Universitat de Girona
Escola Politècnica Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny d'un utillatge per a l'assaig en paral·lel de la tenacitat a la fractura en mode II.

Document: Doc 1. Memòria i annexos

Alumne: Rui Jiang

Tutor: Jordi Renart Canalias
Departament: Enginyeria Mecànica i De la Construcció Industrial
Àrea: Mecànica de Medis Continus i Teoria de Les Estructures

Convocatòria (mes/any): 02/2017

MEMÒRIA I ANNEXOS

ÍNDEX

Memòria

1. Introducció..... 4
1.1. Antecedents..... 4
1.2. Objecte del projecte..... 5
1.3. Abast i especificacions..... 6

2. Descripció de la solució..... 7
2.1. Estat actual de la màquina d'assaig..... 7
2.2. Solució adoptada..... 8

3. Fixacions de l'utillatge..... 8
3.1. Fixacions cèl·lula i guia C-ELS..... 8
3.2. Fixació proveta i grapes..... 9
3.3. Alineament del conjunt..... 10

4. Anàlisi de la funcionalitat de l'utillatge..... 12
4.1. Càlcul de la resistència..... 12
4.2. Càlcul de la fletxa..... 13
4.3. Moment resistent del mecanisme d'abraçadera..... 14

5. Procediment d'assaig..... 15
5.1. Que es vol mesurar? 15
5.2. Provetes..... 15
5.3. Pre-esquerda..... 15
5.4. Calibració del sistema C-ELS..... 16
5.5. Iniciació de l'assaig..... 16
5.6. Informe de l'assaig..... 16

6. Conclusions..... 17

7. Resum del pressupost..... 17

8. Relació de documents..... 18

Annexos

A. Càlculs

A1. Càlcul a resistència..... 20
A1.1. Geometria i seccions d'estudi..... 20
A1.2. Dades i condicions..... 20
A1.3. Càlcul estàtic..... 20
A1.4. Càlcul a fatiga..... 23
A1.5. Conclusions..... 24

A2. Modelització de la fletxa..... 24
A2.1. Geometria, propietats del material i mallat..... 24
A2.2. Condicions de contorn..... 25
A2.3. Resultats de la fletxa..... 26
A2.4. Fletxa braç curt..... 27

A3. Moment de resistència de l'abraçadera..... 27
A3.1. Geometria, propietats del material i mallat..... 27
A3.2. Condicions de contorn..... 28
A3.3. Anàlisi de resultats.....29

B. Procediment d'assaig detallat

B1. Descripció.....31

B2. Objecte i Abast..... 31

B3. Valors que es vol obtenir amb l'assaig.....31

B4. Equipament d'assaig..... 32

B5. Espècimens.....32
B5.1. Recepció dels espècimens.....32
B5.2. Condicionament dels espècimens.....33

B6. Muntatge dels accessoris i ajust de les màquines..... 33

B7. Preparacions necessàries per l'assaig.....35

B8. Realització de la pre-esquerda.....36

B9. Calibració del sistema C-ELS (Clamp calibration) 36

B10. Obtenció de $G_{II\ max}$..... 36

B11. Assaig amb la màquina Bionix..... 37

B12. Tractament de dades..... 39

C. Solucions preliminars

C1. Procés d'optimització de l'utillatge..... 42

C2. Solucions preliminars de la subjecció de la proveta.....43

C3. Solucions preliminars del passador..... 44

1. Introducció

1.1. Antecedents

Una de les línies de recerca del grup de recerca AMADE de la universitat de Girona és l'estudi del comportament a fractura de materials compòsits sotmesos a càrregues cícliques (fatiga). Existeixen diversos mètodes per realitzar assaigs de tenacitat a la fractura, els més utilitzats són el Mode I (DCB, *Double Cantilever Beam*) i el Mode II (ENF, *End Notched Flexure)*, (C-ELS, Calibrated End-Loaded Split). La normativa que defineix els processos i condicions d'aquests assaigs estan establertes a les normes ISO25217 i ISO15114 respectivament

Partint d'un utillatge dissenyat per a l'estudi de la fractura en mode I, es pretén introduir les modificacions de disseny mecànic necessaris per adaptar-la a l'anàlisi de la fractura a fatiga del mode II, aplicant el mètode C-ELS, veure figura 1. En els assaigs a fractura, el paràmetre clau a determinar és l'energia disponibles per la fractura (G), en mode II es defineix com a G_{II}. En assaig estàtics quan G_{II} s'iguala a la tenacitat del material (resistència a la propagació de l'esquerda, G_c) comença la propagació.

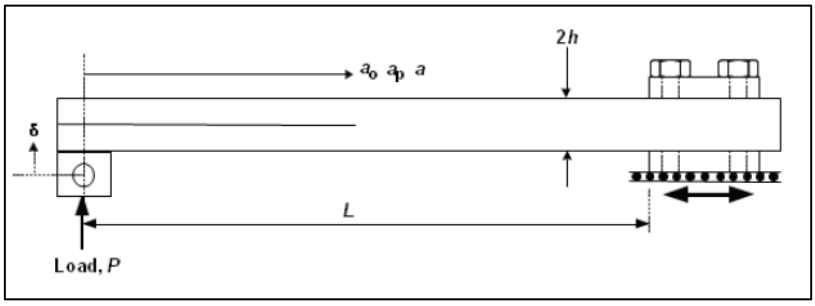
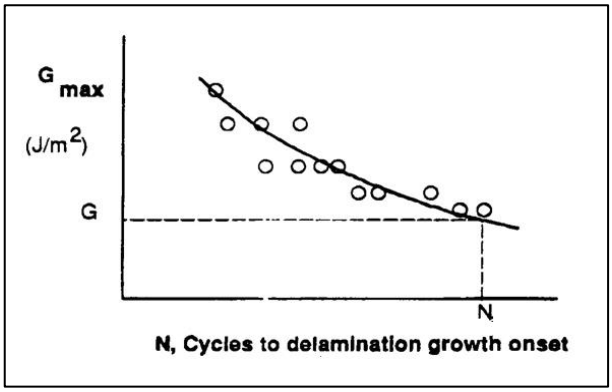
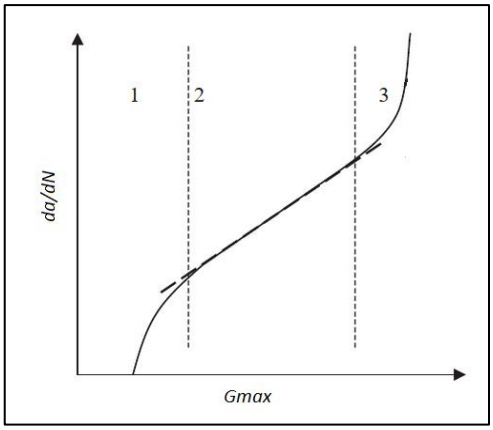


Figura 1. Disposició del muntatge C-ELS per mode II. font extreta de la norma ISO15114.

En els assaigs a fatiga, la determinació de l'energia disponible per a la fractura és igual de rellevant que en els assaigs estàtics, doncs per el cas de fatiga també es farà servir la G_{II} com a paràmetre de mesura. La G_{II} es mesura de dos maneres: mitjançant corbes d'iniciació de dany (onset) i corbes de propagació o creixement d'esquerda.
En el primer cas, es mesura el nombre de cicles necessaris per iniciar la propagació i es representa com una corba Gmax en funció de N, on Gmax és l'energia disponible quan estem a Pmax i δmax, aquest és el punt més alt del cicle.
En el cas de la corba de propagació o creixement d'esquerda es mesura la velocitat de creixement de l'esquerda un cop s'ha iniciat el dany (da/dN, essent a la longitud d'esquerda i N el nombre de cicles) per a un nivell d'energia disponible per a la fractura determinat.





Grafica 1. La gràfica de l'esquerra és una corba Gmax vs N, a la dreta es situa la corba da/dN vs Gmax. La font d'aquestes gràfiques és la *Standard method ASTM D6115.*

Tenint en compte hipòtesis de la mecànica de la fractura lineal i elàstica, l'energia disponible per a la fractura està directament relacionat amb la flexibilitat (o compliança), per tant les corbes d'inici de propagació es poden obtenir a partir de la delaminació de la compliança.
La compliança o flexibilitat, és la inversa de la rigidesa, per tant, es pot definir com el ràtio entre desplaçament i càrrega en tant percent. El motiu de que es faci servir la compliança es degut a que és més simple obtenir dades experimentalment del desplaçament i la força de càrrega. Per a mesurar l'inici del creixement d'esquerda, la variació permesa és d'un 1% a un 5%, Normalment la compliança s'estima assumint el comportament lineal del material adquirint la força màxima al llarg dels cicles de càrrega de l'assaig.

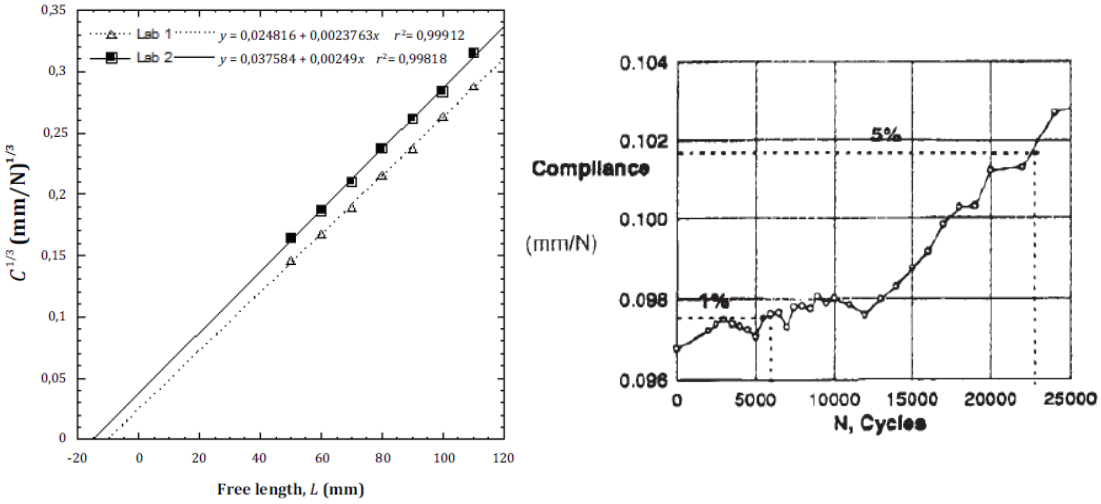


Figura 2. El pendent de la gràfica $C^{1/3}(L)$ de l'esquerra és una dada experimental necessari per el càlcul del mòdul de flexió. A la dreta el comportament de compliança entre el rang [1% - 5%]. Aquestes gràfiques són exemples mostrats per la Norma ISO15114.

El procediment de control del rang de la compliança i presa de dades d'assaig ha de ser individual per cada proveta. El procediment normal requereix aturar l'assaig periòdicament per dur a terme assaigs estàtics per avaluar la compliança de la proveta. La precisió d'aquest mètode depèn de la freqüència de les parades i requereix un nombre elevat de cicles, això fa que la recol·lecció de les dades manualment sigui molt feixuc. El grup de recerca AMADE ha desenvolupat una tècnica de seguiment de la compliança en temps real que evita tenir que fer aquestes parades. Aquesta tècnica podrà ser emprada també en els assaigs multi-fatiga fent un seguiment de la compliança a cada proveta a través de l'evolució de la càrrega que rep de forma individual.

Finalment per trobar la Gmax, a més de la compliaça, també és necessari conèixer la longitud d'esquerda, aquesta dada es pot estimar fent un assaig de calibració prèviament a l'assaig a fatiga.

1.2. Objecte del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar un utillatge/mecanisme per realitzar assaigs a delaminació de materials compòsits sotmesos a fatiga d'assaig en mode II, basat en la norma ISO15114. Al no tenir una normativa estàndard, es dissenyarà un procediment propi d'assaig.

1.3. Abast i especificacions

1.3.1. Abast

El projecte inclou tots els documents necessaris del disseny de l'utillatge per la seva fabricació, i el disseny d'una metodologia d'assaig en mode II.

1.3.2. Especificacions de disseny

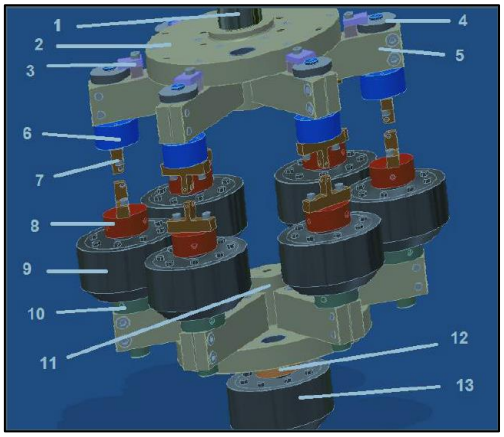
Especificacions	Descripció
El mecanisme ha de ser capaç de muntar-se a la màquina d'assaig	Màquina d'assaig MTS Bionix 858
Llargada de la proveta (L)	150 a 200mm
Gruix de la proveta	3 a 5mm
Càrrega crítica	50N a 500N
Energia de fractura disponible (GII_{max})	50 J/m2 3000 J/m2
Freqüència d'assaig	3 a 5Hz
Temperatura d'assaig	Temperatura ambient
Nombre mínim d'assaigs en paral·lel	4 assaigs
Mesura de càrrega aplicada	Càrrega individual a cada proveta
Condicions de temperatura	Assaig a temperatura ambient
Materials de fabricació	Acer al carboni del tipus C45E
Desplaçament màxim de la proveta	1 a 10 mm
Acabats superficials (en cas que no sigui acer inox)	Niquelat químic, per evitar la corrosió
Factor de seguretat	>1,5
Fletxa màxima a l'eix d'aplicació de la càrrega	0,2 mm

Taula 1. Especificacions de Disseny.

2. Descripció de la solució

2.1. Estat actual de la màquina d'assaig

El grup de recerca AMADE actualment disposa d'un utillatge ja construït per a l'assaig a fatiga en mode I, partint d'aquest projecte ja existent es vol modificar el mecanisme, introduint tots els canvis necessaris per adaptar l'utillatge a l'assaig a fatiga en mode II.

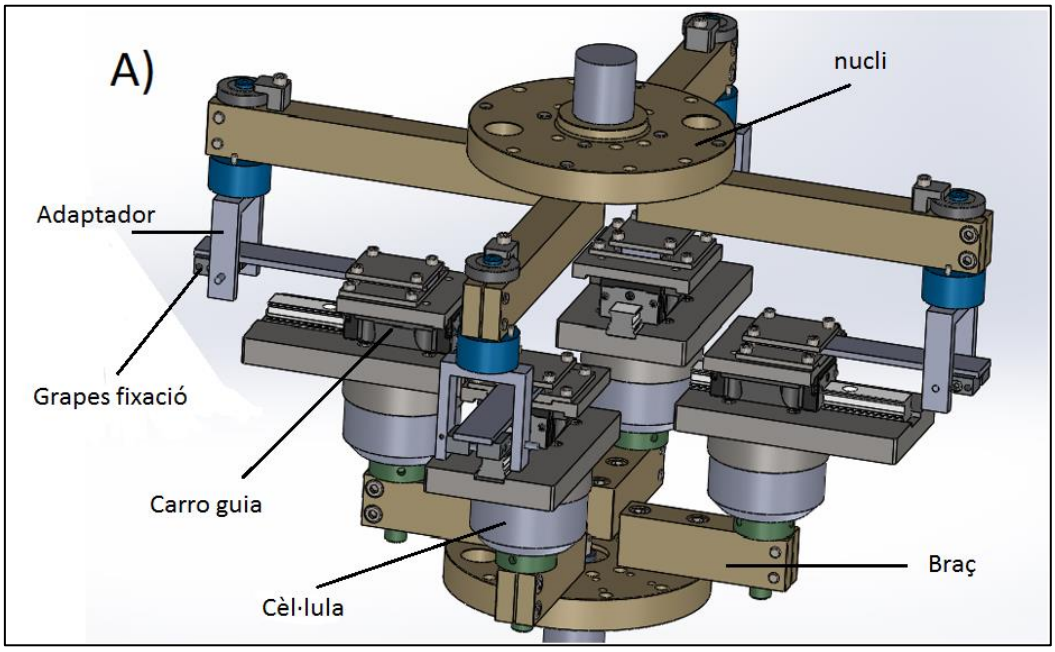


1. Tija màquina d'assaig MTS 858
2. Nucli
3. Topall
4. Femella moletejada
5. Braç
6. Regulador vertical
7. Subjecció
8. Extensor subjecció
9. Cèl·lula de càrrega de 1kN
10. Extensor de la cèl·lula
11. Postís
12. Extensor nucli.
13. Cèl·lula principal de la MTS 858

Imatge 3. Utillatge d'assaig en mode I. Font: TFG de Rubén Pintor Martínez.

2.2. Solució adoptada

Desprès d'analitzar totes les opcions en l'estudi previ. A continuació es presenta la solució final adoptada.



