la rigidesa i la resistència en aquesta direcció seran molt superiors a les de la resta, doncs en les altres direccions, només treballarà la resina que forma la matriu, que té unes propietats mecàniques de rigidesa i resistència molt inferiors a les de la fibra, Figura 3.

El fet que es tracti d'un material anisòtrop fa que el càlcul estructural sigui més complex que en el cas dels materials isotròpics com per exemple l'acer, ja que cal tenir en compte altres variables com ara l'orientació de les fibres.



*Figura 3: Representació d'un material compost de matriu polimèrica reforçat amb fibres llargues. Laminat unidireccional: totes les capes de fibra orientades en la mateixa direcció.*

## 2.2. Laminació

La matriu d'epòxid i el reforç de fibra de carboni es combinen per crear una capa fina. Per tal d'obtenir les propietats desitjades, es crea un laminat. Els laminats s'obtenen apilant capes de material compòsit durant la fabricació.

## 2.3. Modes de delaminació

Un dels modes de falla més comú en materials compostos és la delaminació entre capes de fibra. La delaminació és la separació entre interfícies de les capes de laminat, o quan es genera i/o propaga una esquerda. Per tal de valorar aquests defectes és important determinar com creix l'esquerda sota diferents tipus de càrrega. El creixement de l'esquerda es pot descriure amb la combinació de tres modes de fractura, Mode I, Mode II i Mode III, Figura 4. El Mode I es correspon amb l'obertura de les cares de l'esquerda, el Mode II es correspon amb el lliscament de les cares degut al tallant en el pla i el Mode III és degut a un tallant fora del pla de l'esquerda.

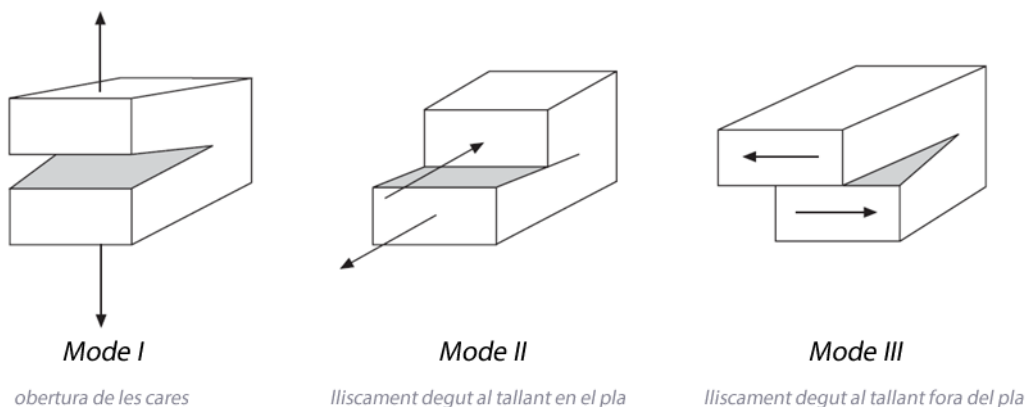


Figura 4: Representació esquemàtica dels modes de fractura.

Quan es produeix una delaminació, les propietats mecàniques del material es veuen reduïdes dràsticament. Per aquest motiu és important el seu estudi.

La tenacitat a la fractura es defineix com l'energia necessària per propagar l'esquerda una superfície determinada. Quan es caracteritza un material de fibres reforçades amb polímers (FRP) és important conèixer la tenacitat a la fractura en els diferents modes.

Per determinar el valor de manera experimental existeixen diversos assajos. Amb aquests assajos es poden obtenir valors de la tenacitat a la fractura en els diferents modes I, II i III, així com la combinació d'aquests.



En moltes aplicacions les capes de material compòsit treballen a tallant, per la qual cosa el mode II de fallada és molt comú. Això fa que hi hagi un especial interès en el seu estudi.

## 2.4. Assaigs en mode II

Existeixen diverses metodologies d'assaig per a la determinació de la tenacitat a la fractura en mode II ( $G_{II}$ ). Algunes disposen d'una norma i altres estan encara en fase de desenvolupament. A continuació se'n detallen alguns i a l'Annex A es pot trobar una explicació més detallada de cada mètode d'assaig.

### 2.4.1. Assaig End Loaded Split (ELS)

L'assaig ELS va ser desenvolupat inicialment a la Texas A&M University el 1981 [4] i va ser millorat posteriorment per Russell i Street el 1987 [5]. Recentment s'ha publicat la norma ISO15114 [6] d'aquest assaig per a provetes CFRP unidireccionals. En aquest assaig es carrega la proveta (que ja conté una preesquerda) a flexió aplicant una càrrega vertical en un extrem de la proveta. L'altre extrem es subjecta amb un carro mòbil que permet el lliure moviment horitzontal, Figura 5. Aquest assaig permet una propagació de l'esquerda estable però sovint es produeixen grans deformacions i introdueix variacions degudes al sistema de subjecció.

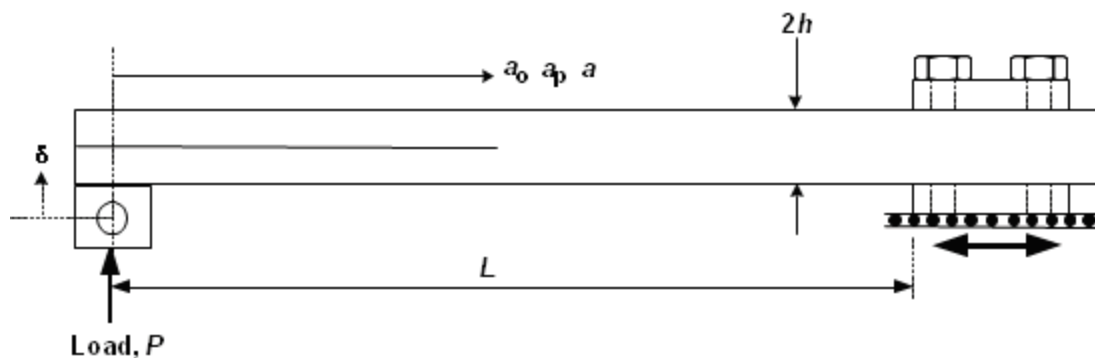


Figura 5: Representació esquemàtica de l'assaig ELS [6].

### 2.4.2. Assaig End Notched Flexure (ENF)

L'assaig ENF va ser introduït per primer cop en l'estudi de materials compostos per Russell i Street el 1982 [7]. Actualment existeix la norma ASTM-D7905 [1]. Es tracta d'un assaig a flexió d'una proveta per-esquerdada en què es propaga l'esquerda col·locant la proveta sobre dos suports cilíndrics i aplicant una força mitjançant un tercer punt de contacte centrat, Figura 6. És

un assaig molt acceptat però el principal inconvenient que presenta és que la propagació de l'esquerda és inestable.

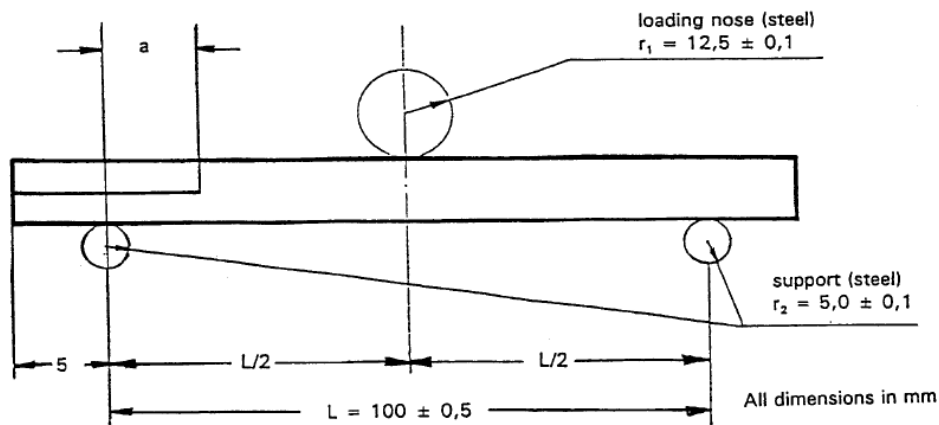


Figura 6: Representació esquemàtica de l'assaig ENF [2].

#### 2.4.3. Assaig Mixed Mode Bending (MMB)

L'assaig MMB va ser presentat el 1990 per Crews i Reeder [8], actualment existeix la norma ASTM D6671 [9]. Permet fer assajos en mode mixt (mode I-II) ja que és una superposició de l'assaig DCB de mode I [10] i l'ENF de mode II, Figura 8. Aquest assaig permet adoptar diferents configuracions amb diferents ràtios de mode mixt  $G_{II}/G_c$ . En una de les seves configuracions límit, es pot considerar l'MMB com un assaig de mode II pur. Aquesta configuració és molt similar a la d'un assaig ENF, i per tant presenta els mateixos problemes que l'assaig anterior.

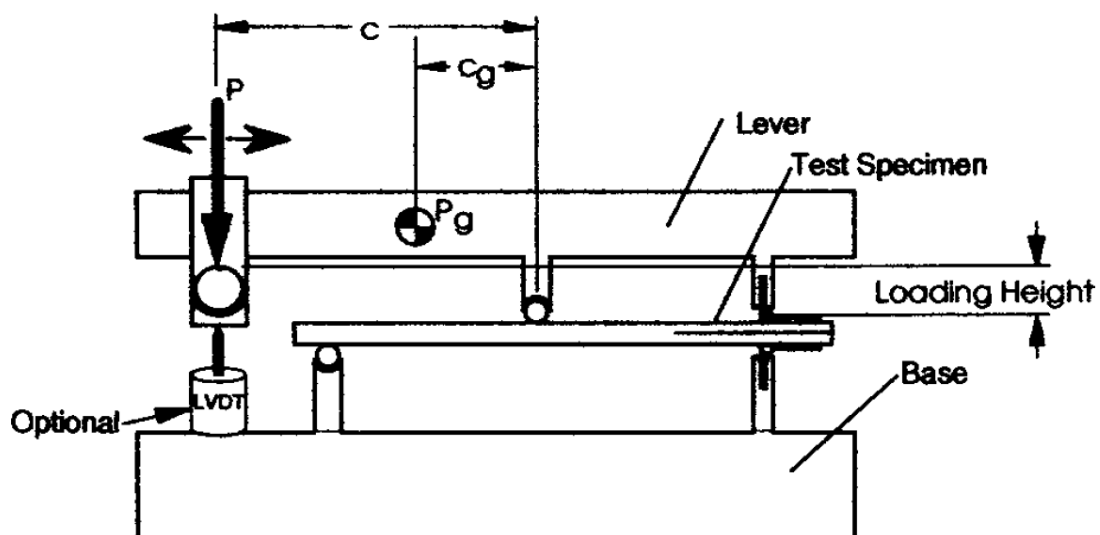


Figura 7: Representació esquemàtica de l'assaig MMB [9].

#### 2.4.4. Assaig Four Point End Notched Flexure (4ENF)

L'assaig 4ENF és una variant de l'assaig ENF, presentat per primer cop per Martin i Davidson el 1997 [11]. Igual que en l'assaig ENF, es col·loca la proveta sobre dos cilindres però en aquest cas es pressiona la proveta a través d'un carro que pivota sobre un eix central i que disposa de dos cilindres que entren en contacte amb la proveta, Figura 8. Tot i que no ha estat gaire estudiat, aquest assaig té l'avantatge que la propagació de l'esquerda és estable. No obstant els treballs que l'han analitzat han reportat que l'assaig és influenciable per la fricció [12].

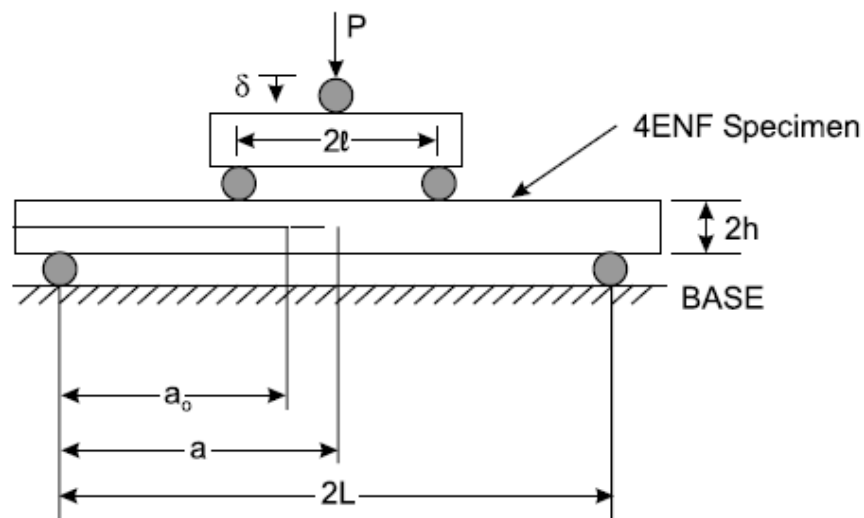


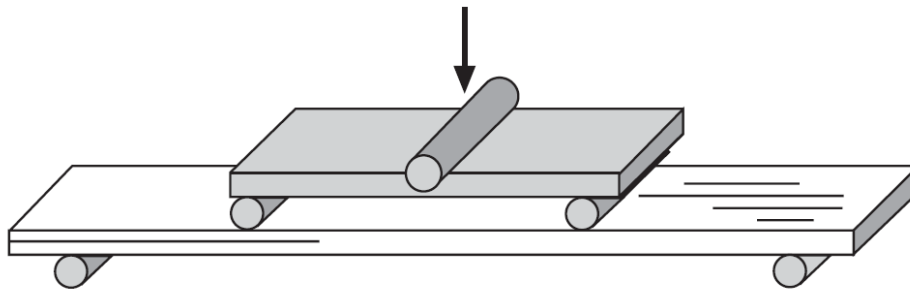
Figura 8: Representació esquemàtica de l'assaig 4ENF [3].

Els principals avantatges del 4ENF respecte als assaigs ELS, ENF o MMB(100%) són que mitjançant aquest assaig la propagació de l'esquerda és estable i no és propens a grans deformacions. Al grup d'investigació AMADE de la Universitat de Girona es pretén dissenyar i fabricar un utilatge que permeti realitzar assajos 4ENF per tal de comparar-los amb altres assajos de delaminació en mode II com ara l'ELS, l'ENF o el MMB (100%). Amb els nou disseny es pretén millorar els utilatges i mètodes d'assaig existents utilitzats en altres universitats i centres de recerca. A l'annex A es pot trobar un resum amb les característiques de diferents utilatges i procediments 4ENF existents.

### 3. DISSENY DE L'UTILLATGE

#### 3.1. Introducció

El 4ENF és un assaig de delaminació en mode II que consisteix en situar una proveta amb un insert o preesquerda sobre dos corrons i aplicar-hi una força mitjançant un carro centrat entre els corrons superiors que pivota sobre un eix central per tal de provocar la delaminació entre capes en mode II, veure Figura 9.



*Figura 9: Representació esquemàtica de l'assaig 4ENF.*

Abans de dissenyar l'utillatge s'han estudiat diferents models existents utilitzats en altres estudis. A l'Annex A es resumeixen les característiques de diferents utillatges i procediments existents. També es mostren els dissenys preliminars de l'utillatge que finalment s'ha fabricat.

#### 3.2. Visió general

Un dels principals inconvenients dels utillatges 4ENF existents és que no permeten visualitzar l'evolució de l'esquerda durant tot l'assaig, una dada útil per al càlcul de la tenacitat a la fractura ( $G_{II}$ ) i també per comprovar el bon funcionament de l'assaig. Per això, el disseny final de l'utillatge 4ENF permetrà visualitzar la proveta i per tant, el front d'esquerda durant tot l'assaig. A més també s'ha tingut en compte que l'eix de gir dels corrons superiors se situï gairebé a la mateixa alçada que els corrons per evitar que la fletxa de la proveta generi grans rotacions de la part superior de l'utillatge. També cal dir que l'utillatge és rígid per tal d'evitar deformacions d'aquest que puguin alterar els resultats dels assajos. A l'Annex C es troben els càlculs mecànics realitzats per la validació del disseny. Els plànols de les diferents peces fabricades, així com les seves característiques tècniques, es troben al Document 2: Plànols.

L'utillatge 4ENF es divideix en dues parts: superior i inferior. La part superior està formada per una fixació, collada a la màquina d'assaig, i un carro. El carro disposa d'una base rectangular on se situen els dos suports dels corrons que transmeten la càrrega a la proveta. La part inferior

està formada per una base, fixada a la màquina, i dos suports on se situen els corròns inferiors que suporten la proveta. Addicionalment també existeixen algunes parts auxiliars, com ara el suport per a l'extensòmetre.

S'ha agafat com a referència l'utilatge ENF (flexió a tres punts) existent al laboratori del grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona per tal de simplificar el disseny i alhora reduir costos, ja que una part de les peces de l'utilatge ENF s'utilitzaran també pel 4ENF. Concretament per al nou disseny s'aprofitarà la part inferior de l'utilatge ENF i una gran part de les peces que conformen el suport per a l'extensòmetre. A la Figura 10 s'indiquen quines parts de l'utilatge 4ENF corresponen a peces de l'utilatge ENF existent.

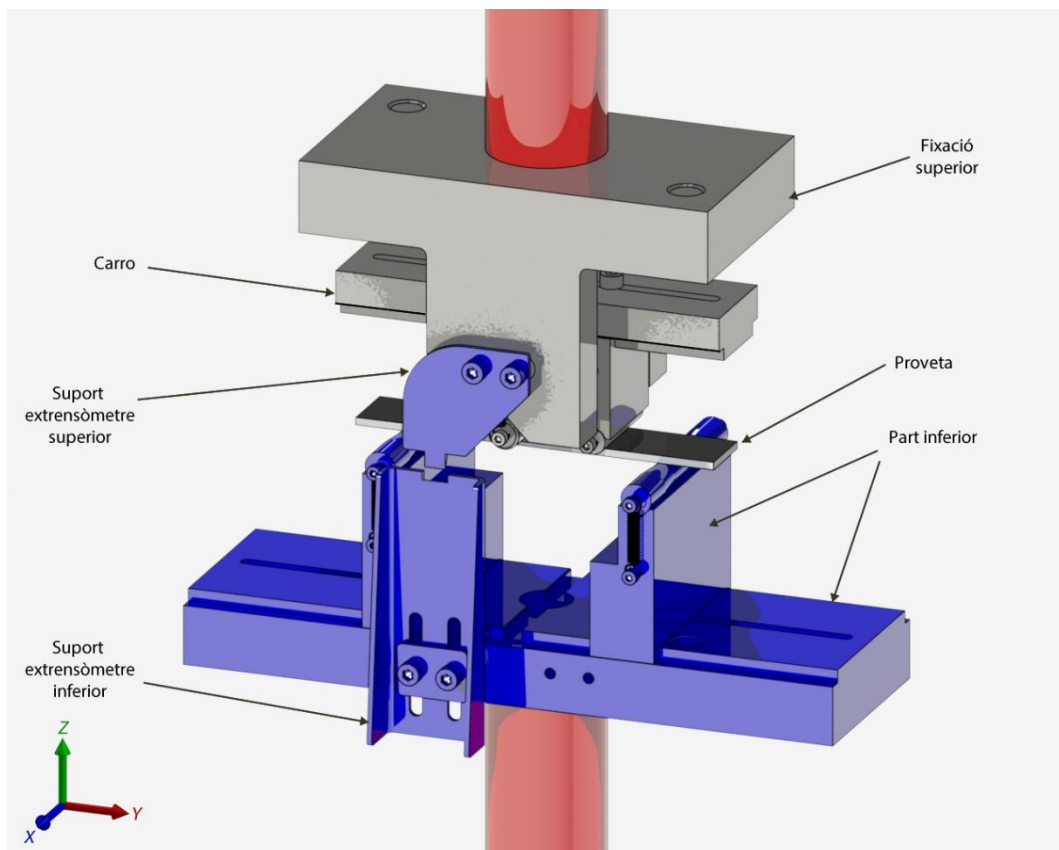


Figura 10: Vista general de l'utilatge 4ENF amb les diferents parts que el conformen. Les peces de color blau corresponen a l'utilatge ENF existent, les parts en vermell corresponen a elements de la màquina d'assaig.

### 3.3. Part superior de l'utilatge

La part superior de l'utilatge està formada per la fixació superior i el carro. La fixació superior s'uneix a la màquina d'assaig mitjançant un cargol. La funció del carro és transmetre la càrrega a la proveta. Veure Figura 11.

La fixació superior, unida al pistó de la màquina, transmet la càrrega al carro a través d'un eix central. La zona on entren en contacte la fixació superior i el carro s'ha dissenyat de manera que permeti el gir lliure del carro en l'eix X per tal que els corrons sempre estiguin en contacte amb la proveta encara que la flexió d'aquesta sigui asimètrica, com s'espera degut a la asimetria de la proveta. A més amb aquest disseny s'aconsegueix que es pugui visualitzar la proveta i la propagació de l'esquerda durant tot l'assaig.

Entre els dos components principals de la part superior de l'utilatge s'han col·locat unes molles, la funció d'aquestes és la subjecció del carro quan aquest no està en contacte amb una proveta. Aquestes molles es subjecten mitjançant petits cargols M3.

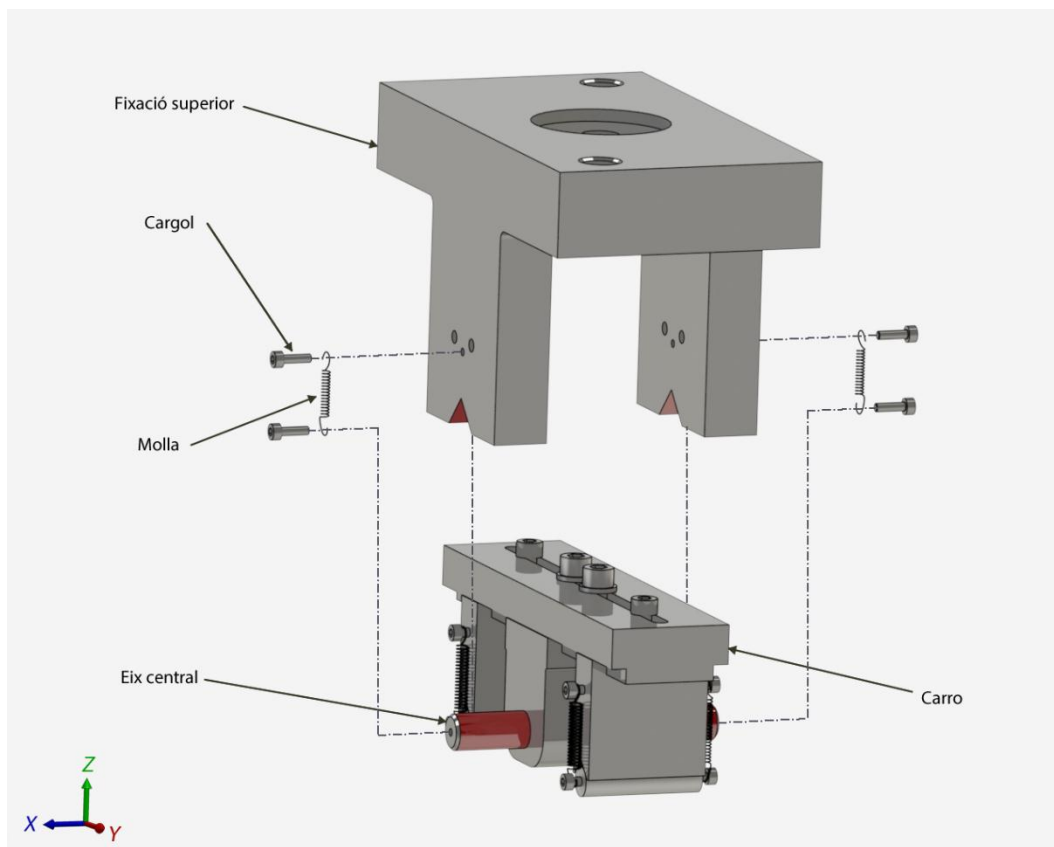


Figura 11: Especejament de la part superior de l'utilatge 4ENF: fixació superior i carro. En vermell, zones de transmissió de càrrega fixació superior – carro.

El carro està compost per una base, un suport central, dos suports per als corrons i dos corrons. La distància vertical entre el centre de l'eix central i els corrons és només de 7.57mm. Veure Figura 12.

La base té uns rebaixos a cada costat per tal de centrar els suports dels corrons. Aquests es fixen a la base mitjançant cargols. Se'n pot variar la posició, abans de fixar-los, gràcies al trau colís central de la base on es fixen els cargols. La distància mínima entre els corrons és de 50.8mm (2") i la màxima és de 127mm (5"). És important que els corrons quedin centrats, per això s'utilitzen plaques de longitud calibrada que se situen entre el suport de l'eix central i cada un dels suports dels corrons abans de fixar els suports. En cas de no disposar de les plaques corresponents a la separació desitjada es poden fer servir mètodes alternatius com per exemple l'ús d'un peu de rei.

Els corrons es subjecten als suports mitjançant molles per evitar que caiguin durant el muntatge, veure Figura 13.

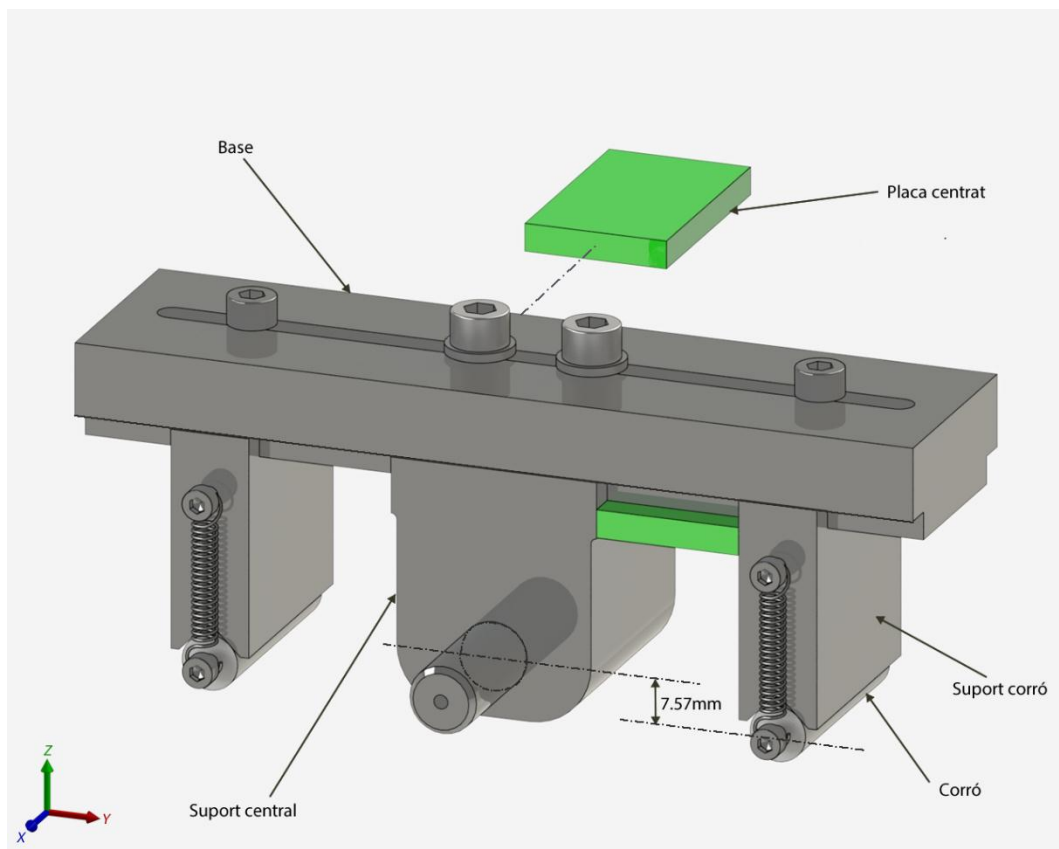


Figura 12: Carro de l'utilatge 4ENF. En verd, plaques utilitzades durant el muntatge per centrar els suports dels corrons.

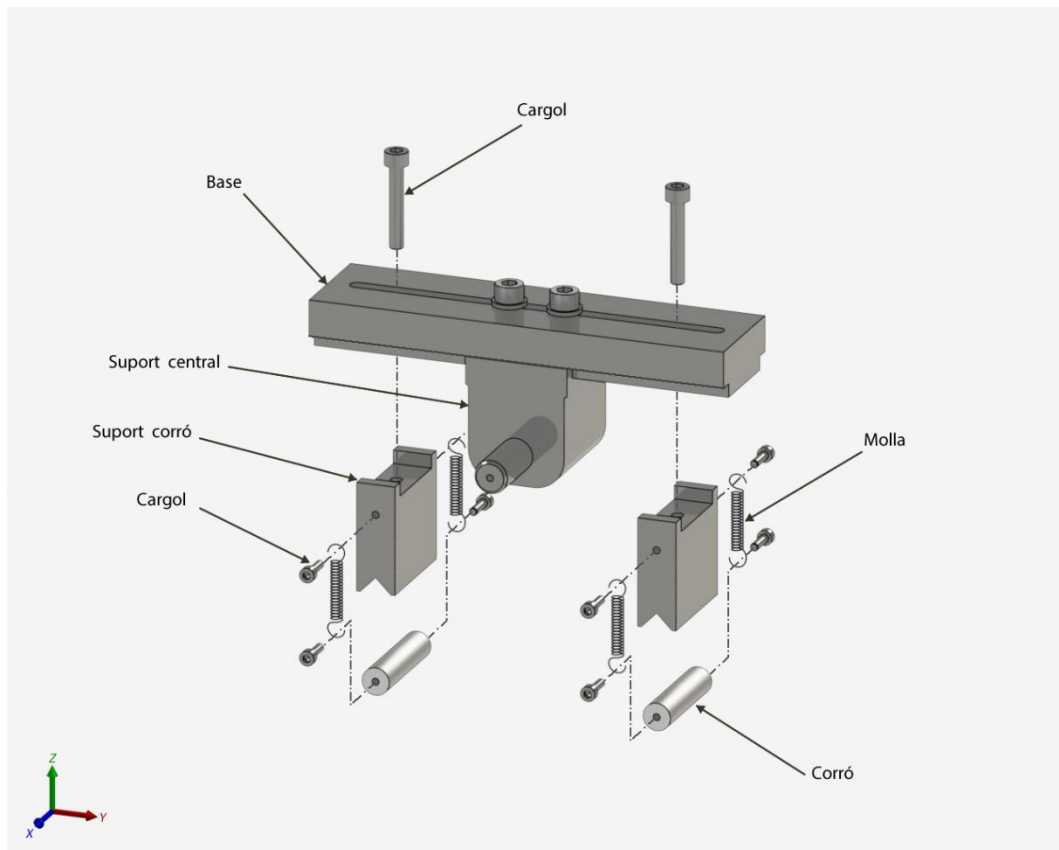
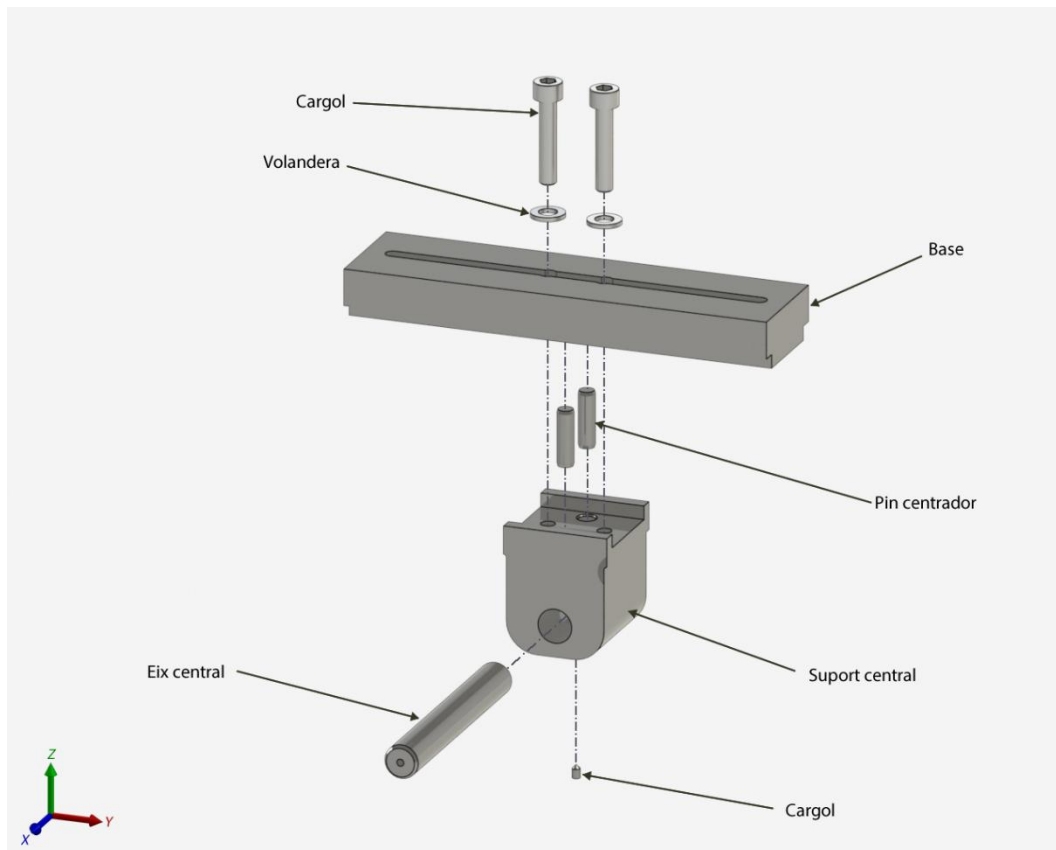


Figura 13: Especejament del carro de l'utilatge 4ENF.

El suport central uneix l'eix central amb la base del carro. Com que el seu posicionament és un aspecte crític i ha de suportar uns esforços considerables, es centra a la base mitjançant dos pins centradors i es fixa amb dos cargols amb volandera, Figura 14.

Al suport central, l'eix central s'allotja a través d'un forat, aquest s'ha posicionat el més baix possible per tal de reduir la distància vertical (en la direcció Z) entre els centres dels corróns que apliquen la força a la proveta i el centre de l'eix, però alhora aconseguint una rigidesa suficient. L'eix central va col·locat dins el forat del suport amb un ajustatge amb joc i un cop posicionat es fixa amb un cargol per evitar desplaçaments.





*Figura 14: Espejament dels elements units al suport central del carro 4ENF.*

### 3.4. Part inferior de l'utillatge

La part inferior de l'utilitatge 4ENF prové de l'utilitatge ENF ja existent al laboratori del grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona, per això només es detallen els aspectes més importants.

Aquesta part està formada per una base, dos suports per als corròns inferiors i dos corròns, a més de les peces auxiliars necessàries per fixar totes les parts, Figura 15.

L'assemblatge de la part inferior és molt similar a la del carro. Els dos suports dels corròns es poden fer lliscar sobre una guia per tal d'aconseguir la distància entre centres dels corròns desitjada, la distància màxima admissible és de 203.2mm (8"). Igual que passa amb el carro de la part superior, l'ajustatge de la distància entre corròns es fa a través de plaques de longitud calibrada. En aquest cas però, per centrar la placa s'utilitza també una xaveta. Els corròns estan units al seu suport mitjançant unes molles i els suports s'uneixen a la base a través d'un cargol central, Figura 16.

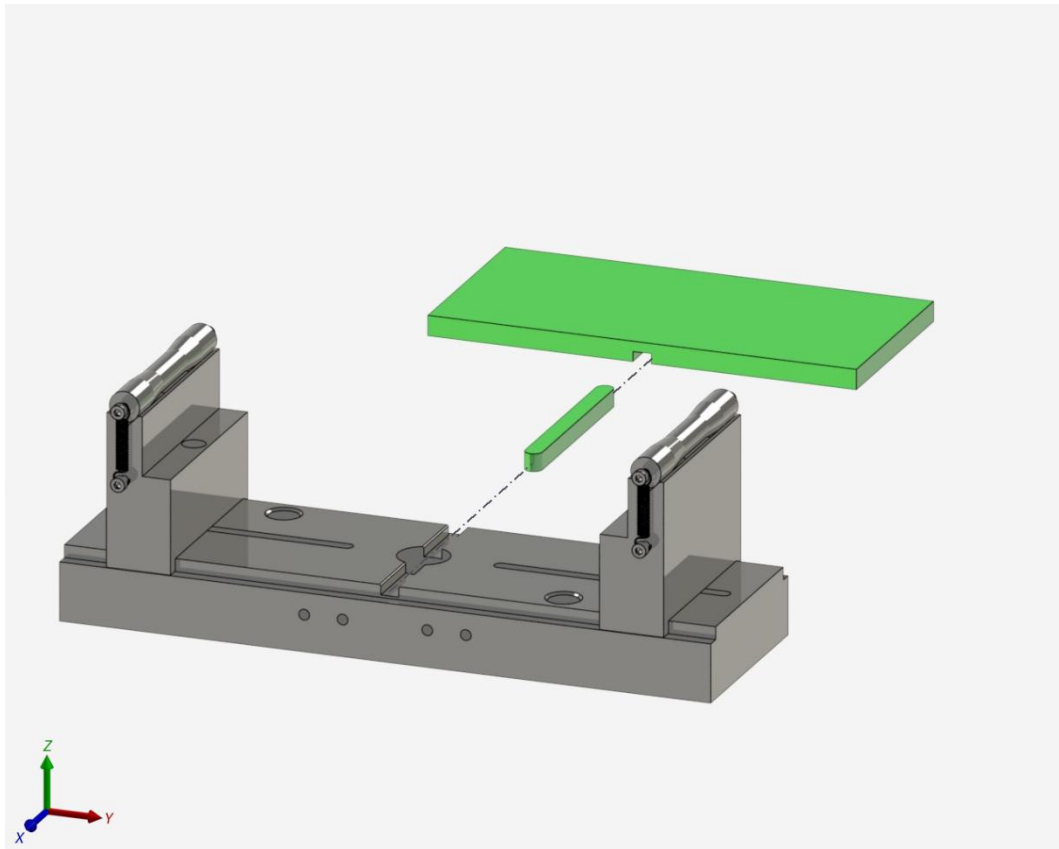


Figura 15: Part inferior de l'utilatge 4ENF. En verd, placa i xaveta utilitzades per al centrat dels suports dels corròs.

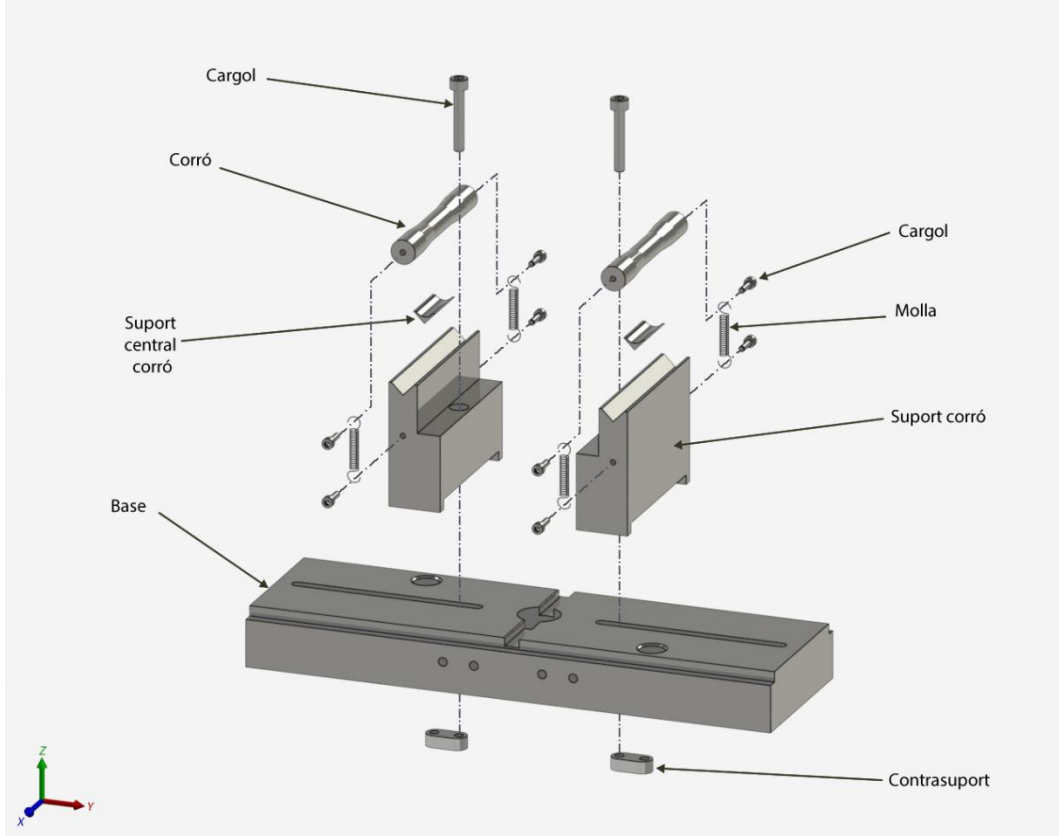


Figura 16: Especejament de la part inferior de l'utilatge 4ENF.

### 3.5. Elements auxiliars

Sovint durant els assajos de materials compòsits es fan servir sistemes de mesura externs a la màquina d'assaig com poden ser galgues extensomètriques, inclinòmetres, transductors de desplaçament (LVDT) o extensòmetres entre d'altres. [12],

L'utilatge ENF del qual s'ha partit per fer el disseny de l'utilatge 4ENF disposa d'un suport per un extensòmetre en forma de pinça (*clip-on-gage*). Aquest s'ha adaptat per poder utilitzar-lo en el nou disseny. Concretament s'han modificat els separadors del suport superior.

La instal·lació d'aquests elements només es realitza quan és necessari utilitzar l'extensòmetre per obtenir més dades durant de l'assaig. El muntatge dels suports es fa mitjançant quatre cargols i uns separadors, Figura 17.