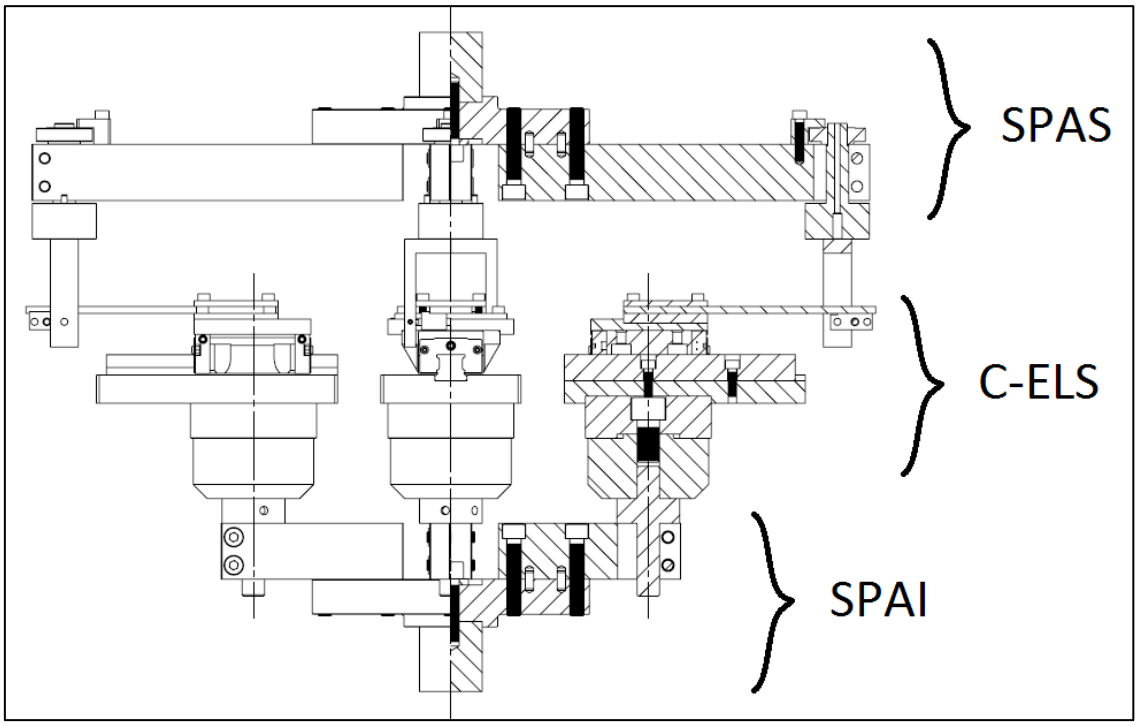
Imatge 4. Utillatge assaig a fatiga en mode II, C-ELS.

La solució adoptada és un utillatge format per tres subconjunts anomenats, subconjunt de posicionament superior (SPAS), subconjunt de posicionament inferior (SPAI) i subconjunt *calibrated end-loaded* Split (C-ELS). Aquest tres subconjunts interactuen entre ells per portar a terme l'assaig a fatiga en mode II.

El SPAI és la part fixa de l'utillatge, fa la funció de bancada i determina la posició de les cèl·lules de càrrega. L'SPAI disposa d'un nucli en forma de disc, En la part central va fixat amb un cargol a la tija de la màquina d'assaig. Els quatre braços fan de posicionament i subjecció de les cèl·lules. Sobre aquestes cèl·lules es muntarà el subconjunt C-ELS.

El C-ELS és la part més important del mecanisme, ja que s'encarrega de la fixació de la proveta, també és el nexe d'unió entre els subconjunts SPAI i SPAS. Per introduir la força de cisallament a la proveta durant l'assaig en el mode II, El mecanisme C-ELS ha de permetre el moviment lliure a l'eix horitzontal, això és possible gràcies a la presència d'un carro guia.

El SPAS és la part mòbil de l'utillatge, per tant, és la part que transmetrà la deformació a la proveta. El nucli de SPAS està unit a la tija de la màquina MTS 858, així que transmet el moviment vertical de la tija a tot el subconjunt. L'adaptador amb forma de forquilla i les grapes de fixació s'encarreguen de que aquest moviment vertical arribi a la proveta.



Imatge 5. Subconjunts de l’utillatge a fatiga en mode II.

3. Fixacions de l’utillatge

3.1 Fixació cèl·lula i guia KUVE25-B

La fixació/posicionament de la cèl·lula es fa mitjançant un extensor que anirà fixat a l’extrem inferior al braç amb un mecanisme d’abraçadera pressionat per dos cargols, a l’extrem superior anirà cargolat a la base de la cèl·lula que disposa d’un forat de mètric M16, veure Figura 6.

El mecanisme C-ELS disposa d’un rodó cilíndric que fa la funció de fixació i posicionament entre la guia i la cèl·lula. El rodó, també anomenat Base suport guia, es fixa a la cèl·lula per un cargol DIN 912 M16x25, veure Figura 6. La base rectangular, que serveix com a carril per on es mourà la guia, es fixa al rodó amb quatre cargols DIN 912 M5x35 (no apareix a la imatge).

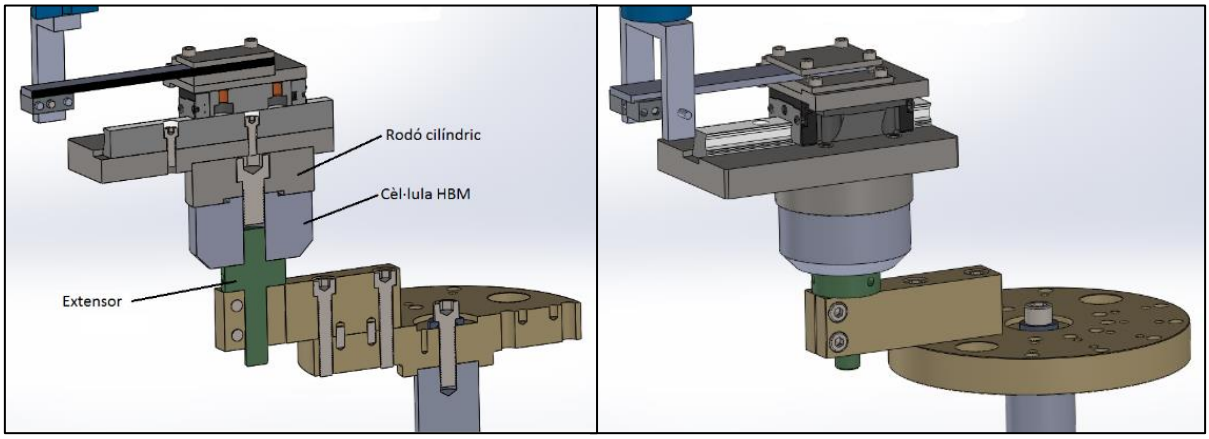


Figura 6. Muntatge de la cèl·lula i guia, d’una de les estacions de treball.

3.2. Fixació proveta i grapes

La fixació de la proveta al C-ELS està definida per tres peces unides amb cargols que son: la base subjecció proveta, V5 kit inf i V5 kit sup. La base de subjecció fa la funció de posicionament, els dos V5 kits fixen la proveta, de forma que el resultat sigui la d'una biga en voladís.

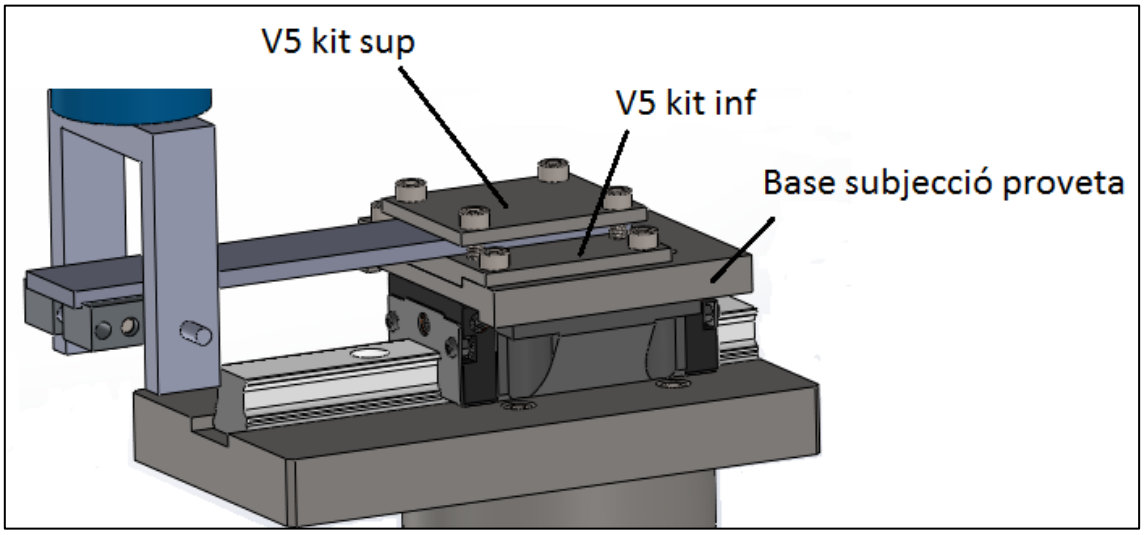


Figura 7. Fixació de la proveta.

La transmissió de la deformació vertical des de el SPAS fins la proveta serà possible gràcies a dos blocs que farà la funció de grapa. Aquest mecanisme consisteix en posar la proveta en mig dels dos blocs, i mitjançant un cargol DIN912 M5x35 es pressiona els blocs contra la part inferior de la proveta, actuant com una grapa mecànica.
El passador s'introdueix dins dels blocs i de l'adaptador i fa la funció d'articulació, és a dir, transmet el moviment entre els dos subconjunt, fent que la força de la màquina arribi a la proveta.

L'adaptador és una forquilla, l'extrem superior d'aquesta forquilla es fixa al braç abraçadera del subconjunt SPAS mitjançant un extensor, la zona d'unió amb l'extensor és una unió cargolada. A l'extrem inferior disposa d'un eix per on s'introdueix el passador. Tenint en compte que aquest utillatge només esta sotmès a reaccions verticals, amb un cargol presoner DIN915 n'hi ha prou per evitar lliscament axial del passador.

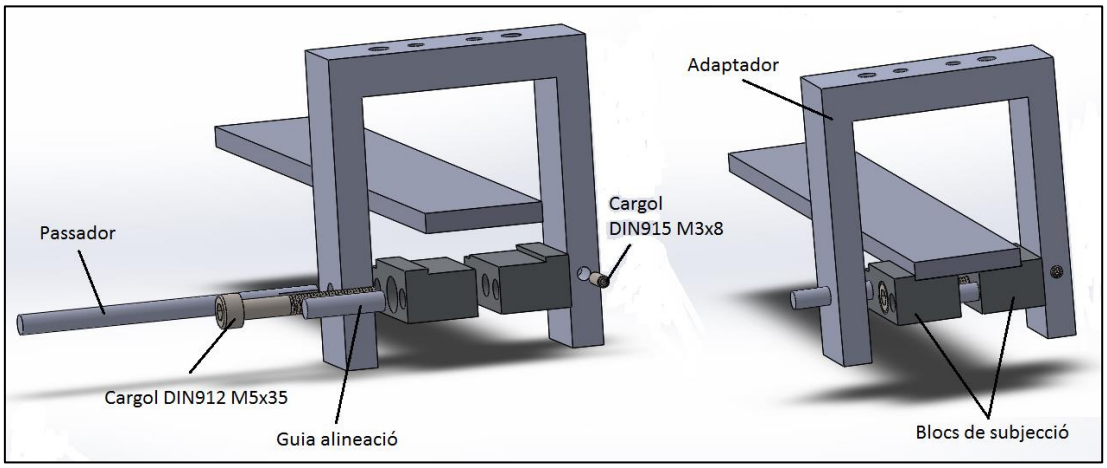


Figura 8. Introducció de la força mitjançant blocs en forma de grapes.

3.3. Alineament del conjunt

A l'hora d'obtenir dades, per tal de reduir els efectes de les variables externes a l'assaig, a més de dissenyar un bon procediment i disposar d'equips de presa de dades adequats, també és necessari reduir els errors de les toleràncies geomètriques de l'utillatge. Principalment assegurar la correcta alineació entre els elements de l'utillatge.

L'alineació de dos elements es realitza mitjançant pins. Els pins son eixos cilíndrics amb una tolerància m6. Tots els elements d'unió on cal tenir en compte una bona alineació disposen de forats per inserir aquests pins, només cal procurar que un dels forats faci interferència (forat amb tolerància K7) amb el pin i l'altre tingui joc mínim (H7).

En primer lloc s'ha d'alinear cada un dels 8 braços. Per posicionar correctament els braços amb les unions cargolades no n'hi ha prou, donat que els forats mètric només estan dissenyats per fer la funció d'unió entre dos elements. Per tant cada braç ha de disposar de pins per assegurar una posició angular correcta, per tal que els braços dels dos subconjunts estiguin alineats.

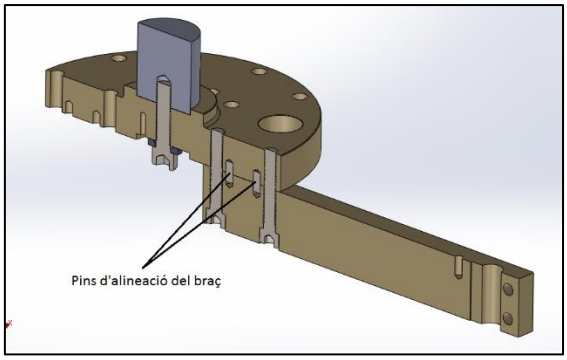


Figura 9. Pins de posicionament del braç.

La posició angular de l'adaptador també ha d'estar correctament orientat. Un extensor serveix de mitja d'unió entre el braç i l'adaptador, el mateix extensor servirà per alinear l'adaptador. La base de contacte de l'extensor amb el braç te dos forats on s'insereix pins de tal forma que només permet un únic posicionament de l'extensor, veure figura 10. Un cop assegurat la posició de l'extensor, en la base inferior d'aquest, a més dels forats mètrics d'unió amb l'adaptador, també disposa de dos forats per col·locar els pins de posicionament de l'adaptador, amb aquest mètode s'assegura l'alineació de l'adaptador.

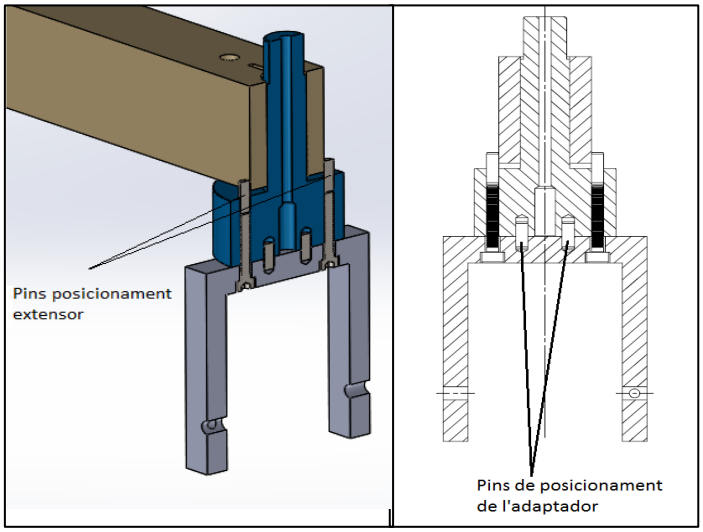


Figura 10. Pins d'alineació de l'extensor i l'adaptador.

Les grapes/blocs de subjecció de la proveta s'alineen entre elles pels extrems mitjançant un pin/guia i el passador, d'aquesta forma s'assegura que els dos blocs siguin totalment paral·lels entre ells, un fet important per transmetre la força a la proveta de forma uniforme.

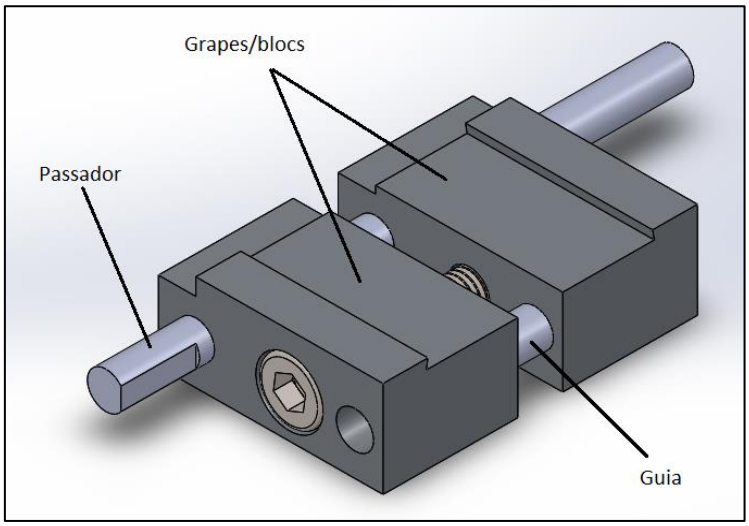


Figura 11. Alineament de les grapes de subjecció.

La fixació de la proveta està explicat a l'apartat 3.2. Fixació proveta i grapes. En aquest cas es presentarà com es farà l'alineació de la proveta respecte el sistema de subjecció C-ELS. Existeix una base externa d'alineament, on es col·locarà els dos kits de fixació i la proveta, veure figura 12. Un cop posicionat servint-se dels laterals d'aquesta base s'alinea la proveta correctament.

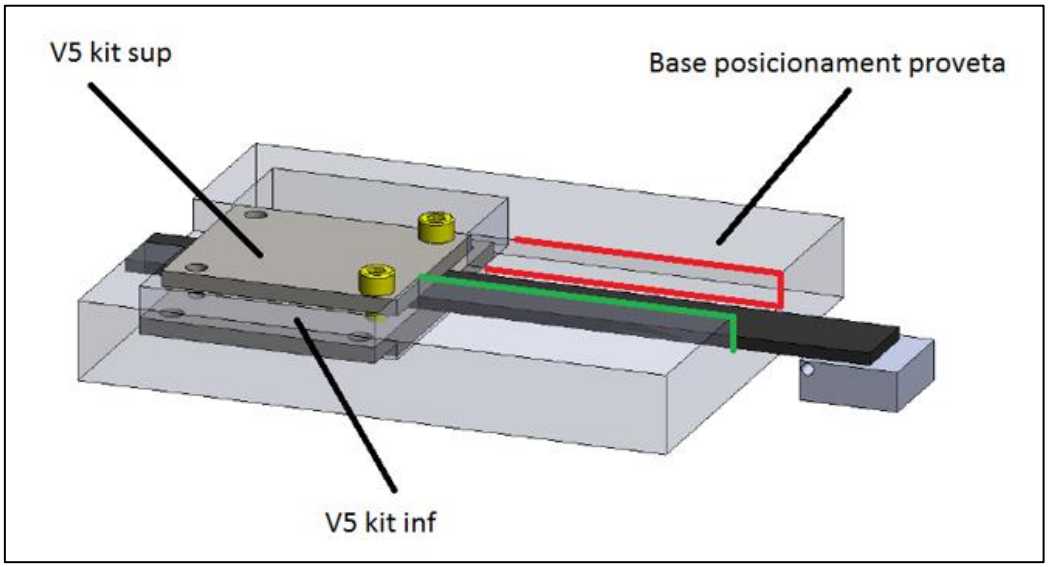


Figura 12. Sistema d'alineació de la proveta.

Finalment queda posicionar la base rectangular de la guia a la cèl·lula. es fa mitjançant un rodó que fa la funció d'extensor entre la base de la guia i la cèl·lula. Tant la base rectangular com el rodó tenen 4 forats simètrics per on s'insereixen els pins, així s'assegura el posicionament desitjat de la base.

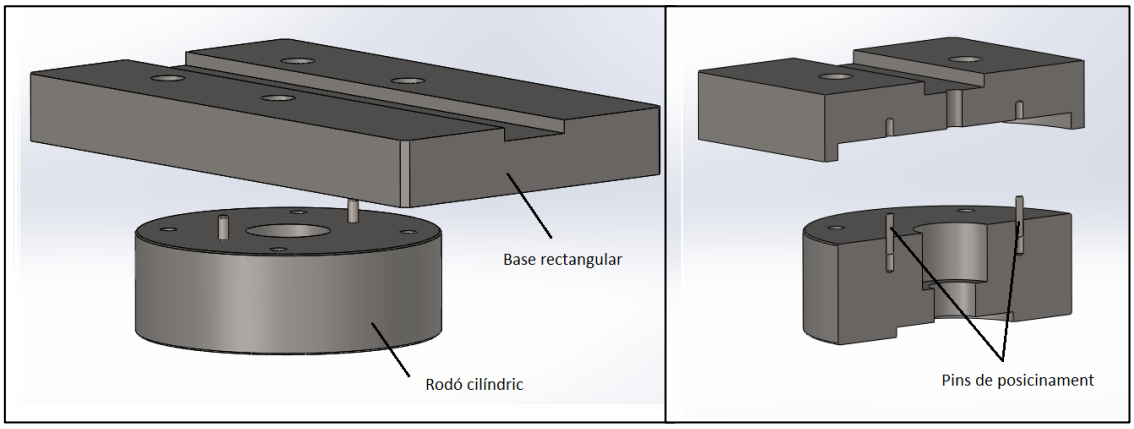


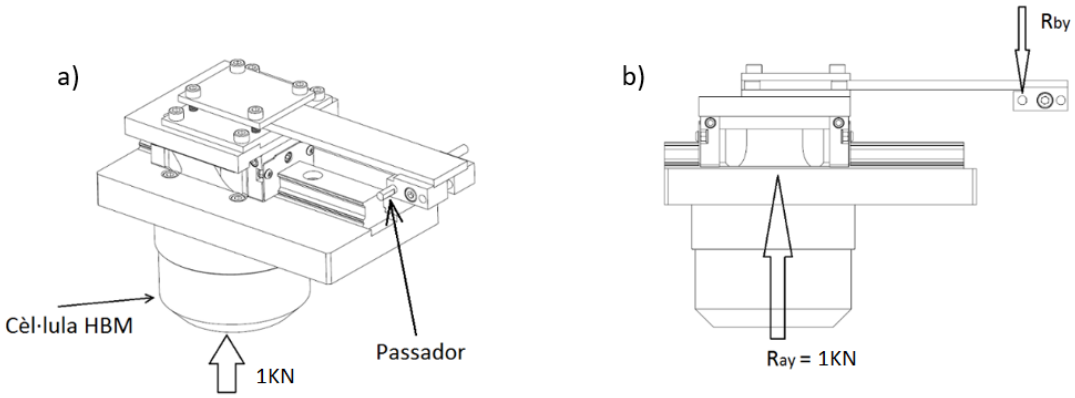
Figura 13. Posicionament de la base rectangular on anirà fixa la guia KUVE25-B.

4. Anàlisi de la funcionalitat de l'utillatge

L'utillatge dissenyat s'ha basat en l'idea de que sigui el més rígid possible i sobredimensionat, per evitar problemes de fletxes i de vibracions durant l'assaig, tals com els sorolls d'interferència amb les cèl·lules de càrrega i el fenomen de la ressonància.

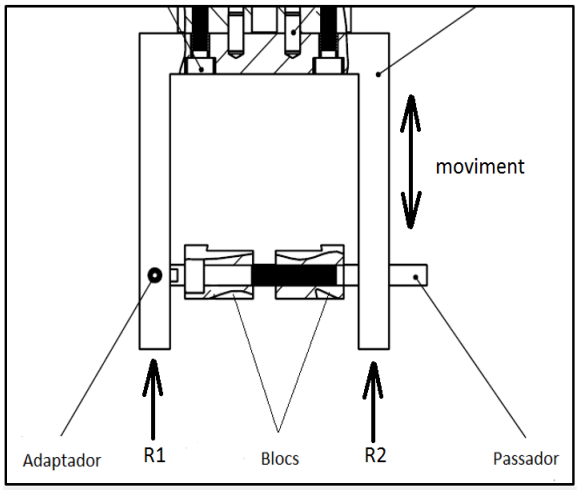
4.1. Càlcul de la resistència

Degut al disseny i a la naturalesa de l'assaig (moviments en sentit vertical repetitius), La transmissió de forces en aquest utillatge és uniforme, tots els elements reben la mateixa força, per tant, l'element el qual s'estudiarà la resistència serà el passador donat que és peça geomètricament més feble.



Imatge 14. Punts d'aplicació de les forces externes.

El passador reparteix la força entre els dos braços de la forquilla, veure Imatge 15.
Els blocs donen rigidesa al passador, actua com un encastament en voladís, per tant aquest passador treballa principalment a tensió tallant.



Imatge 15. Passador

Es fa un estudi de la resistència tant per un cas estàtic, com per un cas a fatiga. Les condicions del cas estàtic serà aplicant una força externa de 1000N, donat que aquesta és la resistència de la proveta, si es sobrepassa, la proveta es trenca i l'assaig es para automàticament. A fatiga s'assaja a 500N i amb una freqüència de 5 Hz durant una setmana, això son 3.024.000 cicles, un estudi a fatiga a vida infinita i amb esforç tallant.

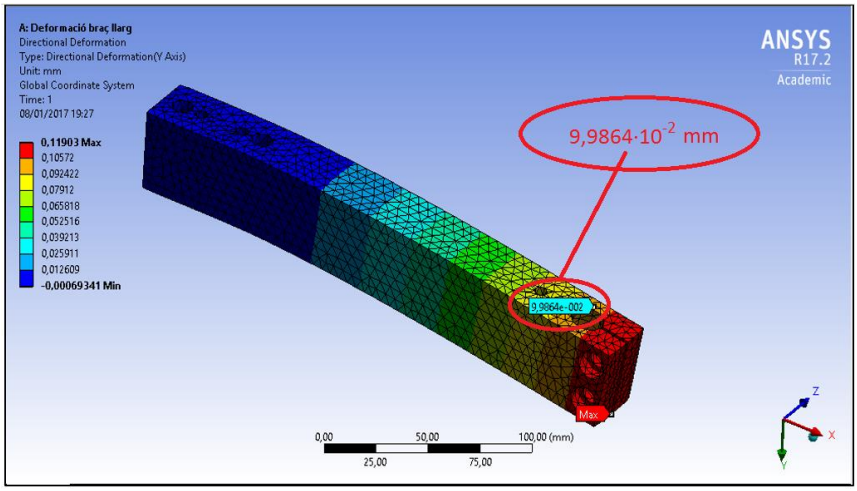
4.2. Càlcul de la fletxa

Un requeriment del disseny és que la fletxa de l'utillatge no superi els 0,2mm. La raó d'imposar aquest requeriment és que una de les dades experimentals que es recull a l'assaig, és el desplaçament vertical de la proveta. Si la fletxa és molt gran, aquesta influirà en els resultats.

Es presenta un anàlisi amb el programa ANSYS, amb les condicions següents:

- Mallat de 5mm.
- Fixació a la zona d'unió amb cargols.
- Una força de 1000N aplicat en sentit vertical a la superfície de de contacte amb l'extensor i l'adaptador.

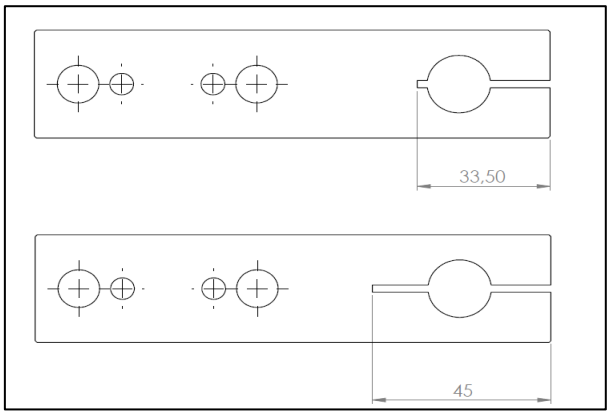
Un cop definit les condicions es presenta el resultat de la deformació ampliat x100.



Imatge 16. Deformació del braç aplicant una força de 1000N.

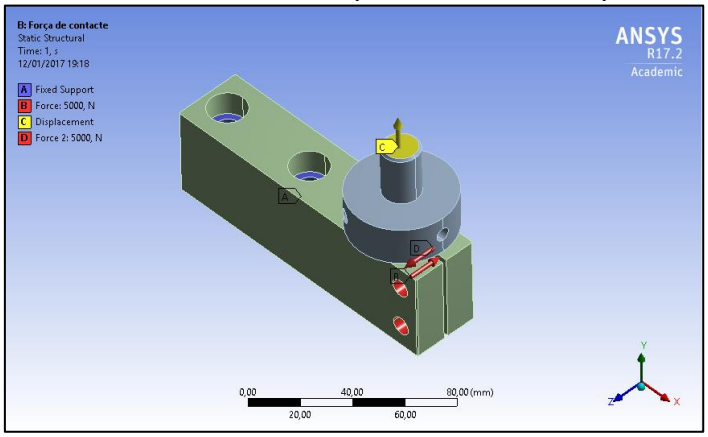
4.3. Moment resistent del mecanisme d'abraçadera

Es vol comparar dos disseny del braç abraçadera, on l'única diferencia resideix en la profunditat del tall de la ranura. Es vol conèixer quina és la força necessària per vèncer la pressió que exerceix els cargols si se'ls aplica una força de compressió de 5000N cada una.



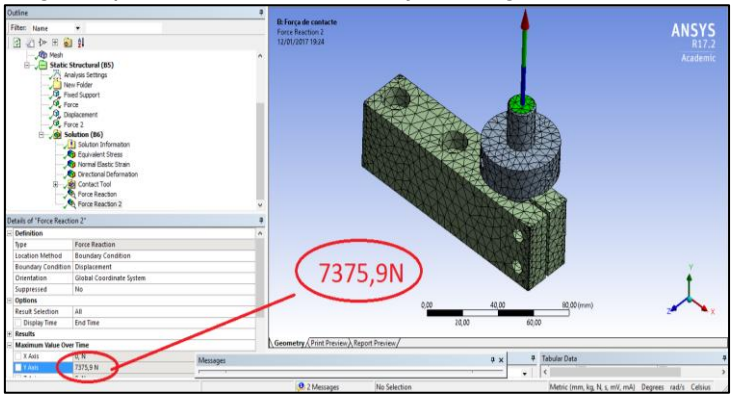
Imatge 17. Profunditats de ranures del braç

Introduint les condicions de contorn de fixació, zona d'aplicació les forces i del desplaçament, a més de condicions de contacte entre les dos peces d'acer amb un coeficient de fricció de 0,2 (contacte acer-acer).



Imatge 18. Condicions de contorn per la simulació

Per al cas de la ranura llarga (45mm) la força per vèncer el mecanisme abraçadera és de 7375,9 N. Per la ranura curta la força de venciment és de 2946,8 N. Tenir una ranura llarga fa que el mecanisme de subjecció sigui més eficient.



Imatge 19. El resultat de la força vertical necessari per vèncer el mecanisme abraçadera.

5. Procediment d’assaig

Es definirà un procediment d'assaig, on s’indicarà a l'usuari com dur a terme una prova d’assaig a fatiga en mode II, i com obtenir els resultats de la taxa d’alliberament d’energia crítica (G_{IIC}, critical energy release rate). Per portar a terme el test de la determinació de la resistència a fractura per als materials unidireccionalment reforçats, s’utilitzarà el mètode calibrated end-loaded split (C-ELS). El muntatge i calibració del C-ELS es basarà a la norma ISO15114:2014.

Aquest procediment és aplicable a la fibra de carboni i fibra de vidre reforçat amb plàstics termoestables i termoplàstics.

5.1. Que es vol mesurar?

En aquest assaig a fatiga en mode II, el paràmetre clau a determinar és l’energia disponibles per la fractura (G_{IImax}).
La G_{II} es mesura mitjançant corbes d’iniciació de dany (onset) i corbes de propagació o creixement d’esquerda.

5.2. Provetes

5.2.1. Recepció de les provetes

Per definir els requisits dimensionals dels espècimens, es basarà en les recomanacions que indica la norma ISO15114:2014.
Aquesta norma recomana un rang per la geometria de les provetes: per aquest assaig s’ha triat que el gruix de la proveta sigui de 2h = 5mm, la longitud sigui L = 200mm una amplada b =25mm i una longitud d’esquerda inicial de a > 50mm.

5.2.1. Condicionament de les provetes

Les mostres es poden assajar tal com s’ha rebut o condicionat d'acord amb l'especificació del client. Si es necessita condicionament de les mostres, cal seguir el procediment de "TP-007 Condicionament de les mostres".

5.3. Pre-esquerda

Per tal d’evitar l’efecte que pugui tenir el procés de fabricació en les provetes, es fa una pre-esquerda a cada una abans d’iniciar del test. Els mètodes disponibles son els de pre-crack en mode I o II, ambdós mètodes estan especificats a la norma ISO 15114:2014, a l’apartat “7.2 Pre-cracking the specimens”. El procediment utilitzat s'ha d'indicar clarament en l'informe.

5.4. Calibració del sistema C-ELS (Clamp calibration)

La calibració del sistema C-ELS, té com objectiu l'obtenció del pendent de la recta entre la *compliance* i la longitud lliure d'assaig de l'espècimen. Sense aquesta recta no seria possible calcular el mòdul de Young de l'espècimen, com a conseqüència no es podrà obtenir el valor de la G_{IImax}.

El procediment de la calibració de l'espècimen està explicat pas per pas en l'Annex B apartat B9. Clamp calibration.

5.5. Iniciació de l'assaig

Un cop triat els espècimens, fetes les calibracions de cada espècimen, realitzat el pre-crack, es procedeix a iniciar el test. El test consisteix en sotmetre els espècimens a un esforç a fatiga induït per una força que estira l'espècimen des de la seva part inferior. La deformació en la part inferior de l'espècimen és major que la part superior, aquest fet provoca una força tallant a la punta de l'equerda que indueix a un creixement de l'esquerda.