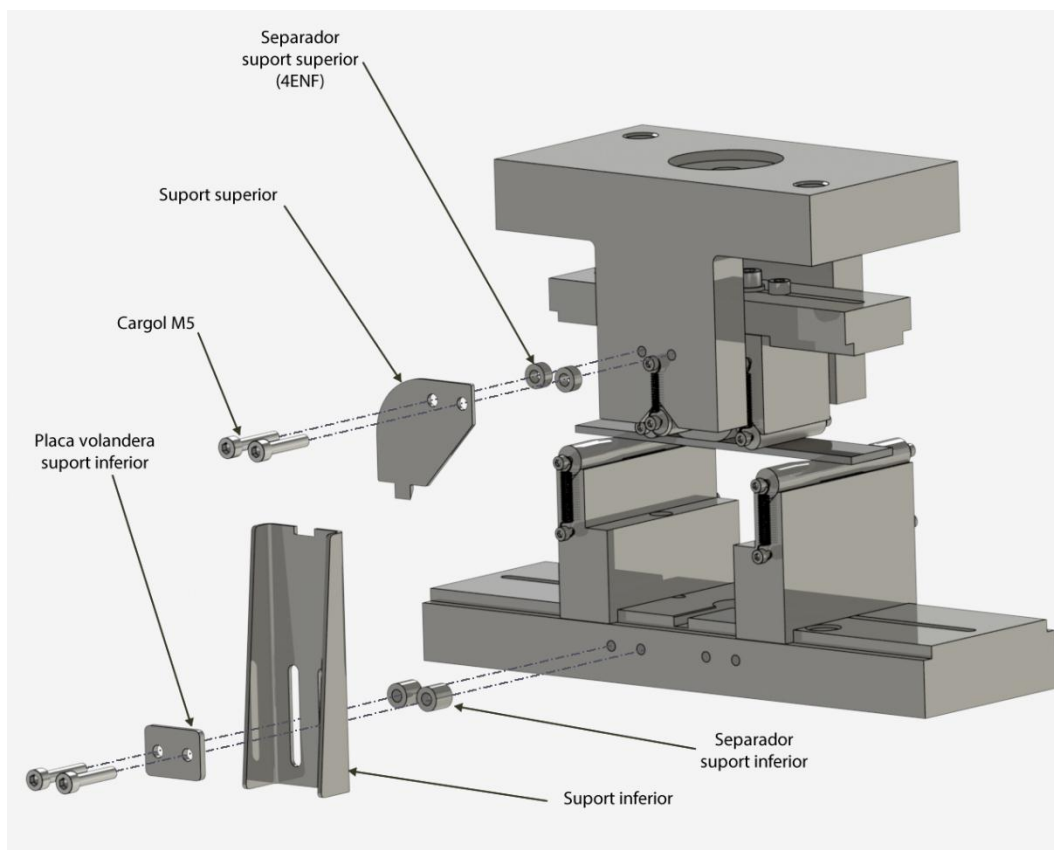


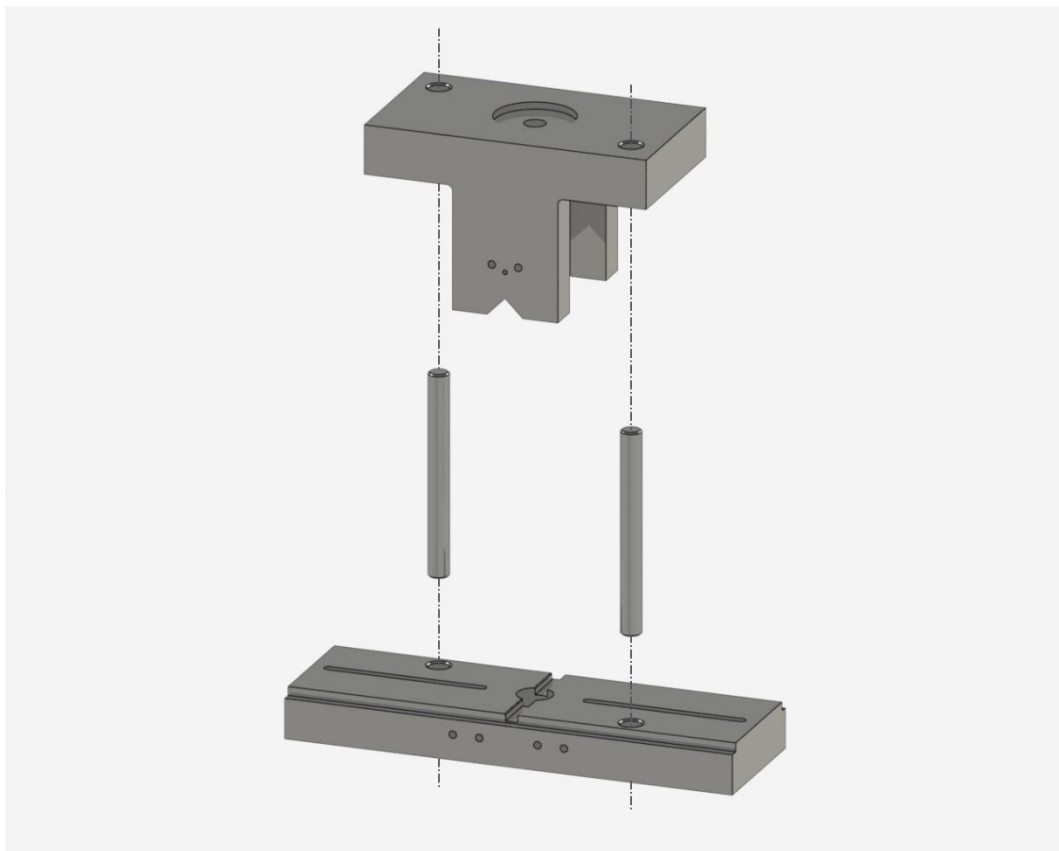
Figura 17: Especejament del suport per extensòmetre de l'utilatge 4ENF.

### 3.6. Alineació i muntatge

El bon alineament de la màquina i també dels utillatges és bàsic per obtenir una bona precisió dels assajos ja que, un mal alineament pot introduir molta variabilitat als resultats degut a que l'aplicació de la càrrega està descentrada, hi ha torsions a la proveta, etc. És per això que moltes normes d'assaig posen gran èmfasi en aquest aspecte i motiu pel qual s'ha tingut en compte en el present disseny.

Per muntar l'utilatge 4ENF a la màquina d'assaig primer de tot es munten la base inferior i superior. En aquest punt és necessari alinear les bases per un correcte funcionament de l'utilatge.

Per alinear les dues bases entre elles es fixa primer la part superior a la màquina i es mou la part mòbil de la màquina d'assaig mitjançant els controls de la màquina a una alçada que permeti fer passar les barres d'alineació per els dos forats de cada una de les bases, Figura 18. Amb les barres col·locades es fixa la base de la part inferior de l'utilatge. A continuació es separen les bases, es retiren les barres i es segueix amb el muntatge de l'utilatge.



*Figura 18: Alineació de les bases de l'utilatge 4ENF.*

El disseny de la resta dels components s'ha fet de manera que no calgui cap alineament addicional. Com a precedents d'aquest sistema existeix el sistema d'alineament de l'utillatge per assaig ENF o de flexió a tres punts.

## 4. PROCEDIMENT D'ASSAIG

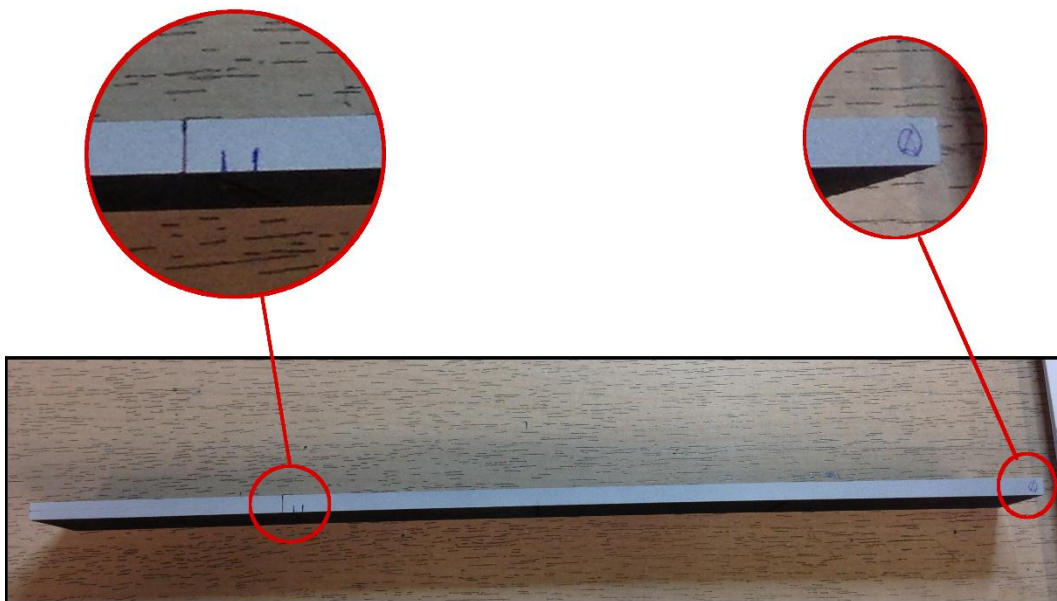
En aquest apartat es resumeix el procediment que s'ha seguit per realitzar els assajos 4ENF. A l'annex E es pot trobar una explicació més detallada d'aquest procediment d'assaig 4ENF.

### 4.1. Preparació de les provetes

Quan es reben les provetes per a l'assaig 4ENF al laboratori, s'assigna un codi individual a cada proveta per tal de poder identificar-la en qualsevol moment.

Tot seguit, es mesura la longitud, l'amplada i el gruix de les provetes.

Un cop fet això, es pinten els laterals amb pintura blanca per tal de poder visualitzar la longitud d'esquerda durant l'assaig. Quan la pintura s'ha assecat, amb l'ajuda d'un microscopi òptic, es fa una marca al punt on finalitza l'insert de la proveta tal com es pot veure a la Figura 19. També s'identifiquen els dos laterals, cara A i B. A la cara A i es fan dues marques que indicaran el final de l'assaig de preesquerda.



*Figura 19: Proveta 4ENF amb els costats pintats i amb l'insert marcat.*

### 4.2. Assaig de preesquerda

L'esquerda generada amb un insert durant la fabricació, a vegades no és perpendicular a la direcció de propagació. La funció de l'assaig de preesquerda és fer avançar lleugerament el front d'esquerda per aconseguir un front d'esquerda uniforme i perpendicular a l'eix de propagació.

Abans de l'assaig 4ENF, per tant, s'ha realitzat un assaig de preesquerda en mode I mitjançant l'assaig DCB (*Double-Cantilever Beam*) segons la norma ISO 15024 [13]. S'ha utilitzat el sistema de subjecció SCB (*Side Clamped Beam*) [14].



Figura 20: Assaig DCB en mode I utilitzant el sistema de subjecció de provetes SCB.

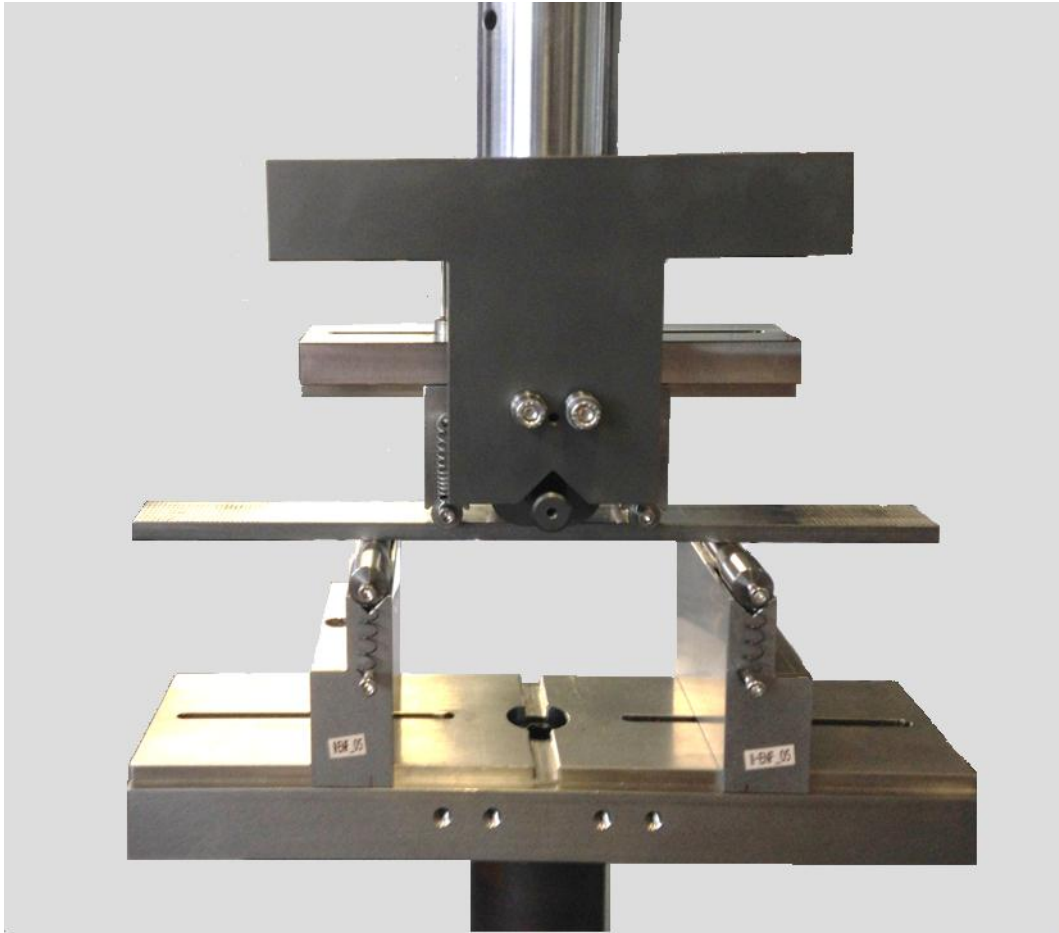
Després d'aquest assaig, cal comprovar que la diferència entre la longitud d'esquerda als dos laterals de la proveta sigui inferior a 2 mm. Això indica que la propagació de l'esquerda és perpendicular a la longitud de la proveta i que per tant l'assaig s'ha dut a terme correctament.

Finalment es fan unes marques que serviran per posicionar la proveta a l'utilatge 4ENF i indicaran l'inici i el final de l'assaig 4ENF. A l'Annex E es detalla com han de ser aquestes marques.

### 4.3. Preparació de l'utilatge i la màquina d'assaig

Per poder realitzar l'assaig 4ENF cal muntar i alinear l'utilatge dissenyat al capítol 3. Per fer-ho cal seguir els passos que es detallen a l'annex E. A la Figura 21 es mostra l'utilatge muntat a la màquina d'assaig.





*Figura 21: Utiltatge 4ENF muntat a la màquina d'assaig.*

#### 4.4. Assaig de les provetes

Després de realitzar els assajos de preesquerda i muntar l'utiltatge, es pot procedir amb l'assaig 4ENF pròpiament dit.

Primer de tot es situa la proveta a assajar sobre els corròs inferiors de l'utiltatge amb l'ajuda de les marques de posicionament. Tot seguit es tara la força de la màquina per tal d'iniciar l'assaig amb una càrrega inicial nul·la. A continuació es situa el carro sobre la proveta i es baixa la base de fixació superior fins que tots els elements estan en contacte i el carro superior centrat i es tara el desplaçament de la màquina.

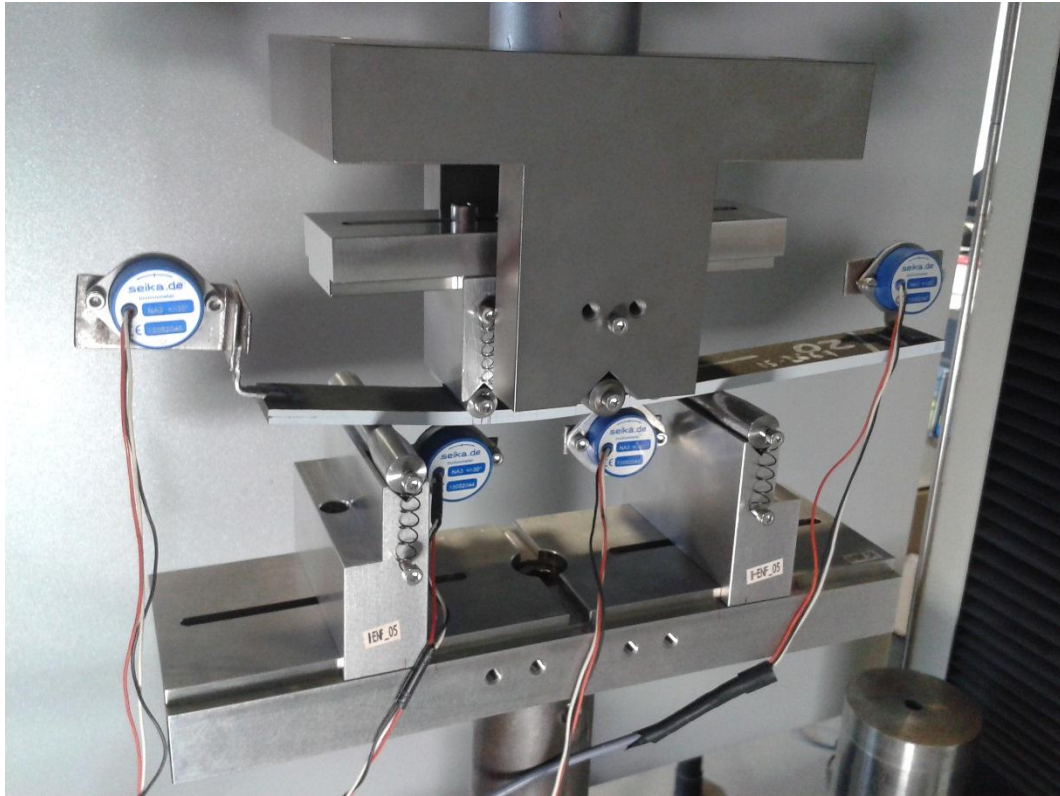
Abans de començar l'assaig cal comprovar que la temperatura i la humitat relativa del laboratori és de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  i  $50 \pm 5\%$  respectivament, condicions normals que vénen marcades per la majoria de normes d'assaig i que en cas de no complir-se podrien afectar les mesures dels aparells de mesura com ara la cèl·lula de càrrega o el sensor de desplaçament.

S'inicia l'assaig amb una velocitat de càrrega de  $0,25 \text{ mm/min}$ . Amb una càmera amb zoom muntada sobre un trípod mòbil es fa un seguiment del front d'esquerda durant la propagació.



Quan aquest arriba a la marca que indica el final de l'assaig, es para l'assaig i es descarrega la proveta fins a la posició inicial.

Per acabar es guarden les imatges de la longitud d'esquerda obtingudes amb la càmera, així com les dades de força i desplaçament obtinguts per al seu posterior tractament i es retira la proveta de la màquina.



*Figura 22: Imatge d'un assaig 4ENF. Es mostra una proveta deformada durant la càrrega, també s'observa el gir del carro.*

## 5. MÈTODES DE REDUCCIÓ DE DADES

Existeixen una gran varietat de mètodes de reducció de dades per l'assaig 4ENF. A l'annex B s'expliquen més detalladament els diferents mètodes de reducció de dades utilitzats per alguns autors. A continuació es descriuen els que s'han utilitzat per aquest cas.

### 5.1. Calibratge de la compliància

El mètode del calibratge de la compliància és un mètode de reducció de dades directe en que només es suposa una relació lineal entre la compliància i la longitud d'esquerda. Per altra banda però, es negligeix qualsevol error degut a variacions en la geometria o les propietats del material de cada proveta.

A partir de les dades obtingudes de desplaçament i força durant l'assaig de la proveta es calcula la compliància als punts corresponents amb les marques fetes a la proveta on la longitud d'esquerda és coneguda. La compliància en un punt equival al desplaçament dividit entre la força.

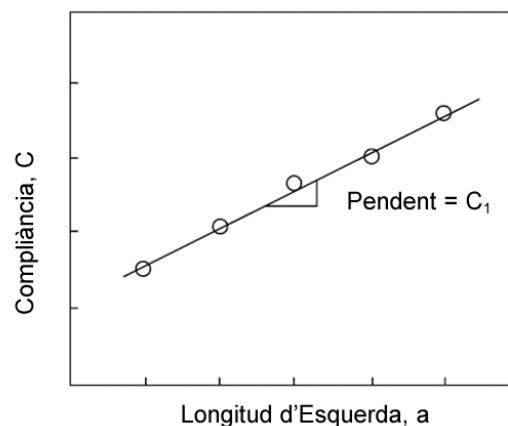


Figura 23: Gràfic compliància (C) vs. longitud d'esquerda (a) per una configuració 4ENF [3].

Un cop s'han obtingut diferents valors de compliància, es fa una regressió lineal i s'obté la equació de la recta de la Eq. 1 on  $C_1$  correspon al pendent de la recta.

$$C = C_0 + C_1 \cdot a \quad \text{Eq. 1}$$

Per al càlcul de la tenacitat a la fractura en un punt concret es fa servir l'equació

$$G_{IIC} = \frac{P_c^2}{2b} \cdot C_1 \quad \text{Eq. 2}$$

on  $G_{IIC}$  és la tenacitat a la fractura crítica,  $P_c$  és la càrrega necessària per fer propagar l'esquerda i  $b$  és l'amplada de la proveta.

Un cop s'ha determinat  $C_1$  es pot generar la gràfica de la tenacitat a la fractura en funció de la longitud de l'esquerda, també coneguda com a corba-R. Figura 24.

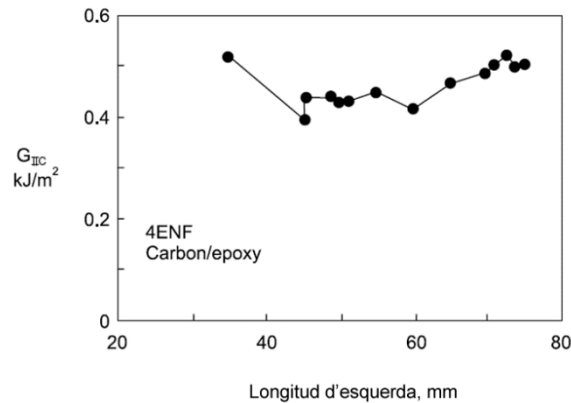


Figura 24: Corba-R per un material compost carboni/epòxid en un assaig 4ENF [3].

Per altra banda, es busquen els valors d'iniciació VIS, NL i MAX/5% per cada proveta.

El punt VIS es correspon amb el moment en què visualment es comença a propagar l'esquerda.

El punt NL es el punt en què els valors de força i desplaçament deixen de ser lineals, això es pot veure fent un gràfic de  $\frac{\partial \text{Força}}{\partial \text{Desplaçament}}$  en funció del desplaçament. En aquest gràfic les dades seguiran una recta força horitzontal fins un punt on comencen a baixar. Aquest punt es el punt de no linealitat NL.

Per altra banda el punt MAX/5% es pot correspondre amb el punt MAX o el punt 5%, el que s'assoleixi primer. El punt MAX es correspon amb el punt on la càrrega és màxima. El punt 5% es troba la intersecció entre la gràfica càrrega desplaçament i la recta de la compliància augmentada un 5%. A la Figura 25 es pot veure un gràfic amb els punts MAX i 5%.

En el cas de l'assaig 4ENF, com que durant l'assaig s'observa que la càrrega segueix creixent, el punt MAX/5% es correspondrà sempre amb el punt 5%.

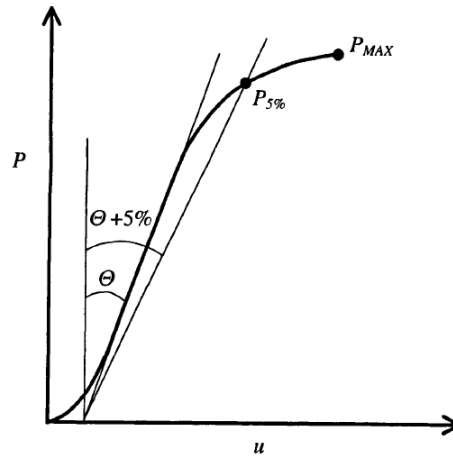


Figura 25: Determinació del punt MAX/5% [15].

Un cop obtinguda la  $G_{II}$  dels valors d'iniciació, es representen també al gràfic de la corba-R.

## 5.2. Teoria simple de bigues

El mètode basat en la teoria simple de bigues o *Simple Beam Theory* (SBT) va ser desenvolupat per Martin i Davidson [16]. Es tracta d'un mètode teòric que permet obtenir la tenacitat a la fractura,  $G$ , d'una proveta sense necessitat de conèixer prèviament la longitud de l'esquerda,  $a$  [17].

$$G_{II} = \frac{9P^2 S_L^2}{16b^2 E h^3} \quad \text{Eq. 3}$$

On  $P$ , és la càrrega aplicada,  $S_L$  és la distància horitzontal entre el rodet inferior esquerre i el rodet superior esquerre,  $b$  és l'amplada de la proveta,  $E$  és el mòdul de Young longitudinal i  $h$  es correspon amb la meitat de l'alçada de la proveta. A partir dels valors de  $G_{IIC}$  obtinguts en diferents punts es pot generar la corba-R tal i com es mostra a la Figura 24.

Aquest mètode requereix disposar de dades precises de la geometria de la peça i de les propietats del material. Cosa que pot fer pensar que el mètode del calibratge de la compliància és més precís.

## 5.3. Altres mètodes

A part dels dos mètodes de reducció de dades anteriors, hi ha altres mètodes que són vàlids per utilitzar en assajos 4ENF. Un d'ells és mitjançant un anàlisi no lineal d'elements finits. Aquest mètode permet simular el comportament de les provetes durant l'assaig.

Per altra banda, Arrese i Mujika [18] van desenvolupar un mètode basat en la teoria simple de bigues.

Aquests mètodes s'expliquen breument a l'annex B.

## 6. VALIDACIÓ

### 6.1. Resultats obtinguts dels assajos 4ENF

Un cop realitzats els assajos 4ENF s'ha dut a terme el tractament de les dades obtingudes. En primer lloc s'ha obtingut el gràfic Força-Desplaçament a partir de les dades de la màquina d'assaig, veure a la Figura 26. Sobre la corba s'hi ha afegit els punts en els quals s'ha mesurat la longitud d'esquerda (*Propagation data*) i també els punts d'iniciació de la propagació. Un d'aquests punts és la pèrdua de linealitat, per tal de mesurar aquesta pèrdua de linealitat s'ha fet una regressió lineal de la part de càrrega de la proveta sense propagació. Aquesta recta, idealment, hauria de coincidir amb l'origen de coordenades, doncs quan no hi ha desplaçament tampoc hi ha força.

En assaigs experimentals, i més concretament en els que impliquen compressions, hi ha un petit desplaçament abans que la màquina no comenci a aplicar la força a l'utilatge, de manera que es produeix un petit desfasament de la compliància i per tant, el gràfic pot quedar lleugerament desplaçat cap a la dreta. En aquests casos cal moure els valors de força i desplaçament tal com s'ha fet a la Figura 26.

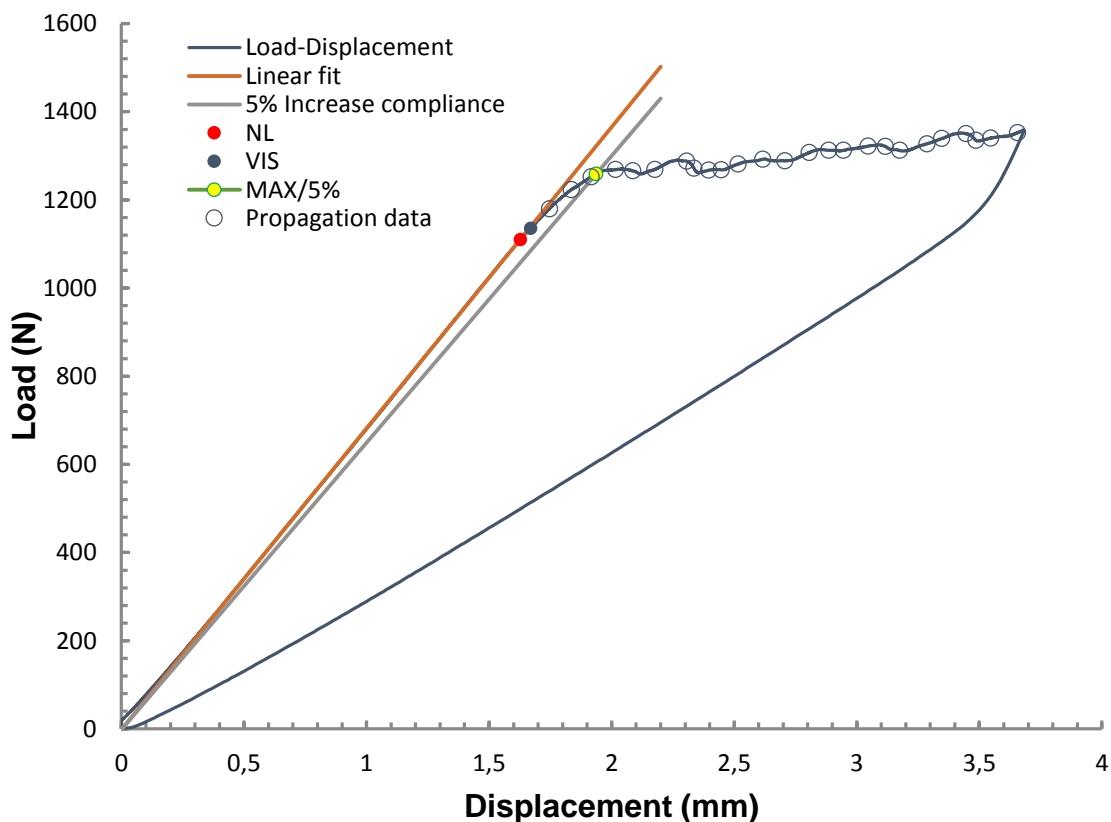


Figura 26: Gràfic Força- Desplaçament obtingut de l'assaig 4ENF en mode II de la proveta 15-2669.

### 6.1.1. Obtenció de $G_{IIC}$ utilitzant el mètode del calibratge de la compliància

A partir de les imatges obtingudes durant l'assaig es determina per a diferents longituds d'esquerda el valor de la força i el desplaçament. A la Figura 27 es pot veure una de les imatges obtingudes durant l'assaig on es pot observar la propagació de l'esquerda. Com que s'han realitzat marques cada 2 mm i cada proveta es propaga 50 mm, es poden obtenir fins a 25 punts.



Figura 27: Imatge obtinguda durant l'assaig en què es pot observar la propagació de l'esquerda.

A continuació es calcula la compliància dels punts obtinguts i es representa en un gràfic la compliància en funció de la longitud de l'esquerda, tal com es pot veure a la Figura 28.

Es fa una regressió lineal amb els punts del gràfic i s'obté l'equació de la recta. El pendent de la recta obtinguda,  $C_1$ , s'utilitza per al càlcul dels valors de la tenacitat a la fractura crítica,  $G_{IIC}$ .

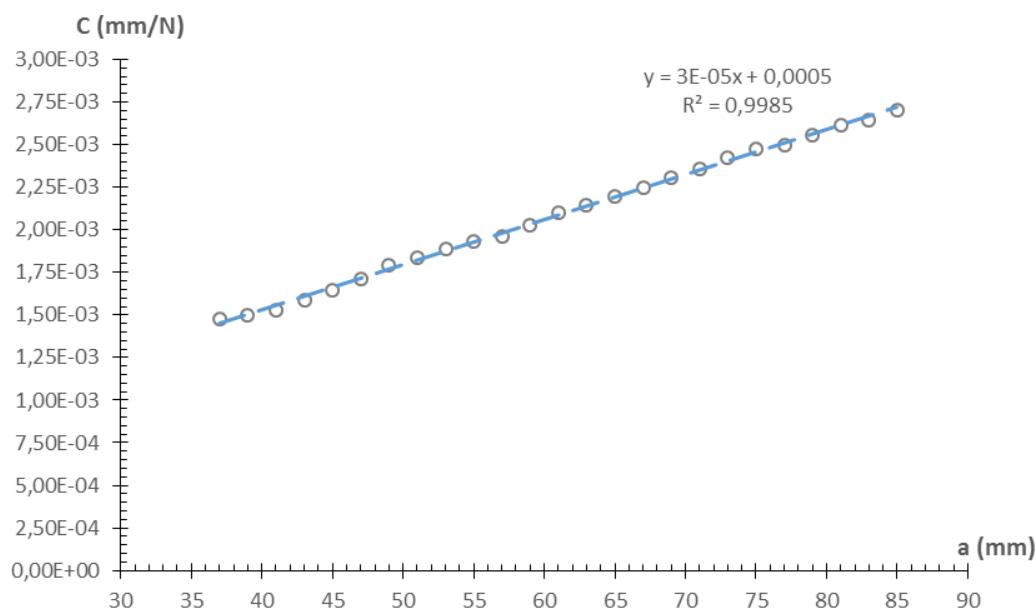


Figura 28: Gràfic Compliància ( $C$ ) - Longitud d'esquerda ( $a$ ) obtingut a partir de les dades d'un assaig 4ENF.

Per altra banda, es busquen els valors d'iniciació VIS, NL i MAX/5% per cada proveta.

Finalment es representen en un gràfic els valors obtinguts de  $G_{IIC}$ , tant en la propagació com els valors d'iniciació tal com es pot veure a la Figura 29. També es calcula el valor mitjà de  $G_{IIC}$  durant la propagació.

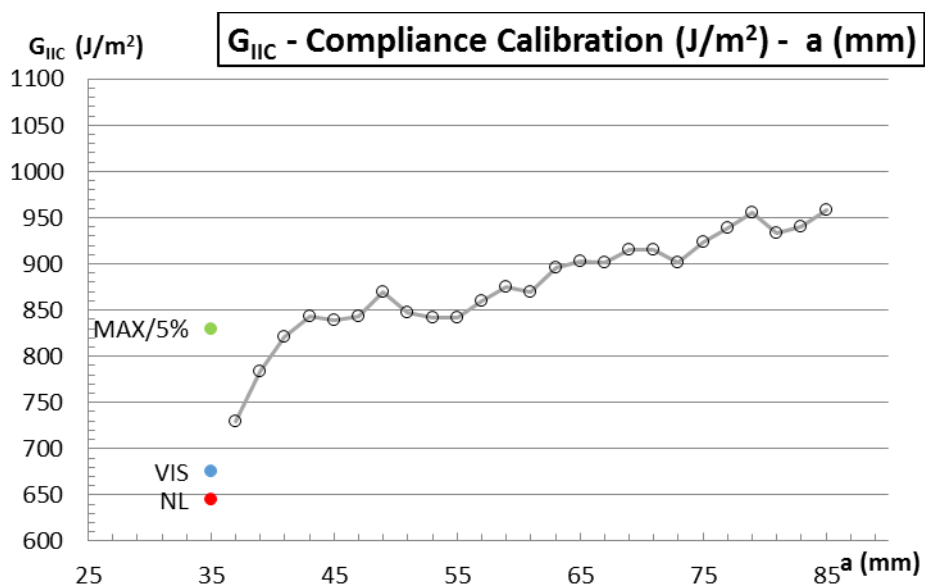


Figura 29: Gràfic Tenacitat a la fractura ( $G_{IIC}$ ) - Longitud d'esquerda ( $a$ ) obtingut utilitzant el mètode del calibratge de la compliància en un assaig 4ENF.

A l'Annex B es pot trobar més informació sobre aquest mètode de reducció de dades.



### 6.1.2. Resultats amb el mètode del calibratge de la compliància

Un cop tractades les dades obtingudes durant l'assaig, a la Taula 1 es mostra un resum dels valors obtinguts utilitzant el mètode del calibratge de la compliància. A l'Annex H es poden trobar els informes amb els resultats detallats per cada proveta.

Taula 1: Resum dels valors obtinguts als assajos 4ENF amb el mètode del calibratge de la compliància.

Proveta	VIS	NL	MAX/5%	PROP.
	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]
15-2666	828	787	898	873
15-2667	644	592	794	829
15-2668	653	527	806	831
15-2669	675	645	830	878
15-2670	720	578	880	866
<b>Mitjana</b>	<b>704</b>	<b>626</b>	<b>842</b>	<b>855</b>
<b>Desv. Std.</b>	75,29	99,43	45,62	23,59
<b>Cv</b>	10,69%	15,89%	5,42%	2,76%

Amb aquests valors, es pot obtenir el gràfic que es mostra a la Figura 30 en què es poden veure els valors mitjans de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$  així com la seva desviació.

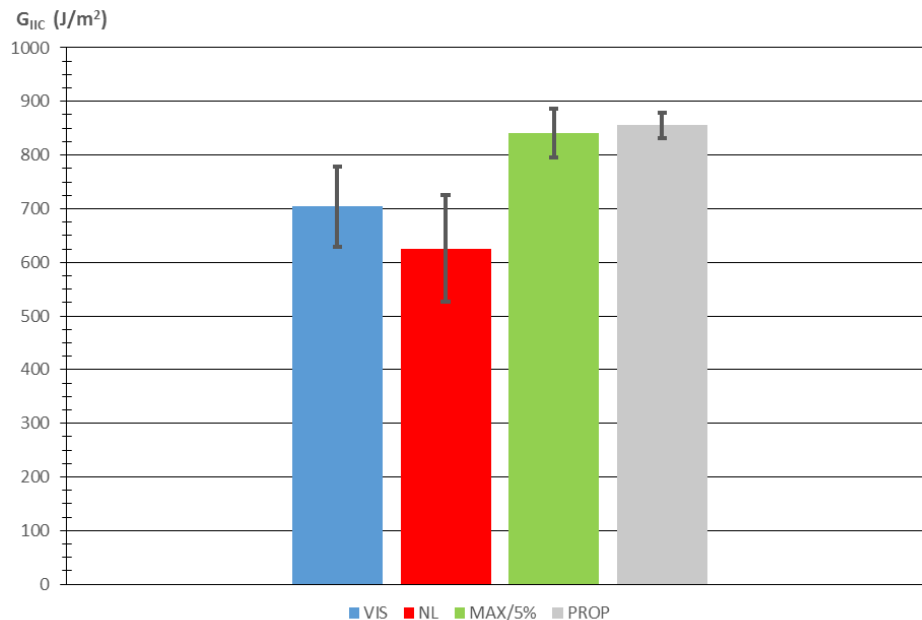


Figura 30: Valors mitjans de la tenacitat a la fractura  $G_{IIC}$  d'un lot de provetes utilitzant el mètode del calibratge de la compliància en un assaig 4ENF.

Observant aquests resultats es pot veure que la dispersió de les dades obtingudes durant la propagació es de només el 2,76%, per altra banda però es pot constatar que la dispersió del punt VIS i el punt NL és més alta, concretament del 10,69% i 15,89% respectivament.

Això pot ser degut per una banda perquè durant l'assaig de la proveta 15-2666 es va haver de parar l'assaig un cop havia començat la propagació degut a un problema tècnic i posteriorment es va repetir l'assaig des del principi, cosa que pot haver originat els valors de VIS i NL més elevats que els de la resta del lot.

Per altra banda, el punt NL presenta una incertesa degut a la dificultat d'obtenir el seu valor. A les normes d'altres assajos, com ara la de DCB [13], ja es parla de la dificultat d'obtenir aquest valor.

### 6.1.3. Obtenció de $G_{IIC}$ utilitzant el mètode de la teoria simple de bigues (SBT)

En aquest cas a partir de les dades de força i desplaçament obtingudes durant l'assaig i utilitzant les fórmules de l'article de Martin i Davidson [16], es pot conèixer la tenacitat a la fractura  $G$  de tots els punts.

El càlcul de  $G$  es fa a partir de la fórmula

$$G = \frac{9P^2 S_L^2}{16b^2 E h^3} \quad \text{Eq. 4}$$

On

$P$ : Càrrega aplicada [N]

$S_L$ : Distància horitzontal entre els corró esquerre inferior i el corró esquerre superior. En cas que  $L/l = 0.5$  equival a  $l$  [mm]

$b$ : amplada de la proveta [mm]

$E$ : Mòdul de Young longitudinal [MPa]

$h$ : meitat de l'alçada de la proveta [mm]

Com es pot observar, en aquest mètode és necessari conèixer acuradament les propietats de la proveta que s'assaja. Per altra banda però, no es necessari conèixer el valor de la longitud de l'esquerda ( $a$ ) per trobar  $G$ .

Amb els valors de  $G$ , es pot estimar el valor de  $a$  en cada punt amb les equacions següents

$$C = \frac{L^3}{48EI} \left( 1 + \frac{9a}{L} \right) = C_0 + C_1 a \quad \text{Eq. 5}$$

$$C_0 = \frac{L^3}{48EI} \quad \text{Eq. 6}$$

$$C_1 = \frac{9L^2}{48EI} \quad \text{Eq. 7}$$

$$a = \frac{C - C_0}{C_1} \quad \text{Eq. 8}$$

On

$L$ : Meitat de la distància horitzontal entre els centres dels corròns inferiors [mm]

$I$ : Segon moment d'inèrcia. En aquest cas  $I = \frac{2}{3}bh^3$  [mm<sup>4</sup>]

Utilitzant només els valors de força i desplaçament durant la propagació de l'esquerda, es calcula  $G$  i  $a$  per cada punt i tot seguit es fa un gràfic tal com es pot veure a la Figura 31. Seguidament es calcula la mitjana de  $G$  durant la propagació.

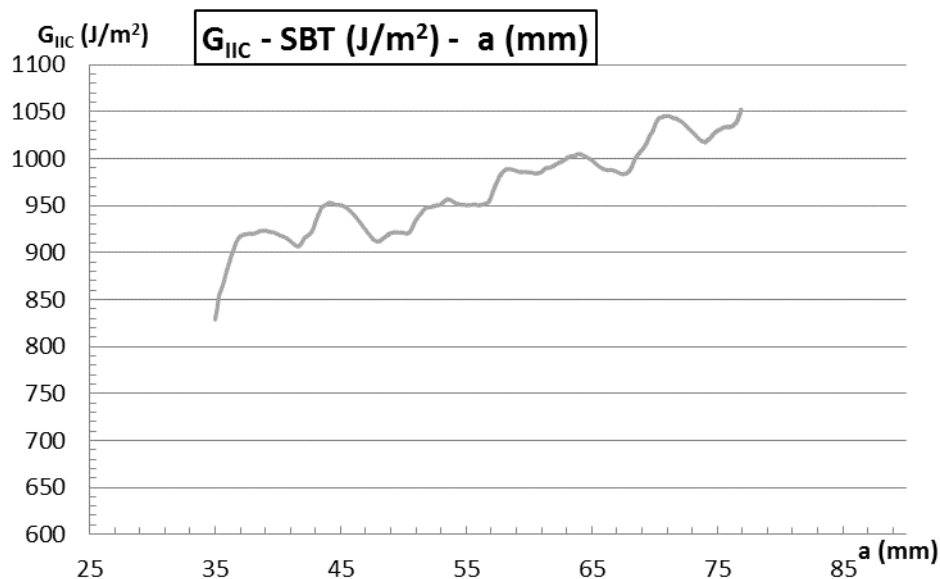


Figura 31: Gràfic Tenacitat a la fractura ( $G_{IIC}$ ) - Longitud d'esquerda ( $a$ ) obtingut utilitzant el mètode SBT en un assaig 4ENF.

A l'Annex B es pot trobar més informació sobre aquest mètode de reducció de dades.

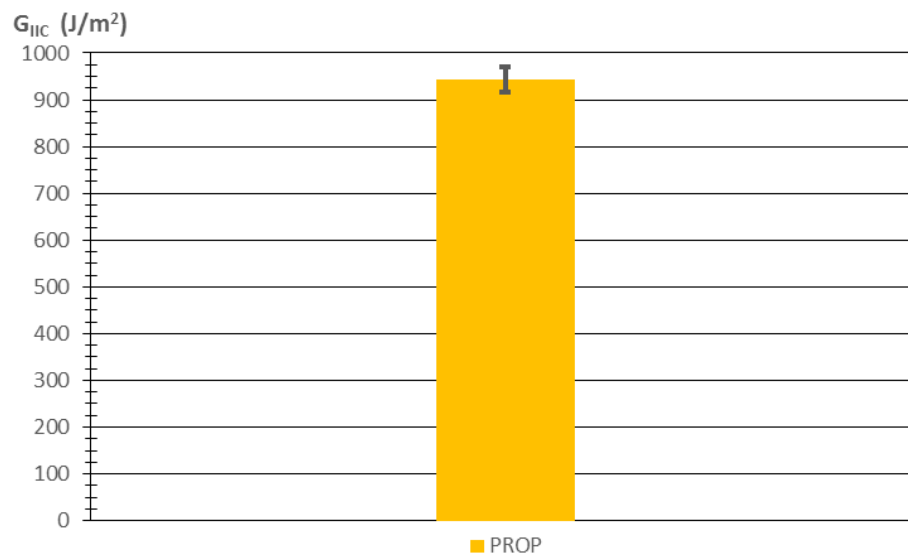
#### 6.1.4. Resultats amb el mètode de la teoria simple de bigues (SBT)

Un cop s'han tractat les dades obtingues durant els assajos utilitzant el mètode de la teoria simple de bigues, els resultats es mostren a la Taula 2. En aquest cas només s'ha calculat la mitjana de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$  durant la propagació de l'esquerda.

Taula 2: Resum dels valors obtinguts als assajos 4ENF amb el mètode de la teoria simple de bigues.

Proveta	PROP. [J/m <sup>2</sup> ]
15-2666	935
15-2667	930
15-2668	971
15-2669	970
15-2670	911
<b>Mitjana</b>	<b>943</b>
<b>Desv. Std.</b>	26,31
<b>Cv</b>	2,79%

Amb aquests valors, es pot obtenir el gràfic que es mostra a la Figura 32 en què es pot veure el valor mitjà de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$  així com la seva desviació.

Figura 32: Valor mitjà de  $G_{IIC}$  d'un lot de provetes utilitzant el mètode de la teoria simple de bigues en un assaig 4ENF.

Analitzant les dades es pot observar que la dispersió de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$  utilitzant aquest mètode és de només el 2,79%. Per altra banda però cal dir que aquest mètode presenta una incertesa més gran degut a la dificultat de seleccionar el rang de dades exacte on es produeix la propagació de l'esquerda.

### 6.1.5. Comparació entre el mètode del calibratge de la compliància i el mètode de la teoria simple de bigues

Un cop s'han obtingut els resultats de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$  utilitzant els dos mètodes de reducció de dades, es poden comparar entre ells. A la Taula 3 es mostren els valors mitjans obtinguts en cada una de les provetes amb els dos mètodes i a la Figura 33 es mostren les gràfiques obtingudes.