Durant l'assaig s'obté el valor de la compliança en cada cicle a partir de la mesura de força – desplaçament a partir d'un mètode desenvolupat per AMADE. Aquest mètode consisteix en, un cop obtingut els valors de la compliança en cada cicle, es troba la longitud d'esquerda , llavors es troba el mòdul de Young (E1) mitjançant una fórmula que relaciona E1 i el pendent de la gràfica $C^{1/3}$ vs a. Per últim es calcula la G_{IImax} a partir de E1.

5.6. Informe d'assaig

L'informe de la prova d'assaig es construeix d'acord amb el procediment "PR-016 Test report". Per al procediment en general cal una identificació completa del material (per exemple fabricant de laminat, material de fibra, material de polímer, la màxima temperatura de curat, la durada de l'assecat, la ubicació de la mostra a la placa) si es lliura per part del client.
A continuació es nombrarà les dades que ha d'aparèixer en l'informe d'assaig:

- El nombre i l'etiqueta de mostres analitzades i el tipus de mètode utilitzat per a l'anàlisi.
- Les dimensions de la càrrega de bloc, preparació de la superfície i l'adhesiu.
- Condicionament de la temperatura i la durada.
- Els valors mitjans i la desviació estàndard per a cada tipus de valors d'iniciació (VIS, NL, MAX, 5%) i el valor mitjà i la desviació estàndard dels últims 10 valors de propagació (PROP) o de l'últim 50% dels valors de propagació, el que conté el major nombre de punts de dades, a partir de totes les mostres provades.
- Les observacions de les proves (per exemple, desviació de la pre-esquerda o la delaminació del plànol mitjà, l'aparició de pont de fibra, deformació permanent després de la descàrrega, etc) que pot haver afectat el procediment de prova o dels resultats.
- Qualsevol desviació del protocol (per exemple, les dimensions dels espècimens, orientació de les fibres).
- Generar la gràfica de $C^{1/3}$ vs *L* per al calibratge de subjecció.
- Una fotografia dels accessoris utilitzats del C-ELS.
- Si els factors de correcció F i N s'utilitzen, això s'ha de tenir en compte en l'informe.

Fulls de resultats individuals inclouen:

- Data i lloc de la prova, la identificació personal que ha realitzat la prova.
- Gruix mitjà, amplada mitjana, màxima variació de gruix al llarg de la longitud, la llargada de la mostra, el material i el gruix i la longitud de la peça inserida.
- Temperatura i humitat relativa durant la prova.
- Tipus de pre-crack utilitzat (Mode I o Mode II).
- Anotar la freqüència de càrrega-descàrrega en Hz(freqüència d'assaig en fatiga es farà a 5 Hz).
- Valor de mòdul E1 a partir de la prova del clamp calibration.
- Anotar el pendent m de la gràfica compliance (C) respecte a l'arrel cúbica de la longitud de delaminació (a^3) i el coeficient de correlació r^2 de l'ajust lineal. Tingueu en compte si el valor-VIS ha estat exclòs de la forma.
- (Cmax / 5% C0) / C0, el percentatge de canvi entre el compliment C0 compliment inicial i el compliment en 5% o punt MAX.
- Corba de càrrega-desplaçament
- Taula de valors G_{IIC}(tots els valors d'iniciació i propagació) i R-curve de la mostra.

6. Conclusions

El disseny plantejat permet realitzar assaigs a fatiga en el segon mode (mode II). A més de satisfer amb els requeriments del client. A continuació es mencionaran algunes de les més importants.

Un factor que influeix directament a l'exactitud i la precisió dels resultat de l'assaig, és el nombre de cicles a la que es sotmet la proveta, en casos estàndard cada proveta s'assaja a un freqüència de 5 Hz durant una setmana. Per optimitzar el temps d'assaig es va decidir que l'utillatge dissenyat pugui assajar paral·lelament 4 provetes.

Una de les mesures experimentals necessaris per l'obtenció del valor del G_{II}, és la deformació vertical al punt de càrrega de la proveta. Per evitar que la pròpia deformació de l'utillatge influeixi en aquesta mesura, s'ha evitar que en el punt d'aplicació de la càrrega el valor de la fletxa de l'utillatge superi els 0.2 mm. Això s'aconsegueix sobredimensionant els braços de l'utillatge.

El disseny d'aquest utillatge és exclusiu per l'assaig en mode II, però en el futur i donat el cas, hi ha parts d'aquest disseny que son adaptables per altres tipus d'assaigs similars de resistència a delaminació, introduint els canvis necessaris al disseny actual.

Dilluns, 8 de gener del 2017

Rui Jiang

7. Resum del pressupost

El cost total per la fabricació de l'utillatge d'aquest projecte és de 7000 euros, sense IVA.

8. Relació de documents

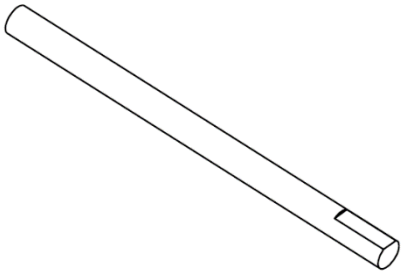
Document 1. Memòria
- Annex A. Càlculs
- Annex B. Procediment d’obtenció de dades d’assaig
- Annex C. Solucions preliminars

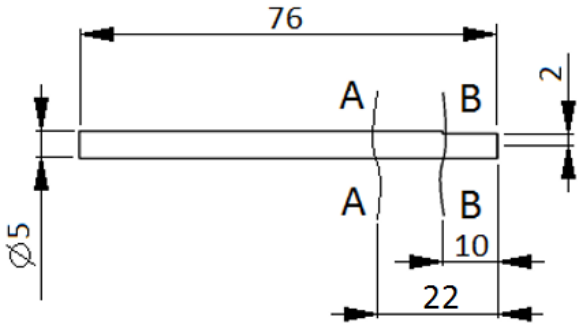
Document 2. Plànols
Document 3. Plec de condicions
Document 4. Amidament
Document 5. Pressupost
Document 6. Resum

ANNEX A: CÀLCULS

A1. Càlcul a resistència:

A1.1. Geometria i seccions d'estudi:





Imatge 1. Passador i Seccions d'estudi.

D'aquest utillatge d'assaig a fatiga en mode II cal destacar que quasi se'l pot considerar un cos rígid, ja que s'ha decidit sobre dimensionar l'utillatge per disminuir la fletxa de l'utillatge a l'hora de l'assaig. No obstant s'estudiarà la resistència de la peça més feble. Totes les peces del conjunt reben la mateixa força resistent, davant aquesta situació la peça amb més probabilitats de patir un trencament és el passador d'unió entre els blocs i la proveta, per que és la peça geomètricament més feble del conjunt.

A1.2. Dades i condicions:

A1.2.1. Estàtica:

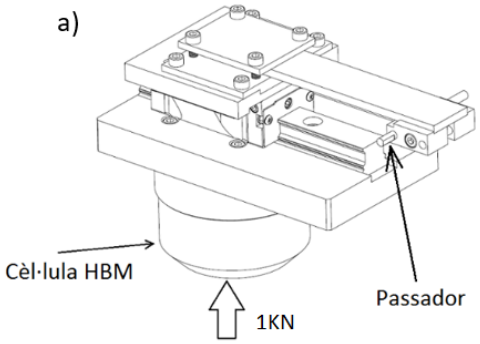
- Material: Acer de màquines d'alta resistència EN 100083-2 tipus 34 CrNiMo 4 (F-1250), trempat i revingut. El diàmetre de la nostra peça és: d = 5mm< 16, per tant Sy = 700 MPa, Sut = 1100 MPa.
- Condicions de xoc (càrrega puntual): el límit de la força per l'assaig estàtic està determinada per la resistència de les provetes que és de 1KN.

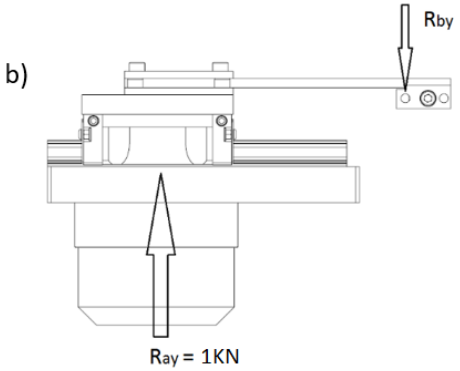
A1.2.1. Fatiga:

- Cicles de força i càrrega: durant l'assaig a fatiga les cèl·lules suporten unes forces d'aproximadament entre 40N i 500N la freqüència d'assaig varia entre 2 i 5Hz, l'assaig dura una setmana s'utilitzarà el cas més desfavorable per els càlculs (500 N i 5Hz).

A1.3. Càlcul estàtic:

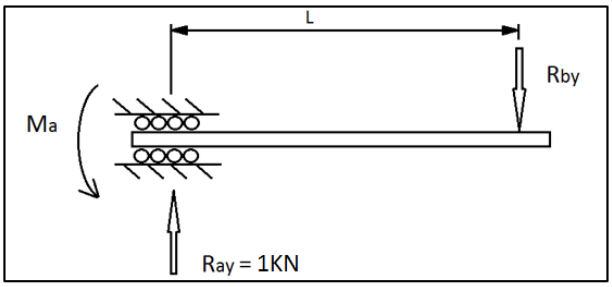
A1.3.1. Forces externes:





Imatge 2. Forces externes.

Les forces externes que actuen al passador es pot trobar sabent el valor de Rby (Imatge 2. b).



$\sum Rx = 0)$

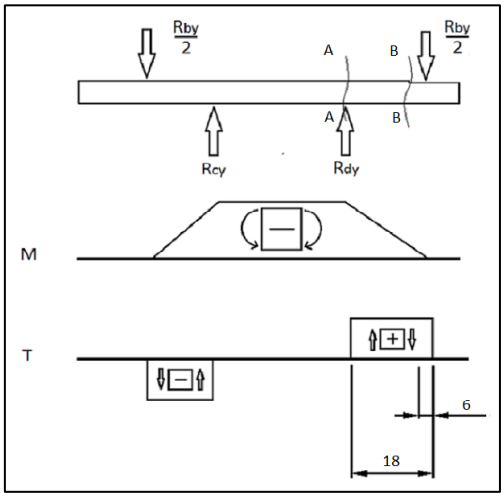
$\sum Ry = 0)\ Ray = Rby\ \rightarrow \boldsymbol{Rby = 1KN}$

$\sum Ma = 0)\ Ma = Rby \cdot L$

Imatge 3. Simplificació del subconjunt guia.

A1.3.2. Tensions:

Un cop trobat el valor de Rby, es procedeix a estudiar les reaccions i càrregues presents al passador.



Secció A-A

$N = 0\ N$

$T = 500\ N$

$M = T \cdot d = 500 \cdot 18 = 9000\ N \cdot mm$

Secció B-B

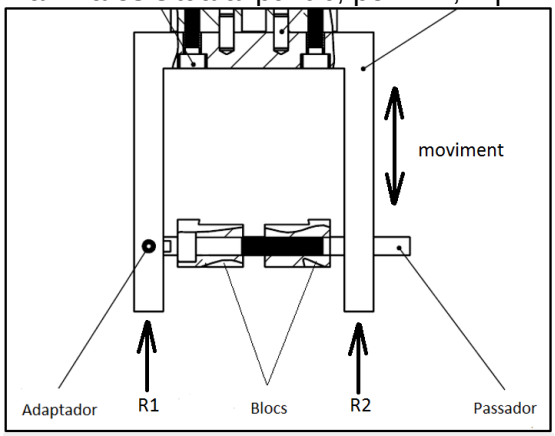
$N = 0\ N$

$T = 500\ N$

$M = T \cdot d = 500 \cdot 6 = 3000\ N \cdot mm$

Imatge 4. Digrama de tensions.

Sabent que l'acer és un material dúctil, no es tindrà en compte la concentració de tensions de la secció B-B. Per tant, la tensió de la secció A-A és major. Com a conseqüència només s'estudiarà la resistència d'aquesta secció. A més observant l'estructura de la unió entre els blocs, el passador i l'adaptador, es veu clarament com en aquest mecanisme el passador treballi principalment a esforç tallant. La força tallant màxima es situa al punt b, per tant, aquest serà el punt d'estudi.

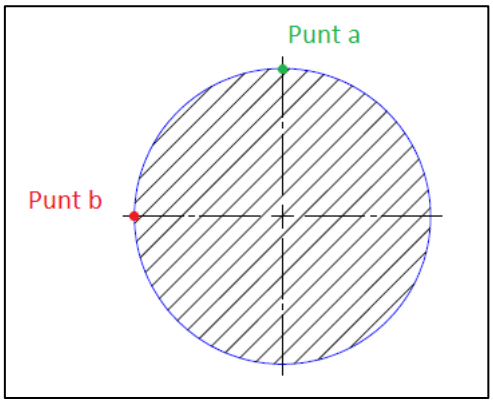


Imatge 5. Unió del passador amb els blocs i l'adaptador.

Punt b:

$\sigma(M) = 0\ N \cdot mm$

$\tau(V) = 500\ N$

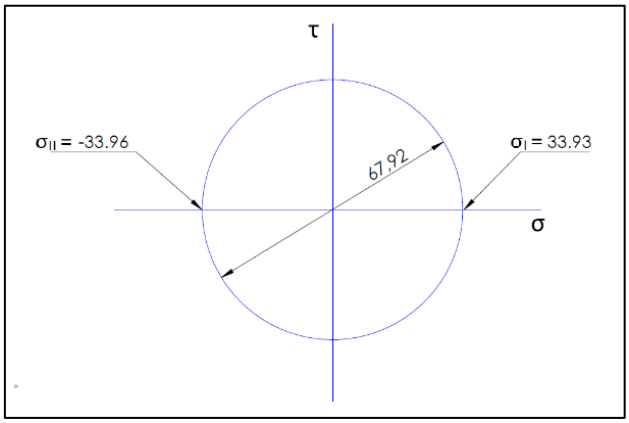


Imatge 5. Punts d'estudi de la secció A-A.

$$\tau(V) = \frac{4 \cdot V}{3 \cdot A} = \frac{4 \cdot 500}{3 \cdot 19.63} = 33.96\ MPa$$

On: $A = \frac{\pi \cdot \emptyset^2}{4} = 19.63\ mm^4 \quad i \quad \emptyset = 5mm$

Càlcul gràfic de les tensions principals (cercle de Mohr):



Imatge 6. Cercle de Mohr del punt b, cas de tallant pur.

Càlcul analític de les tensions principals:

$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} = \frac{0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0}{2}\right)^2 + 33.96^2} = (\sigma_I = +33.96\ ;\ \sigma_{II} = -33.96)\ MPa$$

Tensions de Von Misses:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{0^2 + 3 \cdot 33.96^2} = 58.82\ MPa$$

Coeficient de seguretat estàtic:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{700}{58.82} = \mathbf{11.91}$$

A1.4. Càlcul a fatiga:

A1.4.1. Forces externes:

La transmissió de les forces externes és idèntica a la del cas estàtic (veure apartat A1.3.1.)

A1.4.2. Tensions:

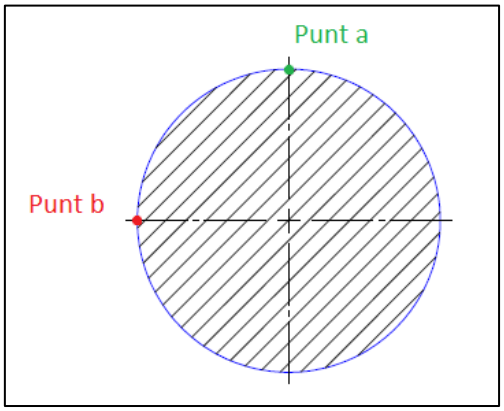
Les seccions d'estudi i la càrrega aplicada també coincidiran amb el cas estàtic.

Secció A-A

$N = 0\ N$

$T = 250\ N$

$M = T \cdot d = 250 \cdot 18 = 9000\ N \cdot mm$



En el punt b es situa el tallant màxim:

$\sigma(M) = 0\ N \cdot mm$

$\tau(V) = 250\ N$

$$\tau(V) = \frac{4 \cdot V}{3 \cdot A} = \frac{4 \cdot 250}{3 \cdot 19.63} = 16.98\ MPa$$

Imatge 8. Punt d'estudi de la resistència a fatiga de la secció A-A.

Coeficient de seguretat secció A-A, càlcul per vida infinita kf =1:

$\sigma_m = \frac{\sigma max + \sigma min}{2} = 0\ MPa$ $\sigma_a = \frac{\sigma max - \sigma min}{2} = 0\ MPa$

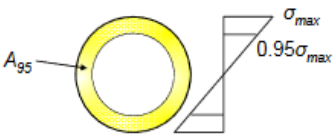
$\tau_m = \frac{\tau max + \tau min}{2} = 8.49\ MPa$ $\tau_a = \frac{\tau max - \tau min}{2} = 8.49\ MPa$

$\boldsymbol{\sigma'_m} = \sqrt{\sigma_m^2 + 3 \cdot \tau_m^2} = 14.71\ MPa$ $\boldsymbol{\sigma'_a} = \sqrt{\sigma_a^2 + 3 \cdot \tau_a^2} = 14.71\ MPa$

Se(pr) = 0.5·Sut = 0.5·700 = 350 MPa

Ka = a·Sut^b = 0.899 per acer rectificat a = 1.58 i b = -0.086

Kb = $(\frac{d}{7.62})^{-0.107}$ =$(\frac{5}{7.62})^{-0.107}$= 1.046 on d= 5 mm, flexió circular rotativa.