*Taula 3: Comparació de resultats obtinguts amb el mètode del calibratge de la compliància (CC) i el mètode de la teoria simple de bigues (SBT).*

Proveta	PROP. CC	PROP. SBT
	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]
15-2666	873	935
15-2667	829	930
15-2668	831	971
15-2669	878	970
15-2670	866	911
<b>Mitjana</b>	<b>855</b>	<b>943</b>
<b>Desv. Est.</b>	23,59	26,31
<b>Cv</b>	2,76%	2,79%

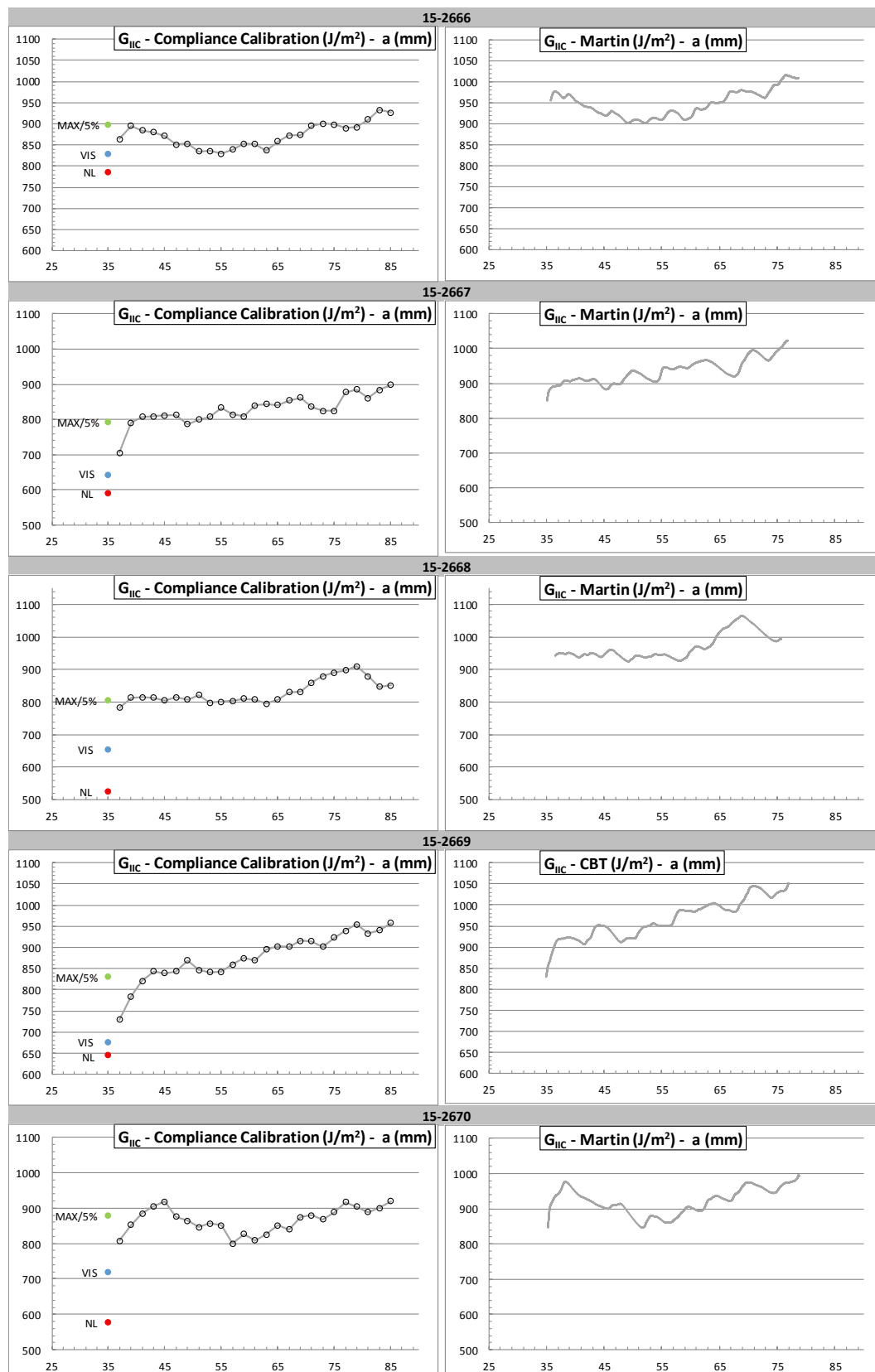


Figura 33: Comparació de gràfics obtinguts mitjançant el mètode del calibratge de la compliància (CC) i el mètode de la teoria simple de bigues (SBT).

Analitzant els resultats obtinguts, es pot constatar que els valors obtinguts amb el mètode SBT estan aproximadament un 10% per sobre dels obtinguts amb el mètode CC.

Es pot observar del gràfic que les dades obtingudes mitjançant els dos mètodes tenen aproximadament la mateixa forma.

Cal dir també que s'han hagut d'ajustar els valors de  $a$  del mètode SBT perquè coincidissin amb els valors reals de la longitud d'esquerda durant la propagació. Per això i perquè el mètode SBT requereix disposar de dades precises de la geometria de la peça i les propietats del material, s'opta per utilitzar únicament els valors obtinguts mitjançant el mètode del calibratge de la compliància (CC). També cal afegir que per el present estudi ens interessa un mètode totalment experimental.

## 6.2. Resultats obtinguts dels assajos ELS

Per poder comprar els resultats dels assajos 4ENF, s'estudien els resultats obtinguts en assajos ELS en mode II d'un lot de provetes de les mateixes dimensions i material que les utilitzades en l'assaig 4ENF.

Aquestes dades s'extreuen d'un treball previ realitzat al grup de recerca AMADE [19]. A l'annex G es poden trobar els resultats de totes les provetes assajades ELS. Per fer la comparació amb els resultats dels assajos 4ENF, s'utilitzen les dades obtingudes amb el mètode SBT (*Simple Beam Theory*).

A la Taula 4 es poden veure un resum dels valors obtinguts en l'assaig de les diferents provetes. Per altra banda a la Figura 34 es pot observar un gràfic amb els valors mitjans de la tenacitat a la fractura crítica  $G_{IIC}$ .

Taula 4: Resum dels valors obtinguts utilitzant el mètode SBT amb els assajos ELS.

Proveta	VIS	NL	MAX/5%	PROP.
	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]	[J/m <sup>2</sup> ]
<b>15-0523</b>	637	504	672	639
<b>15-0525</b>	631	517	689	719
<b>15-0526</b>	605	554	712	752
<b>15-0527</b>	560	461	627	695
<b>Mitjana</b>	<b>608</b>	<b>509</b>	<b>675</b>	<b>701</b>
<b>Desv. Est.</b>	35,04	38,38	35,95	47,63
<b>Cv</b>	5,76%	7,54%	5,33%	6,79%

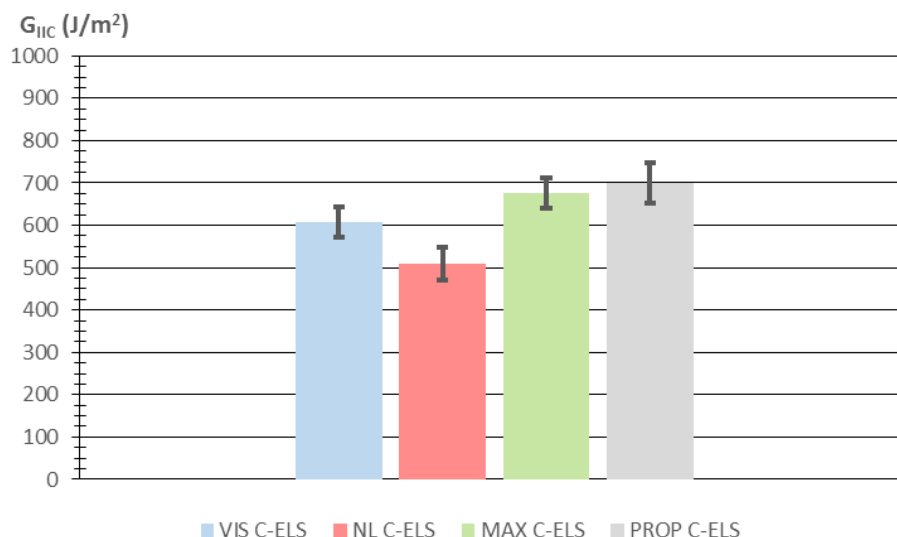


Figura 34: Valors mitjans de la tenacitat a la fractura  $G_{IIC}$  d'un lot de provetes utilitzant el mètode SBT en un assaig ELS.

### 6.3. Comparació de resultats

Es comparen els resultats obtinguts als assajos 4ENF amb els dels assajos ELS. Al gràfic de la Figura 35 es mostra la comparació dels valors de  $G_{IIC}$  als punts d'iniciació i durant la propagació de l'esquerda.

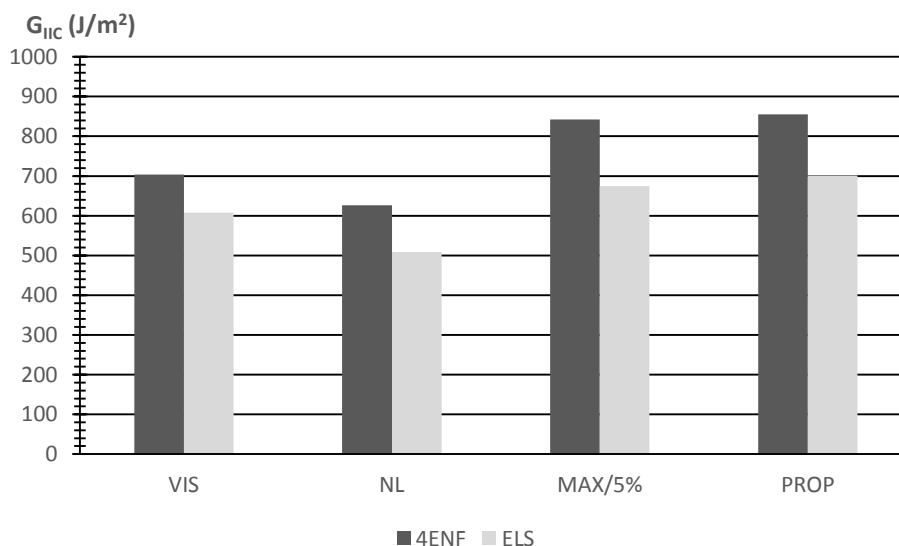


Figura 35: Comparació dels valors obtinguts de  $G_{IIC}$  mitjançant assajos 4ENF i ELS.

Com es pot observar, en tots els casos, els valors obtinguts mitjançant l'assaig 4ENF són més alts que els obtinguts mitjançant l'assaig ELS. Concretament, els valors dels assajos 4ENF són aproximadament un 20% superiors que els obtinguts mitjançant l'assaig ELS.



## 6.4. Discussió de resultats

Analitzant els gràfics força-desplaçament obtinguts i comparant-los amb el gràfic teòric ideal obtingut a partir de les equacions proposades per Martin [16], es pot constatar que hi ha algunes diferències, tal com es pot veure a la Figura 36.

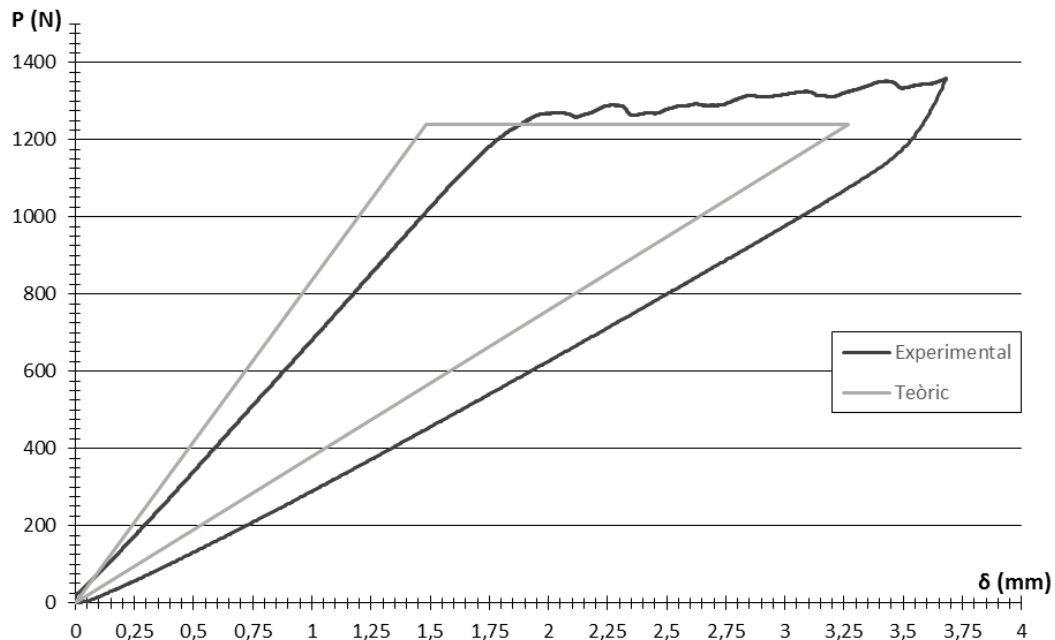


Figura 36: Gràfic Força-Desplaçament teòric i experimental d'un assaig 4ENF.

Segons el gràfic teòric inicialment la compliància és constant, un cop comença la propagació la càrrega es manté constant durant tota la propagació i finalment en la descàrrega la compliància torna a ser constant fins a arribar a l'origen.

Al gràfic experimental es pot observar com la recta força-desplaçament durant la càrrega té un pendent inferior a l'esperat teòricament. Per altra banda, durant la propagació, tot i mantenir-se la força relativament estable, aquesta va augmentant a mida que avança el front d'esquerda. Finalment, durant la descàrrega, inicialment la compliància no es manté constant, cosa que fa que apareixi una corba a la gràfica força-desplaçament.

Es requereix un anàlisi més exhaustiu per estudiar aquest comportament, però un dels motius principals d'aquesta variació podria ser la fricció que hi ha entre les dues cares de l'esquerda durant la propagació i la posterior descàrrega.

Pel què fa a la comparació dels resultats obtinguts amb els assajos 4ENF amb els obtinguts amb assajos ELS, tal com s'ha vist a l'apartat anterior, es pot constatar que tant els valors d'iniciació com la propagació són aproximadament un 20% superiors en el cas de l'assaig 4ENF.

També cal destacar que la variabilitat dels resultats obtinguts amb l'utilatge 4ENF és més gran que amb l'assaig ELS.

En anteriors treballs [3] [20] [16] ja s'apuntava a uns resultats aproximadament un 20% superiors de l'assaig 4ENF respecte a altres assajos en mode II. Un cop finalitzat l'anàlisi de les dades obtingudes, es considera que el disseny del nou utilatge 4ENF és vàlid. Tot i això, es recomana realitzar una campanya experimental més ampla per tal d'obtenir més informació sobre l'assaig 4ENF i les seves característiques.

## 7. CONCLUSIONS

### 7.1. Resum del treball realitzat i conclusions

En el present projecte s'ha dissenyat i fabricat un utillatge 4ENF. L'utillatge s'ha dissenyat de manera que aquest és compatible amb la part inferior de l'utillatge ENF disponible al laboratori del grup de recerca AMADE. També s'ha fet que l'eix central es trobi a la mínima distància vertical possible dels corròns superiors i s'ha aconseguit també que es pugui visualitzar tot el lateral de la proveta durant l'assaig. Per altra banda també s'ha buscat un disseny amb una alta rigidesa per tal que la compliància de l'utillatge no alteri els resultats dels assajos.

L'utillatge construït ha permès realitzar una campanya d'assajos 4ENF en mode II. En aquest tipus d'assaig s'ha pogut comprovar que, contràriament al que passava amb l'assaig ENF, la propagació de l'esquerda és estable.

Després dels assajos s'han comparat els gràfics de força-desplaçament obtinguts experimentalment amb els gràfics teòrics i s'ha pogut constatar que la propagació de l'esquerda és estable però que els valors de la força augmenten durant la propagació. Per altra banda, a l'inici de la descàrrega el gràfic no és lineal.

Aquestes diferències es creu que en gran part poden ser degudes a la fricció entre les dues cares de l'esquerda. Es fa necessari però un estudi més acurat per conèixer les causes exactes.

S'utilitzen dos mètodes de reducció de dades, el mètode del calibratge de la compliància, CC, i el mètode de la teoria simple de bigues, SBT, desenvolupat per Martin [16]. Després de provar els dos mètodes es decideix utilitzar el mètode del calibratge de la compliància ja que es creu convenient la utilització d'un mètode totalment experimental.

Un cop s'han obtingut els valors de la tenacitat a la fractura,  $G$ , dels assajos 4ENF es comparen els resultats amb els obtinguts d'un anterior treball on es realitzaven assajos ELS en mode II. Es comprova que els valors obtinguts amb els assajos 4ENF són aproximadament un 20% superiors als obtinguts als assajos ELS.

Un cop analitzats tots els resultats, es decideix que l'utillatge 4ENF dissenyat compleix els requisits necessaris per a la seva utilització en assajos en mode II. Per altra banda però es creu necessària una campanya experimental més àmplia per tal de millorar el coneixement sobre l'assaig 4ENF i les seves característiques.

## 7.2. Futurs treballs

Durant els assajos de l'utilatge 4ENF només s'ha assajat un lot de provetes amb una configuració de l'utilatge concreta. Es recomana realitzar noves campanyes experimentals en què s'assagin provetes de diferents gruixos i geometries. També es recomana assajar amb varies configuracions de l'utilatge per tal d'avaluar els resultats utilitzant valors diferents de  $L$  i variant la relació  $L/l$ . Un cop realitzats els assajos suficients es recomana realitzar un estudi per millorar el procediment d'assaig amb la nova informació obtinguda.

Com s'ha vist, la fricció entre les cares de l'esquerda afecta els resultats obtinguts, per la qual cosa caldria un estudi més acurat sobre aquest fenomen per determinar com afecta als resultats.

Durant els assajos només s'ha obtingut les dades de força i desplaçament del pistó i la longitud de l'esquerda a través de les imatges gravades. Seria interessant obtenir també dades referents als angles girats mitjançant inclinòmetres en diferents punts per tal de poder utilitzar altres mètodes de reducció de dades en els que no es necessiti la longitud d'esquerda a, ja que aquesta dada té una precisió baixa.

Un cop millorat el procediment d'assaig es proposa realitzar assajos 4ENF a fatiga per conèixer el comportament de l'utilatge i avaluar-ne la seva idoneïtat per aquest tipus d'assaig.

Girona, 14 de juny de 2016.

Pere Novell i Bosch

## 8. RESUM DEL PRESSUPOST

El cost total amb IVA del present projecte a ascendeix a MIL VUIT-CENTS SETANTA-DOS EUROS AMB VUIT CÈNTIMS. (1.872,08€)

## 9. RELACIÓ DE DOCUMENTS

1. Memòria i Annexos
2. Plànols
3. Plec de Condicions
4. Estat d'amidaments
5. Pressupost

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] *ASTM D7905/D7905M. Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, 2014.
- [2] «AITM 1-0006. Carbon Fiber Reinforced Plastics. Determination of Interlaminar Fracture toughness energy. Mode II. GIIC Test. Airbus Industrie Test Method.,» núm. Issue 2, June 1994.
- [3] Adams, D.F. et al., *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 3rd Edition, CRC Press, 2003.
- [4] Vanderkley, P. S., *M.S. Thesis*, Texas A&M University, 1981.
- [5] Russell, A. J. and Street, K. N., *ASTM STP 937*, p. 271, 1987.
- [6] *ISO15114. Fibre-reinforced plastic composites —Determination of the mode II fracture resistance for unidirectionally reinforced materials using the calibrated end-loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach*, 2014.
- [7] Russell, A. J. and Street, K. N., *Proc. ICCM4, Tokyo*, p. 279, 1982.
- [8] J. C. J. J. Reeder, « Mixed mode bending method for delamination testing,» *AIAA J.*, núm. 28(7), pp. 1270-1276, 1990.
- [9] *ASTM D6671/D6671M. Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*, 2013.
- [10] *ASTM D5528, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*, 2013.
- [11] Martin, R.H., Davidson, B.D., Mode II fracture toughness evaluation using a four point bend end notched flexure test. In: *Fourth International conference on deformation and fracture of composites*, Manchester, 1997.

- [12] C. D. B. Schuecker, «Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination,» *Composites Science and Technology*, núm. 60, pp. 2137-2146, 2000.
- [13] *ISO15024. Fibre-reinforced plastic composites - Determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIC, for unidirectionally reinforced materials.*, First Edition ed., 2001.
- [14] J. Renart, N. Blanco, E. Pajares, J. Costa, S. Lazcano i G. Santacruz, «Side Clamped Beam (SCB) hinge system for delamination tests in beam-type composite specimens,» *Composites Science and Technology*, núm. 71, pp. 1023-1029, 2011.
- [15] D. R. Moore, A. Pavan i J. G. Williams, *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers, Adhesives and Composites*, vol.ESIS Publication 28, Kidlington, Oxford: Elsevier Science Ltd., 2001.
- [16] R. H. Martin and B. D. Davidson, *Mode II fracture toughness evaluation using four point bend, end notched flexure test*, vol. 28, 1999, pp. 401-406.
- [17] B. D. Davidson, H. Hu i R. A. Shapery, «Analytical crack-tip element for layered elastic structures,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 6, núm. 62, pp. 243-253, 1995.
- [18] A. Arrese i F. Mujika, «Influence of bending rotations on three and four-point bend end notched flexure tests,» *Engineering Fracture Mechanics*, núm. 75, p. 4234–4246, 2008.
- [19] M. Pérez-Galmés, J. Renart, C. Sarrado, A. Rodríguez-Bellido i J. Costa, *A data reduction method based on the J-integral to obtain the interlaminar fracture toughness in a mode II end-loaded split (ELS) test*, Summited 2016.
- [20] Sun, X., Davidson, B.D., «Numerical evaluation of the effects of friction and geometric nonlinearities on the energy release rate in three- and four-point bend end-notched flexure tests,» *Engineering Fracture Mechanics*, núm. 73, pp. 1343-1361, 2006.
- [21] Davidson, B. D., Xuekun, S., «Effects of Friction, Geometry, and Fixture Compliance on the Perceived Toughness from Three-and Four-Point Bend End-Notched Flexure Tests,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 24, núm. 15/2005, pp. 1611-1628, 2005.



- [22] Davidson, B. D. et al., "Influences of Friction, Geometric Nonlinearities, and Fixture Compliance on Experimentally Observed Toughnesses from Three and Four-point Bend End-notched Flexure Tests.," *Journal of Composite Materials*, vol. 41, no. 10/2007, pp. 1177-1196, 2007.
- [23] Wang, W. et al., "Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites.," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, pp. 1447-1455, 2009.
- [24] Kageyama, K. et al., Effects of Test Conditions on Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Four-Point ENF Specimens, vol. 12, Paris, France.: Proceedings of ICCM, 12, 1999.
- [25] Davies, P. et al., «Comparison of test configurations for the determination of GIIC: Results from an international round robin,» *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 28 (9), núm. September 1999, pp. 432-437, 1999.
- [26] R. G. Budynas i J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Novena Edición ed., México, D.F.: McGraw-Hill, 2012.
- [27] MTS Systems Corporation, «MTS | Testing systems, mechanical testing and sensing solutions,» [En línia]. Available: <http://www.mts.com>. [Últim accés: 12 Maig 2016].
- [28] Anderson, J.C. et al., Ciencia de los Materiales. 2a Edición, Editorial Limusa, 1998.
- [29] Matthews, F.L., Rawlings, R.D., Composite Materials: Engineering and Science, London: Chapman & Hall, 1994.
- [30] Sridharan, S., Delamination Behaviour of Composites., Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2008.
- [31] Japanese Standards Association, "Testing methods for interlaminar fracture toughness of carbon fibre reinforced plastics," no. K7086, 1993.
- [32] Brunner, A.J. et al., "A status report on delamination resistance testing of polymer–matrix composites," *Engineering Fracture Mechanics*, no. 75, pp. 2779-2794, 2008.

## 11. GLOSSARI

**4ENF:** Assaig End-Notched flexure amb 4 punts de subjecció.

**$\alpha$ :** Longitud d'esquerda

**$\alpha_0$ :** Longitud d'esquerda inicial.

**EF:** Elements finits.

**Anisòtrop:** Fenomen que presenten alguns materials en què almenys una de les seves propietats varia segons la direcció.

**Assaig:** Operació de prova a què és sotmès un material per tal de valorar-ne objectivament la idoneïtat per a les condicions de treball que haurà de resistir.

**Assaig de preesquerda:** Operació que es realitza a una proveta abans del seu assaig per tal d'obtenir una esquerda inicial homogènia.

**ASTM:** American Society of the International Association for Testing and Materials.

**CC:** Compliance Calibration

**CFRP:** Carbon Fiber Reinforced Polymer

**Compliancia:** Mesura de la docilitat amb què un material pot ser deformat per una força, sense ruptura.

**Corba R:** Gràfic de la tenacitat a la fractura en funció de la longitud de l'esquerda.

**DCB:** Double-Cantilever Beam.

**ELS:** End Loaded Split

**Extensòmetre:** Aparell emprat per a mesurar petites variacions de la distància entre dos punts d'un sòlid i que hom utilitza en l'estudi de deformacions de models i del comportament de les estructures sotmeses a càrregues.

**Fletxa:** Distància entre el punt de màxima deformació d'una biga sotmesa a flexió i el lloc que ocuparia teòricament el mateix punt si no hi hagués deformació.

**FRP:** Fibres reforçades amb polímer.

**G:** Tenacitat a la fractura.

**$G_{IIC}$ :** Tenacitat a la fractura crítica en mode II.

**$h$ :** Meitat de l'alçada d'una proveta.

**Inclinòmetre:** Aparell que permet mesurar la inclinació.

**Insert:** Làmina fina de tefló que ha estat inserida entre les capes d'un material compòsit durant la seva fabricació.

**ISO:** International Organization for Standardization.

**Isotròpic:** Material que presenta les mateixes propietats físiques en totes les direccions.

**$L$ :** Meitat de la distància horitzontal entre els centres dels corròns inferiors en un utilatge 4ENF.

**$l$ :** Meitat de la distància horitzontal entre els centres dels corròns superiors en un utilatge 4ENF.

**LVDT:** Linear variable differential transformer. Aparell que permet mesurar el desplaçament lineal.

**Material compòsit:** Material format per diversos components elementals l'associació dels quals confereix al conjunt propietats que no té cap dels seus components per separat.

**MMB:** Mixed Mode Bending

**Mòdul de Young:** Paràmetre que caracteritza el comportament d'un material elàstic segons la direcció en la què s'apliqui una força.

**Ortotròpic:** Material les propietats mecàniques del qual varien en funció de la direcció.

**Resistència:** Propietat que tenen els cossos de suportar l'acció d'agents mecànics, físics o químics, sense trencar-se, deformar-se, etc., sense ésser atacats per aquests, etc.

**Rigidesa:** Capacitat que té un sòlid elàstic d'oposar-se a una deformació.

**SBT:** Simple Beam Theory.

**SCB:** Side Clamped Beam.

# ANNEXOS

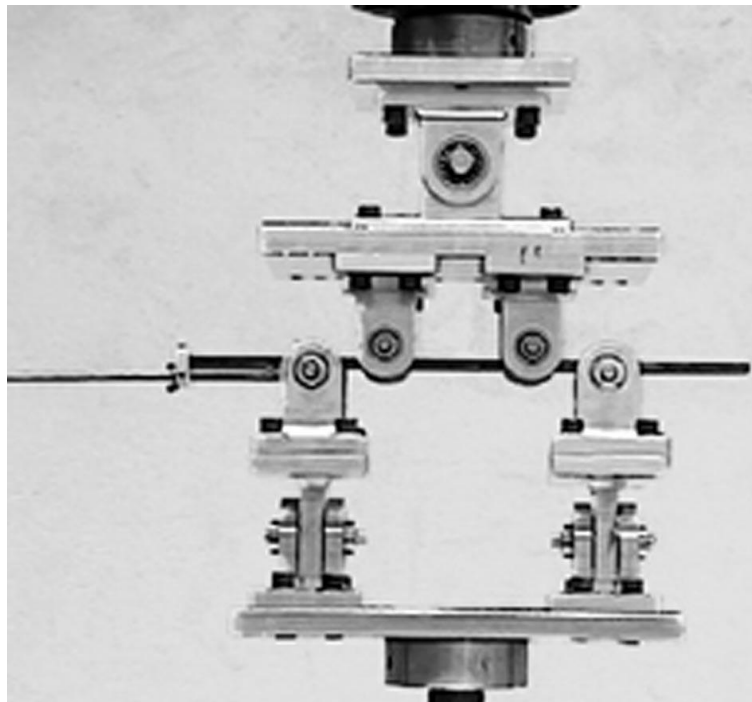
## ANNEX A: UTILLATGES I PROCEDIMENTS EXISTENTS. DISSENYS PRELIMINARS.

### A.1. Característiques dels utillatges 4ENF utilitzats per altres grups de recerca

A continuació es resumeixen els aspectes més rellevants dels utillatges 4ENF utilitzats per altres autors i grups de recerca.

#### Utillatge 1

El primer utillatge analitzat és el que descriuen Schuecker i Davidson [12] en un article publicat l'any 2000. A la Figura 37 es mostra una fotografia de l'utillatge 4ENF utilitzat en aquest estudi. Es pot observar que la part superior de l'utillatge pot rotar lliurement sobre l'eix perpendicular a la longitud de la proveta per tal que les forces aplicades sobre els dos punts de càrrega superiors de la proveta siguin iguals. Per altra banda, la part inferior de l'utillatge pot rotar lliurement sobre l'eix longitudinal per tal d'assegurar una càrrega uniforme en tota l'amplada de la proveta. Tots els punts de rotació, així com els pins de suport, estan equipats amb rodaments per tal de minimitzar la fricció en aquestes parts i permetre l'autoalineament de l'utillatge durant la càrrega de la proveta. A l'extrem esquerra es pot veure una fixació, aquesta sempre es col·loca a la part de la proveta on no hi ha esquerra per tal d'evitar que la proveta es desplaci longitudinalment durant l'assaig i pugui arribar a sortir dels corrns.



*Figura 37: Utillatge 4ENF utilitzat per Schuecker i Davidson [12].*

A la Figura 38 es pot veure l'esquema de l'utilatge utilitzat.

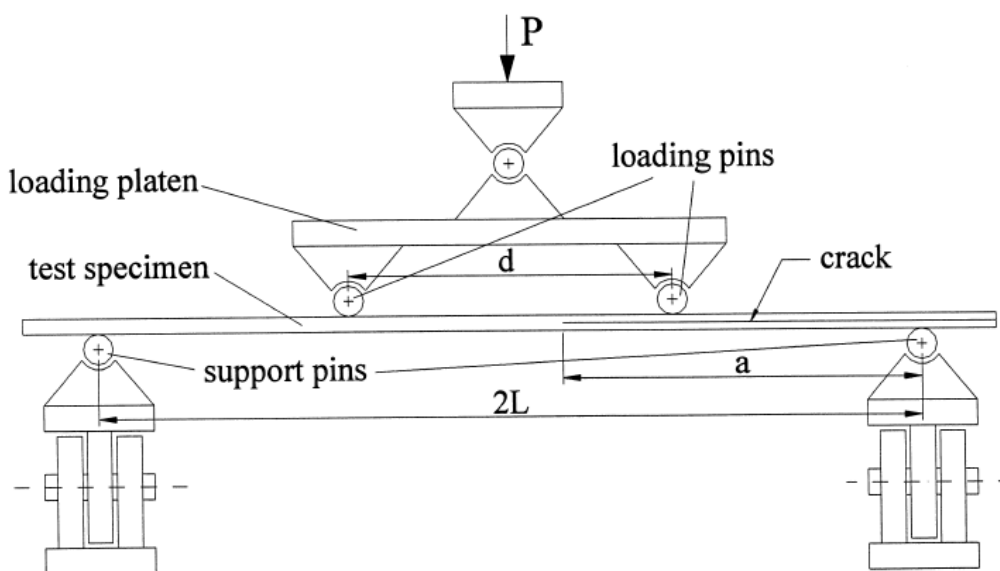


Figura 38: Esquema de l'utilatge 4ENF utilitzat per Schuecker i Davidson [12].

S'han utilitzat dues configuracions d'assaig diferents, A i B, utilitzant 4ENF. Les dades de cada una de les configuracions es mostra a la Taula 5.

Taula 5: Configuració de l'utilatge 4ENF utilitzat.

Geometria de l'utilatge		
	A	B
d	50.8 mm	76.2 mm
2L	127 mm	152.4 mm
span ratio (d/2L)	0.4	0.5

Les provetes assajades tenien una amplada aproximada  $B = 25.4$  mm amb una longitud d'esquerda inicial de  $a = 53.3$  mm. Abans d'assajar les provetes es fa un assaig de preesquerda en mode II amb el mateix utilatge.

## Utilatge 2

El segon utilatge que s'analitza és el proposat per Davidson i Xuekun [21] el 2005. Com es pot observar a la Figura 39, aquest utilatge 4ENF té un pivot central amb una alçada igual a zero respecte els dos corrns superiors. Els diàmetres dels rodets utilitzats per als assajos són de 6.35mm i 9.525mm en funció del material assajat. En tots els assajos 4ENF es va utilitzar una

distància entre rodets superiors,  $d$ , centrada respecte la distància entre els rodets inferiors,  $2L$ , i un valor de  $d/2L=0.5$ .

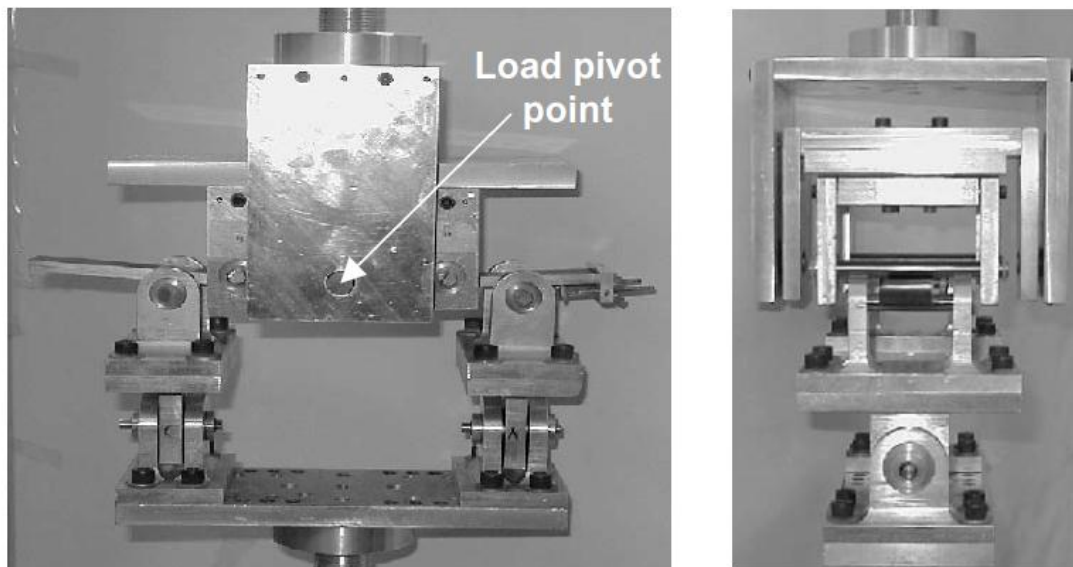


Figura 39: Imatges frontal i lateral de l'utilatge 4ENF utilitzat per Davidson i Xuekun [21].

En aquest treball es realitzen assajos amb 3ENF i en 4ENF amb tres configuracions diferents: 4ENF-A, 4ENF-B i 4ENF-C. A la Figura 40 es pot observar la representació esquemàtica dels assajos. Les característiques de cada configuració i els resultats experimentals es troben a la Taula 6.

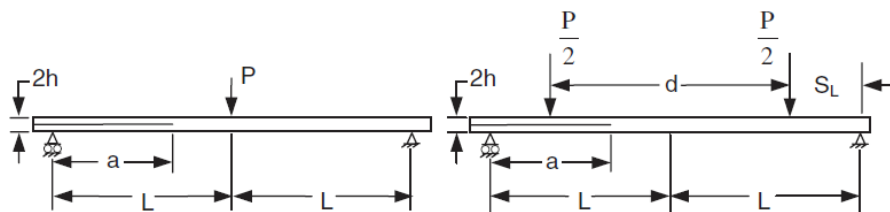


Figura 40: Representació esquemàtica dels assajos 3ENF (a) i 4ENF (b) [21].

Taula 6: Resultats experimentals per C12 K/R6376 i T800H/3900-2 [21].

Material	C12K/R6376				T800H/3900-2			
Test	3ENF	4ENF-A	4ENF-B	4ENF-C	3ENF	4ENF-A	4ENF-B	4ENF-C
$d$ (mm)	—	50.8	63.5	76.2	—	50.8	63.5	76.2
$2L$ (mm)	127	101.6	127	152.4	152.4	101.6	127	152.4
$2h$ (mm)	4.67	4.82	4.79	4.85	5.79	6.59	6.60	6.64
No. specs tested	5	5	2	2	5	5	2	2
Min. $G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	1056	1679	1627	1439	1932	2238	2214	1967
Max. $G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	1427	1744	1673	1566	2134	3071	2673	2443
Avg. $G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	1279	1712	1650	1503	2019	2704	2443	2205
Range/mean	0.29	0.04	0.03	0.08	0.10	0.31	0.19	0.22

Aquest utillatge també és utilitzat en un article de Davidson i Sun [20] del 2006.

Les configuracions de l'utillatge utilitzades en aquest estudi es presenten a la Taula 7 on,  $2L$  es refereix a la distància entre els rodets inferiors,  $d$  a la distància entre els rodets superiors,  $2h$  és el gruix de les provetes i  $DR$  és el diàmetre dels rodets superiors.

Taula 7: Configuracions d'assaig i propietats dels diferents materials assajats. Els números subratllats i en negreta representen els valors de la configuració de referència utilitzada per Davidson i Sun [20].

Geometries considered	
Geometric parameters <sup>a</sup>	3ENF & 4ENF
$2L$ (mm)	<u>101.6</u> , 127, 152.4
$2h$ (mm)	3.6, <u>4.8</u> , 6.0
$D_R$ (mm)	<u>6.35</u> , 9.525
$d/2L$ (4ENF only)	0.4, <u>0.5</u> , 0.6

<sup>a</sup> Crack length,  $a$ , is  $S_L + 15$  mm for the 4ENF and  $L/2$  for the 3ENF test.

Aquest mateix utillatge és utilitzat en un altre article de Davidson et al. [22] del 2007 en assajos de diferents laminats de fibra de carboni.

Les configuracions de l'utillatge i les dimensions de les provetes utilitzades en els assajos es mostren a la Taula 8.

A la Taula 8 es mostra la longitud entre rodets de la part inferior ( $2L$ ), la llargada de l'esquerda ( $a_c$ ), el gruix mitjà de la proveta ( $2h$ ), l'amplada mitjana de la proveta ( $B$ ) i per els assajos 4ENF la ràtio entre la longitud superior i inferior ( $d/2L$ ). L'última columna de la taula indica el rang de càrrega utilitzat en el calibratge de la compliància (CC).



Taula 8: Configuracions de l'utilatge i dimensions de les provetes [22].

Material	Test	Batch-plate	2L (mm)	$a_c$ (mm)	2h (mm)	B (mm)	d/2L	CC range (N)
C12K/R6376	3ENF	1-1	127.0	31.75	4.672	25.320	–	250–680
	4ENF-A	1-2	101.6	40.64	4.816	24.125	0.5	585–1000
	4ENF-B	1-2	127.0	46.99	4.788	24.168	0.5	240–780
	4ENF-C	1-2	152.4	53.34	4.851	24.168	0.5	220–660
T800H/3900-2	3ENF	1-1	152.4	38.10	5.791	25.200	–	250–1400
	4ENF-A	2-1	101.6	45.72	6.594	25.070	0.5	1200–2100
	4ENF-B	2-1	127.0	59.69	6.680	24.980	0.5	1000–1800
	4ENF-C	2-1	152.4	76.20	6.642	25.020	0.5	850–1450
	4ENF-D	2-2	127.0	45.72	6.500	24.290	0.6	1200–2100

### Utilatge 3

El tercer utilatge analitzat és el que presenten Wang et al. [23]. En aquest no es descriu extensament l'utilatge utilitzat per a realitzar els assajos 4ENF, però es mostra una imatge d'aquest. Figura 41.

Com es pot observar, aquest utilatge està invertit respecte els altres utilatges analitzats. El carro es troba a la part inferior de l'utilatge i les provetes es subjecten amb dues gomes a la part superior per tal que no caiguin quan no s'aplica força al carro.

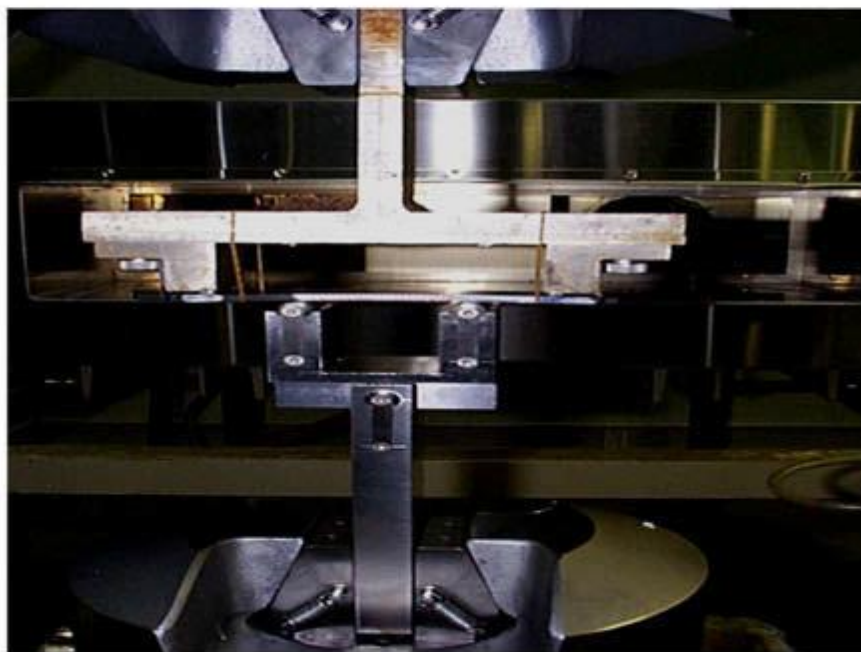


Figura 41: Utilatge 4ENF utilitzat per Wang et al. [23].

La geometria de les provetes assajades es mostra a la Figura 42.

La distància entre rodets inferiors (2L) és de 100 mm, la distància s és de 25 mm, Figura 43.

Abans de l'assaig es preesquerda la proveta uns 2 mm en mode I. La longitud inicial de l'esquerda és de 30 mm.

L'assaig 4ENF s'acaba quan l'esquerda ha crescut uns 30 – 35 mm.

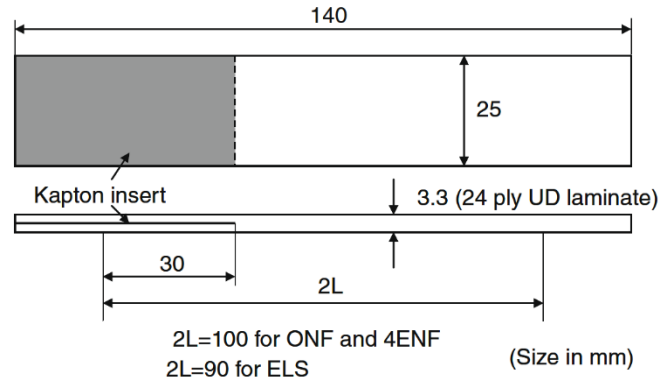


Figura 42: Geometria de les provetes [23].