Kc = Kd = 1 i Ke =1/kf Kf = 1 ja que en aquest punt no existeix concntració de tensions.

Se = Se(pr)·Ka·Kb·Kc·Kd·Ke = 329.12 MPa

S*e* = 0.577·Se = 0.577·329.12 = 189.9 MPa

$$a = \frac{(0.9 \cdot Sut)^2}{Se} = 2090$$

$$b = -\frac{1}{3} \cdot \log\left(\frac{(0.9 \cdot Sut)}{Se}\right) = -0.174$$

$Sf = a \cdot N^b = 155.78\ MPa$ on: $N = 3.024.000\ cicles,\ assaig\ a\ 5\ Hz\ durant\ 1\ setmana$

$\frac{\sigma'_m}{Sut} + \frac{\sigma'_a}{Sf} = \frac{1}{n} \rightarrow$ ***n* = 8.66**

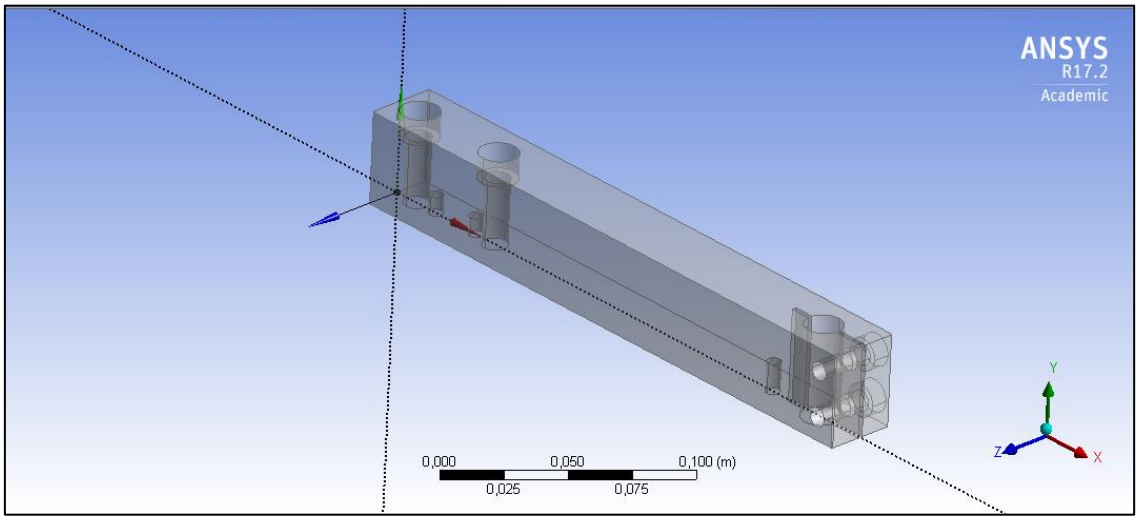
A1.5. Conclusions

Analitzant els valors dels coeficients de seguretat tant del cas estàtic com a fatiga, es veu com tots dos coeficients son clarament superiors a 1. Això indica que el passador pot suportar sense problemes l'assaig estàtic. En quan a fatiga també està apte per assaig a vida infinita.

A2. Modelització de la fletxa del braç(llarg i curt):

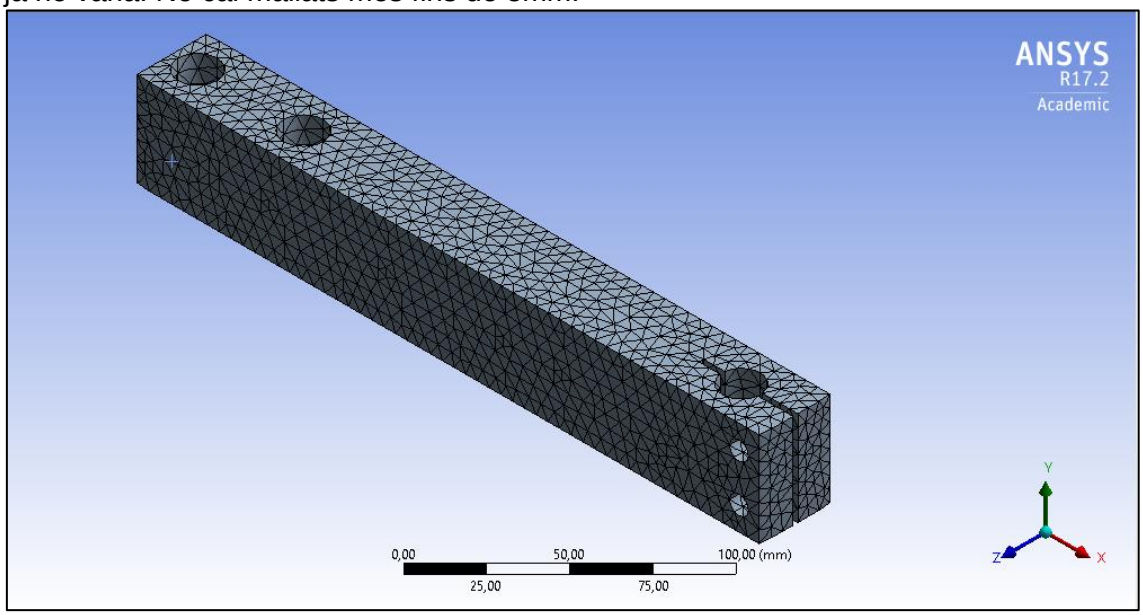
A2.1. Geometria, propietats del material i mallat:

La geometria és importat des de el programa CAD Solid Works. Al Workbech només cal definir les unitats en mm. A propietat se li dona les de l'acer corresponent al C-45E.



Imatge 9. Geometria del braç importat.

El mallat es pot definir a gust de l'usuari, tant la resolució com la forma del elements del mallat a: Mesh>Mesh control>zising. Amb les proves fetes amb Ansys es mostra que per aquest element, a partir d'una resolució de mallat de 5mm el valor final de deformació ja no varia. No cal mallats més fins de 5mm.

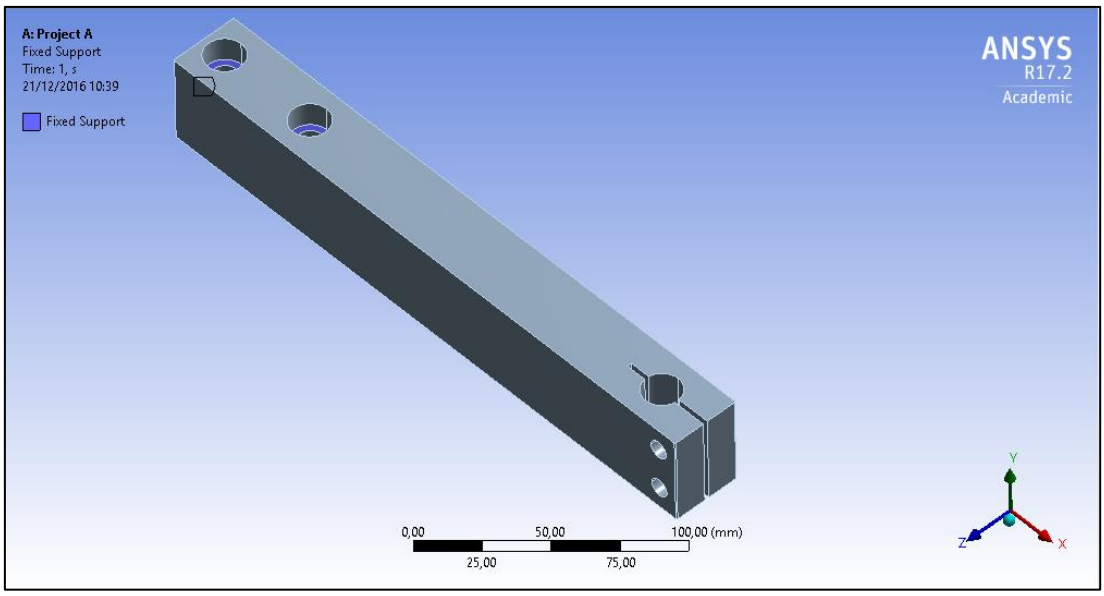


Imatge 10. Mallat amb una resolució de 5mm.

A2.2. Condicions de contorn:

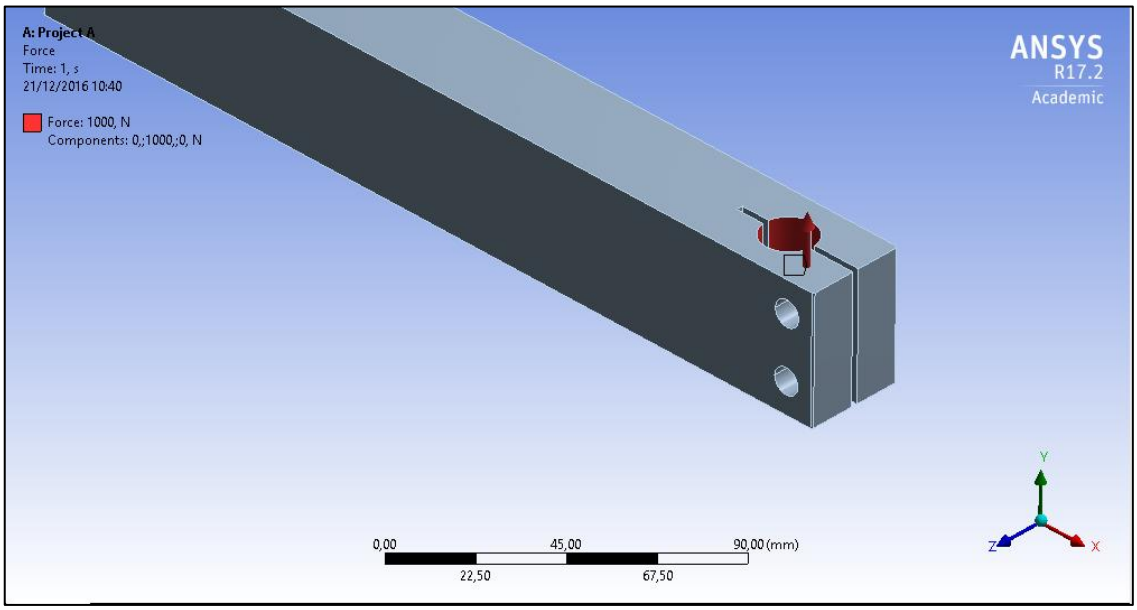
Per calcular la fletxa es necessita dos condicions de contorn totalment definits.

- El primer és la zona de fixació, en aquest cas, serà les superfícies cargolades.



Imatge 11. Zona de fixació de amb cargols.

- La segona condició és la força aplicada, aquesta força ha de ser de 1000N (assaig estàtic) aplicat a la superfície on s'agafarà l'extensor de l'adaptador, a més la direcció i el sentit ja de ser a l'eix y i negatiu.

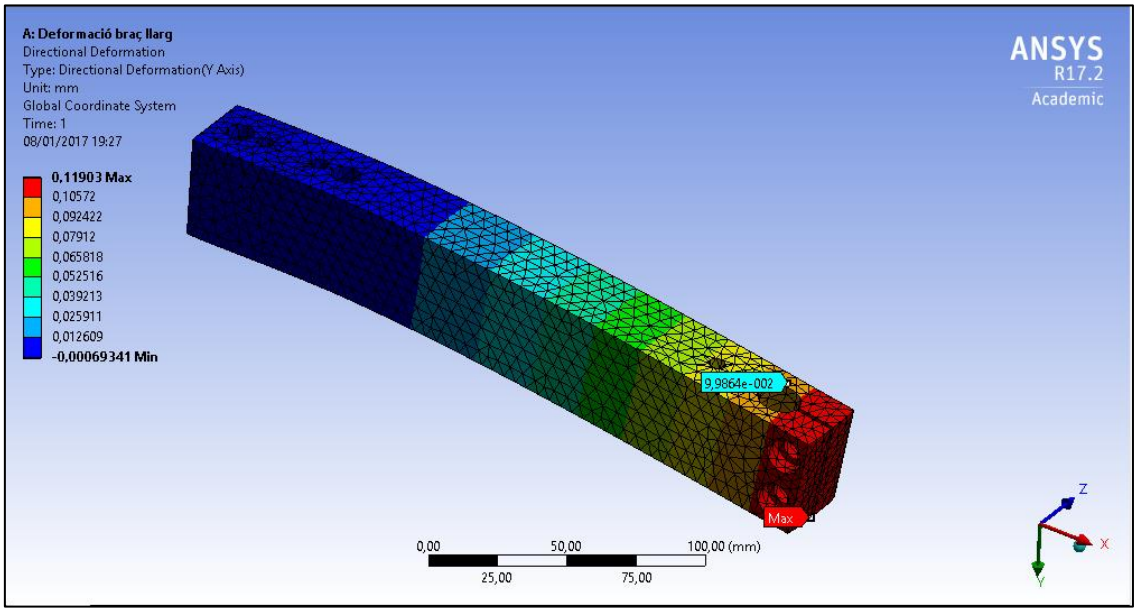


Imatge 12. Zona d'aplicació de la força, també es te en compte la direcció i el sentit d'aquesta força.

A2.3. Resultat de la fletxa:

El resultat que es desitja obtenir és la fletxa provocada al punt d'aplicació de la càrrega per una força de 1000 N.

Aquest valor és d'aproximadament, $\delta_1 = 9.98 \cdot 10^{-4}$ m = 0.998 mm. Aquesta deformació estaria dins de la màxima permesa



Imatge 13. Fletxa del braç llarg al punt d'aplicació de la càrrega.

A2.4. Fletxa braç curt:

El procediment del càlcul de la fletxa al braç curt és idèntic al del braç llarg.

La fletxa del braç curt a la zona de l'aplicació de càrrega és: δ_2 =0.624 mm.

La fletxa total al punt d'aplicació és la suma de les dos fletxes : $\delta_1 + \delta_2$ = 1.622 mm.

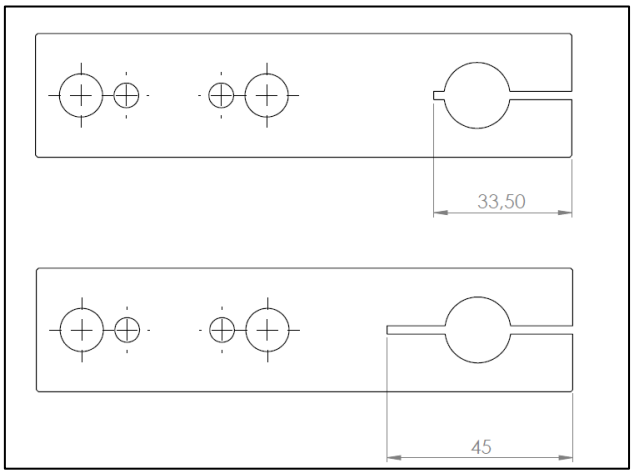
δ total = 1**.622 mm < 2 mm.** Els 2 mm és la defomació màxima permesa de l'utillatge.

A3. Moment resistent de l'abraçadera.

A3.1. Geometria, propietats del material i mallat:

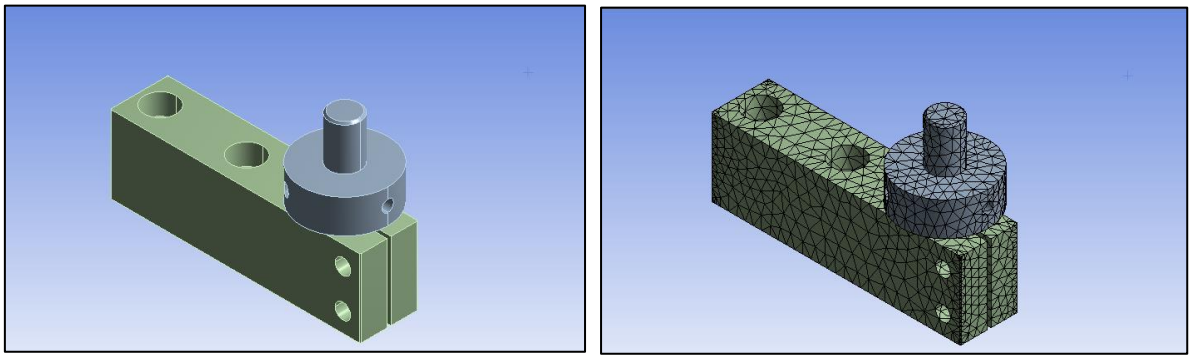
Al disseny del braç en mode II, l'extrem lliure és un mecanisme d'abraçadera on mitjançant dos cargols DIN912 M8, exerceix pressió sobre l'extensor impedint el seu desplaçament en vertical.

Aquest mecanisme és un dels més utilitzats, donat que son de fàcil mecanització i eficient si es dissenya bé. En aquest cas comprovarem com afecta la profunditat de la ranura del braç abraçadera pot afectar a la força necessària que ha d'aplicar els cargols.



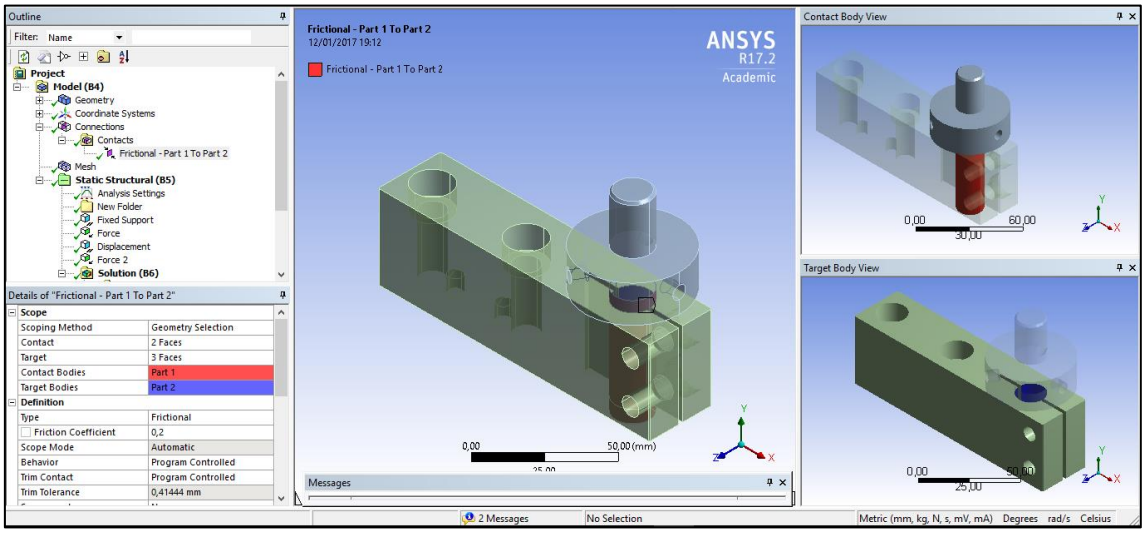
Imatge 14. Braços amb diferent profunditat de ranura.

S'importa el braç i l'extensor, es crea el mallat i al menú de la finestra del Workbench, selecciona contact, > frictional, per analísi de forces de fricció seleccionar coeficient de fricció 0,2 pe contactes entre acers.



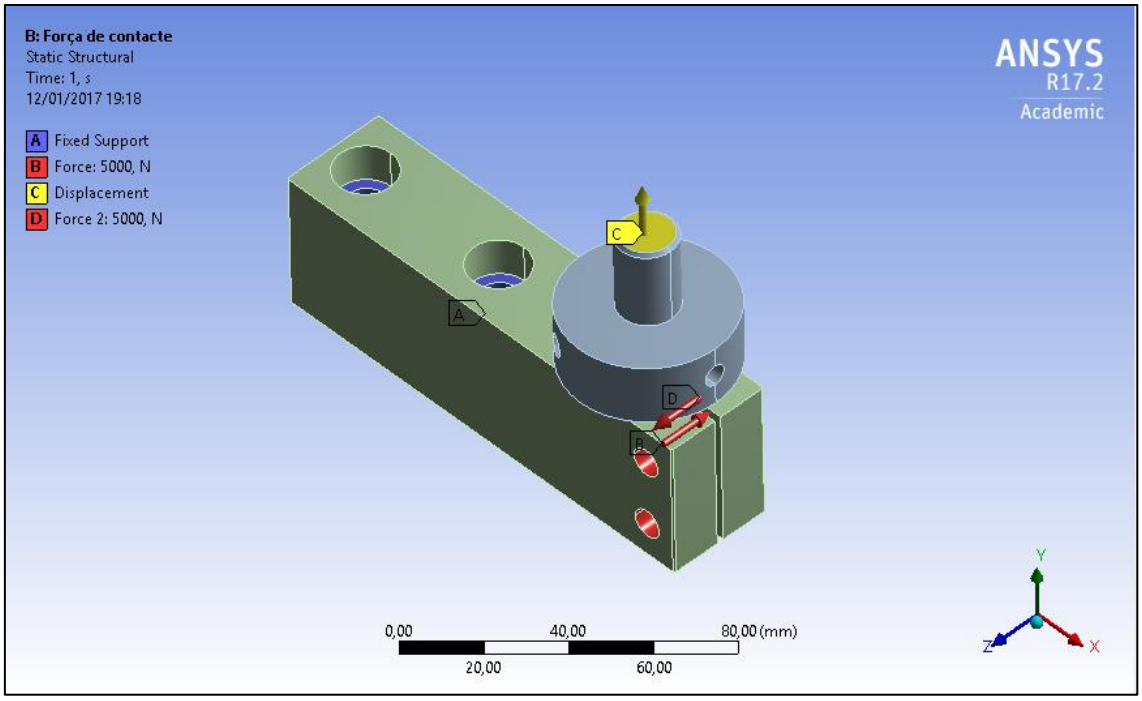
Imatge 15. Mallat de les peces.

A3.2. Condicions de contorn:



Imatge 16. Introducció de les condicions de contacte.

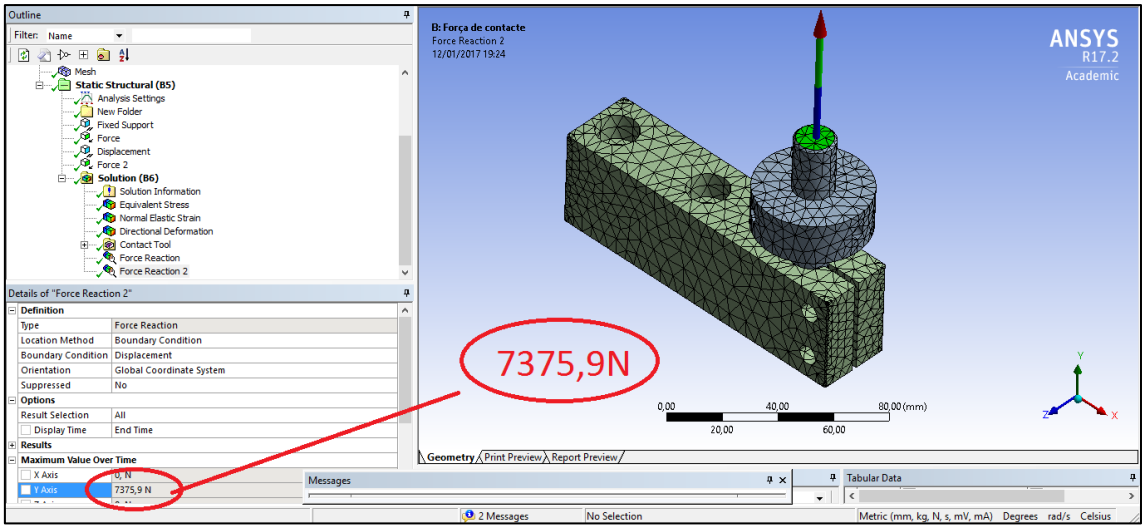
Les condicions de contorn son les de fixació, aplicació de la força de tancament, i que l'extensor es desplaci 1mm de la seva posició original. El que es vol saber és quina força és necessària per que l'extensor comenci a desplaçar-se si al punt de l'abraçadera se li aplica una força axial de 5000N cada cargol.



Imatge 17. Condicions de contorn de la simulació.

A3.3. Anàlisi de resultats:

L'objectiu és comprovar com afecta el valor de la força necessària per moure l'extensor sota un canvi de profunditat de ranura de l'abraçadera.



Imatge 18. Obtenció del resultat de la força de reacció a fricció necessari per provocar el desplaçament de l'extensor.

Per al cas d'una ranura de fundaria 45mm, cal una força superior a 7475,9 N per desplaçar l'extensor.

Si repetim el procés per la ranura de 33,5mm el resultant serà de 2946,8 N.

El cas de la ranura més llarga, clarament millor en termes d'eficiència mecànica.

ANNEX B

PROCEDIMENT DE MUNTATGE I D’ASSAIG A FATIGA EN MODE II

B1. Descripció

Es pretén definir un procediment d'assaig, on s'indicarà a l'usuari com dur a terme una prova d'assaig a fatiga en mode II, i per l'obtenció de les dades d'inici i propagació d'esquerda.

El mètode es basa en la norma d'assaig de determinació de la resistència a fractura per als materials compòsits reforçats, s'utilitzarà el mètode calibrated end-loaded split (C-ELS). El muntatge i calibració del C-ELS serà igual a la norma ISO15114:2014.

Aquest procediment és aplicable a la fibra de carboni i fibra de vidre reforçat amb plàstics termoestables i termoplàstics. Es podria estendre a altres materials aplicant els canvis corresponents per adaptar el procés al nou material.

B2. Objecte i Abast

Objecte	Definir un procediment per l'assaig a fatiga de la resistència a fractura en Mode II.

Abast	Prova de resistència a la fractura en mode II de les unions adhesives estructurals aplicant el mètode calibrated end-loaded split (C-ELS), els espècimens utilitzats son provetes de compostos plàstics reforçats amb fibres unidireccionals.

Inputs	Provetes (espècimens) Aplicació del procediment d'assaig
Resultats	Full de control Full de resultats del test

B3. Valors que es vol obtenir amb l'assaig

Valors a obtenir	**Abreviatura**
Corbes d'inici de dany (Onset)	G_{IImax} (N)
Corbes de propagació d'esquerda	da/dN (G_{IImax})

Taula 1. Resultats finals del test

Descripció dels símbols	**Abreviatura**	**Unitats**
Desplaçament vertical de la tija de la màquina d'assaig (VIS, NL)	δ	mm
Càrrega mesurada per la cèl·lula de la màquina d'assaig(VIS, NL)	*P*	N
Compliança (δ/P)	*C*	mm/N
Freqüència d'assaig	*f*	Hz
Longitud de l'esquerda inicial	*a*	mm
Longitud de pre-crack	a_p	mm
Longitud de la proveta	*l*	mm

Gruix de la proveta	*2h*	mm
Amplada de la proveta	*b*	mm
Mòdul elàstic	*E1*	MPa
Compliança inicial	*C0*	mm/N
Pendent de la gràfica $C - a^3$	*m*	$1/Nmm^2$

Taula 2. Mesures del test

B4. Equipament d'assaig

Equip		Codi	Precisió	Limitacions d'ús
CÈL·LULES DE CÀRREGA	Màquina d'assaig, cél·lula de càrrega, MTS 858, 25 kN	BIONIX MTS 858, CEL MTS/25kN, rang 100 %	1%	Calibrat 50 – 25000 N
	cél·lula de càrrega, HBM, 1.25kN	HBM 1, 1.25kN rang 40 %	1%	Calibrat 50 – 450 N
	cél·lula de càrrega, HBM, 1.25kN	HBM 2, 1.25kN rang 40 %	1%	Calibrat 50 – 450 N
	cél·lula de càrrega, HBM, 1.25kN	HBM 3, 1.25kN rang 40 %	1%	Calibrat 50 – 450 N
	cél·lula de càrrega, HBM, 1.25kN	HBM 4, 1.25kN rang 40 %	1%	Calibrat 50 – 450 N
DIMENSIONS	Peu de Rei	PEUDEREI/01, PEUDEREI/02, PEUDEREI/05, PEUDEREI/08	0.01 mm	Utilitzar PEUDEREI/08 En cas que la proveta superi els 150 mm
	Micrómetre	MICROMETRE/01, MICROMETRE/02	0.001 mm	
OTHER	Registrador de temperatura i humitat	REG/T-HR/02	0.1 ºC, 1%	
	Microscopi per mesurar el crack lenght	MICROSCOPI/ZEISS		

Taula 3. Equips necessaris per portar a terme l'assaig

B5. Espècimens

B5.1. Recepció dels espècimens

Per definir els requisits dimensionals dels espècimens, es basarà en les recomanacions que indica la norma ISO15114:2014 i mostrada en la taula 4.

Dimensió	Valor	Tolerància
longitud l	200 mm	±1 mm
Amplada b	25 mm	±0.1 mm
Gruix 2h	5 mm	±0.02 mm
Longitud de crack inicial a	>50 mm des de la línia de càrrega	-

Taula 4. Dimensions dels espècimens

B5.2. Condicionament dels espècimens

Les mostres es poden assajar tal com s'ha rebut o condicionat d'acord amb l'especificació del client. Si es necessita condicionament de les mostres, cal seguir el procediment de "TP-007 Condicionament de les mostres".

B6. Muntatge dels accessoris i ajust de les màquines.

La màquina que s'utilitza en aquest assaig és la MTS Bionix 858 de 25kN que es troba al laboratori d'AMADE. A aquesta màquina es podria muntar diferents opcions de cèl·lules de càrrega amb el corresponent rang d'utilització (consultar Taula 3).

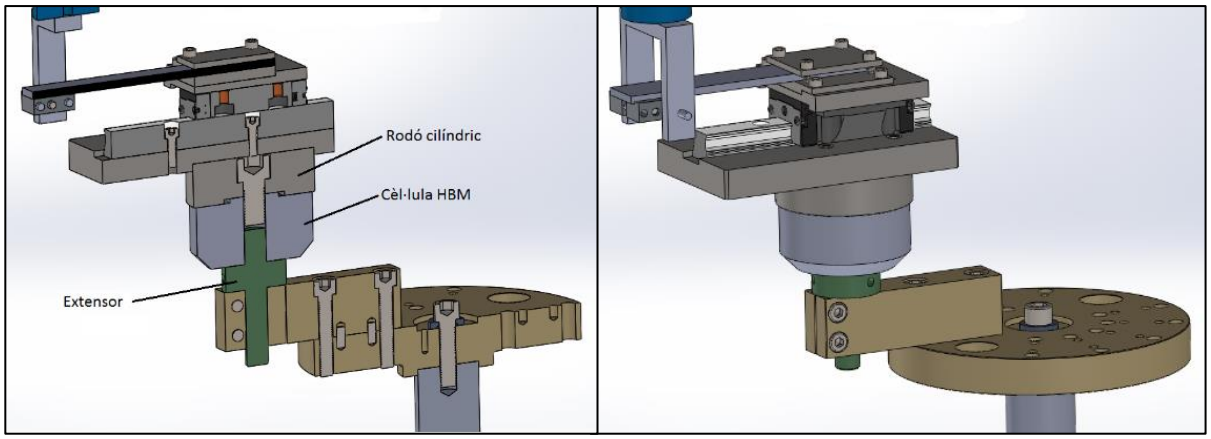
En el cas d'aquest assaig es muntaran cuatre cèl·lules HBM de 1,25kN. Cal recordar que en el test es fa 4 assaigs en paral·lel idèntics.

A continuació es mostrarà el muntatge de la cèl·lula de càrrega i el sistema C-ELS:

- Abans de muntar tots els accessoris, cal assegurar-se que les cèl·lules utilitzades siguin les correctes.

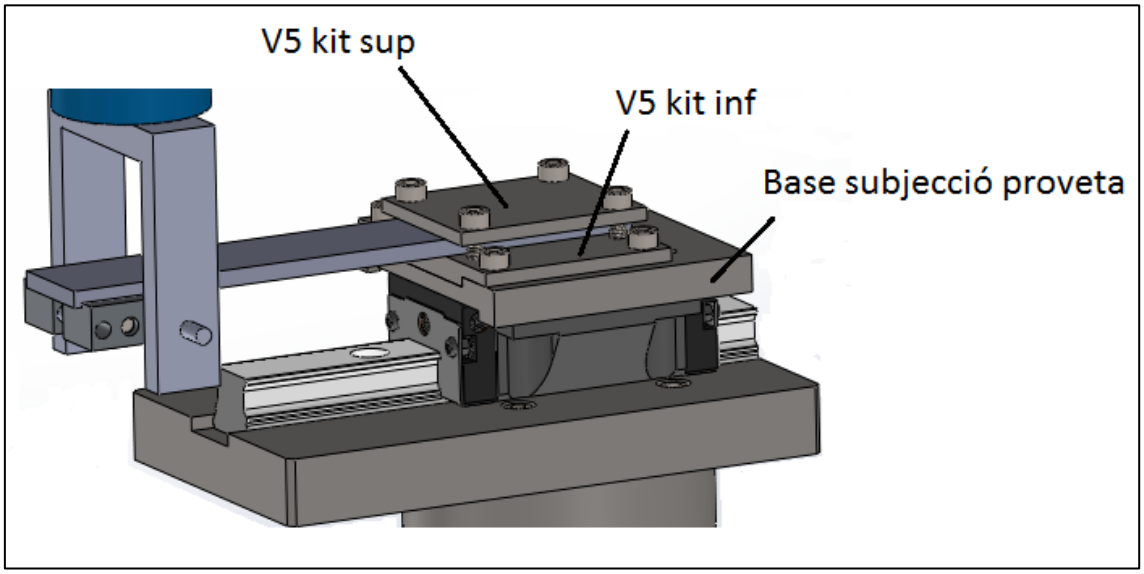
- La fixació/posicionament de la cèl·lula HBM es fa mitjançant un extensor (AMADE 04_01003) que anirà fixat a l'extrem inferior al braç amb un mecanisme d'abraçadera pressionat per dos cargols, a l'extrem superior anirà cargolat a la base de la cèl·lula que disposa d'un forat de mètric M16, veure Imatge 1.