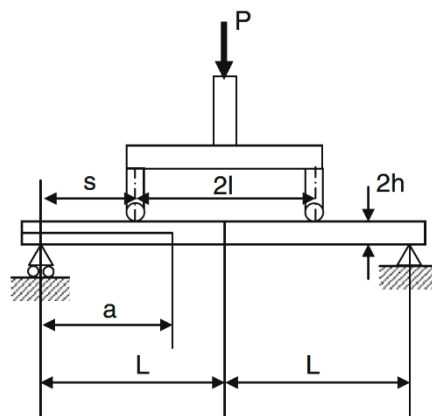


Figura 43: Representació esquemàtica de l'assaig 4ENF [23].

## A.2. Aspectes a destacar del disseny d'un utilatge 4ENF

En aquest apartat s'inclouen els aspectes més importants que ha de tindre el disseny de l'utilatge a partir dels dissenys presentats en l'apartat anterior.

Els autors mencionats a l'apartat anterior [12] - [23] donen molta importància a l'alta rigidesa tant de la màquina d'assaig com de l'utilatge per evitar que tingui efectes sobre la compliància de l'assaig. Per l'assaig 4ENF, la precisió és major quan s'utilitza una distància entre rodets petita i en materials amb baixa tenacitat a la fractura.

Degut a que es necessita un utillatge rígid, es creu que els rodaments de la part inferior de l'utilatge de la Figura 39 redueixen la rigidesa de l'utilatge, més perjudicial que qualsevol avantatge que pugui oferir la reducció de la fricció dels rodaments o la rotació dels suports en l'eix Y per permetre una distribució uniforme de la proveta [21]. Per tant els rodaments longitudinals no són recomanables.

També es pretén dissenyar i fabricar una part superior de l'utilatge més rígida, en comparació a la mostrada a la Figura 39. Per aquest disseny es requereix un pivot central a una alçada superior a zero, aquesta alçada però s'ha de mantenir el més petita possible [24]. Per altra banda però, és important poder visualitzar el creixement de l'esquerda durant l'assaig per tal de poder mesurar-ne la longitud, dada necessària per calcular  $G_{II}$ . Això fa que sigui difícil aconseguir un disseny amb els rodets i l'eix de gir alineats.

Els resultats obtinguts indiquen que és necessari que la compliància tant de l'utilatge com de la màquina per fer l'assaig estigui dos ordres de magnitud per sota que la compliància de la proveta a assajar [21].

En l'assaig 4ENF, es recomana utilitzar la mínima distància entre rodets possible i els rodets amb el mínim diàmetre possible i col·locar la proveta de manera que l'insert estigui com a mínim a l'alçada d'un dels rodets interiors. Aquestes recomanacions minimitzaran l'efecte del gir de l'utilatge quan la proveta es deformi.

A partir de la informació analitzada, es consideren per al disseny de l'utilatge 4ENF els requisits que es detallen a la Taula 9.

*Taula 9: Requisits de l'utilatge 4ENF.*

<b>Característiques de l'utilatge 4ENF</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alta rigidesa.</li> <li>▪ Utilització de parts de l'utilatge ENF disponible al laboratori del grup de recerca AMADE de la Universitat de Girona.</li> <li>▪ La rigidesa de l'utilatge ha d'estar dos ordres de magnitud per sobre de la rigidesa de la proveta a assajar.</li> <li>▪ Visualització de la proveta (seguiment del creixement de l'esquerda).</li> </ul>

Geometria de l'utilatge 4ENF	
Separació dels centres dels corrons superiors (2l)	50.8÷76.2mm (2"÷3")
Separació dels centres dels corrons inferiors (2L)	101.6÷152.4mm (4"÷6")
Relació (2l/2L)	0.5
Distància entre el centre dels corrons superiors i pivot central	inferior a 12.5mm
Amplada de les provetes	20-25mm

### A.3. Dissenys preliminars de l'utilatge 4ENF

A partir dels requisits descrits a l'apartat 0, es proposen dos dissenys preliminars de l'utilatge 4ENF, el disseny A i el disseny B.

#### A.3.1. Disseny A

El disseny A es pot dividir en una part inferior i una part superior. La part inferior està formada per una base fixada a la màquina, dos suports i dos corrons on es recolza la proveta. Aquesta part s'aprofita de l'utilatge ENF disponible al laboratori d'AMADE. Pel que fa a la part superior, està formada per una fixació superior que es fixa a la part mòbil de la màquina d'assaig i un carro. La unió entre el carro i la fixació es fa per mitjà de dos semieixos. Figura 44.

A la Taula 10 es mostren els principals avantatges i inconvenients del disseny A.

*Taula 10: Principals avantatges i inconvenients que presenta el disseny A.*

<b><u>Avantatges</u></b>
El carro no es recolza sobre la proveta. Un cop muntat el carro, aquest queda subjectat amb la part superior.
Els recolzaments superiors i el pivot estan al mateix eix horitzontal.
No cal fer correccions degut al pes del carro.
S'aprofiten parts de l'utilatge ENF que hi ha al laboratori.
<b><u>Inconvenients</u></b>
<b>Mala visibilitat</b>
No es pot utilitzar un sol eix central d'unió entre el carro i la part superior, s'han d'utilitzar dos semi-eixos.
Possibles problemes de fricció entre els rodets superiors i inferiors i la proveta.
Muntatge complicat

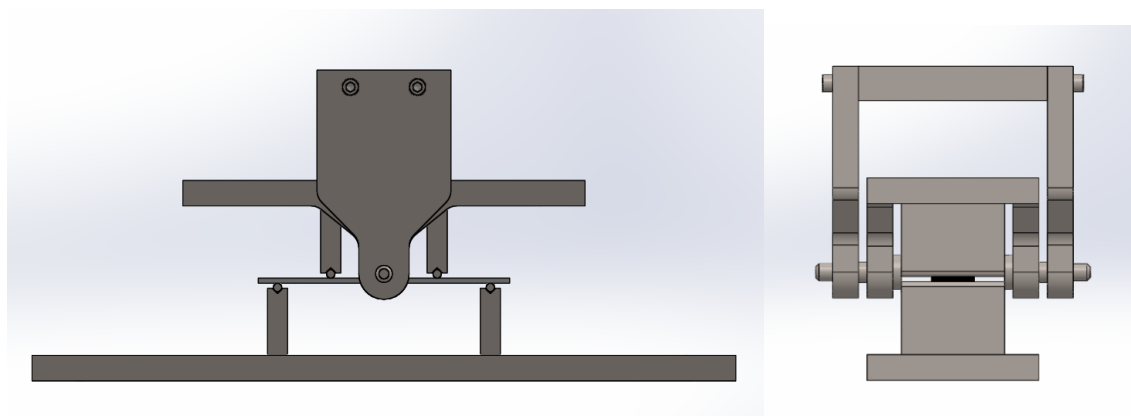


Figura 44: Vista frontal i lateral del disseny A.

### A.3.2. Disseny B

El disseny B, tal com passa amb el disseny A, es pot dividir en una part inferior i una part superior. La part inferior consisteix en una base fixada a la part fixa de la màquina d'assaig, dos suports i dos corrns on es recolza la proveta. La part superior està formada per una fixació superior que es fixa a la part mòbil de la màquina d'assaig i un carro. Figura 45.

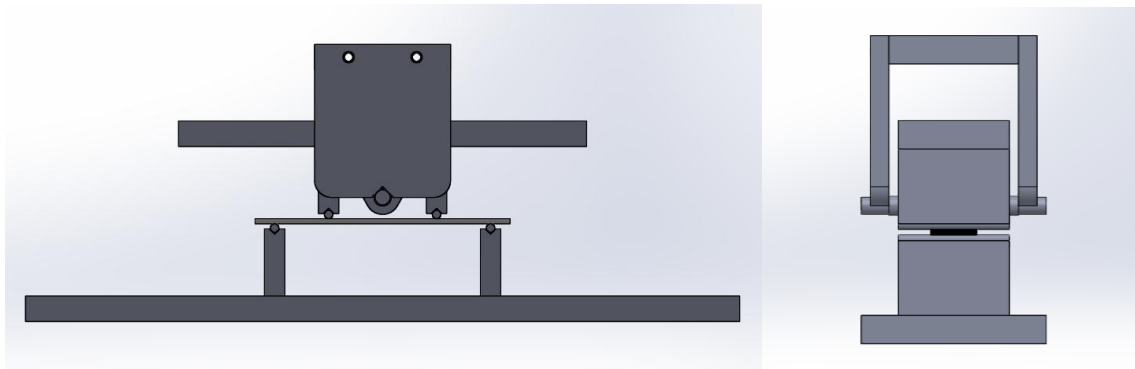
El carro es col·loca sobre la proveta, quan es baixa la fixació superior aquesta entra en contacte amb el carro, que s'autoalinea, i a través d'aquest es transmet la càrrega a la proveta.

Amb aquest disseny s'aconsegueix una bona visibilitat de la proveta durant tot l'assaig, per altra banda, tot i que el centre de rotació del carro no es troba en el mateix pla que els corrns superiors, la distància vertical és molt petita.

A la Taula 11 es mostren els principals avantatges i inconvenients d'aquest disseny.

Taula 11: Principals avantatges i inconvenients que presenta el disseny B.

<b><u>Avantatges</u></b>
Bona visibilitat de la proveta.
Muntatge relativament senzill.
S'aprofiten parts de l'utiltatge ENF que hi ha al laboratori.
Facilitat per centrar l'utiltatge durant el muntatge
<b><u>Inconvenients</u></b>
Centre de rotació del carro superior lleugerament desplaçat verticalment.
Problemes de subjecció del carro
El pes del carro pot afectar els càlculs de $G_{II}$ i s'haurà de tindre en compte en la reducció de dades.



*Figura 45: Vista frontal i lateral del disseny B.*

Un cop analitzats els dos dissenys, s'ha optat per desenvolupar el disseny final a partir del disseny B.

## ANNEX B: MÈTODES DE REDUCCIÓ DE DADES

### B.1. Mètode 1: Calibratge de la compliància

El mètode de reducció de dades basat en el calibratge de la compliància és un mètode experimental. Durant l'assaig de la proveta es recullen dades de força i desplaçament en diferents punts. La compliància en un punt equival al desplaçament dividit entre la força.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad \text{Eq. 9}$$

Per utilitzar aquest mètode, es seleccionen diferents punts i s'obté la lectura de la força aplicada per la màquina d'assaig així com el desplaçament del pistó. Amb aquestes dades es calcula la compliància. Per altra banda es mesura la longitud de l'esquerda de la proveta en aquest punt.

Un cop s'han obtingut punts suficients, es fa un gràfic amb els diferents punts tal com es pot observar a la Figura 23.

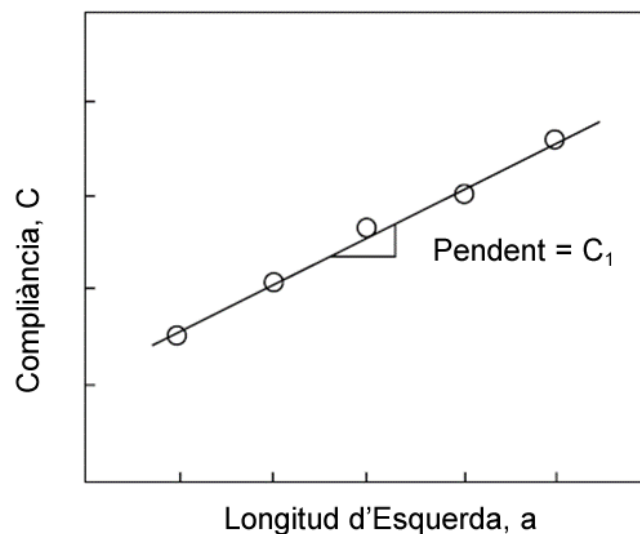


Figura 46: Gràfic compliància (C) vs. longitud d'esquerda (a) per una proveta 4ENF [3].

Es pot observar que hi ha una relació lineal entre la compliància i la longitud d'esquerda. A continuació es fa un regressió lineal per trobar l'equació de la recta. Aquesta serà de la forma

$$C = C_0 + C_1 \cdot a \quad \text{Eq. 10}$$

On  $C_1$  correspon al pendent de la recta.

L'equació fonamental que permet trobar la tenacitat a la fractura crítica a partir de la qual l'esquerda es propaga utilitzant el mètode del calibratge de la compliància és la següent

$$G_{IIC} = \frac{P_c^2}{2b} \cdot \frac{\partial C}{\partial a} \quad \text{Eq. 11}$$

Combinant la Eq. 1 i la Eq. 11 s'obté

$$G_{IIC} = \frac{P_c^2}{2b} \cdot C_1 \quad \text{Eq. 12}$$

on  $G_{IIC}$  és la tenacitat a la fractura crítica,  $P_c$  és la càrrega necessària per propagar l'esquerda i  $b$  és l'amplada de la proveta.

Un cop s'ha determinat  $C_1$  es pot generar la gràfica de la tenacitat a la fractura en funció de la longitud de l'esquerda, també coneguda com a corba-R.

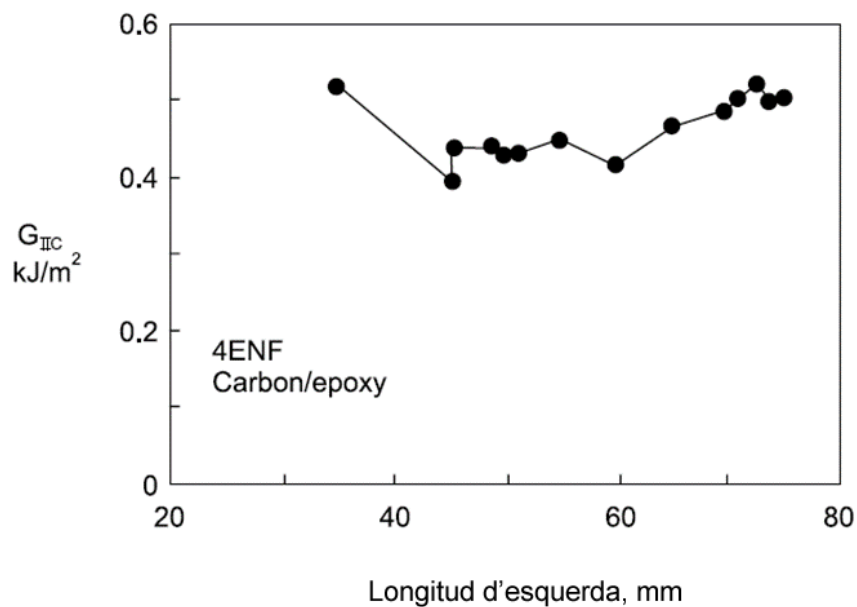


Figura 47: Corba-R per un material compòsit carboni/epòxid en un assaig 4ENF [3].

Aquest mètode és el més precís per determinar la tenacitat en assajos 4ENF. Això es degut a que aquest mètode és un mètode de reducció de dades directe en que només es suposa una relació



lineal entre la compliància i la propagació de l'esquerda. Per altra banda, es negligeix qualsevol error degut a variacions en la geometria o les propietats del material de cada proveta.

Alguns dels autors que utilitzen aquest mètode en els seus treballs són Adams et al. [3], Davies et al. [25] o Schuecker [12].

## B.2. Mètode 2: Teoria simple de bigues

El mètode de la teoria simple de bigues també és conegut com a Simple Beam Theory (SBT).

Per aplicar aquest mètode es determinen els moments a la punta de la delaminació i es substitueixen per les equacions elementals del front d'esquerda [17] per obtenir la tenacitat a la fractura en mode I,  $G_I$ , la qual es nul·la, i la tenacitat a la fractura en mode II,  $G_{II}$ , el resultat de la qual és l'equació

$$G = \frac{(R - 2)}{4b^2D} \cdot \left[ P_L S_L \left( 1 - \frac{a}{2L} \right) + P_R a \left( 1 - \frac{S_R}{2L} \right) \right]^2 \quad \text{Eq. 13}$$

On,  $b$  és l'amplada de la proveta,  $D$  és la rigidesa a flexió de la regió no deslaminada,  $R$  és la relació entre les rigideses a la flexió de la zona no deslaminada i la deslaminada. La resta de símbols estan definits a la Figura 48.

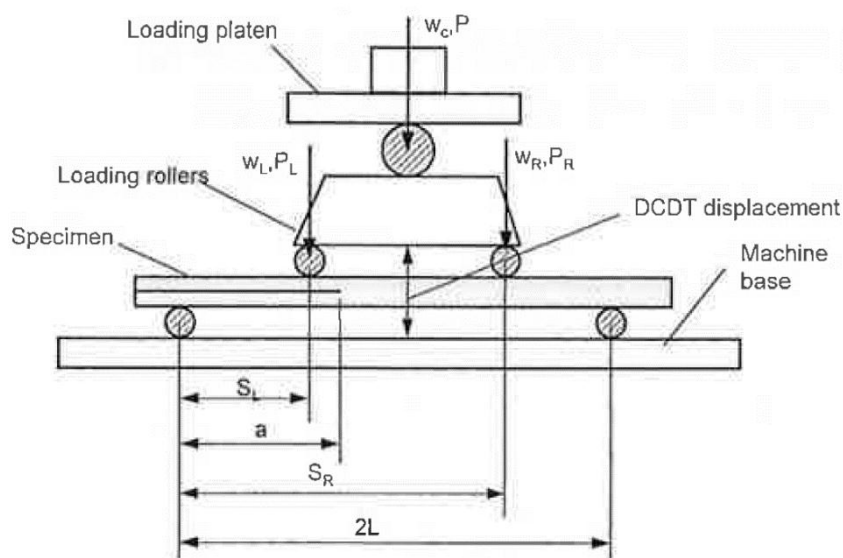


Figura 48: Esquema de l'assaig 4ENF [16].

Considerant una configuració fixa on

$$P_L = P_R = P/2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$G = \frac{P^2(R-2)}{16b^2D} \cdot \left[ S_L + a \left( 1 - \frac{S_L}{2L} - \frac{S_R}{2L} \right) \right]^2 \quad \text{Eq. 15}$$

Per altra banda, si es considera una  $R = 8$  i que la configuració és simètrica i per tant

$$S_L + S_R = 2L \quad \text{Eq. 16}$$

S'obté que

$$G = \frac{3P^2S_L^2}{8b^2D} \quad \text{Eq. 17}$$

A continuació es substitueix  $D$ ,

$$D = \frac{EI}{b} \quad \text{Eq. 18}$$

$$G = \frac{3P^2S_L^2}{8bEI} \quad \text{Eq. 19}$$

On  $E$  es correspon amb el mòdul de Young longitudinal i  $I$  es correspon amb el segon moment d'inèrcia.

Finalment es substitueix el valor de  $I$  considerant que l'alçada de la proveta és  $2h$ ,

$$I = \frac{1}{12} b(2h)^3 \quad \text{Eq. 20}$$

$$G = \frac{9P^2S_L^2}{16b^2Eh^3} \quad \text{Eq. 21}$$

Per altra banda, la compliància de la proveta es pot calcular com

$$C = \frac{L^3}{48EI} \left( 1 + \frac{9a}{L} \right) = C_0 + C_1 a \quad \text{Eq. 22}$$

Aquest mètode requereix disposar de dades precises de la geometria de la peça i de les propietats del material. Cosa que fa que sigui més recomanable utilitzar el mètode del calibratge de la compliància.

Alguns dels autors que utilitzen el mètode de la teoria simple de bigues són Martin i Davidson [16] i Sun i Davidson [20].

### B.3. Mètode 3: Elements finits

Aquest mètode consisteix en un anàlisi no lineal d'elements finits. Es tracta d'un mètode teòric que permet, mitjançant una simulació, conèixer el comportament de les provetes de manera aproximada.

L'equació utilitzada per el càlcul de la tenacitat a la fractura es mostra a continuació

$$G = \frac{1}{B} \cdot \left[ \frac{U_a - U_{a+\delta a}}{\delta a} - \frac{1}{\delta a} \cdot \int_0^S f(\xi) \cdot \eta(\xi) \cdot \partial \xi \right] \quad \text{Eq. 23}$$

On

$B$ : Amplada de la proveta.

$U_a$ : Energia de deformació obtinguda de l'anàlisi d'elements finits d'un cos que conté una esquerra de longitud  $a$ .

$U_{a+\delta a}$ : Energia de deformació quan la longitud d'esquerra és igual a  $a + \delta a$  on  $\delta a$  són petits increments de la longitud de l'esquerra.

$\delta a$ : Petits increments de la longitud de l'esquerra.

$S$ : Longitud de la interfície de la delaminació.

$\xi$ : Sistema de coordenades local de la interfície de delaminació.

$f(\xi)$ : Força de fricció (per unitat de llargada) al llarg de la interfície durant l'avanç de l'esquerra.

$\eta(\xi)$ : Desplaçament relatiu associat.

Amb un anàlisi d'E.F., l'integral de l'equació, anomenada  $\delta W_f$ , es pot calcular com

$$\delta W_f = \sum_{i=1}^N F_i(\xi) \cdot \eta_i(\xi) \quad \text{Eq. 24}$$

On

$F_i(\xi)$ : Mòdul de l'i-èsim node en una superfície de contacte.

$\eta_i(\xi)$ : Desplaçament de l'i-èsim node en una superfície de contacte.

$N$ : Nombre total de nodes de la superfície.

L'equació utilitzada per al càlcul de la tenacitat a la fractura també es pot trobar directament amb la forma

$$G = \frac{1}{B} \cdot \left[ \frac{U_a - U_{a+\delta a}}{\delta a} - \frac{\delta W_f}{\delta a} \right] \quad \text{Eq. 25}$$

Aquest mètode està essent molt utilitzat els últims anys, [21] [20] [22], ja que permet obtenir resultats a partir de simulacions, amb els avantatges que això comporta. Per el present estudi però, aquest mètode no és recomanable ja que el que es necessita són mètodes de reducció de dades totalment experimentals.

#### B.4. Mètode 4: Arrese i Mujika

A partir de la teoria simple de bigues, Arrese i Mujika [18] desenvolupen dos mètodes. Aquests mètodes no s'utilitzaran en el present treball degut a la seva complexitat i a que es necessita un mètode totalment experimental. A continuació es detallen breument els dos mètodes.

##### a) Mètode directe

$$G_{II4ENF}^2 = G_{II4ENF}^0 \cdot \left[ 1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{R}{h} \cdot \varepsilon_c \cdot \left[ 6a_0^3 - 18a_0^2 + \frac{115}{4}a_0 - 5 \right] \right] \quad \text{Eq. 26}$$

On

$$G_{II4ENF}^0 = \frac{9 \cdot P_c^2 \cdot L_0^2}{64 \cdot E_f \cdot w^2 \cdot h^3} \quad \text{Eq. 27}$$

$$\varepsilon^{4ENF} = \frac{3 \cdot P \cdot L_0}{4 \cdot E_f \cdot w \cdot h^2} \quad \text{Eq. 28}$$

On

$R$ : Radi del suport de càrrega.

$h$ : Alçada de la proveta, veure Figura 49.

$a_0$ : Longitud de l'esquerra normalitzada.  $a_0 = a/L$ .

$P_c$ : Càrrega crítica a partir de la qual es propaga l'esquerra.

$L_0$ : Separació inicial entre els suports inferiors, veure Figura 49.

$E_f$ : Mòdul a flexió.

$w$ : amplada de la proveta.

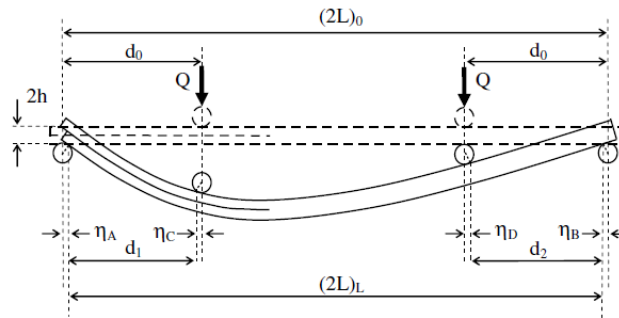


Figura 49: Esquema d'un assaig 4ENF [18].

#### b) Mètode del calibratge de la compliància

$$G_{4ENF}^1 = \frac{P_c^2}{2 \cdot w} \cdot \left[ k_2 \cdot [1 - \zeta_{4ENF}] - [k_1 + k_2 \cdot a] \cdot \frac{\partial \zeta_{4ENF}}{\partial a} \right] \quad \text{Eq. 29}$$

On

$$\zeta_{4ENF}(\%) = \left| \frac{C_{4ENF} - C_{4ENF}^0}{C_{4ENF}^0} \right| \cdot 100 = \frac{R}{h} \cdot \frac{[\epsilon_1 + \epsilon_2]}{[1 + 9 \cdot a_0]} \cdot \frac{3}{8} \cdot [36 \cdot a_0^4 - 144 \cdot a_0^3 + 345 \cdot a_0^2 - 120 \cdot a_0 + 24] \cdot 100 \quad \text{Eq. 30}$$

$$\frac{\partial \zeta_{4ENF}}{\partial a} = \frac{27 \cdot R}{8 \cdot h} \cdot \frac{[\varepsilon_1 + \varepsilon_2]}{L_0} \cdot \frac{\left[108 \cdot a_0^4 - 272 \cdot a_0^3 + 297 \cdot a_0^2 + \frac{230}{3} \cdot a_0 - \frac{112}{3}\right]}{[1 + 9 \cdot a_0]^2} \quad Eq. 31$$

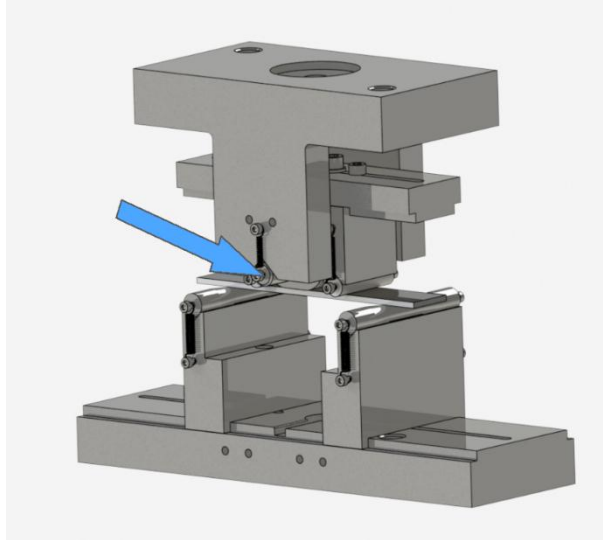
$$\varepsilon^{4ENF} = \frac{3 \cdot P \cdot L_0}{4 \cdot E_f \cdot w \cdot h^2} \quad Eq. 32$$

$$C_0 = k_1 + k_2 b = \frac{C}{|1 - \zeta|} \quad Eq. 33$$

Els valors obtinguts de  $C_0$  permeten obtenir  $k_1$  i  $k_2$  de la Eq. 33 mitjançant una regressió lineal respecte  $b$ .

## ANNEX C: CÀLCULS MECÀNICS DE L'UTILLATGE

Per validar el disseny de l'utiltatge es comprova que aquest resistirà les forces aplicades. Analitzant el disseny s'observa que el punt més crític de l'utiltatge es troba a l'eix central, a l'alçada on aquest entra en contacte amb el suport central del carro. A la Figura 50, la fletxa indica la posició de l'eix central.



*Figura 50: Utiltatge 4ENF. La fletxa indica la posició de l'eix central, component més crític de l'utiltatge.*

Es procedeix a calcular el coeficient de seguretat estàtic i a fatiga utilitzant la metodologia proposada per Shigley [26].

### C.1. Coeficient de seguretat estàtic

Es consideren dos punts. El punt a, situat a l'extrem superior de la peça de diàmetre 12mm, és el punt on la tensió normal serà màxima. El punt b, situat a l'eix y i a l'extrem de la peça, es troba a sobre la línia neutra i és el punt on el tallant serà màxim. A la Figura 51 es mostra un esquema de la secció crítica amb les forces aplicades.

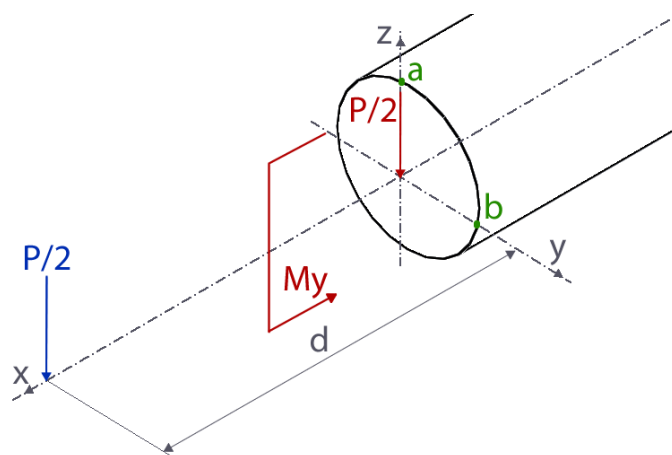


Figura 51: Esquema de la secció crítica de l'utilatge amb les forces aplicades.

La força aplicada màxima,  $P$ , es considera de 5000N. S'ha triat aquest valor per dos motius. Per una banda, Davidson et al. al seu article [22], utilitzant provetes amb un gruix superior a les que s'utilitzaran normalment en els assajos, apliquen una força màxima lleugerament inferior a 5000N. Aquesta s'ha agafat com a referència. Per altra banda, la cèl·lula de càrrega que s'utilitzarà per fer els assajos 4ENF té un rang de 0 a 5kN, per tant en cap cas es podrà superar aquesta càrrega per no malmetre la cèl·lula de càrrega.

A la Taula 12 es mostren les dades considerades per als càlculs mecànics de l'utilatge 4ENF.

Taula 12: Dades considerades per al càlcul dels coeficients de seguretat de l'utilatge 4ENF i propietats del material utilitzat en la secció crítica.

Dades utilitzades per al càlcul del coeficient de seguretat a la secció crítica	
Força màxima aplicada ( $P$ )	5000N
Distància ( $d$ )	16mm
Propietats del material utilitzat	
Material	Acer AISI-4140
Mòdul de Young ( $E$ )	200GPa
Límit elàstic ( $S_y$ )	900MPa
Resistència ( $S_u$ )	1100MPa

A partir de les dades de la taula anterior es calcula el moment degut a la força  $P/2$  aplicada a una distància  $d$  de la secció crítica.



$$M_y = P/2 \cdot d = 40000Nmm \quad (\text{Eq. 34})$$

Coneixent el diàmetre de la secció també es poden calcular les inèrcies.

$$I_y = I_z = \frac{\pi \cdot \phi^4}{64} = 1017,88mm^4 \quad (\text{Eq. 35})$$

Es calculen per separat el coeficient de seguretat estàtic del punt a i del punt b.

#### Punt a

Considerant el punt a, la distància entre aquest punt i l'eix y per on passa la línia neutra serà de 6mm. Aquest punt a més es troba sobre l'eix z. Es calculen les tensions normals i tallants en aquest punt.

$$\sigma_x = \sigma(M_y) = \frac{M_y \cdot z}{I_y} = 235,78MPa \quad (\text{Eq. 36})$$

$$\tau_{xz} = \frac{4 \cdot (P/2)}{3 \cdot \pi \cdot r^3} \cdot \sqrt{r^2 - z^2} = 0MPa \quad (\text{Eq. 37})$$

Com que en aquest punt el tallant i les tensions en les altres direccions són nul·les,

$$\sigma' = \sigma_x = 235.78MPa \quad (\text{Eq. 38})$$

Aplicant la teoria de Von Misses, el coeficient de seguretat estàtic del punt a serà

$$n_e = \frac{S_y}{\sigma'} = 3,82 \quad (\text{Eq. 39})$$

#### Punt b

Es considera el punt b, la distància entre aquest punt i l'eix z és de 6mm. Aquest punt a més es troba sobre l'eix y. En aquest punt la tensió tallant serà màxim i la tensió normal nul·la.

$$\sigma_x = \sigma(M_y) = \frac{M_y \cdot z}{I_y} = 0MPa \quad (\text{Eq. 40})$$

$$\tau_{xz} = \frac{4 \cdot (P/2)}{3 \cdot \pi \cdot r^3} \cdot \sqrt{r^2 - z^2} = 29.47 MPa \quad (Eq. 41)$$

Es calcula l'esforç equivalent de Von Misses,

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_z + \sigma_z^2 + 3 \cdot \tau_{xz}^2} \quad (Eq. 42)$$

Com que les tensions normals són nul·les, la tensió equivalent serà

$$\sigma' = \sqrt{3 \cdot \tau_{yz}^2} = 51.05 MPa \quad (Eq. 43)$$

Ja que el valor de la tensió equivalent de Von Misses del punt a és major, no cal calcular el coeficient de seguretat en aquest punt perquè serà més gran que el del punt a. Per tant, el punt més desfavorable de la secció és el punt a i el coeficient de seguretat estàtic és

$$n_e = 3,82 \quad (Eq. 44)$$

## C.2. Coeficient de seguretat a fatiga

Per el càlcul del coeficient de seguretat a fatiga es considera que a cada cicle es carrega la peça amb la força màxima per, a continuació, descarregar-la fins que la força aplicada és igual a zero. En aquest cas només es considera el punt a, ja que s'ha demostrat que en aquest punt de la secció la tensió és màxima.

$$\sigma(M)_{\max} = 235,78 MPa \quad (Eq. 45)$$

$$\sigma(M)_{\min} = 0 MPa \quad (Eq. 46)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 117,89 MPa \quad (Eq. 47)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 117,89 MPa \quad (Eq. 48)$$

Es calcula el valor de  $S_e$  considerant que l'acabat superficial és mecanitzat, la secció es circular sotmesa a flexió no rotativa, la peça s'utilitza sempre a temperatura ambient i té vida infinita. Per fer-ho s'utilitza l'equació

$$S_e = S_e(pr) \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \quad (\text{Eq. 49})$$

Com que es tracta d'acer amb un  $S_{ut} < 1400 \text{MPa}$ , el valor de  $S_e(pr)$  es calcula com,

$$S_e(pr) = 0,5 \cdot S_{ut} = 550 \text{MPa} \quad (\text{Eq. 50})$$

El valor de  $k_a$  es calcula considerant que l'acabat superficial de la peça és un mecanitzat.

$$k_a = 4,45 \cdot S_{ut}^{-0.265} = 0,6956 \quad (\text{Eq. 51})$$

A continuació es calcula el valor de  $k_b$  tenint en compte que la secció de la peça és circular i està sotmesa a flexió no rotativa.

$$d_{eq} = 0,370 \cdot \varnothing \quad (\text{Eq. 52})$$

$$k_b = \left( \frac{d_{eq}}{7,62} \right)^{-0,107} = 1,0595 \quad (\text{Eq. 53})$$

Tot seguit es troben els valors de  $k_c$ ,  $k_d$  i  $k_e$  considerant que la peça està carregada a flexió, la temperatura sempre serà inferior a  $250^\circ\text{C}$  i no es consideren altres efectes que puguin fer variar el coeficient de seguretat de la peça.

$$k_c = 1 \quad (\text{Eq. 54})$$

$$k_d = 1 \quad (\text{Eq. 55})$$

$$k_e = 1 \quad (\text{Eq. 56})$$

Finalment es troba el valor de  $S_e$  a partir de (Eq. 49).

$$S_e = S_e(pr) \cdot k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e = 405,37 \text{MPa} \quad (\text{Eq. 57})$$

Es calcula el coeficient de seguretat a fatiga considerant la recta de Goodman.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n_f} \quad (\text{Eq. 58})$$

$$n_f = 2,51 \quad (\text{Eq. 59})$$

### C.3. Fletxa màxima

Finalment es calcula la fletxa màxima que tindrà l'eix. Per fer-ho s'utilitza la fórmula

$$z_{m\grave{a}x} = -\frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \quad (\text{Eq. 60})$$

Es consideren els següents valors:

$$F = P/2 = 2500N \quad (\text{Eq. 61})$$

$$l = d = 16mm \quad (\text{Eq. 62})$$

La resta de variables ja s'han definit anteriorment. Per tant la fletxa màxima serà

$$z_{m\grave{a}x} = -\frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} = -0.01677mm \quad (\text{Eq. 63})$$

### C.4. Conclusions

Amb els valors obtinguts dels coeficients de seguretat estàtica i a fatiga i el valor de la fletxa màxima de l'eix, i considerant que l'utilatge rarament treballarà en aquestes condicions, es pot concloure que el disseny compleix amb els requisits necessaris per al bon funcionament de l'utilatge.

## ANNEX D: CÀLCULS AMB ELEMENTS FINITS

Per tal de validar el disseny de l'utillatge es realitzen els càlculs mecànics amb elements finits mitjançant el programa Ansys 17.0. Degut a que la part inferior de l'utillatge ja està fabricada i provada, l'anàlisi es centra únicament a la part superior de l'utillatge.

### D.1. Pre-procés

Per a l'anàlisi mitjançant elements finits es realitza un anàlisi estructural estàtic.

#### D.1.1. Geometria i dimensions

La geometria considerada està composta per 17 sòlids i comprèn la base de fixació superior i el carro. Veure Figura 52.

Les dimensions exactes de les diferents peces es poden trobar al Document 2: Plànols. A l'apartat 3.1. S'explica el disseny de l'utillatge i de les diferents peces.



Figura 52: Geometria considerada per a l'anàlisi amb elements finits.

Per tal d'avaluar el funcionament de l'utillatge s'ha considerat una distància horitzontal entre els corròs de 101,6 mm (4"). Aquesta configuració amb la distància més gran entre corròs que permet l'utillatge. S'ha optat per aquesta configuració per tal de poder avaluar també el comportament de la base del carro en un cas extrem.

Per altra banda, s'ha considerat que totes les peces que estan en contacte entre elles estan enganxades, excepte el contacte entre l'eix central i la base de fixació superior que no estan enganxades i tenen un coeficient de fricció de 0.15.

### D.1.2. Materials

Es consideren diferents materials per a les peces que conformen la geometria. A la Taula 13 es detalla el material de cada una de les peces.

*Taula 13: Material de cada un dels components.*

Núm.	Objecte	Material
1	Base fixació superior	AISI 1045
2	Eix central	AISI 4140
3	Suport central	AISI 1045
4	Base del carro	AISI 304
5	Suport superior (1)	AISI 304
6	Suport superior (2)	AISI 304
7	Corró superior (1)	AISI 4140
8	Corró superior (2)	AISI 4140
9	Cargol Allen M5 x 30 (1)	DIN C25
10	Cargol Allen M5 x 30 (2)	DIN C25
11	Cargol Allen M6 x 30 (1)	DIN C25
12	Cargol Allen M6 x 30 (2)	DIN C25
13	Volandera ISO 7089 M6 (1)	DIN C25
14	Volandera ISO 7089 M6 (2)	DIN C25
15	Pin ISO 2338 6 x20 (1)	DIN C25
16	Pin ISO 2338 6 x20 (1)	DIN C25
17	Cargol ISO 4027 M3 x 5	DIN C25

Les principals característiques dels diferents materials utilitzats es mostren a la Taula 14.

Taula 14: Principals característiques dels materials utilitzats.

Propietats dels materials				
Material	AISI 304	AISI 1045	AISI 4140	DIN C25
Tipus	Acer inoxidable	Acer estructural	Acer d'alta resistència	Acer estructural
Densitat [ $kg/m^3$ ]	8000	7870	7850	7850
$S_y$ [MPa]	205	505	665	250
$S_{ut}$ [MPa]	515	585	1000	460

### D.1.3. Mallat

El mallat utilitzat en la geometria és el mallat per defecte del programa amb la opció de mallat fi. A les volanderes dels cargols M6 s'ha establert un mallat de 1 mm per evitar un problema degut als pocs elements de la peça.

El mallat consta de 163958 nodes i 91064 elements. A la Figura 53 es pot veure el mallat.

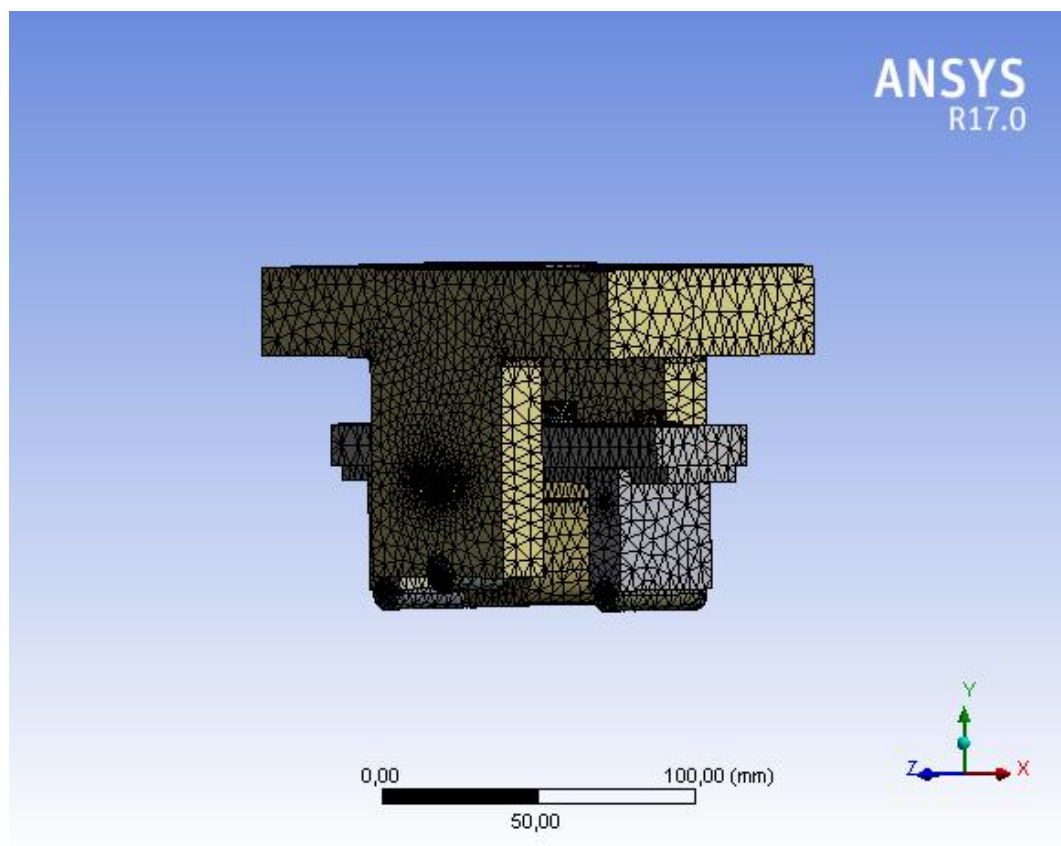


Figura 53: Mallat de la geometria utilitzat.

## D.2. Solució

### D.2.1. Condicions de contorn

En l'anàlisi mitjançant elements finits es considera una força extrema de 5000N. Aquesta es molt superior a la força aplicada habitualment a l'utilatge. La força s'aplica a la part superior de la base de fixació superior, concretament a la cara preparada per allotjar el pistó de la màquina d'assaig. La direcció de la força és en l'eix Y en sentit negatiu.

Per tal que no es mogui la base superior cap als costats s'introdueix un desplaçament de 0 mm en els eixos X i Z i es deixa un desplaçament lliure a l'eix Y per tal que pugui baixar lliurement. La superfície on s'aplica aquest desplaçament es la mateixa on s'ha aplicat la força.

Finalment es fixen els dos corrons superiors per tal de simular que l'utilatge es troba sobre una superfície rígida. A la Figura 54 es poden veure les condicions de contorn.

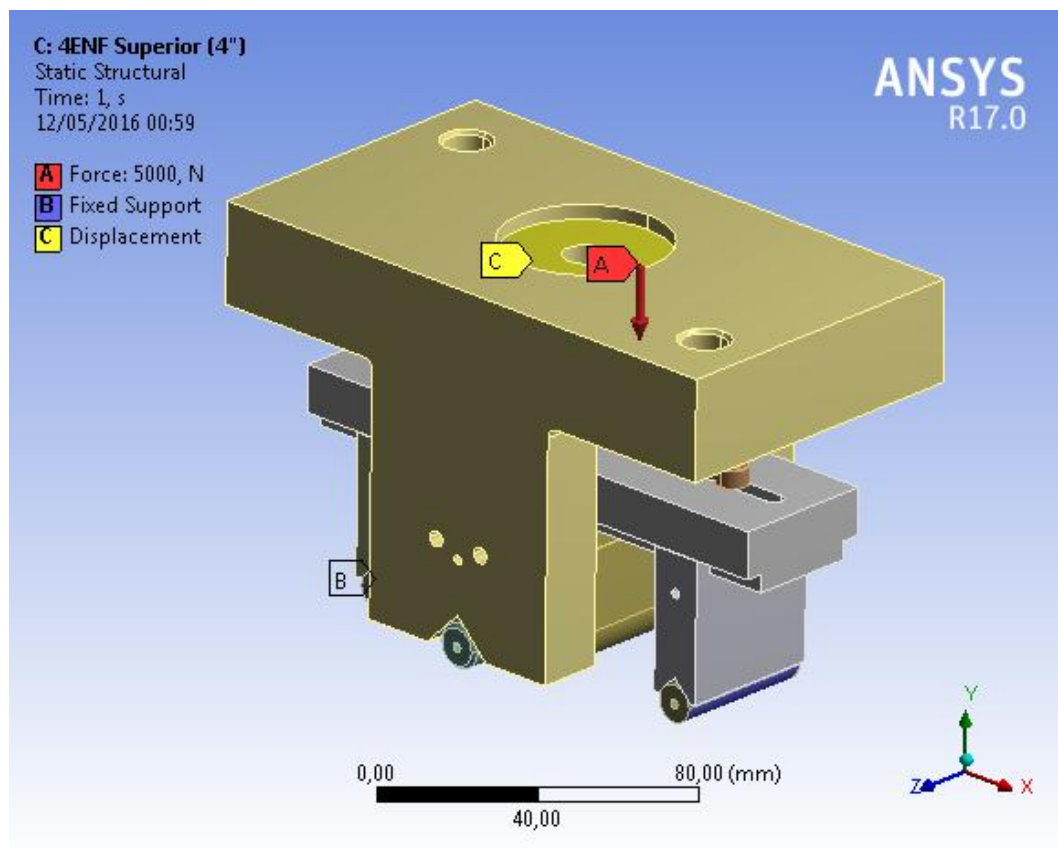


Figura 54: Condicions de contorn.



### D.2.2. Tipus d'anàlisi

L'anàlisi realitzat és un anàlisi lineal, amb el mètode de solució directe. La resta de paràmetres de l'anàlisi són els predeterminats per el programa.

## D.3. Post-procés

### D.3.1. Resultats

#### D.3.1.1. Tensió equivalent de Von Misses

La tensió equivalent de Von Misses màxima és de 173,91 MPa. Aquesta es troba en un punt a la part inferior de l'eix central, a la zona on es connecta l'eix central amb el suport central. També es pot observar que la zona on s'acumulen més tensions és la zona de l'eix central propera al suport central.

A la Figura 55 es poden veure les tensions i el punt on la tensió és màxima. Per altra banda, a la Figura 56 es pot veure en detall les tensions que suporta l'eix central. També es mostren les tensions al suport central i la base del carro, Figura 57 i Figura 58 respectivament, però en aquestes peces les tensions no són tant importants. La resta de peces pateixen unes tensions petites i no es mostren.

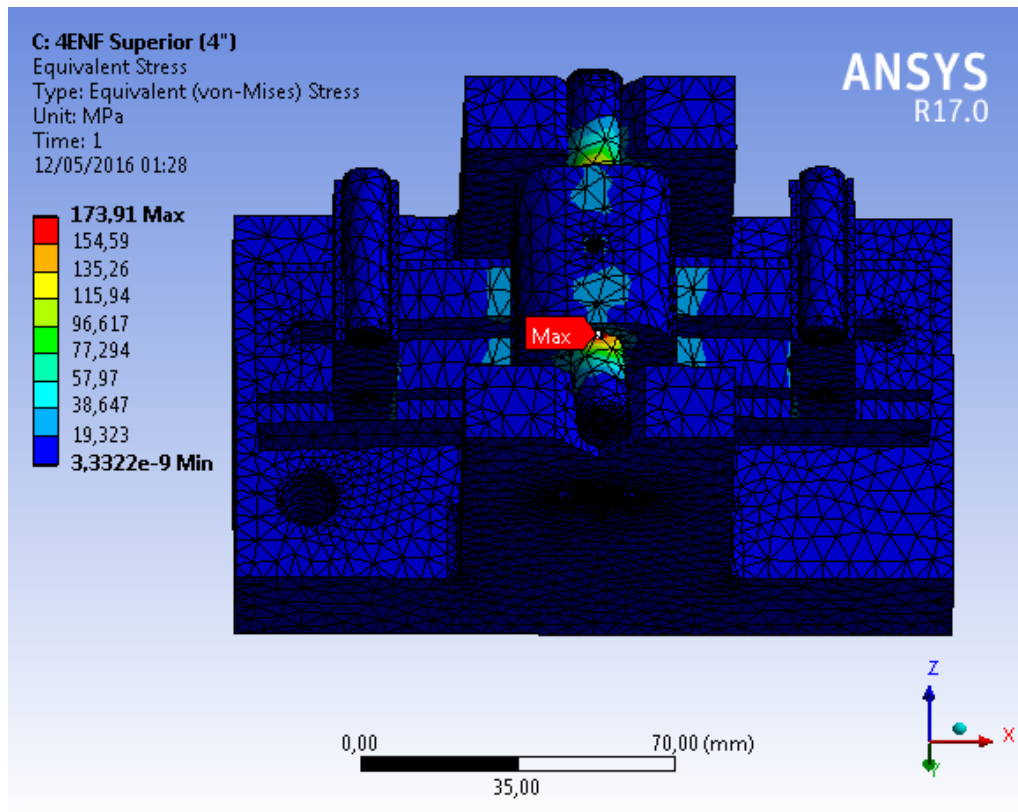


Figura 55: Tensions equivalents de Von Mises i punt on la tensió és màxima.

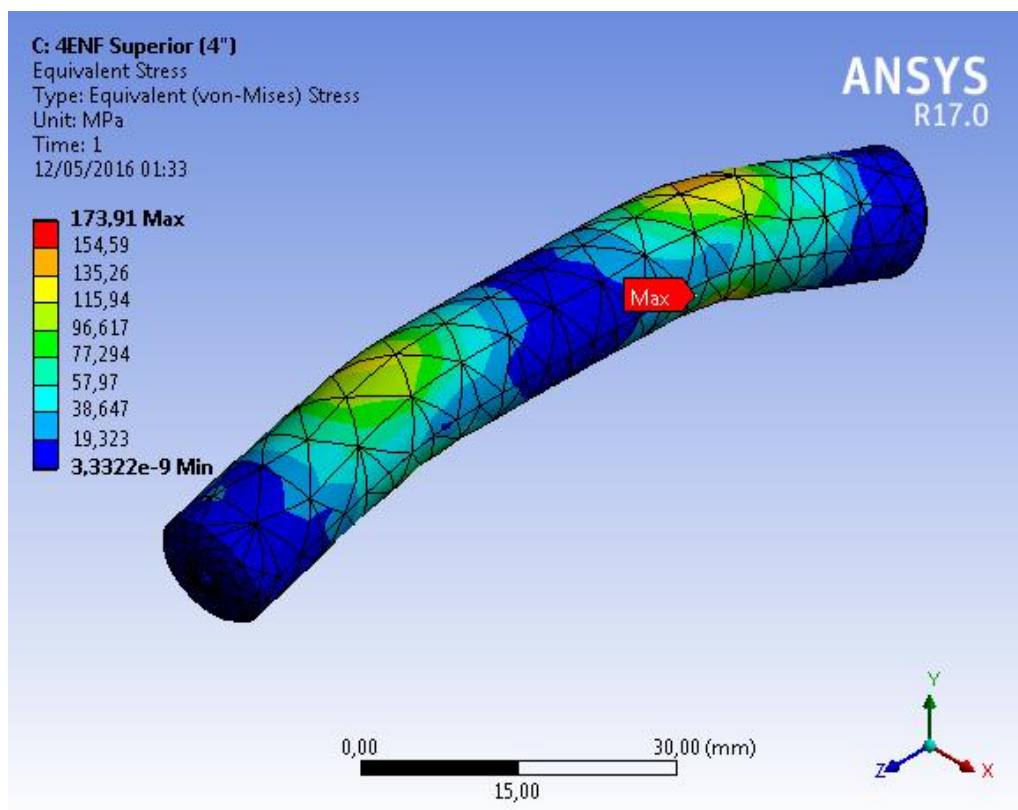


Figura 56: Tensions de l'eix central i punt on la tensió és màxima.

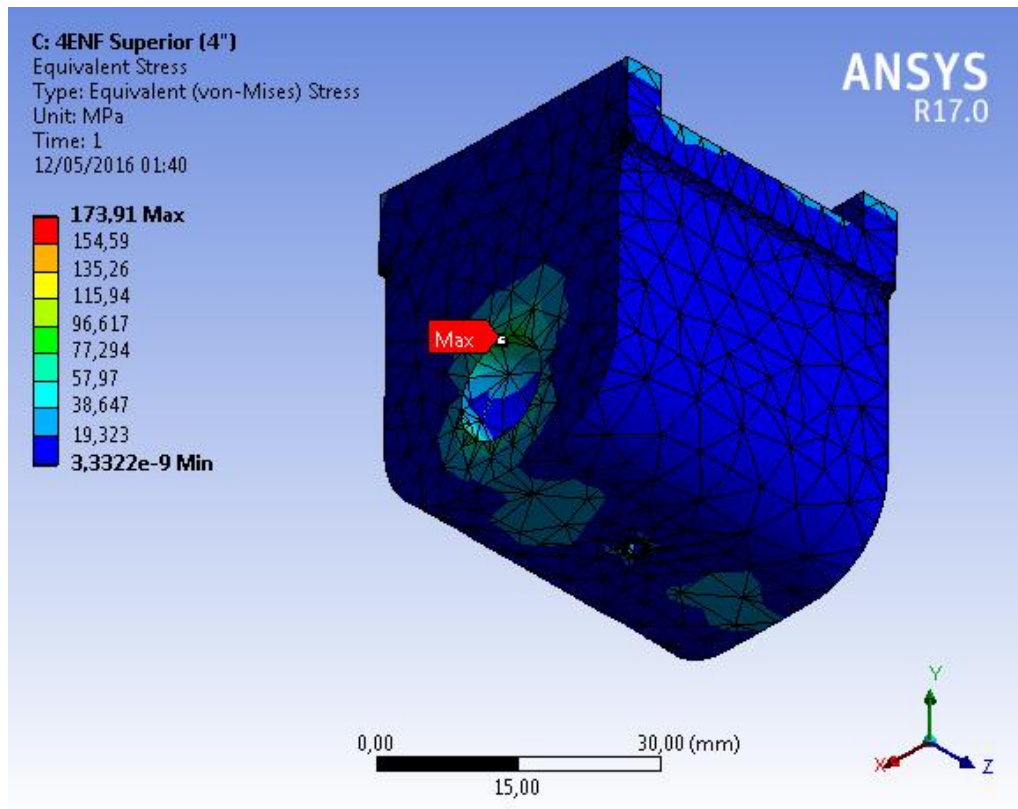


Figura 57: Tensions del suport central.

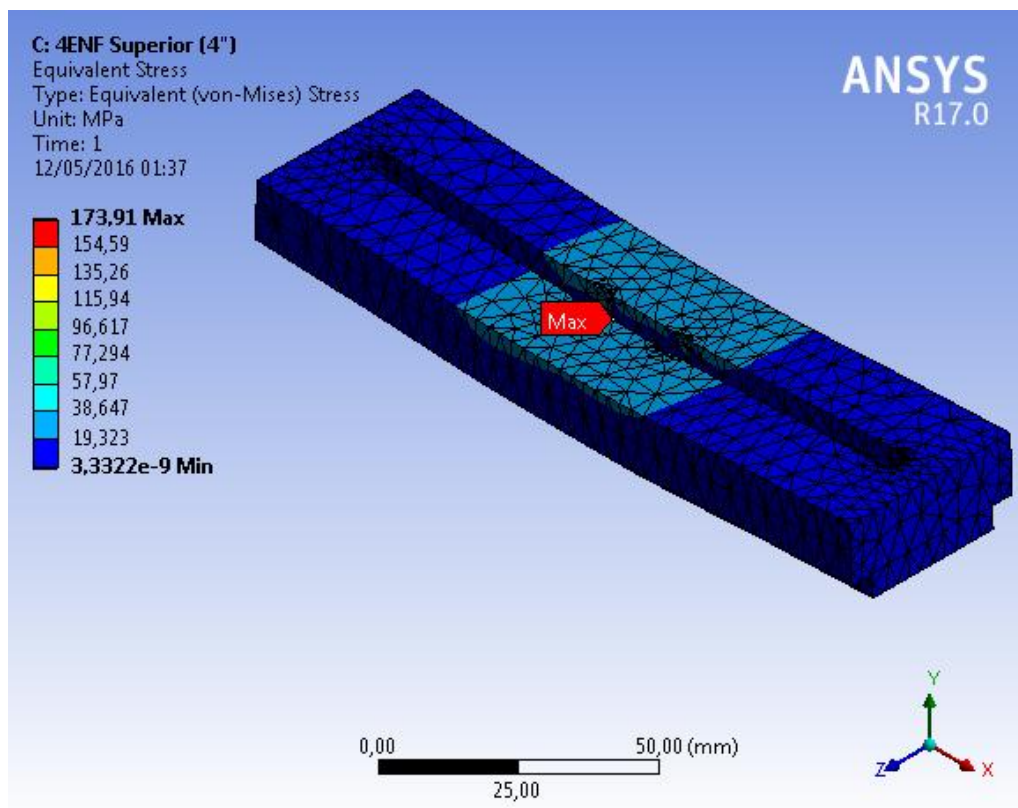


Figura 58: Tensions a la base del carro.

### D.3.1.2. Coeficient de seguretat estàtic

El coeficient de seguretat estàtic mínim és de 3,8238 i coincideix amb el punt on la tensió és màxima, es a dir a la part inferior de l'eix central al punt on s'uneix amb el suport central. En aquest cas, tal com es pot veure a la Figura 59, la peça més crítica també és l'eix central. El coeficient de seguretat de l'eix central es pot veure a la Figura 60. Per altra banda, el suport central i la base del carro tenen coeficients de seguretat alts tal com es pot veure a les Figura 61 i Figura 62 respectivament.

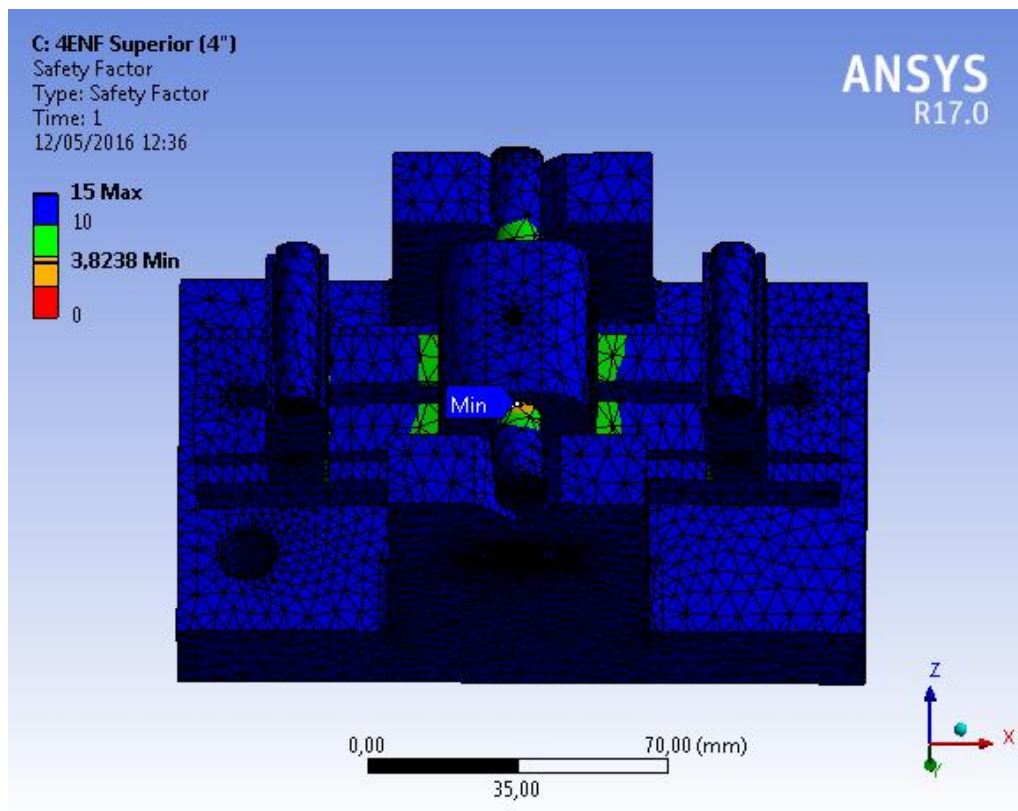


Figura 59: Coeficient de seguretat estàtic i punt on aquest és mínim.

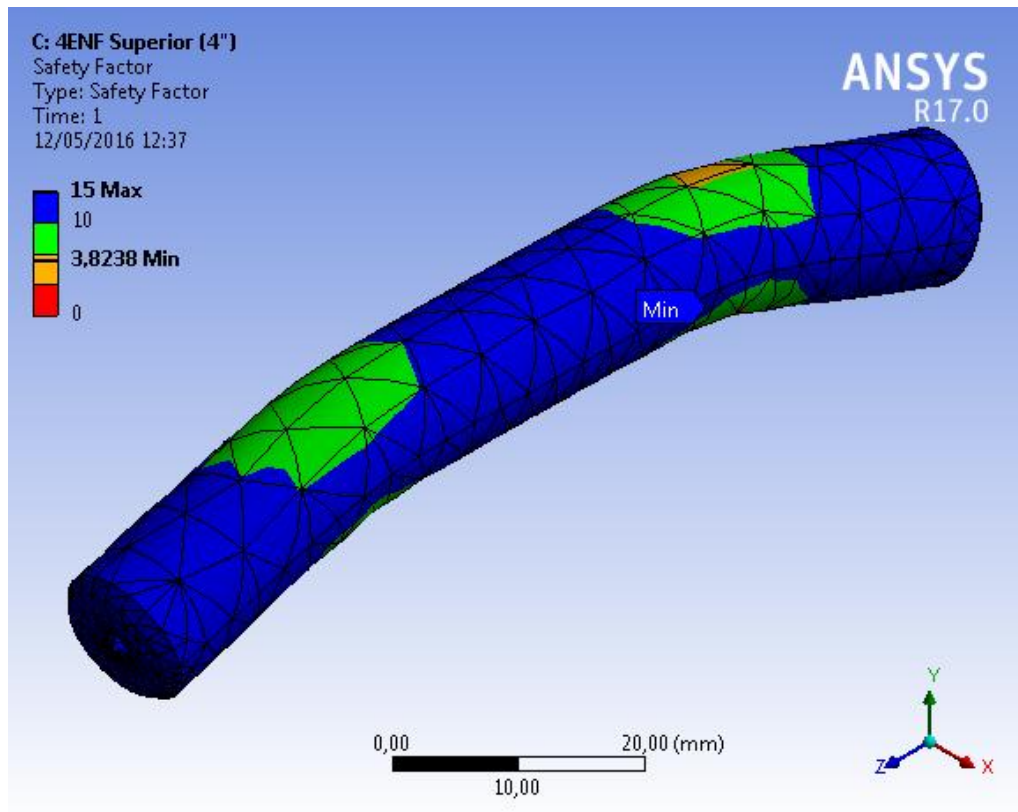


Figura 60: Coeficient de seguretat estàtic de l'eix central.

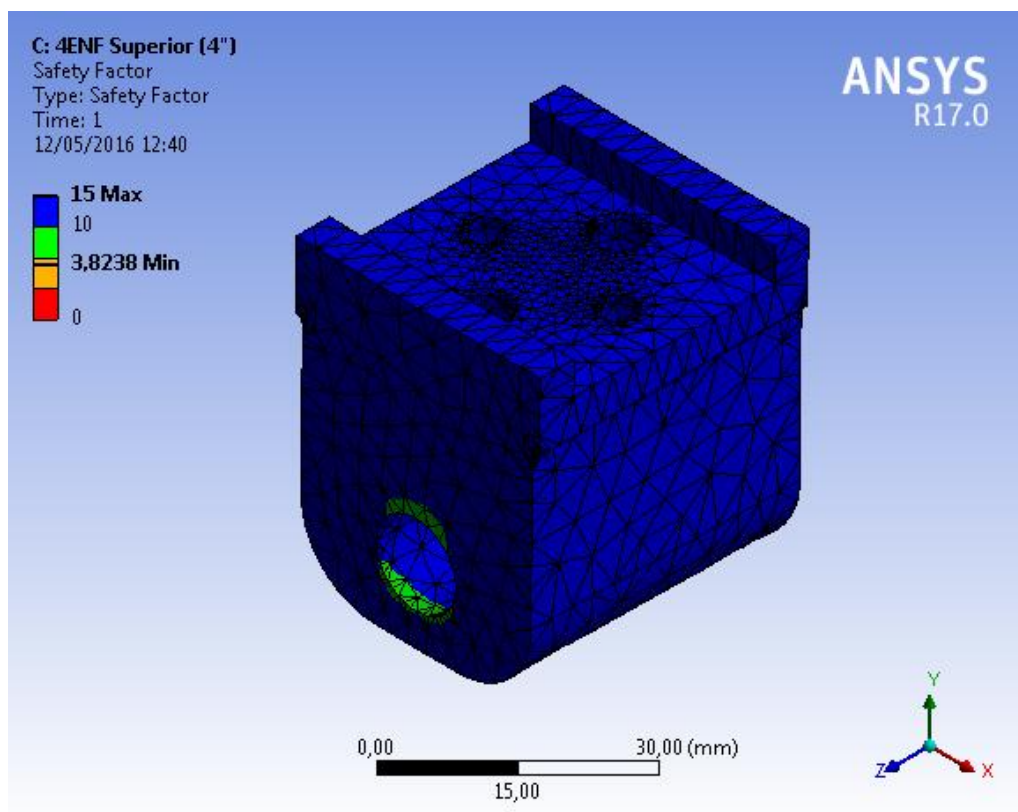


Figura 61: Coeficient de seguretat estàtic del suport central.



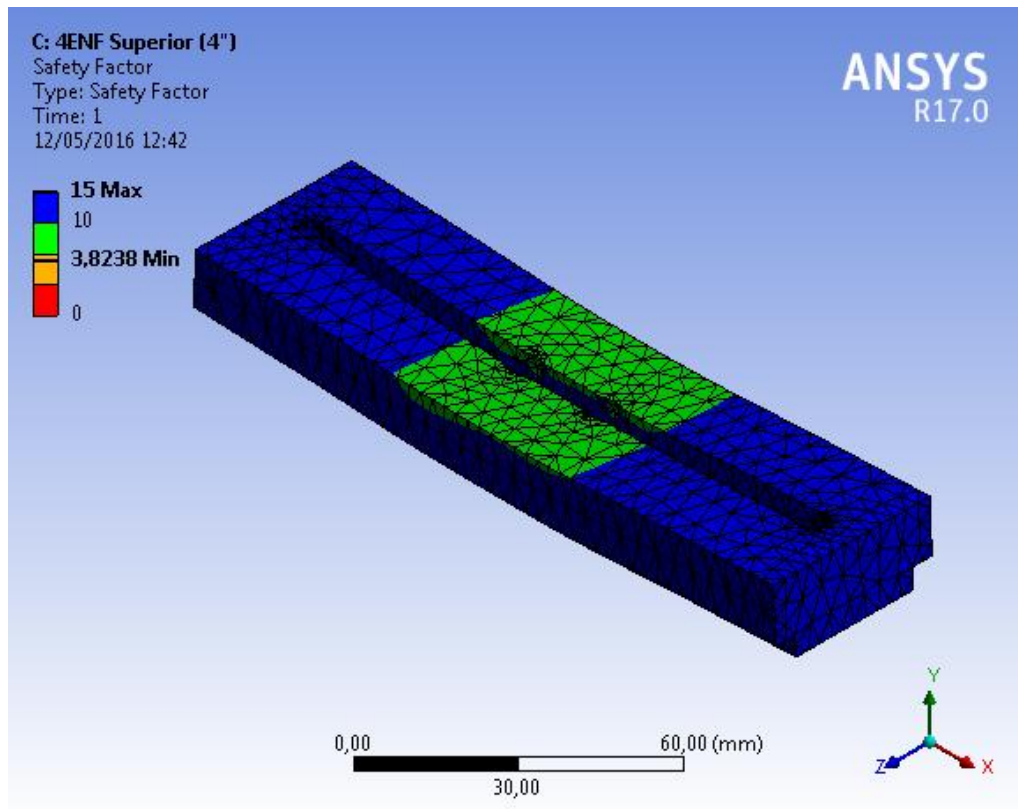
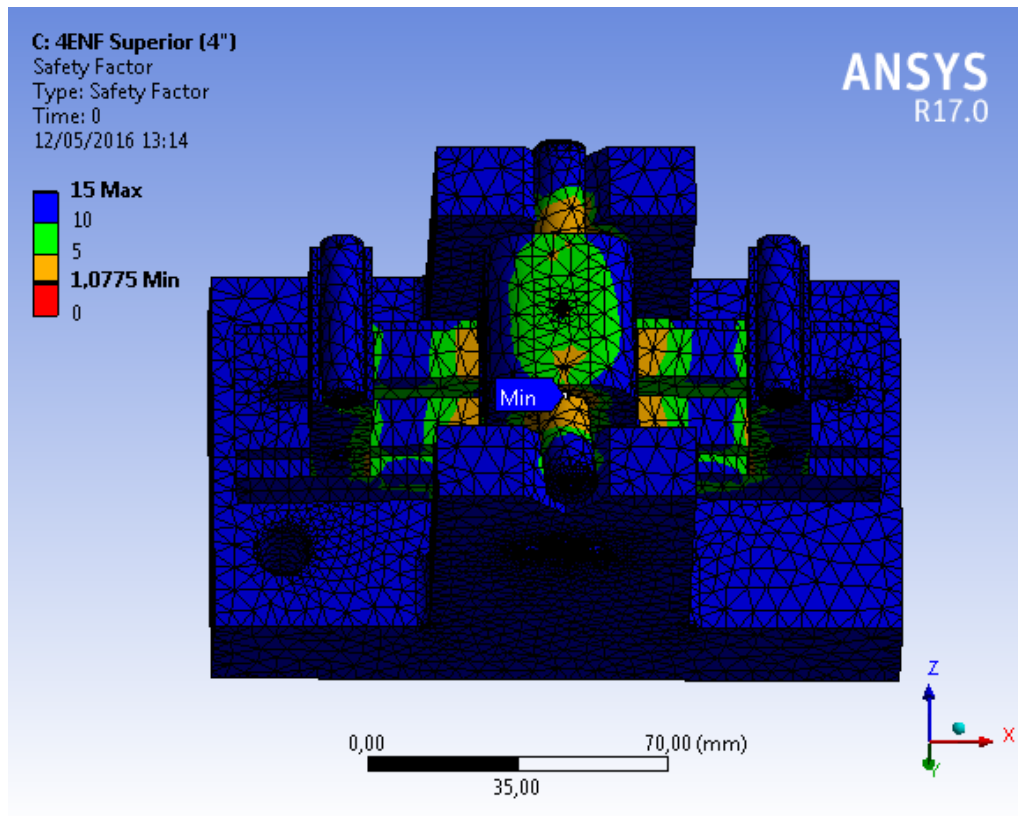
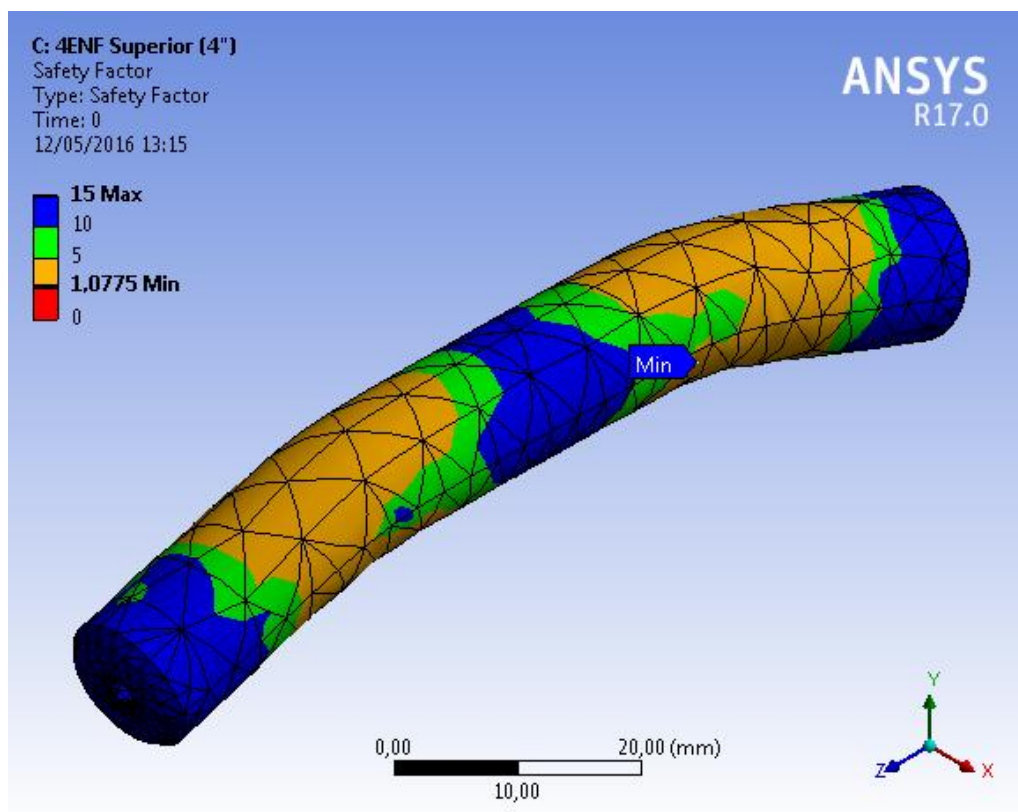


Figura 62: Coeficient de seguretat estàtic de la base del carro.

#### D.3.1.3. Coeficient de seguretat a fatiga i vida estimada

El coeficient de seguretat a fatiga mínim és de 1,0775 i es troba a l'eix central en la zona on entra en contacte amb el suport central (Figura 63) , tal com passa també amb el coeficient de seguretat estàtic. L'eix central (Figura 64) és la peça que pateix més a fatiga, tot i que el suport central i la base del carro (Figura 65 i Figura 66 respectivament) també tenen coeficients de seguretat a fatiga petits.

*Figura 63: Coeficient de seguretat a fatiga.**Figura 64: Coeficient de seguretat a fatiga de l'eix central.*

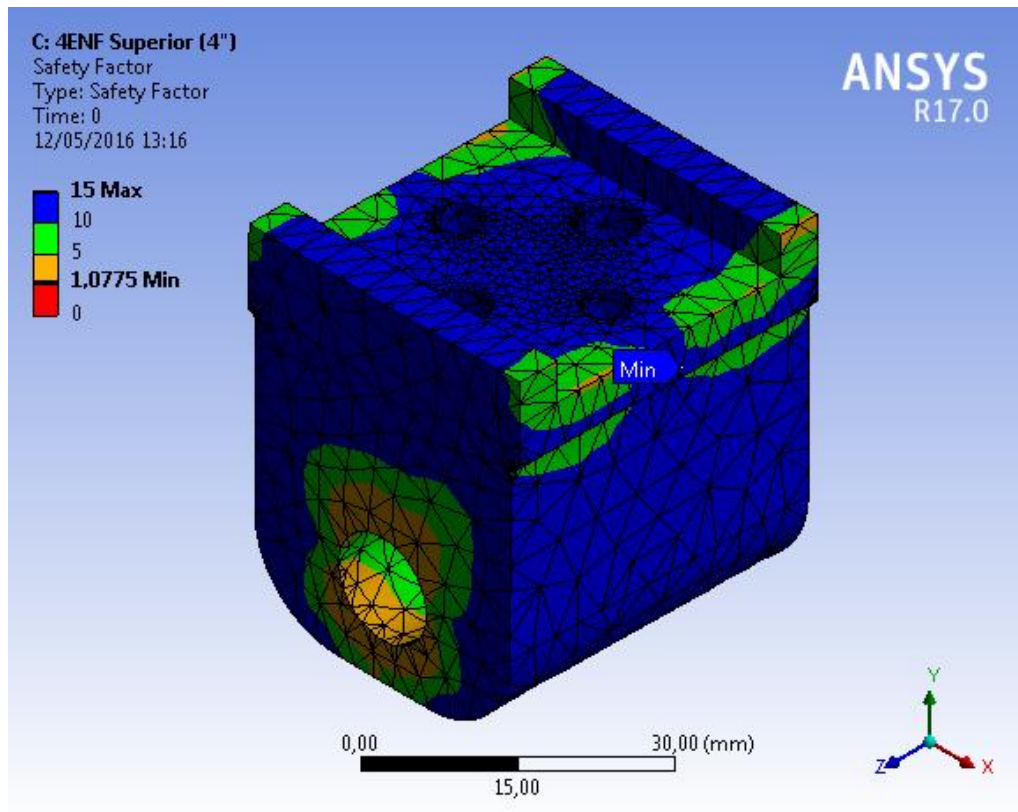


Figura 65: Coeficient de seguretat a fatiga del suport central.

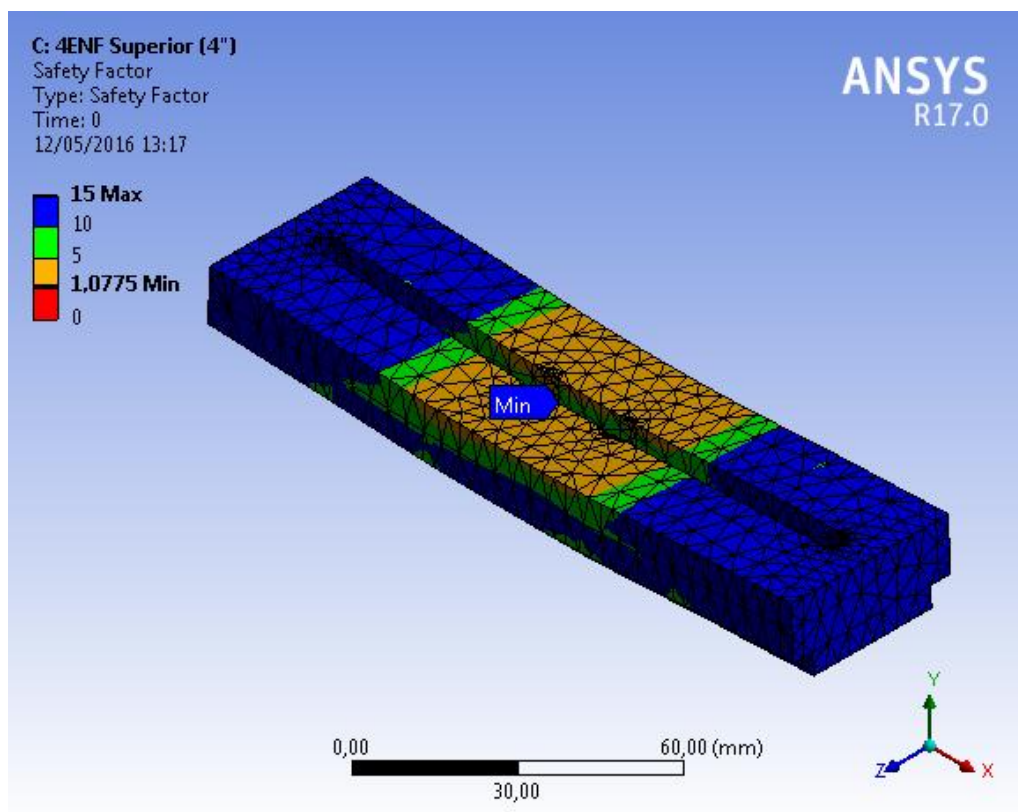


Figura 66: Coeficient de seguretat a fatiga de la base del carro.



Pel que fa a la vida de l'utilatge, com que el coeficient de seguretat a fatiga mínim és més gran de 1, totes les peces tenen una vida de més de  $10^6$  cicles tal com es pot veure a la Figura 67.

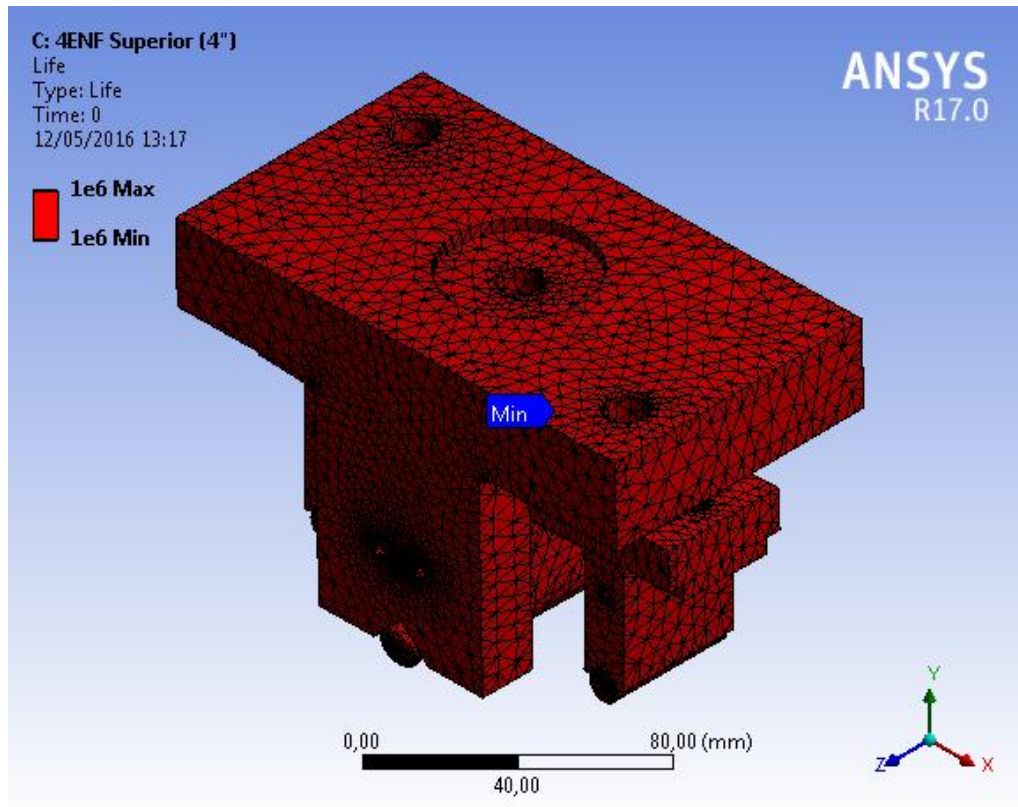


Figura 67: Vida de l'utilatge a fatiga.

### D.3.2. Conclusions

Un cop analitzats els resultats es pot veure que la peça més crítica de tot el disseny és l'eix central. La part més crítica de l'eix és la zona on aquest entra en contacte amb el suport central.

Pel que fa a les càrregues estàtiques i el coeficient de seguretat estàtic, el disseny compleix amb els requisits ja que el coeficient de seguretat mínim és de 3,8238. Cal tindre en compte que la càrrega aplicada a l'utilatge és de 5000N, aquesta càrrega és molt gran i no s'hauria d'assolir mai amb un ús correcte de l'utilatge.

Per altra banda, en el cas de fatiga, el coeficient de seguretat mínim és de 1,0775. Tot i que és un valor superior a 1, està molt proper a 1. Cal dir però que en assajos a fatiga els valors de la càrrega són encara més petits i per tant no s'assolirà mai el valor de 5000N.

Per tal de verificar que el disseny de l'utilatge és vàlid, s'ha fet un segon anàlisi a fatiga en les mateixes condicions però amb una càrrega de 2000N. Aquesta càrrega segueix estant molt per sobre dels valors normals de treball. En aquest cas el coeficient de seguretat és de 1.9743.

Finalment, s'ha analitzat l'utilatge canviant la configuració d'aquest. S'ha utilitzat una distància entre els corrons superiors de 50,8 mm (2"). Aquesta distància és la distància mínima que permet l'utilatge. Els resultats obtinguts han estat pràcticament iguals als obtinguts en el primer anàlisi.

Per tant un cop analitzats els resultats, es pot concloure que el disseny de l'utilatge és vàlid per a la seva utilització en condicions normals.

## ANNEX E: PROCEDIMENT D'ASSAIG

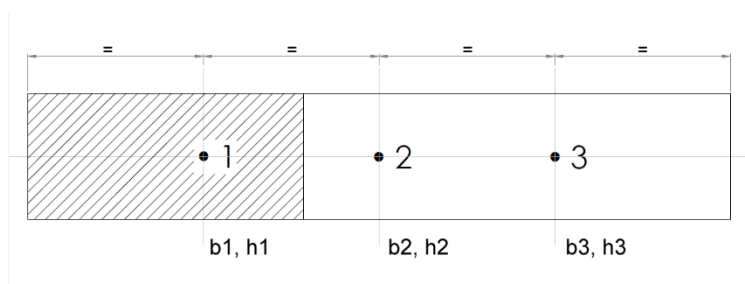
A continuació s'expliquen els passos a seguir des de la recepció de les provetes fins que s'acaba l'assaig 4ENF.

### E.1. Preparació de les provetes

Les provetes s'agrupen en lots. Totes les provetes d'un lot s'extreuen del mateix panell. Durant la fabricació dels panells es col·loca un insert a la capa intermèdia per tal que les provetes tinguin una esquerdada inicial.

Quan es reben les provetes per a l'assaig 4ENF al laboratori, s'assigna un codi individual a cada proveta per tal de poder identificar-la. En cas que es tracti de provetes asimètriques, s'han de poder diferenciar les dues cares durant tot el procediment.

Un cop identificades les provetes cal mesurar la seva longitud total i l'amplada i gruix en diferents punts tal com es pot observar a la Figura 68.



*Figura 68: Esquema dels punts on es mesuren amplada i gruix de les provetes per a l'assaig 4ENF.*

Abans de l'assaig és habitual realitzar un assaig de preesquerda per tal d'obtenir una esquerda inicial homogènia. L'assaig de preesquerda es pot en mode I o en mode II, seguint les normes ISO 15024 [13] i ASTM D7905M [1] respectivament. En aquest cas s'ha optat per un assaig en mode I seguint la norma ISO 15024, per tant, s'agafaran de referència les dimensions de proveta que recomana la norma tal com es mostra a la Figura 69 i la Taula 15.

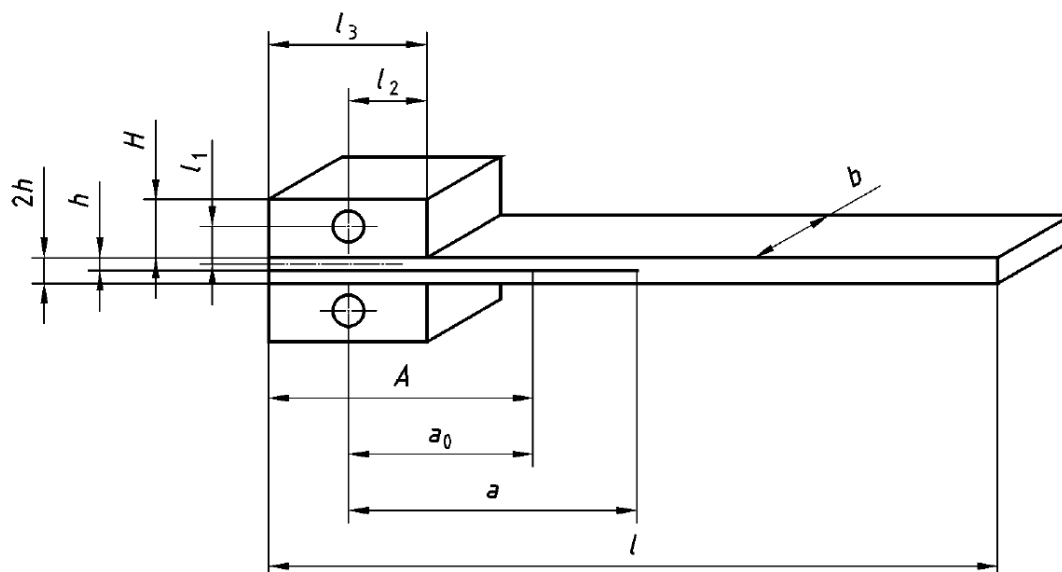


Figura 69: Esquema de la proveta utilitzant blocs segons la norma ISO15024 [13].

Taula 15: Dimensions recomanades de les provetes segons la norma ISO15024 [13].