- L'utillatge C-ELS disposa d'un rodó cilíndric que fa la funció d'unió i posicionament entre la guia i la cèl·lula. El rodó, també anomenat Base suport guia, es fixa a la cèl·lula mitjançant un cargol DIN 912 M16x25 veure imatge 1. La base rectangular, que serveix com a carril per on es mourà la guia, es fixa al rodó amb cargols DIN 912 M5x35 (no apareix a la imatge).



Imatge 1. Muntatge dels accessoris de la prova d'assaig

- La fixació de la proveta al C-ELS està definida per tres peces unides amb cargols que son: La base subjecció proveta (AMADE 03-1019), V5 kit inf (AMADE 03-1020) i V5 kit sup (AMADE 03-1021), veure imatge 2. Per més informació sobre la fixació del C-ELS cal consultar el document Nº2 Plànols.



Imatge 2. Test set up.

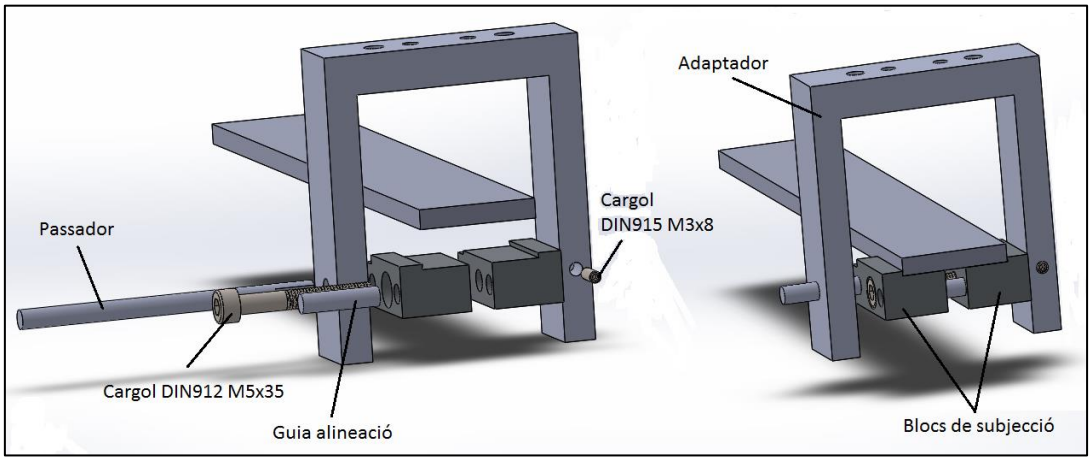
- Hi ha dos opcions d'introducció de la força als espècimens:

  a) Grapes mecàniques a pressió:

  - Es disposa de dos semi-blocs, la unió d'aquest blocs amb la proveta es produeix mitjançant un cargol DIN912 M5x35 que pressiona els blocs contra la part inferior de la proveta, actuant com una grapa mecànica.

  - Per alinear els blocs es fa servir la guia d'alineació i el propi passador.

  - El passador s'introdueix dins dels blocs i de l'adaptador, per tant fa de transmissió de la força de la màquina cap a l'espècimen.
  - L'adaptador és una forquilla que transmet el moviment vertical de la màquina d'assaig a la proveta.



Imatge 3. Introducció de la força mitjançant blocs en forma de grapes.

b) Blocs que s'uneixen a la proveta mitjançant un adhesiu:

- El muntatge es realitza mitjançant un bloc amb propietats adhesives, s'enganxa el bloc a la superfície inferior de la proveta, aquest blocs ja venen amb un forat passant on s'introdueix el passador.

- La resta del muntatge és igual a la de les grapes mecàniques.

B7. Preparacions necessàries per l'assaig

- Identificar la mostra. Cal identificar cada mostra d'acord a les necessitats del client. Si el client no requereix un sistema d'identificació específica, s'utilitza una codificació interna.

- Mesurar la longitud total de la mostra amb una precisió fins al mil·límetre, fent servir un calibrador o peu de rei.

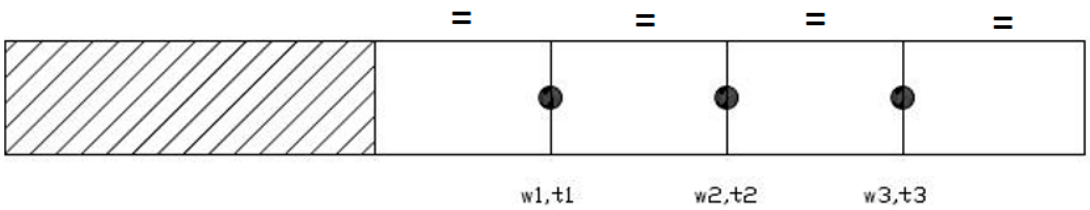
- Mesurar l'amplada de la mostra en tres punts equidistants (w1,w2,w3) al llarg de la longitud amb un calibrador i una precisió de 0.02 mm.

- Mesurar el gruix en tres punts equidistants situats a la línia central de la mostra (t1, t2, t3) amb un calibrador i amb una precisió de 0.02 mm.

- Assegurar que la variació en el gruix no sigui superior a 0.1 mm.

- Assegurar que la variació de l'amplada no sigui superior a 0.1 mm.

- Assegurar que la variació de longitud no sigui superior a 0.2 mm. Aquesta longitud és la distancia entre el punt d'aplicació de la càrrega i la línia on la proveta s'encasta al C-ELS.



Imatge 4. Punts de mesura de l'amplada (w) i el gruix (t) de la mostra.

- Aplicar una capa fina d'aerosol de base blanca als costats de la mostra per a facilitar veure el front de l'esquerda. La pintura ha de ser a base d'aigua, si és possible, ja que alguns dissolvents poden ser perjudicials per a la matriu.

B8. Realització de la pre-esquerda

L'experiència ha demostrat que els valors d'iniciació de la tenacitat a la fractura depèn del mètode utilitzat. Les mostres han de contenir una pre-esquerda, els mètodes disponibles son els de pre-esquerda en mode I o en mode II, ambdós mètodes estan especificats a la norma ISO 15114:2014, a l'apartat "7.2 Pre-cracking the specimens". El procediment utilitzat s'ha d'indicar clarament en l'informe.

B9. Calibració del sistema C-ELS (Clamp calibration)

- Desprès de fer el pre-crack, es procedeix amb una calibració de les fixacions del sistema C-ELS seguint el procediment d'assaig estàtic. Les dades obtingudes serviran per obtenir el valor del Mòdul de Young, E1.

$$E1 = \frac{1}{2b \cdot (Slope \cdot h)^3} \qquad (1)$$

- On, *b* i *h* son l'amplada i el gruix de la proveta respectivament. L'*Slope,* és el pendent de la gràfica que relaciona la compliança amb la longitud L, aquesta és la dada experimental obtinguda de la clamp calibration.

B10. Obtenció de $G_{II\,max}$

A continuació es procedeix a determinar el valor de G_{IImax} per cada proveta. Per fer-ho s'introdueix unes condicions conegudes per l'assaig.

- Per una deformació (δ) fixa, a més dels valors de longitud d'esquerda (a) i longitud lliure (L) imposades per el personal encarregat de l'assaig.
- Tenint en compte que:

$$C = \frac{\delta}{P} \qquad (2)$$

- I que segons teoria de bigues per una proveta amb encastament amb voladís com la del disseny C-ELS:

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{3 \cdot a^3 + L^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot E1} \qquad (3)$$

- Per tant G_{IImax}:

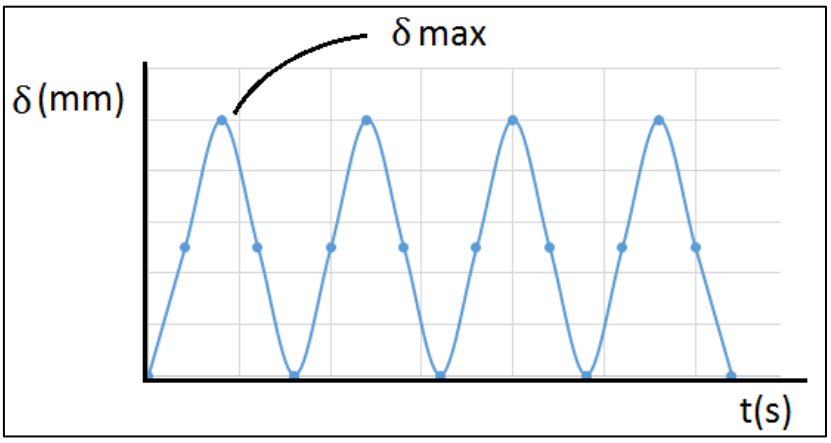
$$G_{IImax} = \frac{9 \cdot P^2 \cdot a^2}{4 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E1} = \frac{9 \cdot \delta^2 \cdot \mathrm{a}^2}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot E1 \cdot C^2} \qquad (4)$$

- Es substitueix la compliança, *C,* de l'equació (3) en l'equació (4). L'equació resultant és un polinomi en funció dels paràmetres *a* i *L*:

$$G_{IImax} \cdot \left[4 \cdot b^2 \cdot h^3 \cdot E1 \cdot \left(\frac{3 \cdot a^3 + L^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot E1}\right)^2\right] = 9 \cdot \delta^2 \cdot \mathrm{a}^2 \qquad (5)$$

- De l'equació (5), els valors de b i h són les dimensions de l'amplada i gruix de la proveta respectivament, per tant son dades conegudes, i E1 ja s'ha trobat partir del clamp calibration.

- Per una deformació màxima durant el cicle $\delta = \delta_{max}$ determinada i una G_{IImax} imposada, per exemple si es volgués fer l'assaig al 80% del G_{IIC}.



Imatge 5. gràfica del cicle de deformació en funció del temps.

- Per els dos paràmetres restants *a* i *L*, s'ha de tenir en compte les següents restriccions geomètriques per l'assaig:
- Degut a les restriccions del disseny de l'utillatge, el valor de la longitud lliure ha d'estar dins del rang: 30mm ≤ *L* ≤ 100mm.
- Per una estabilitat i funcionalitat optima de la proveta, s'ha de complir que el ratio 0,55 ≤ *a/L* ≤ 1.
- Es troba una combinació de *a* i *L* que permeti assajar a una G_{IImax} determinada per un nivell de desplaçament màxim ($\delta_{\max}$) imposat. S'ha de tenir en compte que l'utillatge esta dissenyat per un assaig a fatiga en paral·lel per quatre provetes, totes quatre tindran el mateix desplaçament màxim, però els paràmetres *a* i *L* seran diferents entre elles.
- Comentar que l'ajust de *a* i *L* està fet amb el STB i és un ajust aproximat, per tal de determinar el nivell de G_{IImax} real al qual es farà l'assaig es pot fer una calibració de la compliança per una *L* imposada, a diferents longitud de *a*, d'aqueta forma es pot obtenir els valors de *Co* i *m* (equació 3 de la norma ISO15114). Finalment la calibració de la compliança servirà per estimar a en funció de la compliança mesurada durant l'assaig.

B11. Assaig amb la màquina Bionix

- Comprovar que les calibracions per a tots els equips de prova són vàlids. Marqueu això en el full de control.
- Les condicions de prova de temperatura i humitat són prova de 23 ± 2ºC i 50 ± 10% (la norma no especifica les condicions, però ISO291 és a la llista de referències). Comprovar que es compleixen les condicions. Si les condicions són fora d'aquest rang, poseu-vos en contacte amb el client per aprovar aquestes condicions.
- Marqueu aquesta informació en el full de control.
- Preparar la màquina d'assaig d'acord amb les instruccions de l'INS-009.12 Preparació de màquines d'assaig hidràuliques quan s'utilitza Bionix 1 o 2.

- Assegureu-vos que la màquina de prova s'ha alineat d'acord amb el procediment de TP-021 d'alineació amb un rellotge comparador. Comprovi al registre IMP009.14 Controls d'alineació.
- Iniciar el programa MPT i triar una carpeta on La màquina emmagatzema les dades.
- Utilitzar l'estació de Bionix1.5kN_282483 i el programa C-ELS_ESIS_ TC4_Protocol.00 (quan és una prova a temperatura ambient). Altres estacions possibles es poden trobar en IMP019.01 Registre de programes de prova. El mètode de prova quan s'utilitza la màquina de prova Insight és: C-ELS_Protocol.
- Col·locar la mostra entre les dues plaques (parts V5 kit inf i V5 kit sup) (Figura 8), de manera que la línia amb el text "FIX" s'alinea amb la vora de la placa. Utilitza les posicions de base de posicionament per col·locar la mostra correctament. Quan la mostra està en la seva posició, premi els cargols amb una clau de torsió amb un parell de 8 Nm.

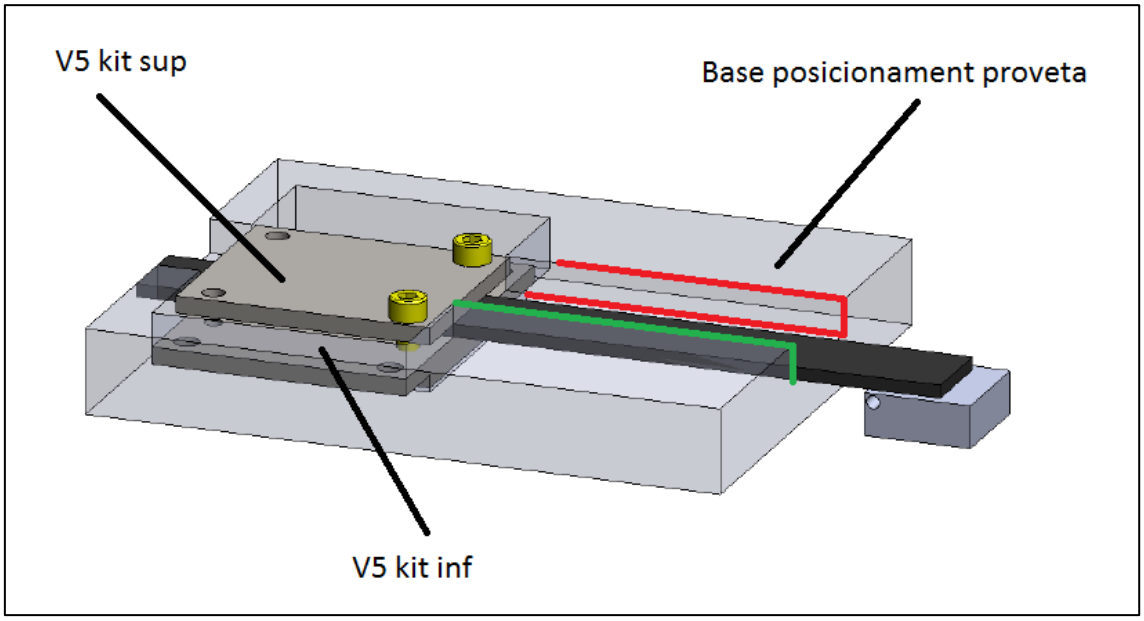


Figura 8. Sistema d'alineació de la proveta amb les plaques de fixació. La cara vermella de la base de posicionament és per les provetes amb una amplada de 25 mm. La cara verd és per provetes de 20 mm.

- Col·locar la mostra amb els suports de fixació (V5 kit inf i V5 kit sup) a la ranura del carro mòbil (Base subjecció proveta) que s'ha muntat a la màquina de prova de manera que la vora de la part de metall amb la ranura està alineat amb la vora del dispositiu de fixació (V5 kit inf i V5 kit sup).
- Tara la força quan el carro es troba a la màquina de prova, però sense passadors.
- Desplaçar la màquina i el carro de manera que els orificis de la forquilla de càrrega (Adaptador) i els orificis dels blocs units a la mostra són a la mateixa altura.
- Moure el carro cap endavant de manera que es pot inserir un passador a través del forat de la càrrega-bloc que s'enganxa a la mostra.
- Comprovi la càrrega de la mostra, si hi ha càrrega residual, activar el control manual (Comando manual) i canviar el desplaçament de manera que la força serà igual a zero.
- Desactivar el control manual i posar a zero el desplaçament.