Dimensió	Valor	Tolerància
Longitud ( $l$ )	>125 mm	-
Amplada ( $b$ )	20.0 mm	$\pm 0.5$ mm
Gruix ( $2h$ )	3.0 mm	$\pm 0.1$ mm

Després de verificar les dimensions de les provetes, es pinten de color blanc els laterals de la proveta (Figura 70) per facilitar la visualització del front de l'esquerra durant l'assaig.

Amb les provetes pintades, primer de tot es diferencien les dues cares laterals i es marca la cara A pintant una lletra A de color blau a l'extrem on no hi ha l'insert. Tot seguit es localitza l'insert amb l'ajuda del microscopi òptic i es fa una marca de color vermell al final d'aquest. També es fan dues marques més a 3 i 5mm de la primera. Aquestes marques serviran de referència a l'hora de fer les preesquerdes de les provetes. A la Figura 70 es mostra una proveta pintada i marcada, en aquest cas l'insert es troba a l'esquerra de la proveta.

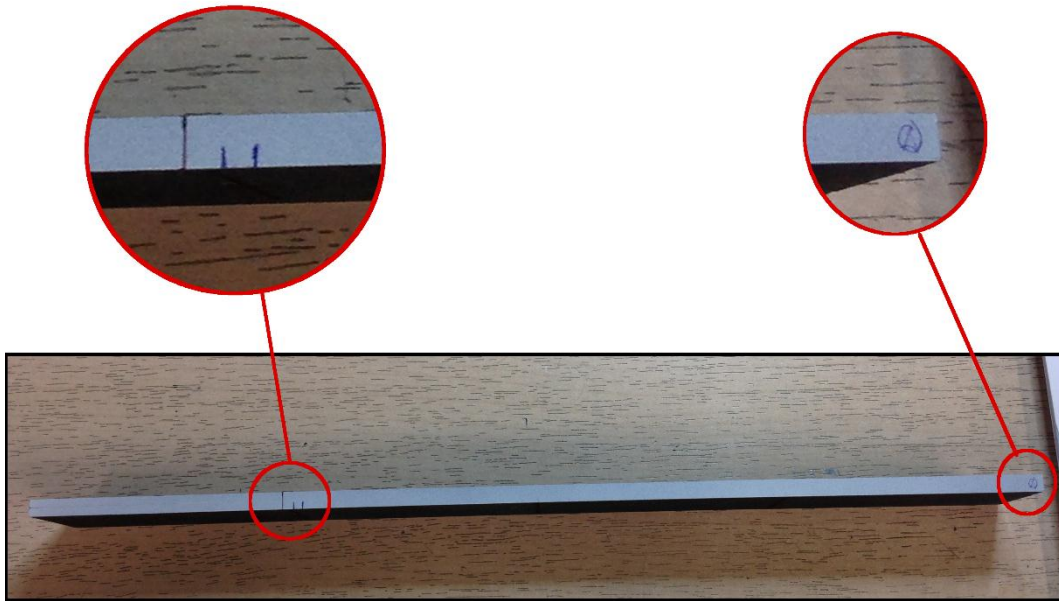


Figura 70: Proveta 4ENF pintada i marcada per fer l'assaig de preesquerda en mode I.

Per fer l'assaig de preesquerda, les provetes es poden subjectar mitjançant frontisses (*hinges*), amb el sistema SCB (*Side Clamped Beam*) o enganxant blocs d'alumini.

En aquest cas s'ha optat per el sistema SCB.

## E.2. Assaig de preesquerda

En aquest cas s'ha optat per realitzar l'assaig de preesquerda mitjançant un assaig DCB (*Double-Cantilever Beam*) en mode I segons la norma ISO 15024 [13] utilitzant el sistema SCB per a subjectar les provetes.

Primer de tot es munta i es prepara l'utillatge corresponent a la màquina d'assaig i es prepara seguint el procediment establert per el laboratori d'assaigs.

Tot seguit es munta el sistema SCB a la proveta que es vol assajar i es comprova que s'ha fixat correctament, veure Figura 71.



*Figura 71: Proveta amb el sistema SCB preparada per fer l'assaig de preesquerda en mode I.*

Abans de col·locar la proveta a la màquina es tara la força. A continuació es subjecta la proveta a l'utilatge mitjançant dos passadors, tot seguit s'ajusta el posicionament de la màquina per tal d'iniciar l'assaig sense càrrega. En aquest punt es tara el desplaçament.

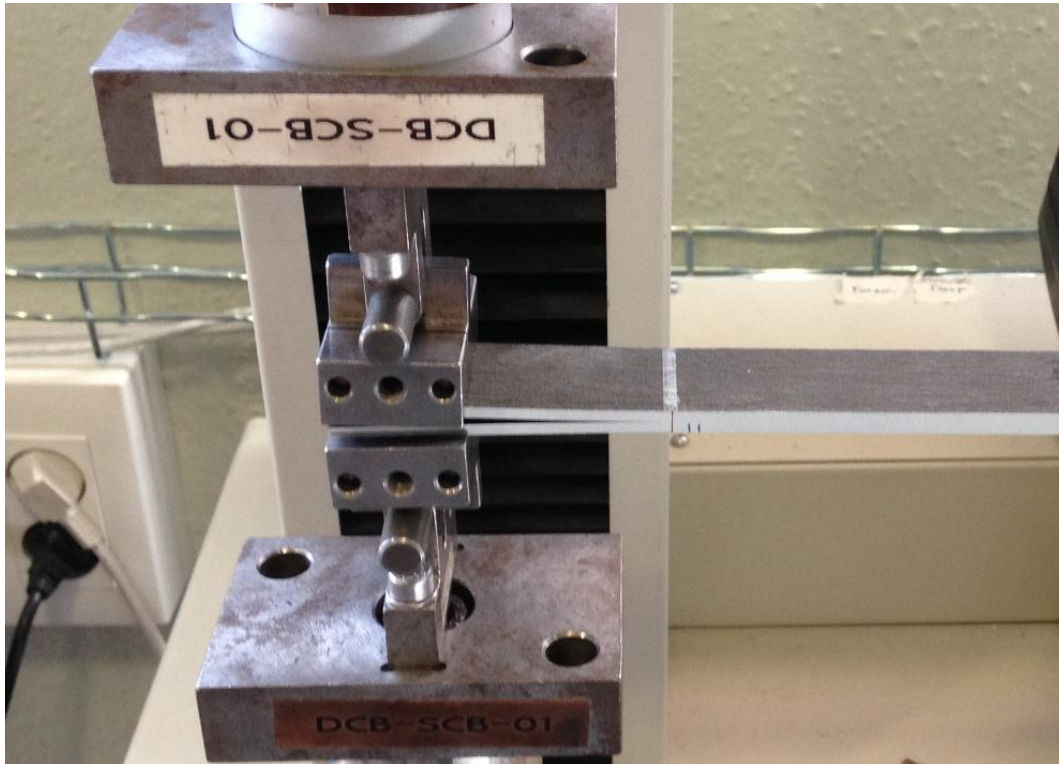
Abans de començar l'assaig de preesquerda es comprova que la temperatura i la humitat relativa de la sala siguin de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  i  $50\pm 5\%$  respectivament i s'anota a la fulla de control. En cas que la temperatura i/o la humitat relativa no es trobin dins de l'interval, no es podrà iniciar l'assaig.



*Figura 72: Assaig de preesquerda DCB (Double-Cantilever Beam) en mode I utilitzant el sistema SCB.*



A continuació es carrega la proveta mitjançant el control de desplaçament per fer créixer l'esquerda inicial. Mitjançant una càmera amb zoom, muntada en un trípode mòbil automatitzat es visualitza l'avanç de l'esquerda i es para l'assaig quan aquesta es troba entre les dues marques que s'han fet anteriorment a 3 mm i 5 mm del final de l'insert, veure Figura 73.



*Figura 73: Propagació de l'esquerda utilitzant l'assaig DCB en mode I i el sistema DCB. Al lateral de la proveta es pot veure la marca del final de l'insert i dues marques més a 3 mm i 5 mm.*

Un cop s'ha desmuntat la proveta de l'utilatge, es mesura la longitud d'esquerda de les dues cares amb el microscopi òptic. Per poder considerar correcte la preesquerda, cal que la diferencia entre la longitud d'esquerda de les dues cares sigui inferior a 2 mm. Això indica que la propagació de l'esquerda és perpendicular a la longitud de la proveta i que per tant l'assaig s'ha dut a terme correctament. Si no es compleix aquest requisit, cal repetir el procediment de preesquerda fins a complir aquest requisit.

Finalment, es retira el sistema de subjecció utilitzat en l'assaig de preesquerda i es fa una marca de color negre al front d'esquerda actual per indicar el punt d'inici de l'assaig 4ENF. Tot seguit es fa una marca 5 mm abans del punt d'inici de l'assaig que servirà per posicionar el corró superior esquerre de l'utilatge 4ENF. A partir de la marca del corró superior esquerre es fa una altra marca a una distància  $2l$  que servirà per posicionar el corró superior dret de l'utilatge. Finalment es fa una marca a 5 mm abans de la marca del corró superior dret que servirà per indicar el final de l'assaig 4ENF.

A la Figura 74 es pot veure un esquema de l'assaig i la posició de les diferents marques. En aquest cas, l'assaig s'iniciarà a la marca que coincideix amb  $a_0$  i acabarà a la marca que coincideix amb  $a_f$ .

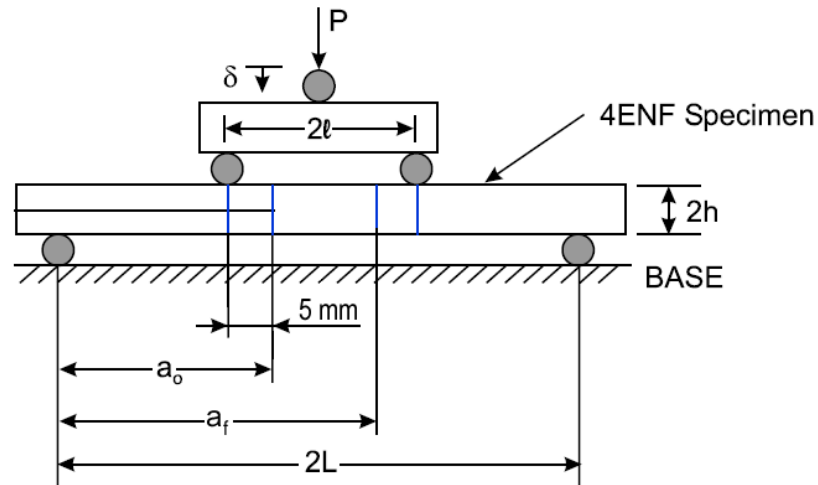


Figura 74: Esquema de l'assaig 4ENF amb el posicionament de la proveta sobre l'utilatge.

Les marques es realitzaran a les dues cares de la proveta de manera que quan es col·loqui la proveta a l'utilatge 4ENF, les marques coincideixin amb els corròs superiors en les dues cares.

Per altra banda, a la cara A es fa una marca a una distància  $l$  a l'esquerra de la marca que indica la posició del corró superior esquerre per indicar la posició del corró inferior esquerre i una altra marca a una distància  $2L$  de l'anterior per marcar la posició del corró inferior dret. En el cas que  $l/L \neq 0.5$ , s'hauran de calcular les distàncies necessàries per tal de posicionar la proveta.

Per poder posicionar correctament l'avanç del front d'esquerra durant l'assaig, en una de les cares, es realitzaran marques cada 2 mm a partir de la marca que indica el front d'esquerra inicial fins la marca que indica el final de l'assaig.

### E.3. Preparació de l'utilatge i la màquina d'assaig

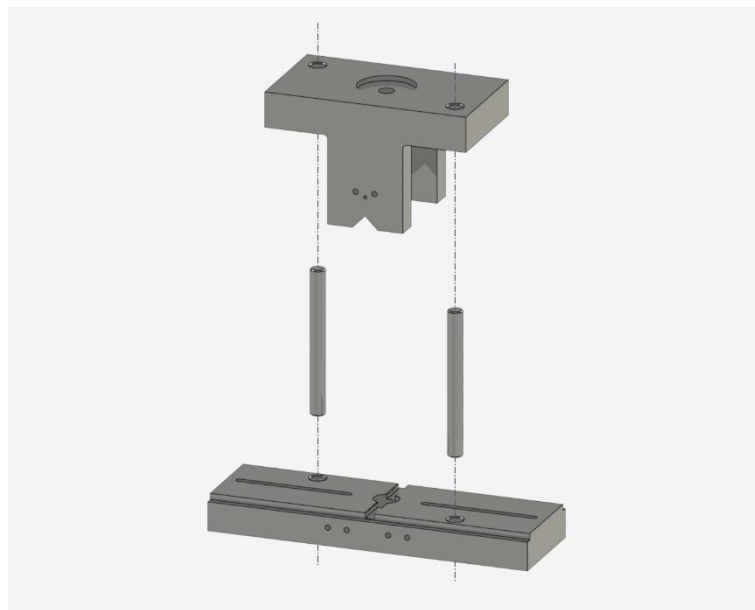
Abans de muntar l'utilatge a la màquina d'assaig cal comprovar que la cèl·lula de càrrega muntada a la màquina tingui les característiques adequades per realitzar un assaig 4ENF (rang de càrrega adequat a les carregues d'assaig esperades), si es necessari es substituirà. Es recomana utilitzar una cèl·lula de càrrega de 5kN. També cal comprovar que la màquina d'assaig està alineada.



Per realitzar el muntatge de l'utilatge 4ENF primer es munten dos extensors, un a la part mòbil de la màquina d'assaig i l'altre a part fixa que s'asseguren mitjançant un cargol.

Un cop fet això es situa la base inferior de l'utilatge 4ENF sobre l'extensor inferior i es fixa la base superior sobre l'extensor de la part mòbil.

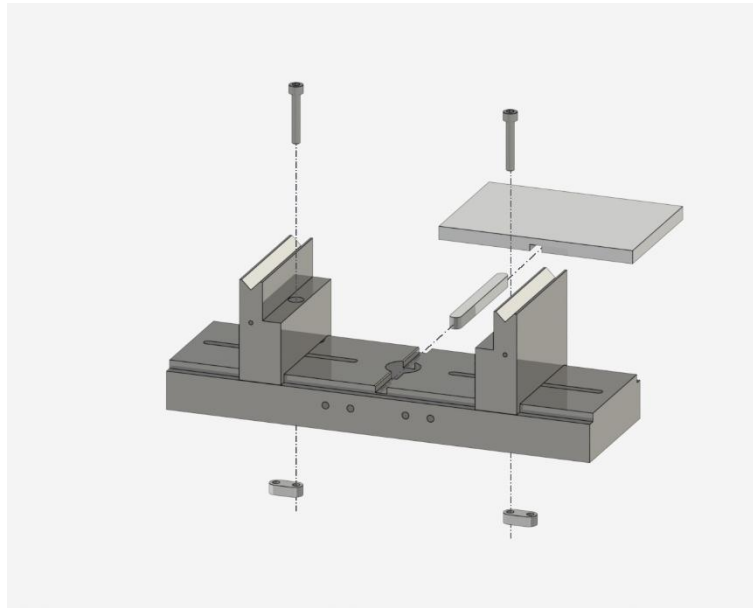
A continuació es mou la part mòbil de la màquina a una alçada que permeti fer passar les barres d'alineació per els dos forats de cada una de les bases. Veure Figura 75.



*Figura 75: Alineació de la fixació superior i inferior de l'utilatge 4ENF.*

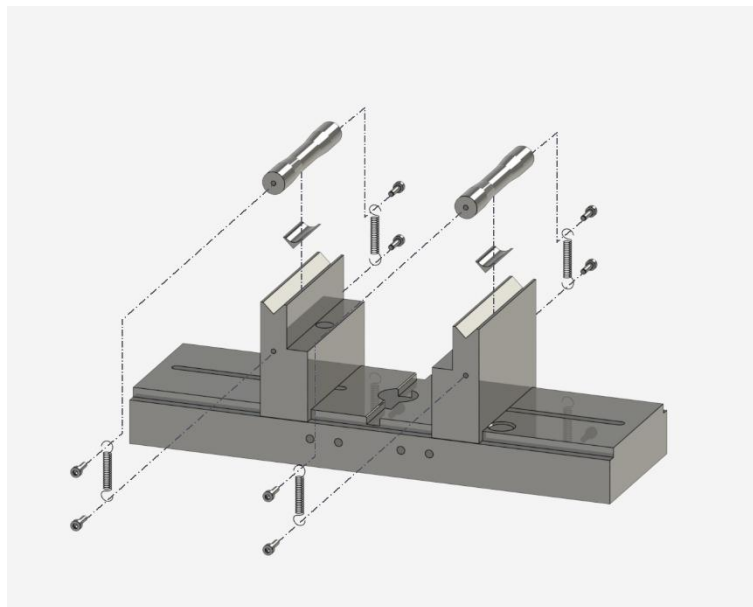
Tot seguit es fixa la base inferior, es separa la part mòbil de la màquina i retiren les barres. D'aquesta manera l'utilatge queda alineat.

Després es col·loquen els suports inferiors sobre la base inferior. Es fixen mitjançant un cargol Allen M5 i un contra-suport. Cal muntar-los de manera que la distància entre els centres dels corrons inferiors sigui  $2L$  i cal assegurar que quedin centrats respecte l'eix central de l'utilatge. Per fer-ho es col·loca la xaveta a la ranura central de la base i a sobre es posiciona la placa calibrada corresponent a la distància  $2L$  tal com es mostra a la Figura 76. Un cop els suports estan posicionats correctament es fixen i es retira la placa i la xaveta.



*Figura 76: Fixació dels suports inferiors de l'utilatge 4ENF mitjançant una placa calibrada.*

A continuació es munten els suports centrals dels corrons inferiors, els corrons inferiors, els cargols M3 i les molles. Figura 77.



*Figura 77: Muntatge dels corrons inferiors de l'utilatge 4ENF.*

A part, es munta el carro de la part superior. Per muntar aquest carro primer de tot cal fixar el suport central a la base del carro mitjançant 2 pins (que actuen de centradors) i 2 cargols M6 amb volandera. Un cop fixat s'insereix l'eix central al forat del suport i es fixa amb d'un cargol

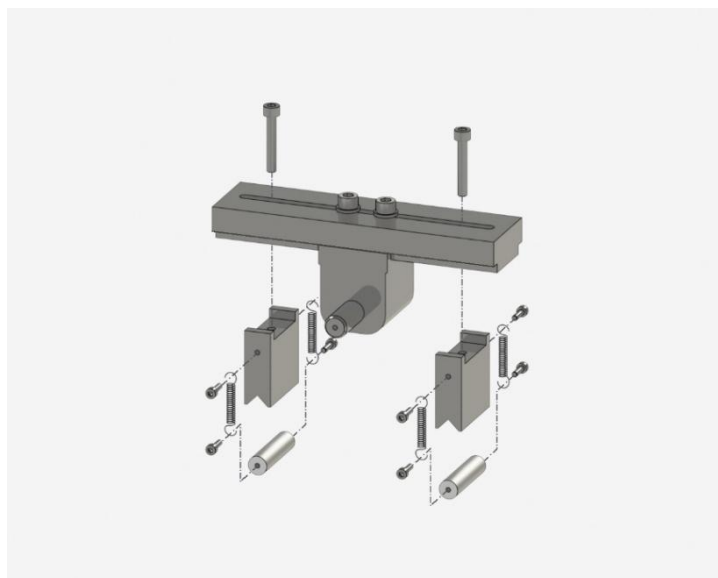
sense cabota. El cargol es fa coincidir amb l'allotjament de l'eix central, per fer-ho l'eix central disposa d'una marca en un dels seus extrems. Figura 78.



*Figura 78: Fixació del suport central a la base del carro de l'utillatge 4ENF.*

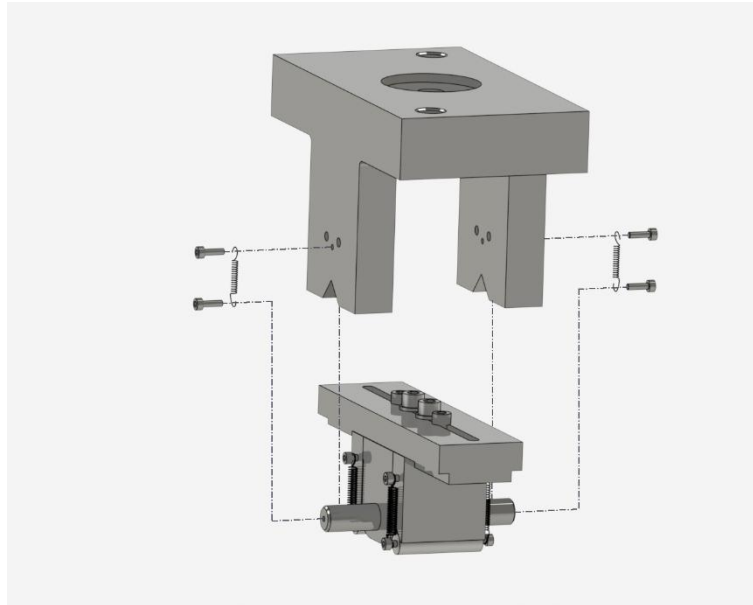
A continuació es munten els suports superiors a la base del carro. Els suports es centren respecte l'eix central utilitzant plaques calibrades corresponents a la distància desitjada (2l), tal com s'ha fet amb la part inferior de l'utilatge, o bé es munten directament recolzats sobre el suport central en cas que la distància 2l sigui la mínima de 50,8mm (2").

Tot seguit es munten els corrons i subjecten amb cargols M3 i molles. Figura 79.



*Figura 79: Fixació dels suports superiors de l'utilatge 4ENF i muntatge dels corrons.*

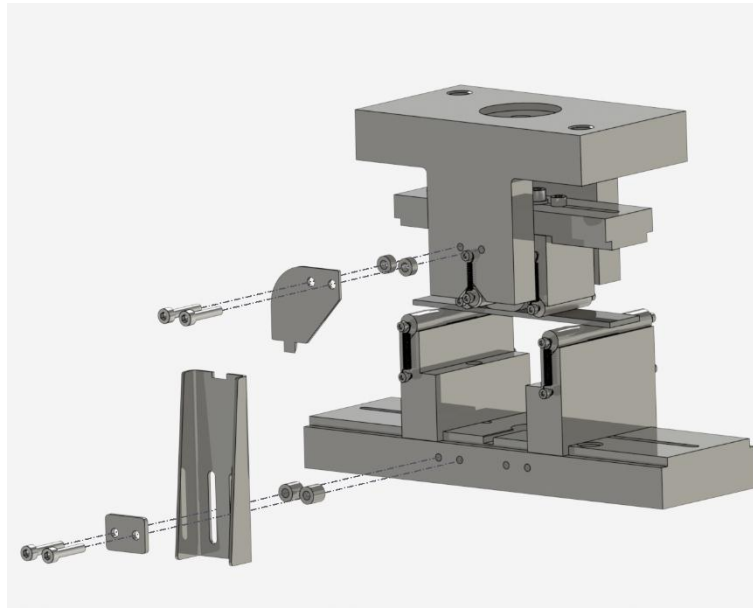
Un cop muntat el carro, es posiciona a l'allotjament de l'eix central de la fixació superior, opcionalment es pot fixar mitjançant cargols M3 i molles, Figura 80.



*Figura 80: Muntatge del carro a la fixació superior de l'utilatge 4ENF.*

Finalment cal comprovar que totes les parts de l'utilatge estan fixades correctament i tarar la força de la màquina tenint en compte el pes, tant de la proveta com del carro. És important comprovar que la part mòbil de la part superior (carro) està en contacte amb la fixació superior a l'inici de l'assaig però no es transmet càrrega.

En cas que sigui necessari, es munta els suports per a l'extensòmetre segons l'esquema de la Figura 81.



*Figura 81: Muntatge dels suports per a l'extensòmetre.*

#### E.4. Assaig de les provetes

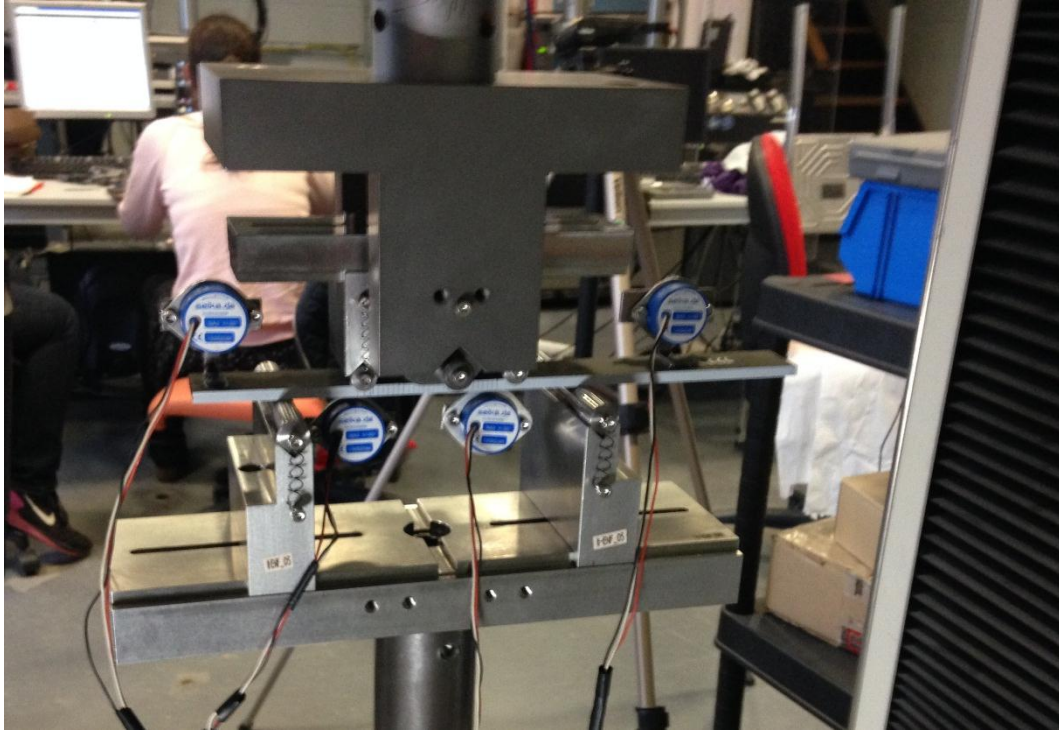
Un cop s'ha muntat i preparat l'utilatge 4ENF i s'han realitzat els assajos de preesquerda de les provetes, es pot procedir a fer l'assaig de les provetes.

Per fer-ho, primer es fa pujar la part mòbil de la màquina d'assaig i es col·loca la proveta sobre els corròs inferiors fent que la cara A quedi col·locada davant la càmera. En cas de no haver subjectat el carro mitjançant les molles, es col·loca el carro sobre la proveta i es fa baixar la part mòbil de la màquina fins que la base de fixació superior estigui en contacte però sense carregar l'eix central. És important vigilar que mentre baixa la base, aquesta no toqui amb el carro. Abans que la base superior entri en contacte amb el carro es tara la càrrega de la màquina.

Tot seguit es posiciona la proveta alineant els corròs inferiors amb les marques corresponents realitzades a la proveta. A continuació es carrega la proveta amb uns 100N i es torna a descarregar. Això es fa per tal de centrar el carro. Finalment es comprova l'alineació entre els quatre corròs i les marques corresponents de la proveta.

Es tara el desplaçament de la màquina quan l'eix central i la base superior estan en contacte. Per altra banda es comprova que la càmera està enfocada correctament i que el suport motoritzat funciona correctament i permet abastar tota la longitud d'assaig. Per altra banda es comprova que l'adquisició de dades funciona correctament.

A la Figura 82 es pot veure l'utilatge 4ENF amb la proveta posicionada i preparat per a l'assaig. En aquesta imatge també es poden veure uns inclinòmetres muntats a sobre la proveta per tal de conèixer els angles de gir en diferents punts. En aquest cas les dades dels inclinòmetres no són necessàries per al tractament de dades, però des del grup de recerca AMADE es va demanar utilitzar-los per poder reaprofitar les dades en altres aplicacions.



*Figura 82: Utilatge 4ENF amb la proveta posicionada i preparat per realitzar l'assaig.*

En aquest moment es comprova que la temperatura i humitat relativa del laboratori són de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  i  $50 \pm 5\%$  respectivament. En cas de no ser així, s'haurà de posposar l'assaig fins que es compleixin aquestes condicions.

Un cop fetes totes les comprovacions, s'inicia la captura d'imatges amb la càmera i l'adquisició de dades i s'inicia l'assaig. Un cop comença la propagació de l'esquerda es va seguint el front d'esquerda amb la càmera.

A la Figura 83 es pot veure una captura de la càmera. La línia gruixuda negra es la marca que indica el front d'esquerda inicial i per tant l'inici de la propagació, les línies fines tenen una separació de 2 mm entre elles i ens permeten visualitzar aproximadament el front d'esquerda. Quan el front d'esquerda ha superat una marca, aquesta es veu partida. En aquesta imatge el front d'esquerda es troba entre la segona i la tercera marca. Finalment la marca vermella indica un interval de 10 mm.

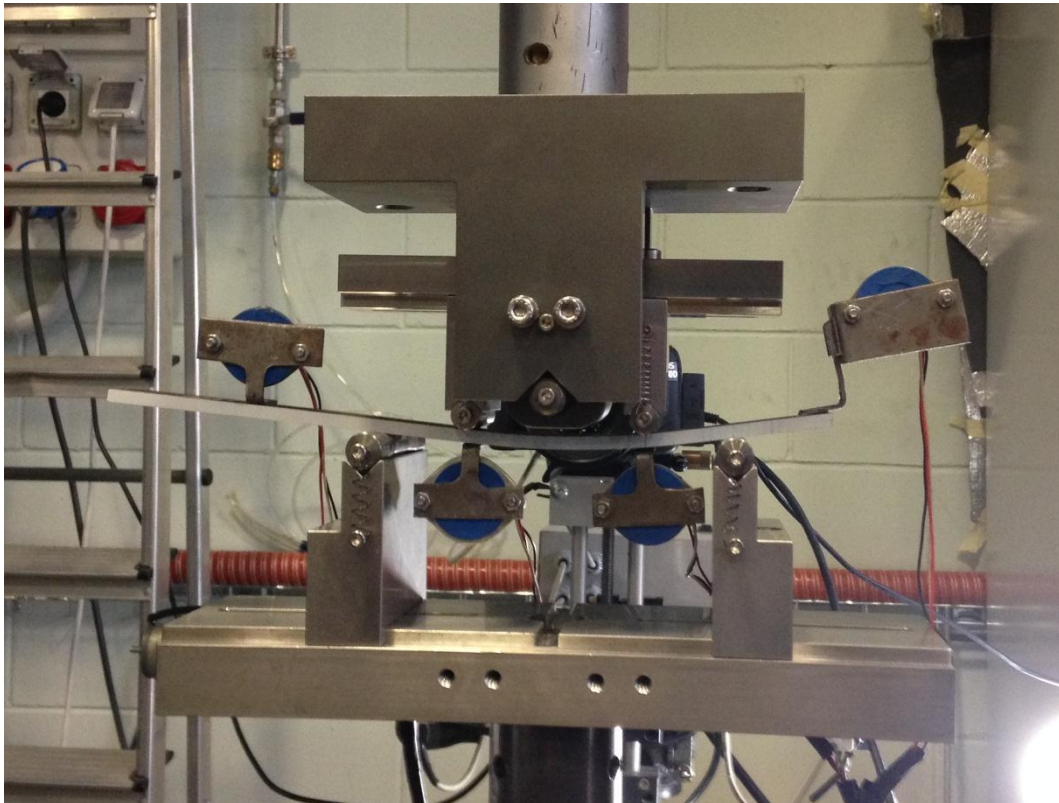


Figura 83: Captura de càmera durant un assaig 4ENF.

Durant l'assaig s'adquireixen les dades de força i desplaçament. La força s'obté mitjançant una cèl·lula de càrrega instal·lada a la màquina d'assaig. El desplaçament el dona la màquina d'assaig directament, però també és pot adquirir utilitzant altres mètodes com ara extensòmetres. Les imatges obtingudes utilitzant la càmera, tal com es pot veure a la part inferior esquerra de la Figura 83, porten sobreimprès el desplaçament del pistó. D'aquesta manera quan el front d'esquerda assoleix alguna de les marques, es pot relacionar una longitud d'esquerda coneguda amb uns valors de desplaçament i força.

Per altra banda a la Figura 84 es pot veure l'utilatge 4ENF durant l'assaig d'una proveta. Es pot observar com es vincla la proveta degut a la càrrega aplicada a aquesta a través del carro.





*Figura 84: Utillatge 4ENF durant l'assaig d'una proveta.*

Un cop el front d'esquerda ha superat la marca de final d'assaig, es descarrega la proveta i es retorna a la posició inicial. Tot seguit es guarden les dades de força i desplaçament, així com les imatges de la càmera per el seu posterior tractament.

Finalment es puja la part mòbil de la màquina. En cas de no utilitzar les molles per a subjectar el carro a la base superior, es retira el carro. Tot seguit es retira la proveta i es procedeix a mesurar la longitud de l'esquerda final.



## ANNEX F: MÀQUINES D'ASSAIG

A continuació es mostren les principals característiques de les màquines d'assaig utilitzades durant els assajos. Tota la informació ha estat extreta dels catàlegs del fabricant MTS publicats a la seva pàgina web [27].

### F.1. Màquina d'assaig MTS Bionix 858

#### MTS 810 & 858 Test Systems Meeting the Full Spectrum of Testing Needs

##### Superior Testing and Global Support for all Environments

Test engineers worldwide rely on MTS Material Testing Systems and unrivaled global support to achieve outstanding results for both static and dynamic material and component testing. Renowned for their unmatched accuracy, flexibility, high performance, and innovative standard features, these systems provide for years of superior testing for all types of test and lab environments. With a large selection of fully fatigue-rated MTS load units, control technology and accessories to choose from, tightly integrated systems can be easily configured to meet an extremely wide array of test requirements.

##### Unmatched Accuracy

- An integral actuator design, stiff, low-mass crossheads, and special force transducers deliver superior axial and lateral stiffness.
- Precision-machined columns and actuator rods, and laser-guided factory alignment ensure unprecedented alignment accuracy.
- Highly accurate MTS load cells exhibit low hysteresis and long-term stability.
- Linear Variable Differential Transducers mounted co-axially with actuators deliver precise actuator position measurement.

##### Flexibility

- MTS load units perform both highly accurate monotonic tests and dynamic test applications.
- Flexible test spaces, hydraulic lifts and locks, and conveniently placed controls facilitate easy crosshead positioning.
- MTS servovalves are available in a wide variety of force and flow capacities.
- 810 systems can accommodate up to two servovalves - port shut-offs allow operation of one or both valves.
- MTS load units require no special mounting or foundation.

##### High Performance

- Lightweight crossheads and stiff components reduce load frame deflections and increase performance envelopes.
- Extremely low friction actuators and high response servovalves ensure superior test control.
- Close-coupled accumulators enable high frequency servo-valve response, resulting in low distortion and reduced line noise.
- Hydraulic service manifolds provide smooth ramping of system pressure to ensure precise control during system start-up.

##### Innovative Features

- Five-port servovalves ensure that pressure changes - low-to-high, high-to-low, and rapid shutoff - are made under system control to guarantee smooth transitions.
- Local hydraulic station control integral with actuator-mounted manifold provides unmatched convenience and First-on/Last-off management of hydraulic power.
- Off-Low-Slow-High pressure control provides true bumpless start and protects specimens.
- Force-limited stroke control for specimen insertion protects both operators and specimens.

##### MTS Proven Control Solutions

FlexTest SE & GT Digital servo-controllers from MTS make up a powerful array of reliable, flexible and easy-to-use controllers designed to address the full spectrum of material and component testing needs. These systems employ robust VME-based MTS hardware and provide the pricing flexibility to accommodate a broad range of budgets. An array of MTS material testing software perform test definition, test execution, and report generation for virtually all types of material tests, including tension, bending, and compression testing, fatigue life studies, and fracture growth studies. MTS software programs include:

- MTS's MultiPurpose TestWare® for flexibility to meet the demands of quickly changing test requirements in your standard and non-standard testing applications.
- MTS TestWorks® to perform all of your tensile, flex, compression and peel/tear tests, as well as complicated non-standard tests.
- MTS Fatigue and Fracture Testing Software for general-purpose and material-specific testing applications.

#### Material Testing Continuum

Force Range	5 kN (1 kip)						25 kN ( 5.5 kip)						100 kN (22 kip)						250 kN (55 kip)						500 kN (110 kip)																							
Range of Available Performance	Moderate												High												Very High																							
Material Strength	Plastics						Elastomers						Aluminum						Composites						Steel						Super Alloys																	
Specimen Size	Subsized												Standard												Medium												Large											
Test Type	Tension • Bend • Durability • High Cycle Fatigue • Low Cycle Fatigue Compression • Creep • Fatigue Crack Growth • Fracture Toughness																																															

**Versatile, Configurable 810**

The 810 Material Testing System delivers a broad array of testing capabilities for both low and high force static and dynamic testing. By selecting from a variety of force capacities, servovalve flow ratings, pump capacities, software, and accessories, the floor-standing 810 system can easily be configured to meet your specific material or component testing needs. The versatile 810 system features:

- Force ranges from 25 kN (5.5 kip) to 500 kN (110 kip)
- A wide performance range - see Performance Curves on pages 20-23
- The ability to test materials ranging in strength from plastics to aluminum, composites and steel
- A large test space to accommodate standard, medium and large size specimens, grips, fixtures and environmental subsystem
- The capability to perform a wide variety of test types from tensile to high cycle fatigue, fracture mechanics, and durability of components

**Full Featured, Compact 858**

The 858 Material Testing System is a cost-effective choice for low force static and dynamic testing applications. Designed to preserve valuable floor space, the 858 load unit can fit conveniently on an existing laboratory bench, or sit on its own portable, custom cart. While extremely compact, the 858 system provides a broad range of test enhancing features, including:

- Force ranges from 5 kN (1.1 kip) to 25 kN (5.5 kip)
- A moderate performance range - see Performance Curves on pages 24-27
- The ability to test lower strength materials ranging from plastics to aluminum
- Accommodation of subsize to standard specimens
- The capability to perform tension, compression, bend and fatigue tests; specialized tests for biomedical and biomechanical testing; and durability testing on small components
- Wide column spacing to accommodate larger fixtures, environmental chambers and furnaces



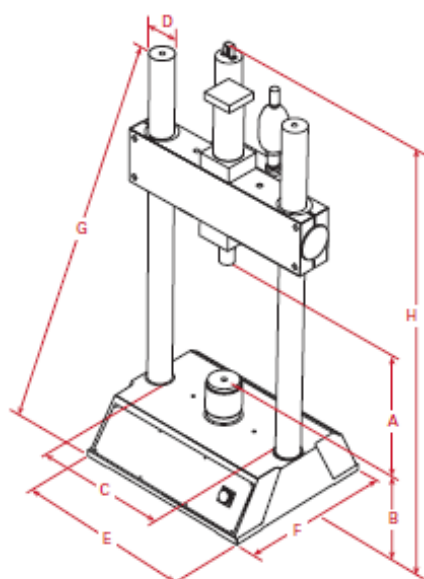
## Components of the 858 System

The 858 employs a MTS Model 359 load unit that is fatigue-rated at 25 kN (5.5 kip). This freestanding load unit can be operated at frequencies up to 30 Hz without having to secure it to the lab bench or the optional cart that is available from MTS.

The 359 load unit features a generous horizontal test space between the columns, which enables easy specimen mounting. Load units with extended columns can be ordered to gain additional vertical free space.

The basic load unit configurations each use an integral crosshead-mounted linear actuator with an attached manifold. This provides close-coupled servovalves and accumulators for improved performance and reduced pressure fluctuations.

A selection of linear actuators are available to achieve a wide range of scale force data from 5 kN to 25 kN. The full-scale force is dependent on the output pressure of the particular MTS hydraulic power unit selected. Optional hydraulic lifts can be provided to facilitate repositioning of the crosshead. See Performance Curves on page 24.



## Specifications By Frame Configuration

### Load unit specifications

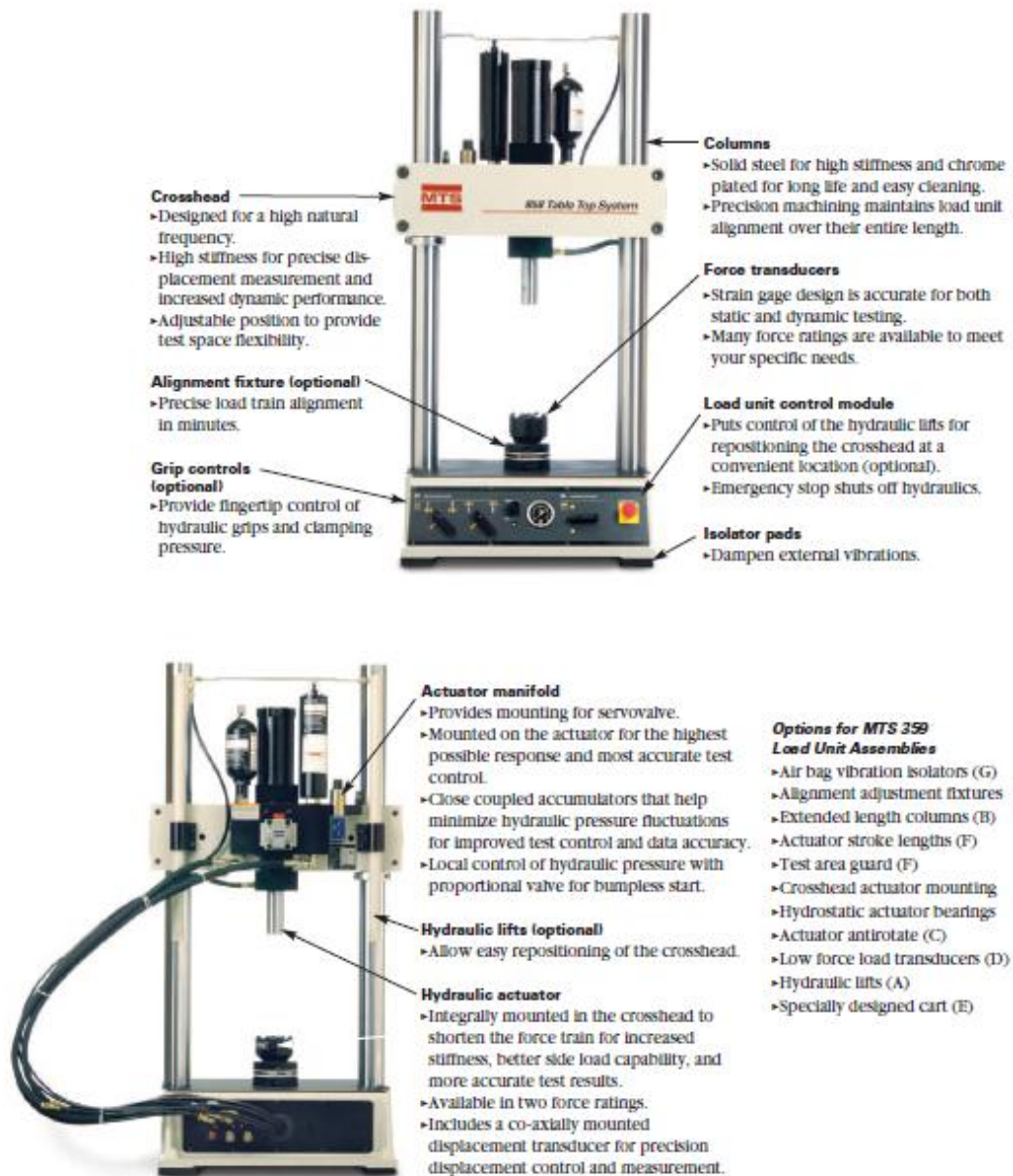
Model	359.15 Standard	359.15 Extended	359.25 Standard	359.25 Extended
Force capacity <sup>1</sup>	15 kN (3.3 kip)	15 kN (3.3 kip)	25 kN (5.5 kip)	25 kN (5.5 kip)
Vertical test space* (A)	789 mm (31.0 in)	1289 mm (50.7 in)	789 mm (31.0 in)	1289 mm (50.7 in)
Working height (B)	278 mm (10.9 in)	278 mm (10.9 in)	278 mm (10.9 in)	278 mm (10.9 in)
Column spacing (C)	460 mm (18.1 in)	460 mm (18.1 in)	460 mm (18.1 in)	460 mm (18.1 in)
Column diameter (D)	76 mm (3.0 in)	76 mm (3.0 in)	76 mm (3.0 in)	76 mm (3.0 in)
Base width (E)	625 mm (24.6 in)	625 mm (24.6 in)	625 mm (24.6 in)	625 mm (24.6 in)
Base depth (F)	527 mm (20.8 in)	527 mm (20.8 in)	527 mm (20.8 in)	527 mm (20.8 in)
Diagonal Clearance (G)	1378 mm (54.25 in)	1879 mm (74.0 in)	1378 mm (54.25 in)	1879 mm (74.0 in)
Overall Height (H)	1687 mm (66.4 in)	2187 mm (86.1 in)	1687 mm (66.4 in)	2187 mm (86.1 in)
Stiffness <sup>2</sup>	275x10 <sup>6</sup> N/m (1.57x10 <sup>6</sup> lb/in) (measured)	275x10 <sup>6</sup> N/m (1.57x10 <sup>6</sup> lb/in) (measured)	275x10 <sup>6</sup> N/m (1.57x10 <sup>6</sup> lb/in) (measured)	275x10 <sup>6</sup> N/m (1.57x10 <sup>6</sup> lb/in) (measured)
Weight	192 kg (425 lb)	231 kg (508 lb)	192 kg (425 lb)	231 kg (508 lb)

\* Test space is the maximum distance between the load cell and the actuator with the actuator fully retracted.

<sup>2</sup> Determined at each load unit's full fatigue rating with its crosshead raised 800 mm (31.5 in.) above the base plate.

<sup>3</sup> Rated actuator force at 21 MPa (3000 psi).

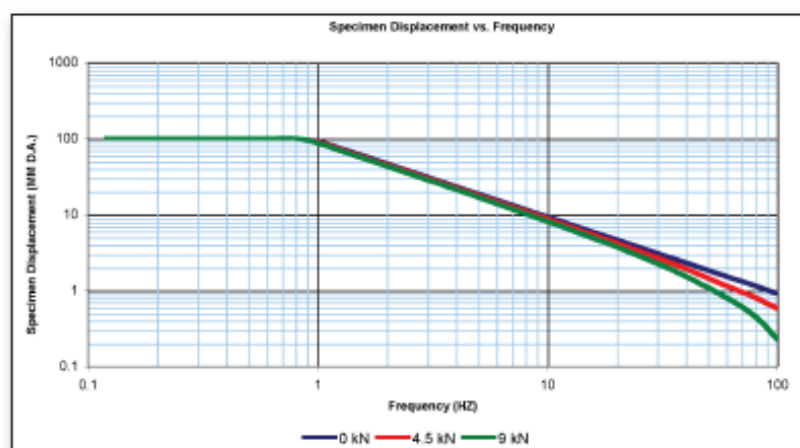
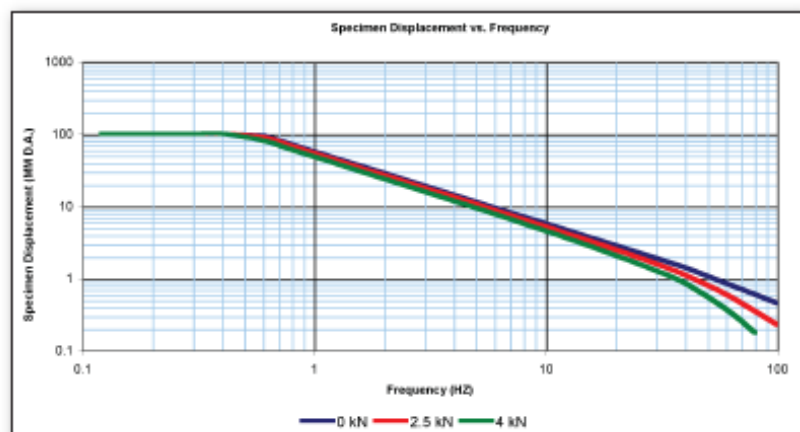
Specifications are subject to change without notice. Contact MTS to verify critical specifications.



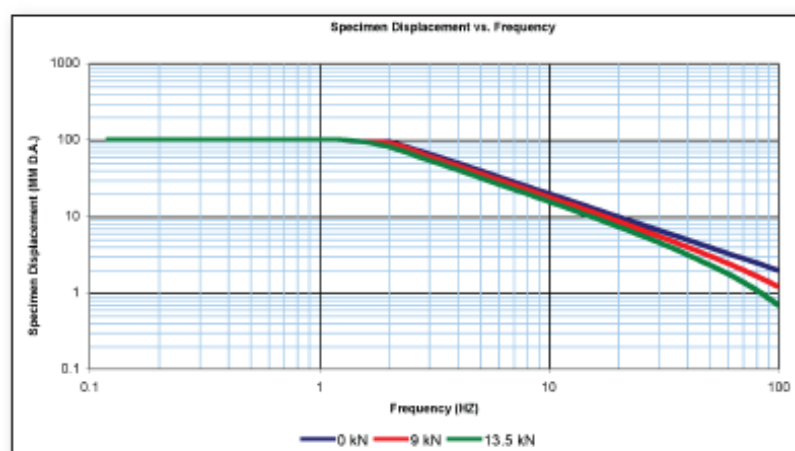
## 858 Performance Curves

The graphs on the following pages illustrate the dynamic performance characteristics of a sampling of configurations available for the 810 and 858 systems. Actual performance will depend upon the

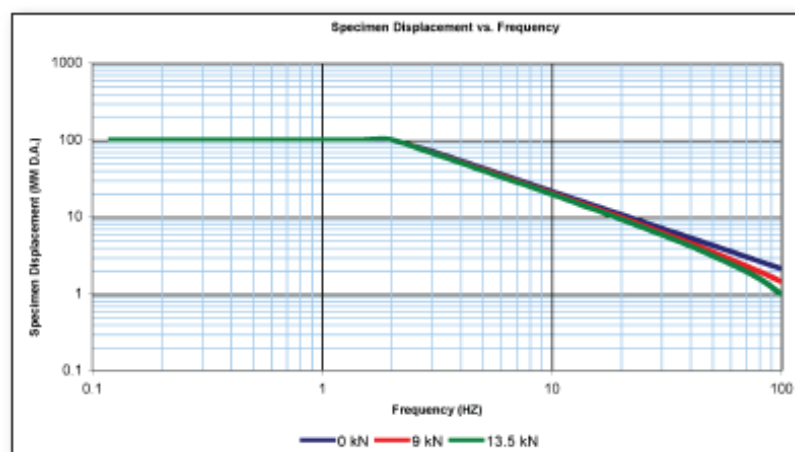
specimen under test, grips and fixtures employed, and the components selected in your system. MTS can assist you in configuring a system to meet your test requirements.





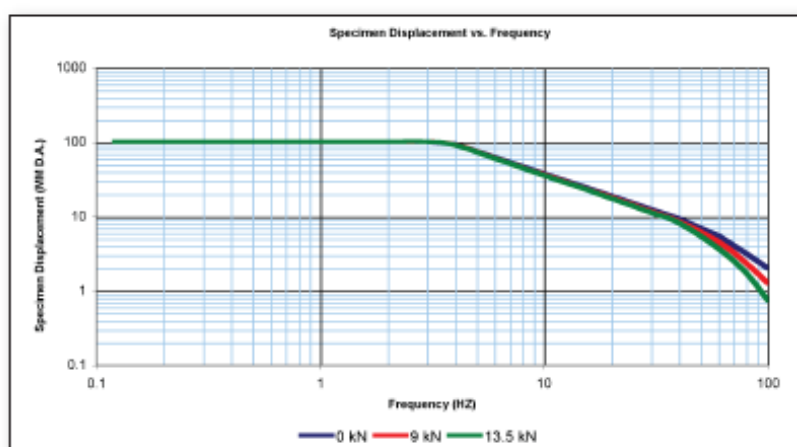


<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN (5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.23G x (1)	19 lpm (5 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b> 15 kN (3.3 kip)		<b>Grip:</b> 647.01	4.1 kg (9.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b> 100 mm (4 inches)		<b>HPU:</b> 505.07 60 Hz	26.5 lpm (7 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b> 210 bar (3000 psi)			

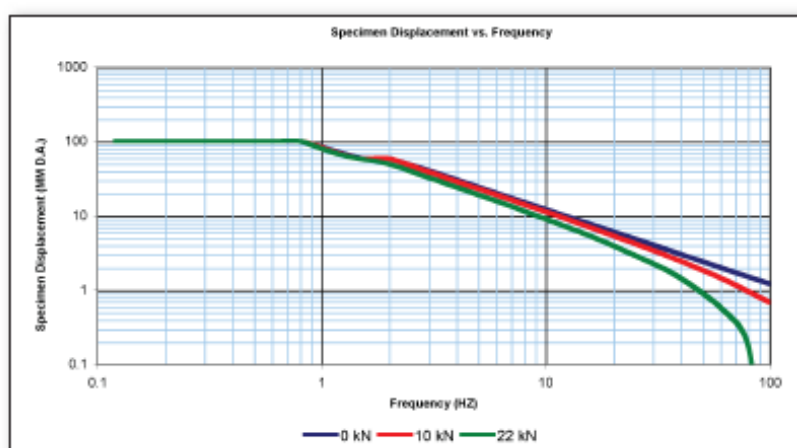


<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN (5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.24G x (1)	38 lpm (10 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b> 15 kN (3.3 kip)		<b>Grip:</b> 647.01	4.1 kg (9.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b> 100 mm (4 inches)		<b>HPU:</b> 505.07 60 Hz	26.5 lpm (7 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b> 210 bar (3000 psi)			

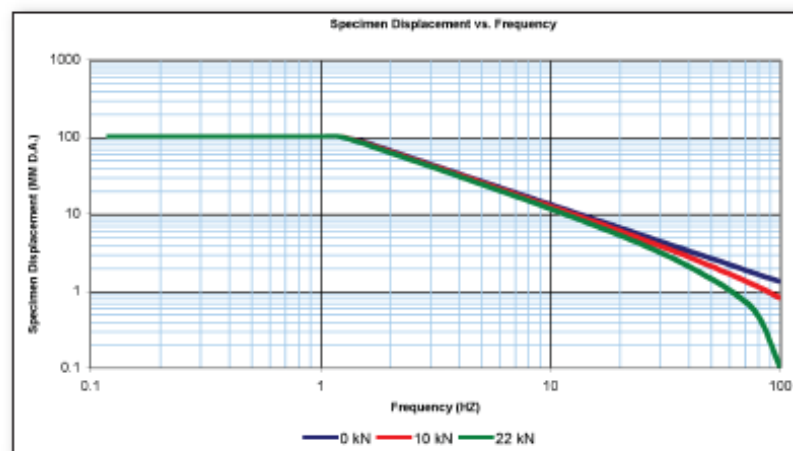
## 858 Performance Curves (continued)



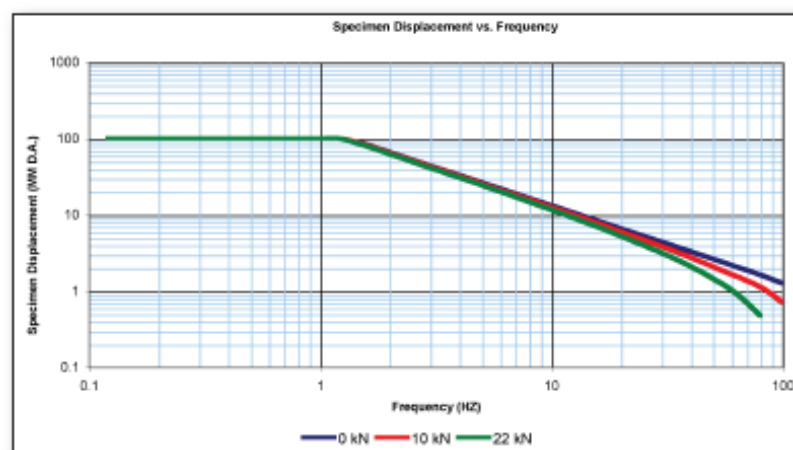
<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN (5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.25G x (1)	57 lpm (15 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b>	15 kN (3.3 kip)	<b>Grip:</b> 647.01	4.1 kg (9.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b>	100 mm (4 inches)	<b>HPU:</b> 505.11 60 Hz	41.6 lpm (11 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b>	210 bar (3000 psi)		



<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN (5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.23G x (1)	19 lpm (5 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b>	25 kN (5.5 kip)	<b>Grip:</b> 647.02	6.8 kg (15.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b>	100 mm (4 inches)	<b>HPU:</b> 505.07 60 Hz	26.5 lpm (7 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b>	210 bar (3000 psi)		



<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN	(5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.24G x (1)	38 lpm	(10 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b>	25 kN	(5.5 kip)	<b>Grip:</b> 647.02	6.8 kg	(15.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b>	100 mm	(4 inches)	<b>HPU:</b> 505.07	60 Hz	26.5 lpm (7 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b>	210 bar	(3000 psi)			





<b>Load Frame Model:</b> 359	25 kN	(5.5 kip)	<b>ServoValve(s):</b> 252.25G x (1)	57 lpm	(15 gpm)
<b>Actuator Static Force:</b>	25 kN	(5.5 kip)	<b>Grip:</b> 647.02	6.8 kg	(15.0 lbs.)
<b>Actuator Nominal Stroke:</b>	100 mm	(4 inches)	<b>HPU:</b> 505.07	60 Hz	26.5 lpm (7 gpm)
<b>System Oil Pressure:</b>	210 bar	(3000 psi)			

*\* Systems illustrated include accumulation, pressure and return hoses selected to match the other component ratings listed. Hydraulic power supplies have been selected to not limit performance provided by other components. Performances illustrated represent a mathematical prediction of system performance acting against a spring specimen. Your MTS Sales representative can discuss these and other performance options available.*



## F.2. MTS Insight 5kN (Single Column Configuration) i 100kN




**be certain.**

## MTS Insight™ Material Testing Systems

### Product Information

1kN–300kN



100-146-686 G

## Specifications

## Specifications

This section provides general specifications for the MTS Insight Material Testing System frames and illustrations of the crosshead and baseplate threaded hole patterns for mounting fixtures.

**Note** At the time of this printing, some specifications have not been tested and calculated specifications are provided in the following tables. Consequently, specifications are subject to change without notice. Contact MTS for verification if critical specifications.

## General Specifications

The following specifications are for all MTS Insight frames. Specifications for the specific models are in the following tables.

Parameter	Specification
Environmental	For indoor use only
Temperature	5 to 40 °C
Relative humidity	10 to 85%, noncondensing
Altitude	For use at altitudes up to 2000 m (6500 ft)
Power	
Insulation over voltage	Category II
Pollution degree	2

## Specifications

## Model Specifications

MTS Insight Model	Low Capacity				
	MTS Insight 1	MTS Insight 2	MTS Insight 2 High Speed	MTS Insight 5	MTS Insight 5
Column Configuration	Single	Single	Double	Single	Double
Force Capacity	1 kN (225 lbf)	2 kN (450 lbf)	2 kN (450 lbf)	5 kN (1125 lbf)	5 kN (1125 lbf)
Vertical Test Space					
Crosshead Travel					
Standard Length	750 mm (29.5 in)	750 mm (29.5 in)	NA	750 mm (29.5 in)	1100 mm (43 in)
Extended Length	1004 mm (39.5 in)	1004 mm (39.5 in)	1400 mm (55 in)	1004 mm (39.5 in)	1400 mm (55 in)
Maximum Test Speed	1500 mm/min (59 in/min)	1000 mm/min (39 in/min)	2540 mm/min (100 in/min)	500 mm/min (20 in/min)	1000 mm/min (39 in/min)
Minimum Test Speed	0.001 mm/min (0.00004 in/min)	0.001 mm/min (0.00004 in/min)	0.003 mm/min (0.00012 in/min)	0.001 mm/min (0.00004 in/min)	0.001 mm/min (0.00004 in/min)
Height					
Standard Length	1140 mm (45 in)	1140 mm (45 in)	NA	1140 mm (45 in)	1600 mm (63 in)
Extended Length	1394 mm (55 in)	1394 mm (55 in)	1900 mm (74.75 in)	1394 mm (55 in)	1900 mm (74.75 in)
Width	490 mm (19 in)	490 mm (19 in)	650 mm (26 in)	490 mm (19 in)	650 mm (26 in)
Depth	450 mm (18 in)	450 mm (18 in)	450 mm (18 in)	450 mm (18 in)	450 mm (18 in)
Weight					
Standard Length	50 kg (110 lb)	50 kg (110 lb)	NA	50 kg (110 lb)	115 kg (255 lb)
Extended Length	55 kg (119 lb)	55 kg (119 lb)	123 kg (281 lb)	55 kg (119 lb)	123 kg (281 lb)
Clearance from Loading Axis to Column Cover	100 mm (3.9 in)	100 mm (3.9 in)	NA	100 mm (3.9 in)	NA
Space Between Columns	N/A	N/A	450 mm (15.9 in)	N/A	405 mm (15.9 in)
Power Requirements	120 or 230 VAC (single phase)	120 or 230 VAC (single phase)	120 or 230 VAC (single phase)	120 or 230 VAC (single phase)	120 or 230 VAC (single phase)

## Specifications

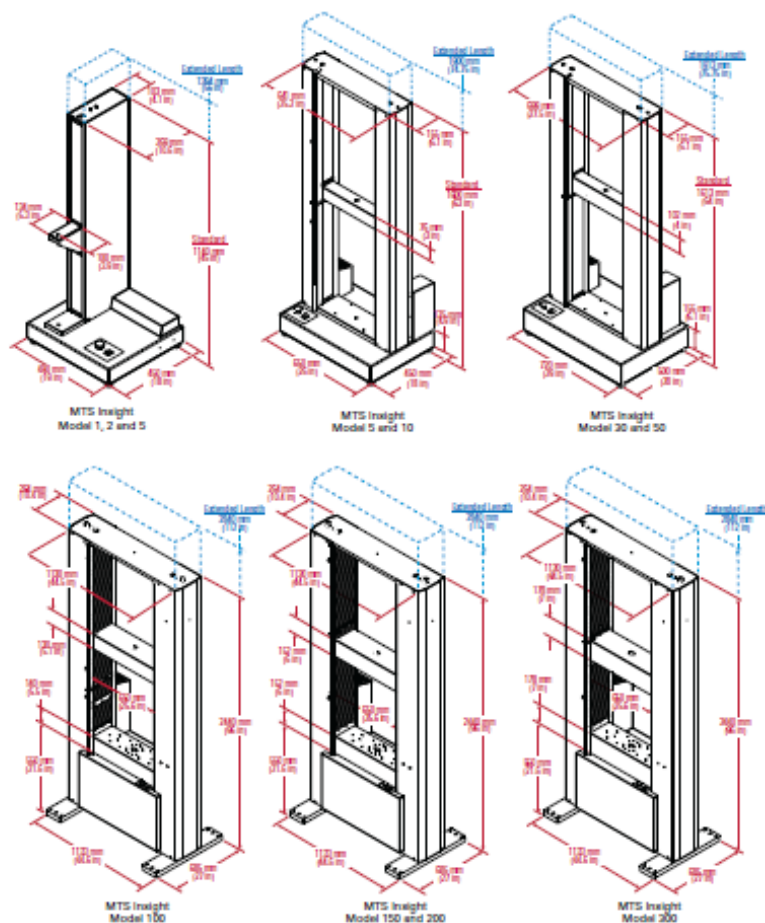
High-Capacity				
MTS Insight Model	MTS Insight 100	MTS Insight 150	MTS Insight 200	MTS Insight 300
Column Configuration	Double	Double	Double	Double
Force Capacity	100 kN (22500 lbf)	150 kN (33750 lbf)	200 kN (45000 lbf)	300 kN (67500 lbf)
Vertical Test Space Crosshead Travel				
Standard Length	1200 mm (47.3 in)	1200 mm (47.3 in)	1200 mm (47.3 in)	1150 mm (45.3 in)
Extended Length	1600 mm (63 in)	1600 mm (63 in)	1600 mm (63 in)	1550 mm (61 in)
Maximum Test Speed	500 mm/min (20 in/min)	500 mm/min (20 in/min)	500 mm/min (20 in/min)	500 mm/min (20 in/min)
Minimum Test Speed	0.01 mm/min (0.0004 in/min)	0.01 mm/min (0.0004 in/min)	0.01 mm/min (0.0004 in/min)	0.01 mm/min (0.0004 in/min)
Height				
Standard Length	2440 mm (96 in)	2440 mm (96 in)	2440 mm (96 in)	2440 mm (96 in)
Extended Length	2840 mm (112 in)	2840 mm (112 in)	2840 mm (112 in)	2840 mm (112 in)
Width	1133 mm (44.6 in)	1133 mm (44.6 in)	1133 mm (44.6 in)	1133 mm (44.6 in)
Depth	685 mm (27 in)	685 mm (27 in)	685 mm (27 in)	685 mm (27 in)
Weight				
Standard Length	750 kg (1655 lb)	970 kg (2140 lb)	970 kg (2140 lb)	1050 kg (2315 lb)
Extended Length	787 kg (1735 lb)	1029 kg (2270 lb)	1029 kg (2270 lb)	1116 kg (2460 lb)
Clearance from Loading Axis to Column Cover	N/A	N/A	N/A	N/A
Space Between Columns	650 mm (25.6 in)	650 mm (25.6 in)	650 mm (25.6 in)	650 mm (25.6 in)
Power Requirements	230 VAC	400 VAC	400 VAC	400 VAC
Power Supply	(single phase)	(three phase)	(three phase)	(three phase)

## MTS Insight 50 W Multihead

Specifications	MTS Insight 50 Wide
Force Capacity	50 kN (11250 lbf)
Minimum Test Speed	0.001 mm/min. (0.00004 in./min.)
Maximum Test Speed	500 mm/min. (19.7 in./min.)
Force Capacity @ max. test speed	25 kN (5625 lbf)
Maximum Test Speed @ rated force capacity	250 mm/min. (9.8 in./min.)

## Specifications

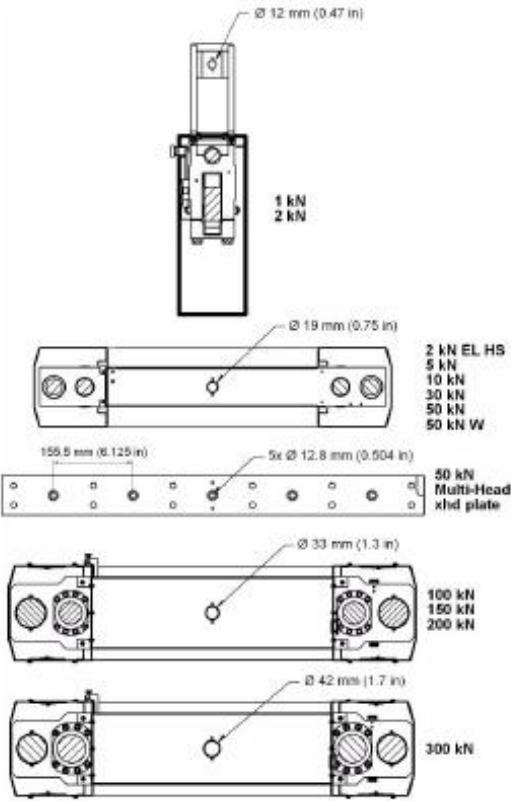
## Dimensions



Specifications

Crosshead Detail

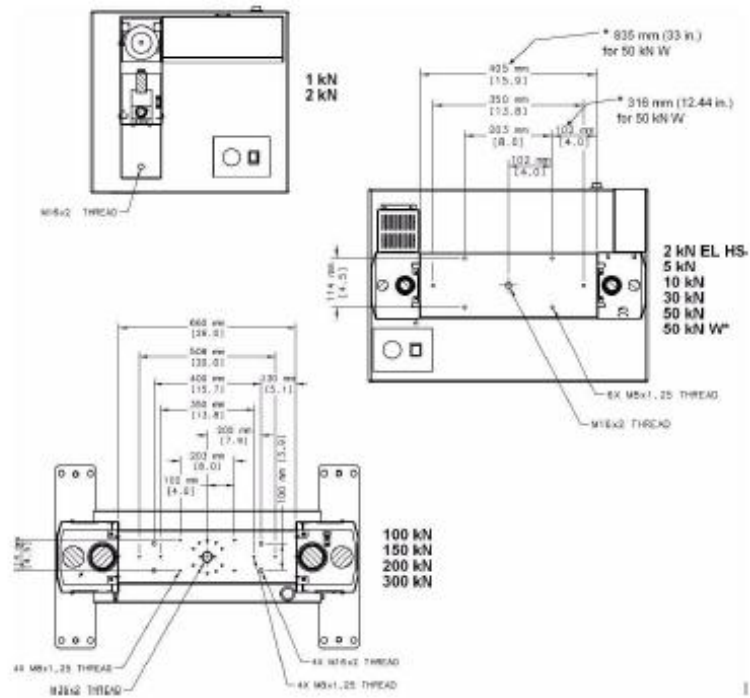
The crosshead has a single hole drilled through for mounting loadcells, alignment fixtures, grips, and so forth.



## Specifications

## Baseplate Detail

The baseplate has various patterns of threaded holes for mounting fixtures.



## Specifications



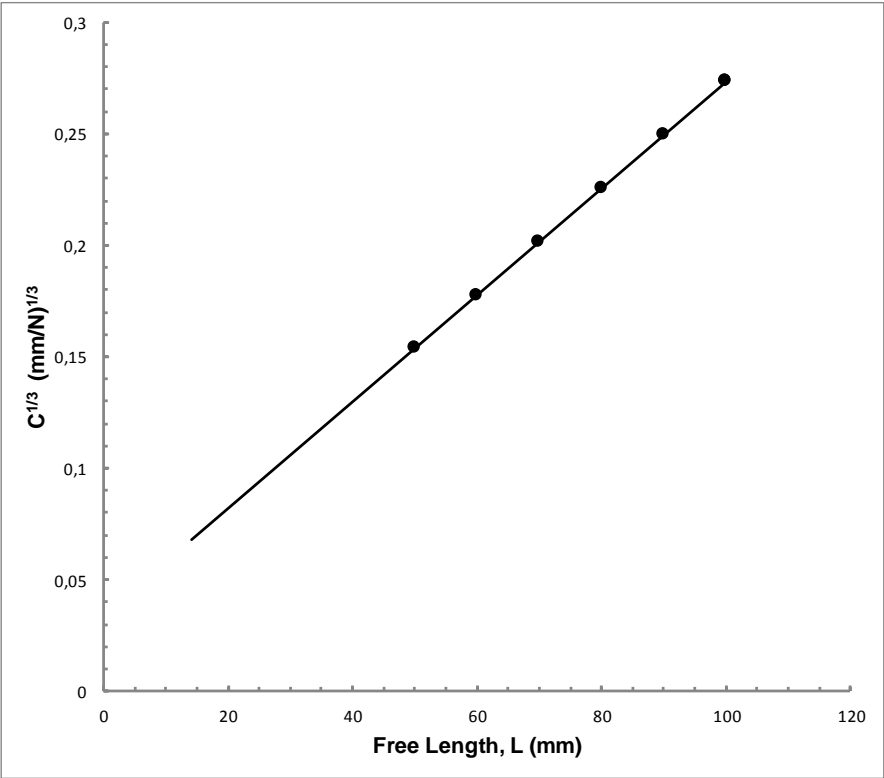
Model	Baseplate Thickness	
	mm	in.
1 kN	19	0.7
2 kN	19	0.7
2 kN EL HS	25	1.0
5 kN	25	1.0
10 kN	25	1.0
30 kN	25	1.0
50 kN	25	1.0
50 kN W	50	2.0
50 kN W Multithead	50	2.0
100 kN	140	5.5
150 kN	152	6.0
200 kN	152	6.0
300 kN	178	7.0

Les referències bibliogràfiques citades en aquest annex es poden consultar a l'apartat de bibliografia de la memòria del projecte.



## ANNEX G: RESULTATS DELS ASSAJOS ELS

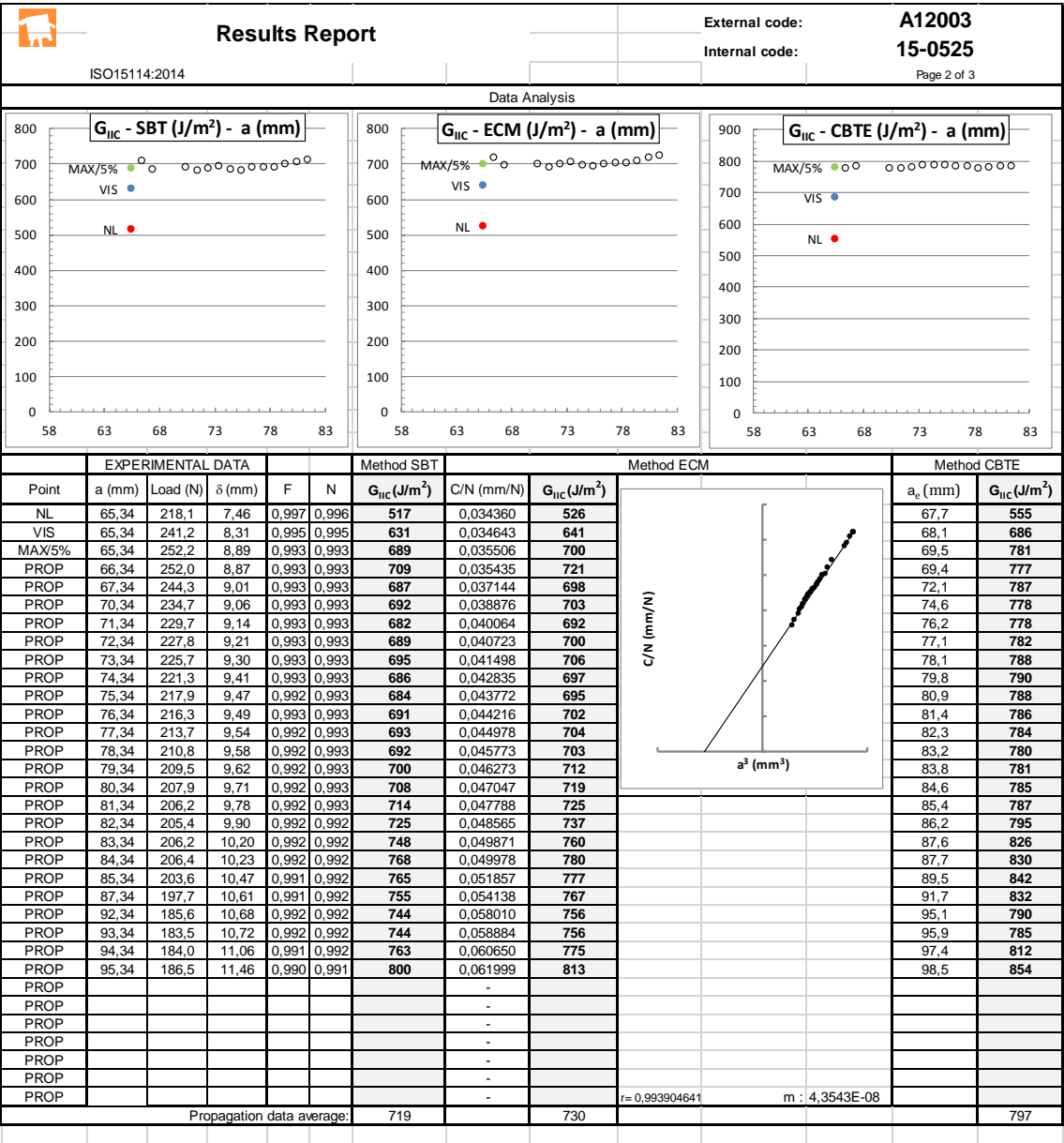
A continuació es reproduïx l'informe amb els resultats obtinguts dels assajos ELS en mode II.

 <b>Calibration for ELS clamp correction</b>		External code: <b>A12002</b> Internal code: <b>18-0524</b>					
ISO15114:2014		Page 1 of 1					
Data reduction sheet created by:		Validated by:	Date:				
<b>SPECIMEN DIMENSIONS</b>							
Specimen:	A12002	Date:	23/03/2015				
Technician:		MPE					
Width (mm)							
W1	24,94						
W2	24,94						
W3	24,94						
Thickness 2h (mm)							
T1	4,583						
T2	4,572	Specimen length: (mm)	L1	249,51	L2	249,51	
T3	4,598	Average width b (mm):	24,94	mm	Width variat.	0,00	
		Average thickness h(mm):	2,292	mm	Thick. variat.	0,026	
		Average length L(mm):	249,5	mm	Length variat.	0,00	
<b>SPECIMEN PREPARATION</b>							
Technician	MPE	Date:	23/03/2015				
<b>LOAD INTRODUCTION FIXTURE</b>							
Fixture	End Block	$l_1$ (mm):	2,00	$l_2$ (mm):	4,29		
<b>TEST SETUP</b>							
Laboratory:	AMADE	Date:	23/03/2015	Technician:	MPE		
Loading cross-head rate (mm/min):	1,0	Unload cross-head rate (mm/min):	10,0	Hr lab. (%):	52%		
Lab. Temp. (°):	24,1	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-		
Test machine:		BIONIX1	Load Cell/Range:	5KN, 100%			
<b>COMPLIANCE - vs. L</b>							
$L$ (mm)	100,0	100,0	90,0	80,0	70,0	60,0	50,0
$C$ (mm/N)	0,0205	0,0205	0,0155	0,0115	0,0081	0,0056	0,0037
Max. Load (N)	248,6	248,6	248,4	247,9	247,7	249,1	250,9
$r^2$	0,9994	0,9994	0,9995	0,9994	0,9995	0,9995	0,9997
<b>CLAMP CALIBRATION</b>							
Slope							
0,00240							
$r^2$							
0,9999							
$E_1$ (GPa):							
120,90							
$\Delta_{clamp}$ (mm):							
14,16							
REMARKS							

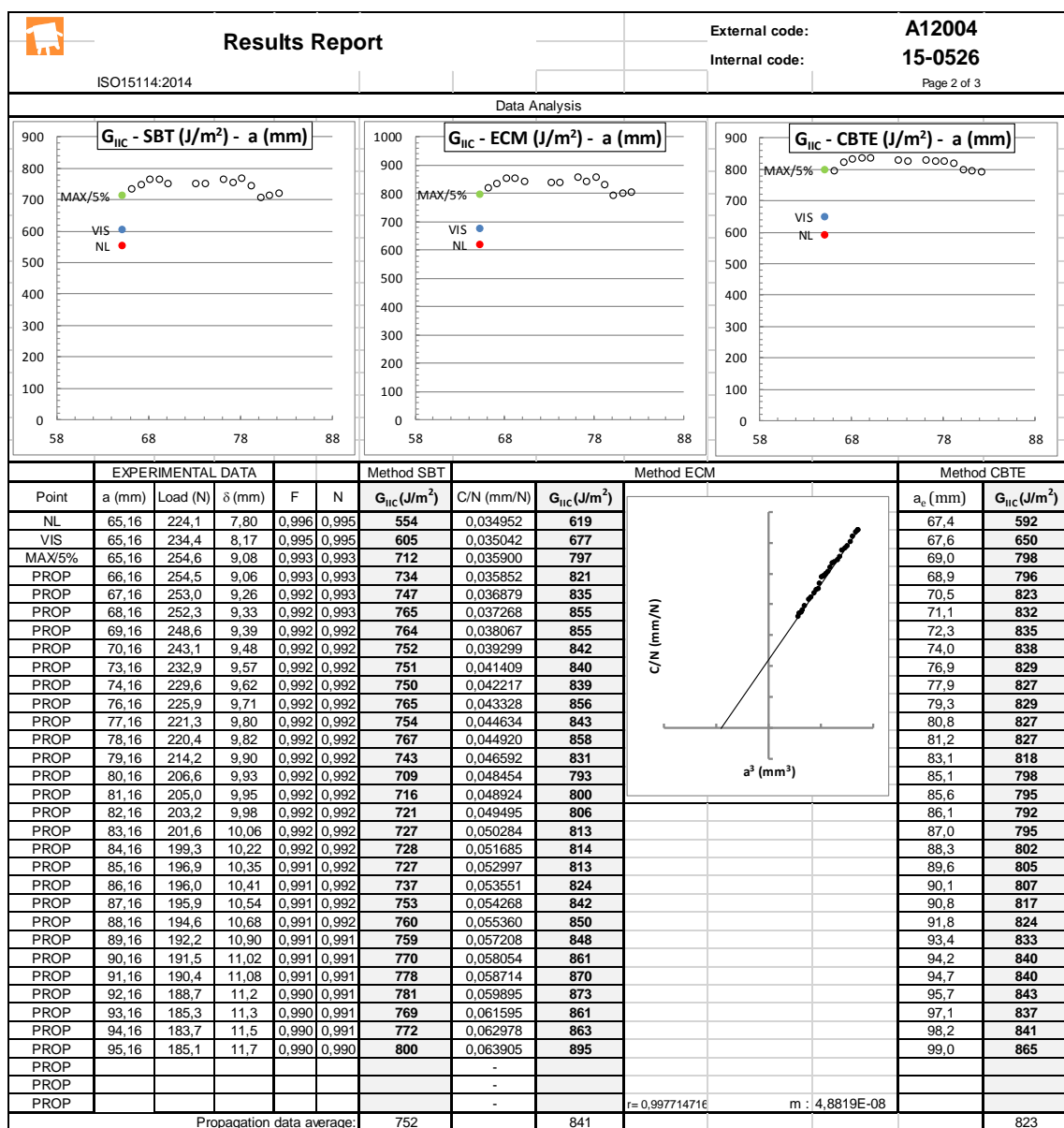
Results report		External code: A12001				
		Internal code: 15-0523				
ISO15114:2014		Page 1 of 3				
Data reduction sheet created by JCO		Validated by JCO				
Date: 4/11/2011						
SPECIMEN DIMENSIONS						
Specimen:	A12001	Date:	23/03/2015			
Technician:	MPE					
Width (mm)						
W1	25,23					
W2	25,23					
W3	25,23					
Thickness 2h (mm)						
T1	4,411					
T2	4,448	Specimen length: (mm)	L1	249,80	L2	249,80
T3	4,450	Average width b (mm):	25,23	mm	Width variat.	0,00
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average thickness h(mm):	2,218	mm	Thick. variat.	0,039
	PEUDEREI/02	Average length L(mm):	249,8	mm	Length variat.	0,00
PRECRACK TEST						
Technician	MPE	Date:	25/03/2015	Mode:	Mode II	File:
CRACK LENGTHS						
$\bar{a}_{insert1}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert2}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert}$ (mm):		$\Delta \bar{a}_{insert}$ (mm):
$\bar{a}_{precrack1}$ (mm):	64,9	$\bar{a}_{precrack2}$ (mm):	65,1	$\bar{a}_{precrack}$ (mm):	65,0	$\Delta \bar{a}_{precrack}$ (mm):
$a_{01}$ (mm):	64,9	$a_{02}$ (mm):	65,1	$a_0$ (mm):	65,0	$\Delta a_0$ (mm):
$\bar{a}_{final1}$ (mm):	96,0	$\bar{a}_{final2}$ (mm):	97,5	$\bar{a}_{final}$ (mm):	96,7	$\Delta \bar{a}_{final}$ (mm):
Technician	MPE	Date:	25/03/2015	Equipment used:	PEUDEREI/01	
LOAD INTRODUCTION FIXTURE						
Fixture	End Block	$l_1$ (mm):	2,00	$l_2$ (mm):	4,22	
Free Length dimension, L (mm):	99,9					
TEST SETUP						
Laboratory:	AMADE	Date:	25/03/2015	Technician:	MPE	
Load. cross-head rate (mm/min):	1,0	Unload cross-head rate (mm/min):	10,0	Hr lab. (%):	45%	
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-	Chamber
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm					
Test machine:	BIONIX1			Load Cell/Range:	5KN/10%	
FLEXURAL MODULUS AND CLAMP CORRECTION FROM CALIBRATION						
Calibration data file:	A12002_CAL_ISO15114	$E_1$ (GPa):	120,9	$\Delta_{clamp}$ (mm):	14,2	
TEST RESULTS						
Technician	MPE	Date:	26/03/2015	File:	A12001	
LOAD - DISPLACEMENT CURVE						
FAILURE MODE		REMARKS				
		High values of G-ECM due to a steps in the crack growing to provides an strange C/N ( $a^3$ ) curve. (??)				

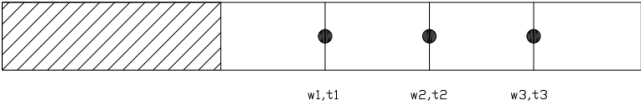
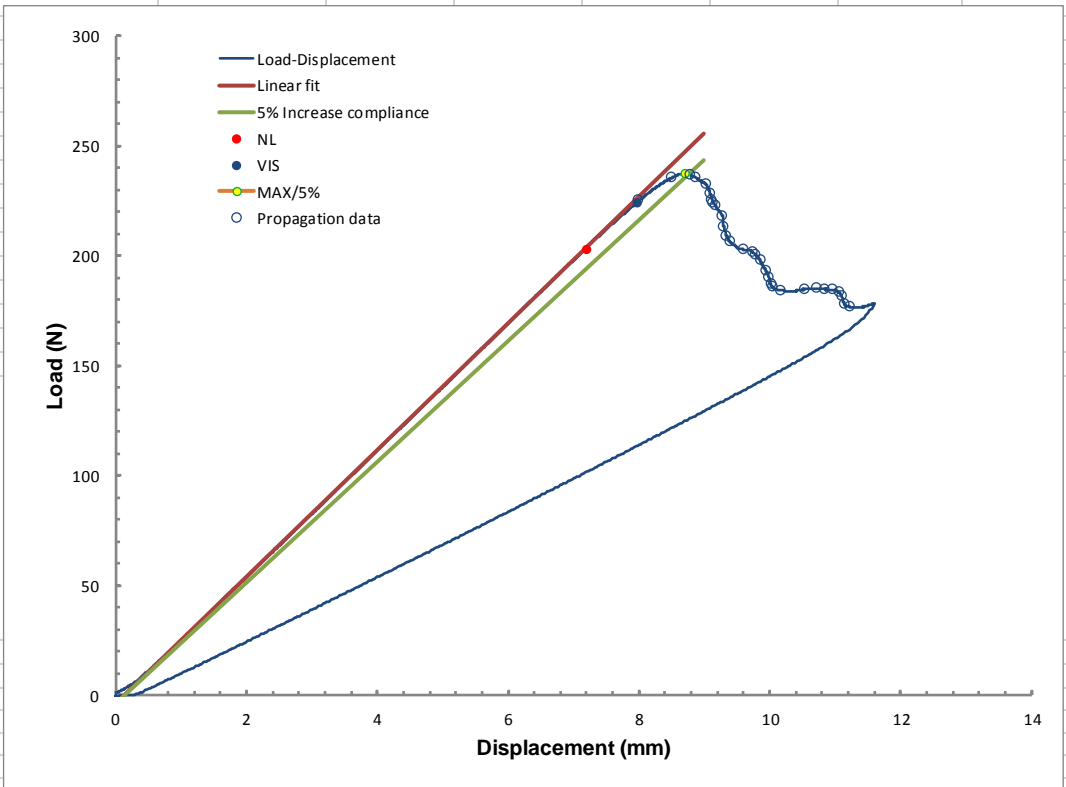
[illegible]

Results report		External code: A12003					
		Internal code: 15-0525					
ISO15114:2014		Page 1 of 3					
Data reduction sheet created by JCO		Validated by JCO					
Date: 4/11/2011							
SPECIMEN DIMENSIONS							
Specimen:	A12003	Date:	23/03/2015				
Technician:	MPE						
Width (mm)							
W1	25,16						
W2	25,16						
W3	25,16						
Thickness 2h (mm)							
T1	4,491						
T2	4,524	Specimen length: (mm)	L1	249,80	L2	249,80	
T3	4,530	Average width b (mm):	25,16	mm	Width variat.	0,00	
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average thickness h(mm):	2,258	mm	Thick. variat.	0,039	
	PEUDEREI/02	Average length L(mm):	249,8	mm	Length variat.	0,00	
PRECRACK TEST							
Technician	MPE	Date:	25/03/2015	Mode:	Mode II	File:	-
CRACK LENGTHS							
$\bar{a}_{insert1}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert2}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert}$ (mm):		$\Delta \bar{a}_{insert}$ (mm):	#VALOR!
$\bar{a}_{precrack1}$ (mm):	65,1	$\bar{a}_{precrack2}$ (mm):	65,6	$\bar{a}_{precrack}$ (mm):	65,3	$\Delta \bar{a}_{precrack}$ (mm):	0,4
$a_{01}$ (mm):	65,1	$a_{02}$ (mm):	65,6	$a_0$ (mm):	65,3	$\Delta a_0$ (mm):	0,4
$\bar{a}_{final1}$ (mm):	96,6	$\bar{a}_{final2}$ (mm):	95,8	$\bar{a}_{final}$ (mm):	96,2	$\Delta \bar{a}_{final}$ (mm):	0,8
Technician	MPE	Date:	26/03/2015	Equipment used:	PEUDEREI/01		
LOAD INTRODUCTION FIXTURE							
Fixture	End Block	$l_1$ (mm):	2,00	$l_2$ (mm):	4,26		
Free Length dimension, L (mm):	99,7						
TEST SETUP							
Laboratory:	AMADE	Date:	26/03/2015	Technician:	MPE		
Load. cross-head rate (mm/min):	1,0	Unload cross-head rate (mm/min):	10,0	Hr lab. (%):	45%		
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-	Chamber	None
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm						
Test machine:	BIONIX1		Load Cell/Range:	5KN/10%			
FLEXURAL MODULUS AND CLAMP CORRECTION FROM CALIBRATION							
Calibration data file:	A12002_CAL_ISO15114		$E_1$ (GPa):	120,9	$\Delta_{clamp}$ (mm):	14,2	
TEST RESULTS							
Technician	MPE	Date:	26/03/2015	File:	A12003		
LOAD - DISPLACEMENT CURVE							
FAILURE MODE		REMARKS					

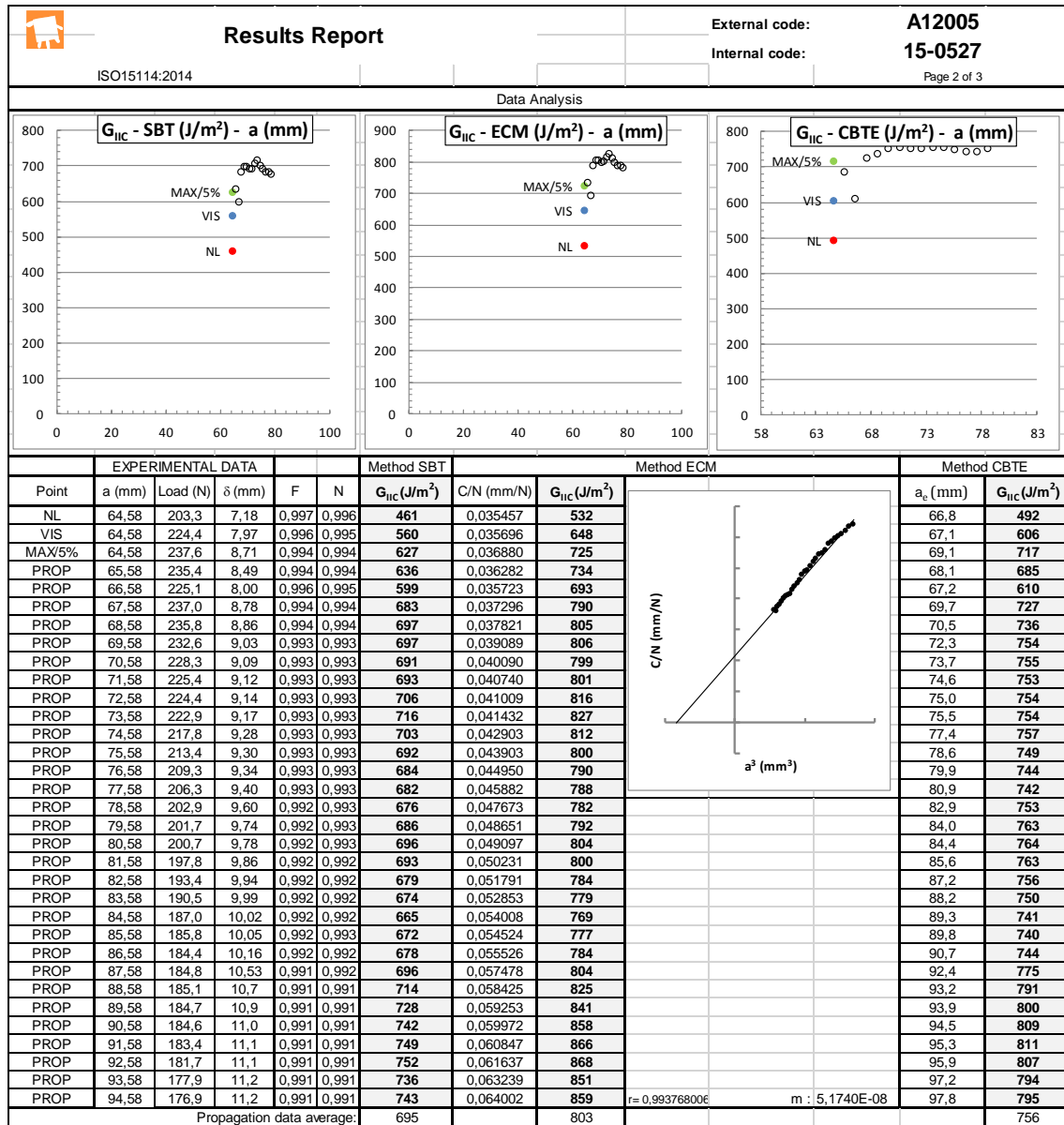


Results report		External code: A12004					
		Internal code: 15-0526					
ISO15114:2014		Page 1 of 3					
Data reduction sheet created by JCO		Validated by JCO					
Date: 4/11/2011							
<b>SPECIMEN DIMENSIONS</b>							
Specimen:	A12004	Date:	23/03/2015				
Technician:	MPE						
Width (mm)							
W1	25,12						
W2	25,12						
W3	25,12						
Thickness 2h (mm)							
T1	4,491						
T2	4,495	Specimen length: (mm)	L1	249,80	L2	249,80	
T3	4,484	Average width b (mm):	25,12	mm	Width variat.	0,00	
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average thickness h(mm):	2,245	mm	Thick. variat.	0,011	
	PEUDEREI/02	Average length L(mm):	249,8	mm	Length variat.	0,00	
<b>PRECRACK TEST</b>							
Technician	MPE	Date:	25/03/2015	Mode:	Mode II	File:	-
<b>CRACK LENGTHS</b>							
$\bar{a}_{insert1}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert2}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert}$ (mm):		$\Delta \bar{a}_{insert}$ (mm):	#VALOR!
$\bar{a}_{precrack1}$ (mm):	65,2	$\bar{a}_{precrack2}$ (mm):	65,1	$\bar{a}_{precrack}$ (mm):	65,2	$\Delta \bar{a}_{precrack}$ (mm):	0,1
$a_{01}$ (mm):	65,2	$a_{02}$ (mm):	65,1	$a_0$ (mm):	65,2	$\Delta a_0$ (mm):	0,1
$\bar{a}_{final1}$ (mm):	96,6	$\bar{a}_{final2}$ (mm):	95,8	$\bar{a}_{final}$ (mm):	96,2	$\Delta \bar{a}_{final}$ (mm):	0,8
Technician	MPE	Date:	26/03/2015	Equipment used:	PEUDEREI/01		
<b>LOAD INTRODUCTION FIXTURE</b>							
Fixture	End Block	$l_1$ (mm):	2,00	$l_2$ (mm):	4,25		
Free Length dimension, L (mm):	99,9						
<b>TEST SETUP</b>							
Laboratory:	AMADE	Date:	26/03/2015	Technician:	MPE		
Load. cross-head rate (mm/min):	1,0	Unload cross-head rate (mm/min):	10,0	Hr lab. (%):	45%		
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-	Chamber	None
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm						
Test machine:	BIONIX1	Load Cell/Range:	5KN/10%				
<b>FLEXURAL MODULUS AND CLAMP CORRECTION FROM CALIBRATION</b>							
Calibration data file:	A12002_CAL_ISO15114	$E_1$ (GPa):	120,9	$\Delta_{clamp}$ (mm):	14,2		
<b>TEST RESULTS</b>							
Technician	MPE	Date:	26/03/2015	File:	A12004		
<b>LOAD - DISPLACEMENT CURVE</b>							
<b>FAILURE MODE</b>		<b>REMARKS</b>					



Results report		External code: A12005	
		Internal code: 15-0527	
ISO15114:2014		Page 1 of 3	
Data reduction sheet created by JCO		Validated by JCO	
Date: 4/11/2011			
SPECIMEN DIMENSIONS			
Specimen:	A12005	Date:	23/03/2015
Technician:	MPE		
Width (mm)			
W1	25,05		
W2	25,05		
W3	25,05		
Thickness 2h (mm)			
T1	4,492		
T2	4,431		
T3	4,446		
Specimen length: (mm)	L1	249,79	L2
Average width b (mm):	25,05	mm	Width variat.
Average thickness h(mm):	2,228	mm	Thick. variat.
Average length L(mm):	249,8	mm	Length variat.
Measurements with:	MICROMETRE/02		
	PEUDEREI/02		
PRECRACK TEST			
Technician	MPE	Date:	25/03/2015
Mode:	Mode II	File:	-
CRACK LENGTHS			
$\bar{a}_{insert1}$ (mm):	-	$\bar{a}_{insert2}$ (mm):	-
$\bar{a}_{precrack1}$ (mm):	64,9	$\bar{a}_{precrack2}$ (mm):	64,3
$a_{01}$ (mm):	64,9	$a_{02}$ (mm):	64,3
$\bar{a}_{final1}$ (mm):	97,1	$\bar{a}_{final2}$ (mm):	97,1
$\Delta \bar{a}_{insert}$ (mm):		$\Delta \bar{a}_{precrack}$ (mm):	0,7
$\Delta a_0$ (mm):	0,7	$\Delta \bar{a}_{final}$ (mm):	0,0
Technician	MPE	Date:	26/03/2015
Equipment used:	PEUDEREI/01		
LOAD INTRODUCTION FIXTURE			
Fixture	End Block	$l_1$ (mm):	2,00
		$l_2$ (mm):	4,23
Free Length dimension, L (mm):	99,9		
TEST SETUP			
Laboratory:	AMADE	Date:	26/03/2015
Load. cross-head rate (mm/min):	1,0	Unload cross-head rate (mm/min):	10,0
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm		
Test machine:	BIONIX1	Load Cell/Range:	5KN/10%
FLEXURAL MODULUS AND CLAMP CORRECTION FROM CALIBRATION			
Calibration data file:	A12002_CAL_ISO15114	$E_1$ (GPa):	120,9
$\Delta_{clamp}$ (mm):	14,2		
TEST RESULTS			
Technician	MPE	Date:	26/03/2015
File:	A12005		
LOAD - DISPLACEMENT CURVE			
			
FAILURE MODE		REMARKS	





## ANNEX H: RESULTATS DELS ASSAJOS 4ENF

A continuació es reproduïen els resultats dels assajos 4ENF en mode II.

Results report		External code: A12006		Internal code: 15-2666	
Page 1 of 2					
SPECIMEN DIMENSIONS					
Specimen:	A12006	Date:	12/04/2016	Technician:	PNB
Width (mm)					
W1	25,25				
W2	25,21				
W3	25,24				
Thickness 2h (mm)					
T1	4,495	Specimen length: (mm)		L1	250,00
T2	4,520			L2	250,00
T3	4,517	Average width b (mm):		25,23	mm
Measurements with: MICROMETRE/02		Average thickness h (mm):		2,255	mm
PEUDERE/02		Average length L (mm):		250,0	mm
		Width variat.		0,04	
		Thick. variat.		0,025	
		Length variat.		0,00	
PRECRACK TEST					
Technician	PNB / MPE	Date:	15/04/2016	Mode:	Mode I
CRACK LENGTHS					
L <sub>insert1</sub> (mm):	61,6	L <sub>insert2</sub> (mm):	62,4	L <sub>insert</sub> (mm):	62,0
L <sub>precrack1</sub> (mm):	67,7	L <sub>precrack2</sub> (mm):	68,3	L <sub>precrack</sub> (mm):	68,0
a <sub>01</sub> (mm):	35,0	a <sub>02</sub> (mm):	35,0	a <sub>0</sub> (mm):	35,0
L <sub>final1</sub> (mm):	119,3	L <sub>final2</sub> (mm):	118,1	L <sub>final</sub> (mm):	118,7
Technician		PNB	Date:	10/05/2016	Equipment used:
					PEUDERE/02
TEST SETUP					
Laboratory:	AMADE	Date:	09/05/2016	Technician:	PNB/MPE
Load. cross-head rate (mm/min):	0,25	Unload cross-head rate (mm/min):	5,0	Hr lab. (%):	50%
Lab. Temp. (°):	24,4	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-
Magnifying optical system:		Canon 550D + Macro EF100 mm			
Test machine:		INSIGHT	Load Cell/Range:	10KN/100%	
TEST RESULTS					
Technician	PNB/MPE	Date:	09/05/2016	File:	15-2666
LOAD - DISPLACEMENT CURVE					
FAILURE MODE		REMARKS			
		Ha tocat un inclinòmetre durant l'assaig.			



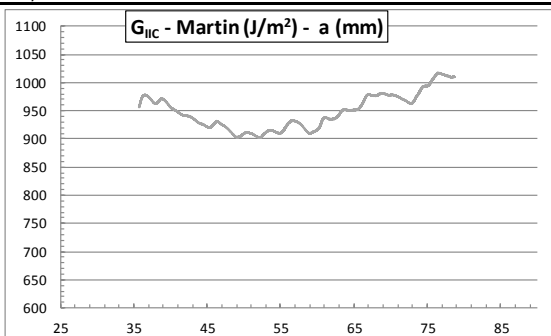
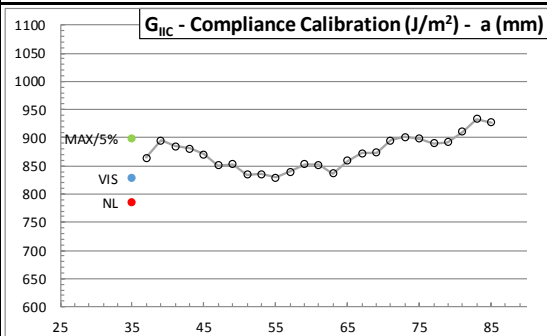
## Results Report

External code: **A12006**


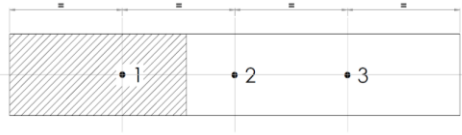
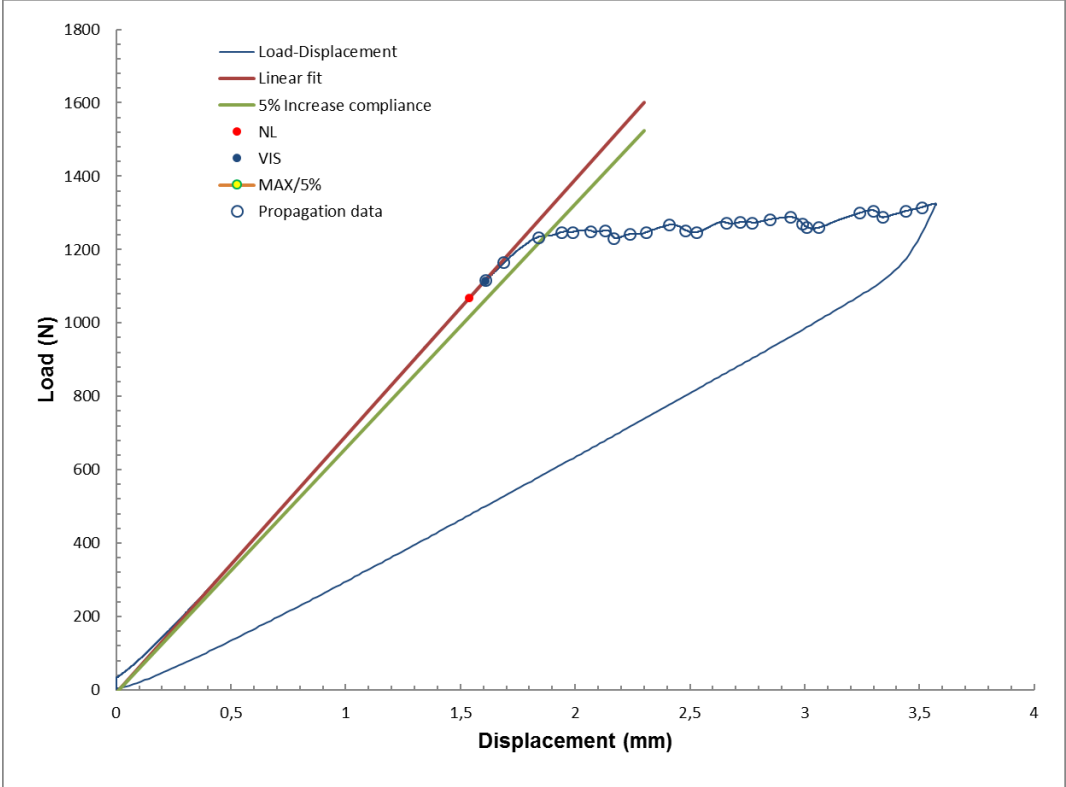
Internal code: 15-2666


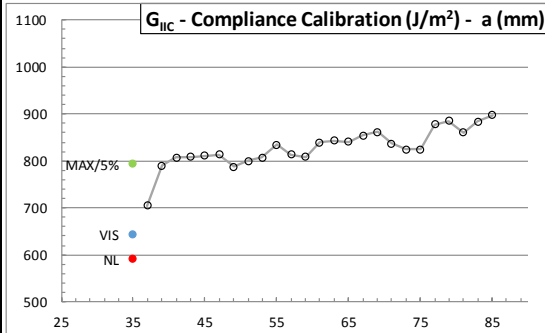
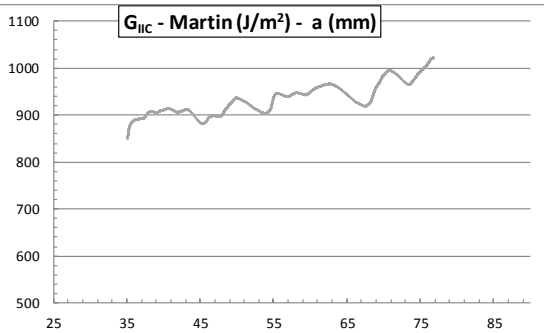
Page 2 of 2

## Data Analysis



	EXPERIMENTAL DATA				Method CC		Martin Method	
Point	a (mm)	Load (N)	δ (mm)	C (mm/N)	G <sub>IIC</sub> (J/m <sup>2</sup> )			
NL	35	1218,0	1,73	0,00142	787	a <sub>0</sub>	35,00 mm	
VIS	35	1249,8	1,83	0,00146	828	b	25,23 mm	
MAX/5%	35	1301,8	1,91	0,00147	898	2h	4,51 mm	
PROP	37	1276,6	1,83	0,00144	864	h	2,26 mm	
PROP	39	1299,4	1,92	0,00148	895	L	60,00 mm	
PROP	41	1291,8	1,94	0,00151	885	E	120000 N/mm2	
PROP	43	1288,8	2,01	0,00156	881	l	192,98 mm4	
PROP	45	1281,7	2,04	0,00160	871	S <sub>L</sub>	30,00 mm	
PROP	47	1266,6	2,14	0,00169	851	C <sub>0</sub>	1,94E-04	
PROP	49	1268,7	2,21	0,00175	853	C <sub>1</sub>	2,91E-05	
PROP	51	1254,8	2,27	0,00181	835			
PROP	53	1255,4	2,33	0,00186	836			
PROP	55	1250,6	2,39	0,00191	829			
PROP	57	1258,3	2,48	0,00197	839			
PROP	59	1268,4	2,58	0,00204	853			
PROP	61	1268,0	2,63	0,00208	852			
PROP	63	1256,3	2,67	0,00213	837			
PROP	65	1272,7	2,76	0,00217	859			
PROP	67	1283,0	2,88	0,00225	873			
PROP	69	1283,8	2,94	0,00229	874			
PROP	71	1299,1	3,04	0,00234	895			
PROP	73	1303,6	3,13	0,00240	901			
PROP	75	1301,5	3,19	0,00245	898			
PROP	77	1295,6	3,23	0,00250	890			
PROP	79	1297,0	3,29	0,00254	892			
PROP	81	1310,4	3,36	0,00257	910			
PROP	83	1326,7	3,5	0,00264	933			
PROP	85	1322,3	3,6	0,00269	927			
PROP								
PROP								
PROP								
PROP								
PROP								
Propagation data average:					873	Propagation data average: 935		

 <b>Results report</b>		External code: <b>A12007</b>		Internal code: <b>15-2667</b>	
Page 1 of 2					
<b>SPECIMEN DIMENSIONS</b>					
Specimen:	A12007	Date:	12/04/2016	Technician:	PNB
Width (mm)					
W1	25,03				
W2	24,92				
W3	25,07				
Thickness 2h (mm)					
T1	4,524	Specimen length: (mm)		L1	250,00
T2	4,532	Average width b (mm):		25,01	mm
T3	4,525	Average thickness h(mm):		2,264	mm
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average length L(mm):		250,0	mm
	PEUDEREI/02				
<b>PRECRACK TEST</b>					
Technician	PNB / MPE	Date:	15/04/2016	Mode:	Mode I
<b>CRACK LENGTHS</b>					
L <sub>insert1</sub> (mm):	62,3	L <sub>insert2</sub> (mm):	60,5	L <sub>insert</sub> (mm):	61,4
L <sub>precrack1</sub> (mm):	67,4	L <sub>precrack2</sub> (mm):	67,5	L <sub>precrack</sub> (mm):	67,4
a <sub>01</sub> (mm):	35,0	a <sub>02</sub> (mm):	35,0	a <sub>0</sub> (mm):	35,0
L <sub>final1</sub> (mm):	117,7	L <sub>final2</sub> (mm):	117,4	L <sub>final</sub> (mm):	117,6
Technician	PNB	Date:	09/05/2016	Equipment used:	PEUDEREI/02
<b>TEST SETUP</b>					
Laboratory:	AMADE	Date:	09/05/2016	Technician:	PNB/MPE
Load. cross-head rate (mm/min):	0,25	Unload cross-head rate (mm/min):	5,0	Hr lab. (%):	50%
Lab. Temp. (°):	24,4	Test Temp (°):	RT	Max. Dev. T:	-
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm				
Test machine:	INSIGHT	Load Cell/Range:	10KN/100%		
<b>TEST RESULTS</b>					
Technician	PNB/MPE	Date:	09/05/2016	File:	15-2667
<b>LOAD - DISPLACEMENT CURVE</b>					
					
<b>FAILURE MODE</b>			<b>REMARKS</b>		

							
Results Report							
External code:				A12007			
Internal code:				15-2667			
Page 2 of 2							
Data Analysis							
							
	EXPERIMENTAL DATA				Method SBT		
Point	a (mm)	Load (N)	δ (mm)	C (mm/N)	G <sub>IIC</sub> (J/m <sup>2</sup> )		
NL	35	1068,0	1,54	0,00144	592		
VIS	35	1113,9	1,61	0,00145	644		
MAX/5%	35	1237,3	1,87	0,00151	794		
PROP	37	1165,9	1,69	0,00145	705		
PROP	39	1234,5	1,84	0,00149	790		
PROP	41	1248,0	1,94	0,00155	808		
PROP	43	1248,5	1,99	0,00159	808		
PROP	45	1250,5	2,07	0,00165	811		
PROP	47	1252,1	2,13	0,00170	813		
PROP	49	1231,9	2,17	0,00176	787		
PROP	51	1242,3	2,24	0,00180	800		
PROP	53	1247,7	2,31	0,00185	807		
PROP	55	1268,1	2,41	0,00190	834		
PROP	57	1252,4	2,48	0,00198	814		
PROP	59	1248,5	2,53	0,00202	808		
PROP	61	1272,4	2,66	0,00209	840		
PROP	63	1275,1	2,72	0,00213	843		
PROP	65	1273,5	2,77	0,00217	841		
PROP	67	1283,1	2,85	0,00222	854		
PROP	69	1288,8	2,94	0,00228	861		
PROP	71	1270,1	2,99	0,00235	837		
PROP	73	1260,9	3,01	0,00239	825		
PROP	75	1260,7	3,06	0,00243	824		
PROP	77	1301,1	3,24	0,00249	878		
PROP	79	1306,4	3,30	0,00252	885		
PROP	81	1288,2	3,34	0,00259	861		
PROP	83	1305,2	3,4	0,00263	884		
PROP	85	1315,6	3,5	0,00267	898		
PROP							
PROP							
PROP							
PROP							
PROP							
Propagation data average:				829			
Martin Method							
a <sub>0</sub>	35,00 mm						
b	25,01 mm						
2h	4,53 mm						
h	2,26 mm						
L	60,00 mm						
E	120000 N/mm2						
I	193,33 mm4						
S <sub>L</sub>	30,00 mm						
C <sub>0</sub>	1,94E-04						
C <sub>1</sub>	2,91E-05						
					G <sub>IIC</sub> (J/m <sup>2</sup> )		
Propagation data average:					930		

Results report		External code: A12008		Internal code: 15-2668	
Page 1 of 2					
SPECIMEN DIMENSIONS					
Specimen:	A12008	Date:	12/04/2016	Technician:	PNB
Width (mm)					
W1	25,15				
W2	25,14				
W3	25,16				
Thickness 2h (mm)					
T1	4,514				
T2	4,467				
T3	4,496				
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average width b (mm): 25,15 mm		Width variat. 0,02	
	PEUDEREI/02	Average thickness h(mm): 2,246 mm		Thick. variat. 0,047	
		Average length L(mm): 250,0 mm		Length variat. 0,00	
PRECRACK TEST					
Technician	PNB / MPE	Date:	15/04/2016	Mode:	Mode I
CRACK LENGTHS					
L <sub>insert1</sub> (mm):	62,5	L <sub>insert2</sub> (mm):	62,4	L <sub>insert</sub> (mm):	62,5
L <sub>precrack1</sub> (mm):	67,7	L <sub>precrack2</sub> (mm):	69,1	L <sub>precrack</sub> (mm):	68,4
a <sub>01</sub> (mm):	35,0	a <sub>02</sub> (mm):	35,0	a <sub>0</sub> (mm):	35,0
L <sub>final1</sub> (mm):	118,8	L <sub>final2</sub> (mm):	117,8	L <sub>final</sub> (mm):	118,3
Technician	PNB	Date:	10/05/2016	Equipment used:	PEUDEREI/02
TEST SETUP					
Laboratory:	AMADE	Date:	10/05/2016	Technician:	PNB/MPE
Load. cross-head rate (mm/min):	0,25	Unload cross-head rate (mm/min):	5,0	Hr lab. (%):	50%
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm				
Test machine:	INSIGHT	Load Cell/Range:	10KN/100%		
TEST RESULTS					
Technician	PNB/MPE	Date:	09/05/2016	File:	15-2668
LOAD - DISPLACEMENT CURVE					
FAILURE MODE			REMARKS		



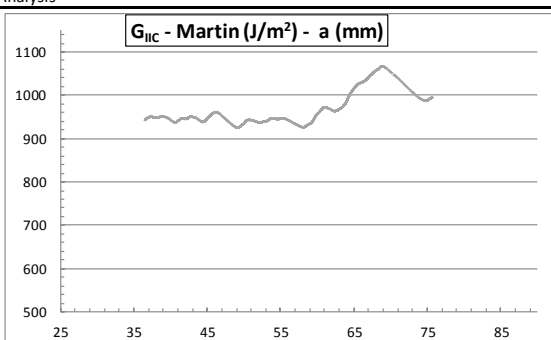
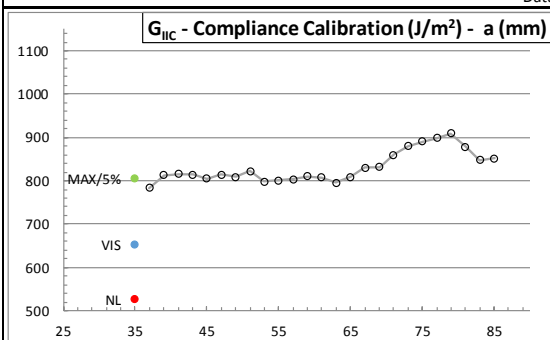
## Results Report

External code: **A12008**


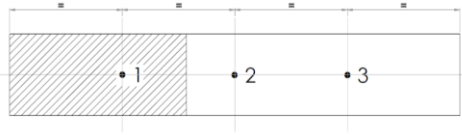
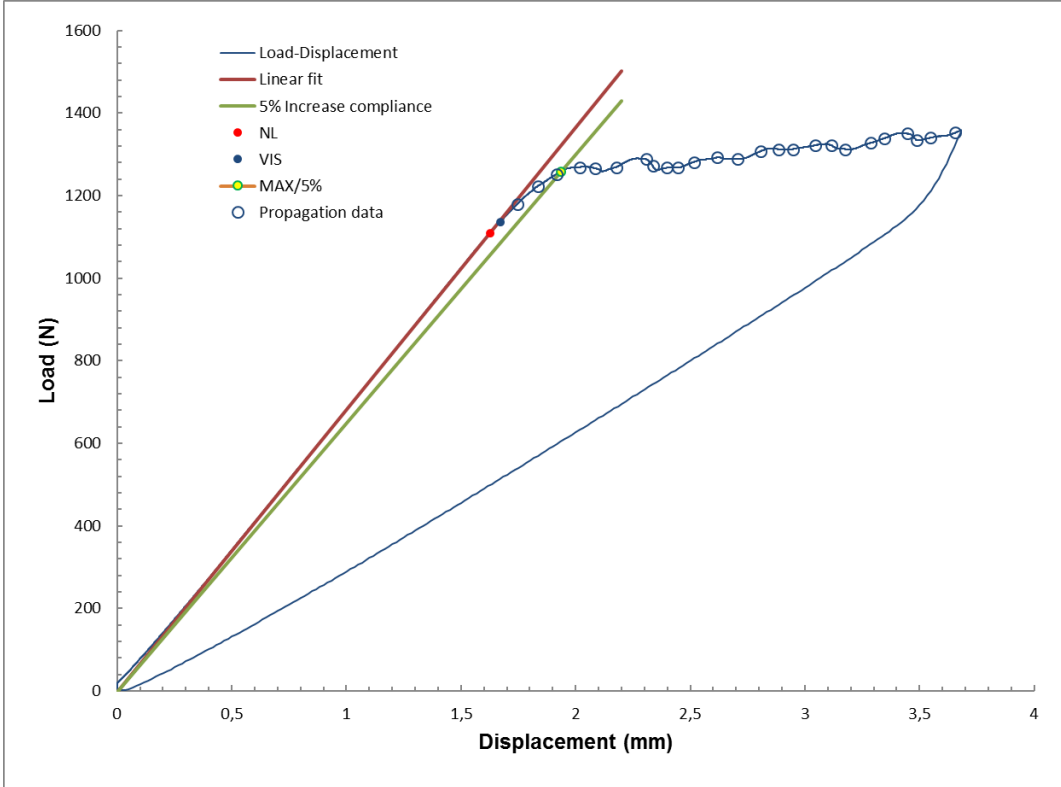
Internal code: **15-2668**

Page 2 of 2

## Data Analysis



	EXPERIMENTAL DATA				Method CC	Martin Method	
Point	a (mm)	Load (N)	$\delta$ (mm)	C (mm/N)	$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )		
NL	35	1022,0	1,40	0,00137	527	$a_0$	35,00 mm
VIS	35	1138,2	1,57	0,00138	653	$b$	25,15 mm
MAX/5%	35	1264,4	1,82	0,00144	806	$2h$	4,49 mm
PROP	37	1246,0	1,76	0,00141	783	$h$	2,25 mm
PROP	39	1270,0	1,85	0,00145	813	$L$	60,00 mm
PROP	41	1271,3	1,87	0,00147	815	$E$	120000 N/mm2
PROP	43	1270,6	1,94	0,00152	814	$I$	190,01 mm4
PROP	45	1263,2	1,97	0,00156	805	$S_L$	30,00 mm
PROP	47	1271,1	2,07	0,00163	815	$C_0$	1,97E-04
PROP	49	1266,1	2,14	0,00169	808	$C_1$	2,96E-05
PROP	51	1277,2	2,20	0,00172	823		
PROP	53	1258,5	2,26	0,00179	799		
PROP	55	1260,3	2,32	0,00184	801		
PROP	57	1262,4	2,41	0,00191	804		
PROP	59	1267,6	2,51	0,00198	810		
PROP	61	1265,9	2,56	0,00202	808		
PROP	63	1256,2	2,60	0,00207	796		
PROP	65	1266,4	2,69	0,00212	809		
PROP	67	1283,1	2,81	0,00219	830		
PROP	69	1283,9	2,87	0,00223	831		
PROP	71	1305,5	2,97	0,00227	859		
PROP	73	1321,2	3,06	0,00231	880		
PROP	75	1328,6	3,12	0,00235	890		
PROP	77	1334,7	3,16	0,00237	898		
PROP	79	1343,2	3,22	0,00240	910		
PROP	81	1320,3	3,29	0,00249	879		
PROP	83	1296,1	3,3	0,00257	847		
PROP	85	1299,3	3,4	0,00260	851		
PROP							
PROP							
PROP							
PROP							
PROP							
Propagation data average:					831	Propagation data average: 971	

 <b>Results report</b>		External code: <b>A12009</b>	
		Internal code: <b>15-2669</b>	
Page 1 of 2			
<b>SPECIMEN DIMENSIONS</b>			
Specimen:	A12009	Date:	12/04/2016
Width (mm)		Technician: PNB	
W1	25,10		
W2	25,15		
W3	25,16		
Thickness 2h (mm)			
T1	4,547		
T2	4,526	Specimen length: (mm)	L1 250,00
T3	4,534	Average width b (mm):	25,14 mm
Measurements with:	MICROMETRE/02	Average thickness h(mm):	2,268 mm
	PEUDEREI/02	Average length L(mm):	250,0 mm
<b>PRECRACK TEST</b>			
Technician	PNB / MPE	Date:	15/04/2016
		Mode:	Mode I
		File:	-
<b>CRACK LENGTHS</b>			
L <sub>insert1</sub> (mm):	63,1	L <sub>insert2</sub> (mm):	62,3
L <sub>precrack1</sub> (mm):	68,6	L <sub>precrack2</sub> (mm):	69,2
a <sub>01</sub> (mm):	35,0	a <sub>02</sub> (mm):	35,0
L <sub>final1</sub> (mm):	119,4	L <sub>final2</sub> (mm):	118,0
Technician	PNB	Date:	10/05/2016
		Equipment used:	PEUDEREI/02
<b>TEST SETUP</b>			
Laboratory:	AMADE	Date:	10/05/2016
Load. cross-head rate (mm/min):	0,25	Unload cross-head rate (mm/min):	5,0
Lab. Temp. (°):	24,3	Test Temp (°):	RT
Magnifying optical system:		Max. Desv. T:	-
		Chamber	None
Test machine:		INSIGHT	Load Cell/Range:
			10KN/100%
<b>TEST RESULTS</b>			
Technician	PNB/MPE	Date:	10/05/2016
		File:	15-2669
<b>LOAD - DISPLACEMENT CURVE</b>			
			
<b>FAILURE MODE</b>		<b>REMARKS</b>	





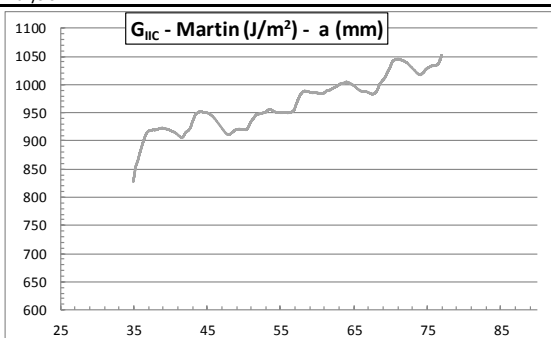
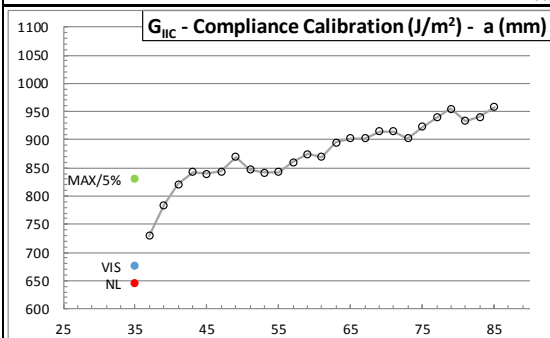
## Results Report

External code: **A12009**

Internal code: **15-2669**

Page 2 of 2

## Data Analysis



	EXPERIMENTAL DATA				Method CC	Martin Method		
Point	a (mm)	Load (N)	$\delta$ (mm)	C (mm/N)	$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )			
NL	35	1109,6	1,63	0,00147	645	$a_0$	35,00 mm	
VIS	35	1135,4	1,67	0,00147	675	$b$	25,14 mm	
MAX/5%	35	1258,7	1,94	0,00154	830	$2h$	4,54 mm	
PROP	37	1179,9	1,75	0,00148	729	$h$	2,27 mm	
PROP	39	1223,4	1,84	0,00150	784	$L$	60,00 mm	
PROP	41	1251,9	1,92	0,00153	821	$E$	120000 N/mm2	
PROP	43	1268,6	2,02	0,00159	843	$I$	195,46 mm4	
PROP	45	1265,9	2,09	0,00165	840	$S_L$	30,00 mm	
PROP	47	1269,0	2,18	0,00171	844	$C_0$	1,92E-04	
PROP	49	1287,9	2,31	0,00179	869	$C_1$	2,88E-05	
PROP	51	1271,5	2,34	0,00184	847			
PROP	53	1267,2	2,40	0,00189	841			
PROP	55	1268,1	2,45	0,00193	842			
PROP	57	1281,2	2,52	0,00196	860			
PROP	59	1292,0	2,62	0,00202	875			
PROP	61	1288,5	2,71	0,00210	870			
PROP	63	1307,3	2,81	0,00215	895			
PROP	65	1312,3	2,89	0,00220	902			
PROP	67	1312,1	2,95	0,00225	902			
PROP	69	1321,7	3,05	0,00230	915			
PROP	71	1321,5	3,12	0,00236	915			
PROP	73	1312,1	3,18	0,00242	902			
PROP	75	1327,3	3,29	0,00248	923			
PROP	77	1339,1	3,35	0,00250	939			
PROP	79	1350,1	3,45	0,00255	955			
PROP	81	1334,8	3,49	0,00261	933			
PROP	83	1339,9	3,5	0,00265	941			
PROP	85	1352,4	3,7	0,00270	958			
PROP								
PROP								
PROP								
PROP								
PROP								
Propagation data average:					878	Propagation data average:		970

Results report		External code: A12010		Internal code: 15-2670	
Page 1 of 2					
SPECIMEN DIMENSIONS					
Specimen:	A12010	Date:	12/04/2016	Technician:	PNB
Width (mm)					
W1	25,13				
W2	25,14				
W3	25,17				
Thickness 2h (mm)					
T1	4,416				
T2	4,429				
T3	4,411				
Measurements with:	MICROMETRE/02	Specimen length: (mm)		L1	250,00
	PEUDEREI/02	Average width b (mm):		25,15	mm
		Average thickness h(mm):		2,209	mm
		Average length L(mm):		250,0	mm
PRECRACK TEST					
Technician	PNB / MPE	Date:	15/04/2016	Mode:	Mode I
CRACK LENGTHS					
L <sub>insert1</sub> (mm):	63,3	L <sub>insert2</sub> (mm):	63,4	L <sub>insert</sub> (mm):	63,4
L <sub>precrack1</sub> (mm):	68,5	L <sub>precrack2</sub> (mm):	70,3	L <sub>precrack</sub> (mm):	69,4
a <sub>01</sub> (mm):	35,0	a <sub>02</sub> (mm):	35,0	a <sub>0</sub> (mm):	35,0
L <sub>final1</sub> (mm):	119,6	L <sub>final2</sub> (mm):	119,1	L <sub>final</sub> (mm):	119,3
Technician	PNB	Date:	10/05/2016	Equipment used:	PEUDEREI/02
TEST SETUP					
Laboratory:	AMADE	Date:	10/05/2016	Technician:	PNB/MPE
Load. cross-head rate (mm/min):	0,25	Unload cross-head rate (mm/min):	5,0	Hr lab. (%):	50%
Lab. Temp. (°):	24	Test Temp (°):	RT	Max. Desv. T:	-
Magnifying optical system:	Canon 550D + Macro EF100 mm				
Test machine:	INSIGHT	Load Cell/Range:	10KN/100%		
TEST RESULTS					
Technician	PNB/MPE	Date:	10/05/2016	File:	15-2670
LOAD - DISPLACEMENT CURVE					
FAILURE MODE		REMARKS			



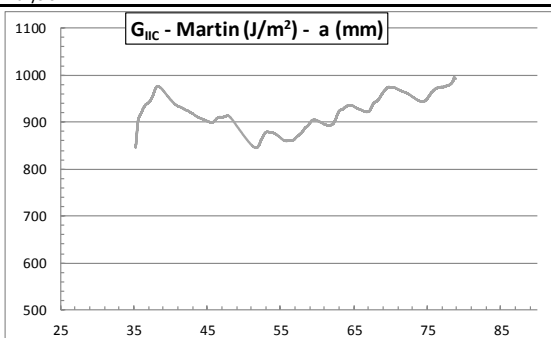
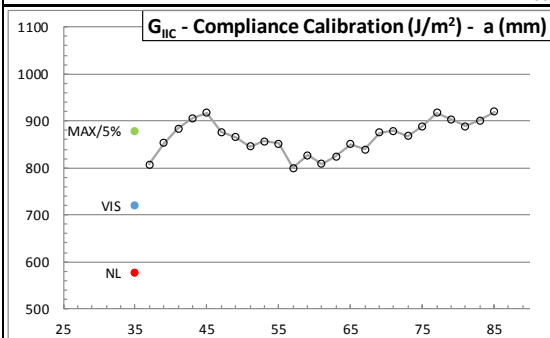
## Results Report

External code: **A12010**

Internal code: 15-2670

Page 2 of 2

## Data Analysis



	EXPERIMENTAL DATA				Method CC		Martin Method			
Point	a (mm)	Load (N)	$\delta$ (mm)	C (mm/N)	$G_{IIC}$ (J/m <sup>2</sup> )					
NL	35	996,8	1,57	0,00157	578		$a_0$	35,00 mm		
VIS	35	1112,8	1,76	0,00158	720		$b$	25,15 mm		
MAX/5%	35	1229,8	2,03	0,00165	880		$2h$	4,42 mm		
PROP	37	1178,2	1,89	0,00160	807		$h$	2,21 mm		
PROP	39	1210,7	1,96	0,00162	852		$L$	60,00 mm		
PROP	41	1233,1	2,05	0,00166	884		$E$	120000 N/mm2		
PROP	43	1248,1	2,11	0,00169	906		$I$	180,79 mm4		
PROP	45	1256,3	2,14	0,00170	918		$S_L$	30,00 mm		
PROP	47	1227,6	2,21	0,00180	876		$C_0$	2,07E-04		
PROP	49	1219,4	2,25	0,00185	865		$C_I$	3,11E-05		
PROP	51	1206,2	2,32	0,00192	846					
PROP	53	1213,6	2,39	0,00197	857					
PROP	55	1210,1	2,44	0,00202	852					
PROP	57	1172,4	2,49	0,00212	799					
PROP	59	1192,3	2,58	0,00216	827					
PROP	61	1179,2	2,65	0,00225	809					
PROP	63	1191,1	2,75	0,00231	825					
PROP	65	1209,6	2,86	0,00236	851					
PROP	67	1201,7	2,91	0,00242	840					
PROP	69	1226,5	3,06	0,00249	875					
PROP	71	1229,8	3,11	0,00253	880					
PROP	73	1221,7	3,15	0,00258	868					
PROP	75	1236,4	3,26	0,00264	889					
PROP	77	1255,6	3,38	0,00269	917					
PROP	79	1246,7	3,45	0,00277	904					
PROP	81	1236,5	3,48	0,00281	889					
PROP	83	1244,7	3,6	0,00286	901					
PROP	85	1257,8	3,7	0,00294	920					
PROP										
PROP										
PROP										
PROP										
PROP										
Propagation data average:					866	Propagation data average:				