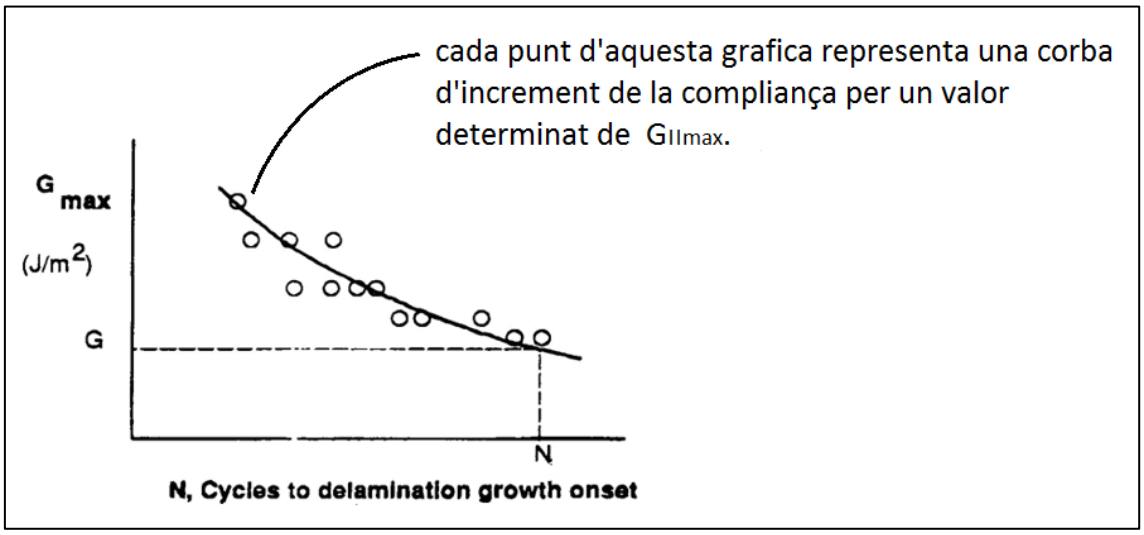
- Comprovar la configuració del programa. La freqüència de la prova ha de ser de 5 Hz, amb un desplaçament màxim entre δ = [1 a 6 mm], imposat per els paràmetres *a* i *L.*
- Iniciar l'assaig.
- Durant l'assaig es fa una adquisició del valor de la compliança a una freqüència de 100Hz. De manera que assajant a 5Hz s'obté 20 punts per cicle.
- Amb un sistema d'adquisició extern a la màquina d'assaig anomenat QUANTUM, s'adquireix les dades del desplaçament de la proveta i la força de cada cèl·lula de càrrega.
- Posteriorment es tracta aquestes dades cicle a cicle per obtenir un valor de la compliança per cada cicle.
- A partir de la compliança es calcula el valor de la longitud d'esquerda (*a*), i sabent *a* es calcula el valor de G_{IImax}.
- Parar l'assaig.
- Abans de retirar el passador, comproveu que hi hagi càrrega zero. Si no, mogui el pistó amb el control manual. Traieu el passador. Descargolar els cargols amb la clau de torsió.
- Retirar la mostra i verificar que no hi ha danys a l'aparell.
- Inspeccionar la mostra i reportar qualsevol pont fibra o deformació plàstica en el full de control.

B12. Tractament de dades

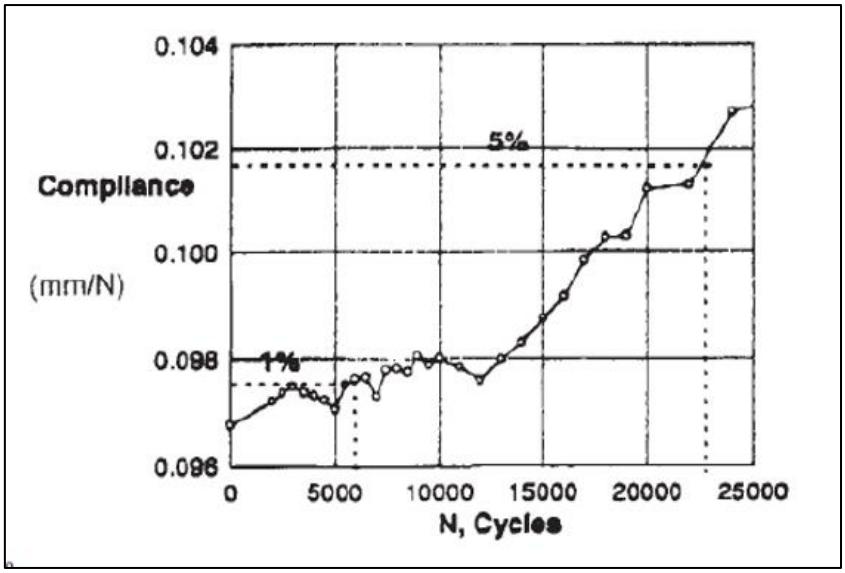
Per al tractament de dades cal incloure el "clamp calibration". Les dades de la calibració de la compliança. Dades de l'assaig i condicions de temperatura i humitat.

El resultat de l'assaig és l'obtenció de dos corbes:

- Corba Onset:, es mesura el nombre de cicles necessaris per iniciar la propagació i es representa com una corba G_{IImax} en funció del nombre de cicles, N. Es recorda que G_{IImax} és l'energia disponible quan estem a Pmax i δmax, aquest és el punt més alt del cicle. La compliança es calcula a partir de P i δ

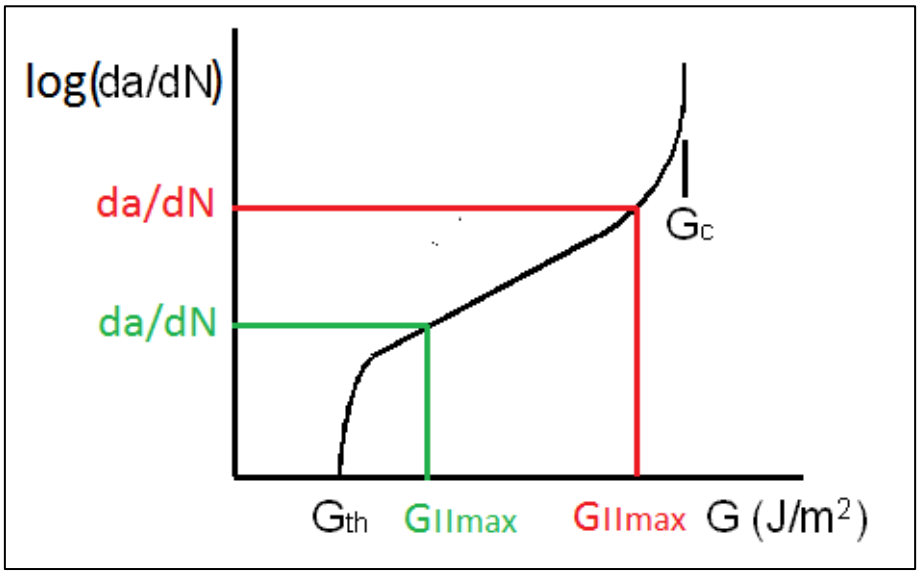


Gràfica 9. Corba de G_{IImax} en funció del nombre de cicles.



Gràfica 10. Corba d'increment de la compliança fins al 5%. Aquesta gràfica representa un punt de la corba G_{IImax} vs N.

- Corba de propagació de l'esquerda (da/dN): es comença l'assaig a per un cert nivell de G_{IImax}, per exemple al 80% del Gc. Per cada cicle es mesura la compliança (C), s'obté la longitud d'esquerda (a) i es troba G_{IImax}. Aquesta és la seqüencia.
- Com que a(N) es pot derivar numèricament per obtenir da/dN. Llavors per cada cicle es tindrà un punt de da/dN i G_{IImax}. De manera que es pot representar la corba de propagació.
- Comentar que una derivació numèrica pot crear molt de soroll, si és el cas s'ha d'agafar més d'una dada per cicle.



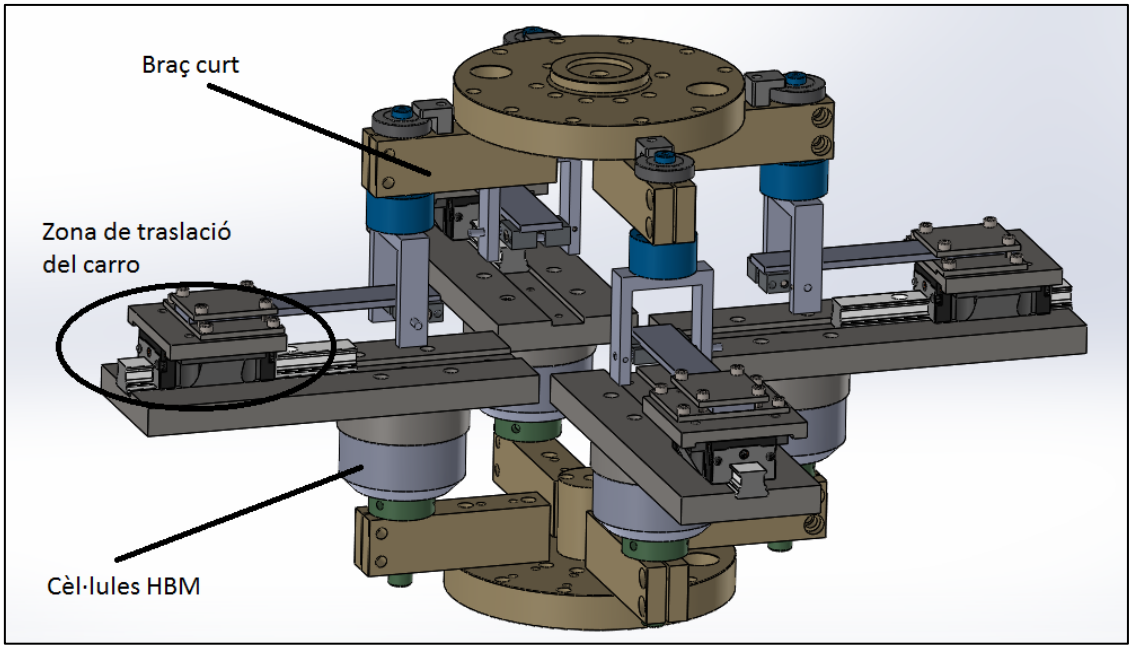
Gràfica 11. Corba da/dN vs G_{IImax}.

ANNEX C: SOLUCIONS PRELIMINARS

C1. Procés d'optimització de l'utillatge

Abans de començar, és necessari recordar que segons la pròpia normativa ISO15114 i els requeriments del client. Només s'ha trobat una solució viable per satisfer els requeriments del client i la normativa ISO15114. La feina del disseny s'ha concentrat en optimitzar l'utillatge. A continuació es mostrarà el procés d'optimització de l'utillatge.

A la imatge 1, es presenta la primera idea del disseny. Aquest primer disseny ja està capacitat per a portar a terme l'assaig a fatiga en mode II, però es vol millorar alguns aspectes importants com les dimensions de l'utillatge i la funcionalitat a l'hora de l'adquisició de dades.

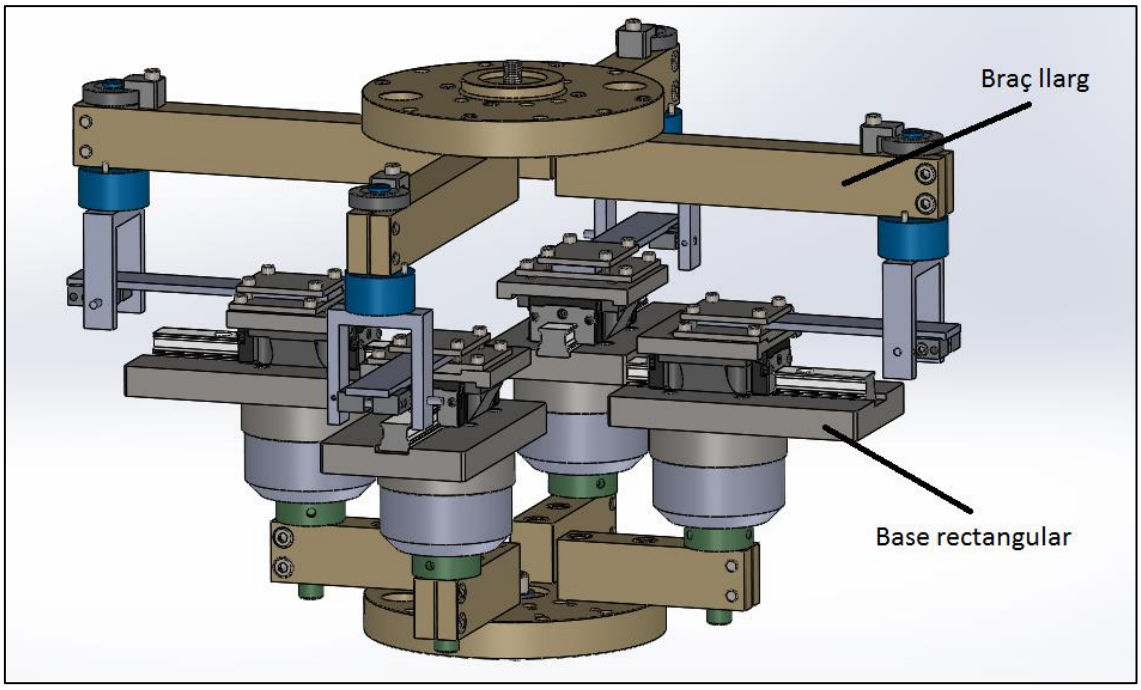


Imatge 1. Primera solució de l'utillatge per l'assaig a fatiga en mode II, C-ELS.

El problema principal que presenta aquest disseny serà durant l'adquisició de dades. La zona de moviment del carro-guia es troba descentrat respecte les cèl·lules de carrega, aquest fet pot provocar que el sistema tingui vibracions no desitjades que influeix en els resultats obtinguts. S'ha de rectificar el disseny de tal forma que el moviment del carro-guia estigui centrat respecte les cèl·lules.

Per fer possible que el carro es mogui dins un rang centrat respecte la cèl·lula, es decideix allargar el braç del subconjunt superior, d'aquesta forma girant 180º la col·locació del carro aquest es mourà dins del rang desitjat. Veure imatge 2.

Aquesta modificació també permet escurçar la base rectangular que fa de suport i fixació del carro-guia.



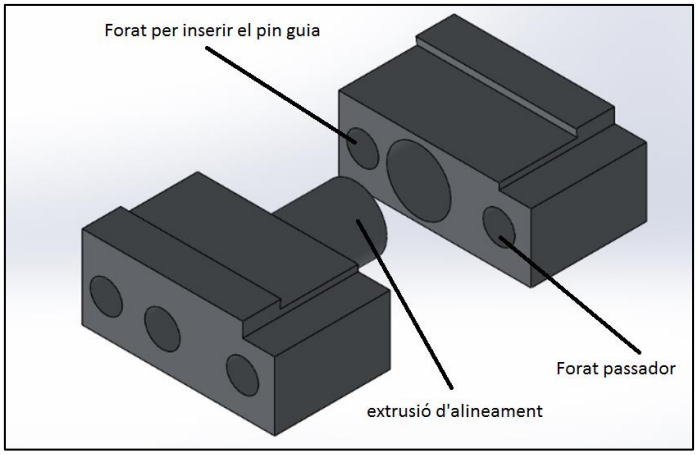
Imatge 2. Solució amb el carro centrat a la cèl·lula HBM de l'utillatge per l'assaig a fatiga en mode II, C-ELS

C2. Solucions preliminars de la subjecció de la proveta.

La subjecció de la proveta és també una part clau en el funcionament de l'utillatge donat que és l'element que està físicament en contacte amb la proveta d'assaig.

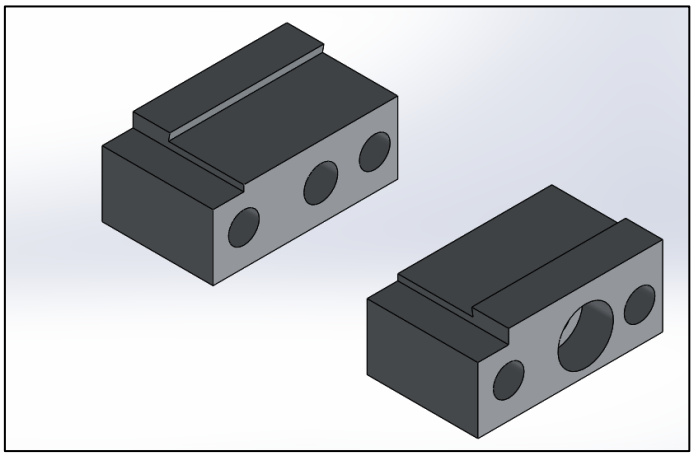
La alineació entre els dos blocs que ha de ser exacta, de tal manera que la força que cada bloc transmeti a la proveta siguin iguals. S'ha considerat dos dissenys de blocs de subjecció.

En el primer disseny la alineació entre els blocs es fa per tres punts. En els dos forats dels extrem s'inserten el pin guia i el passador, tots dos elements serveixen per alinear els blocs. El forat del mig a més de tenir un forat mètric per collar un cargol per pressionar els blocs contra la proveta aquest té una extrusió cilindrica que encaixa dins un forat de manera que també fa funció d'alineament.



Imatge 3. 1er disseny dels blocs de subjecció.

En el segon disseny s'ha optat per prescindir de la extrusió d'alineament central.



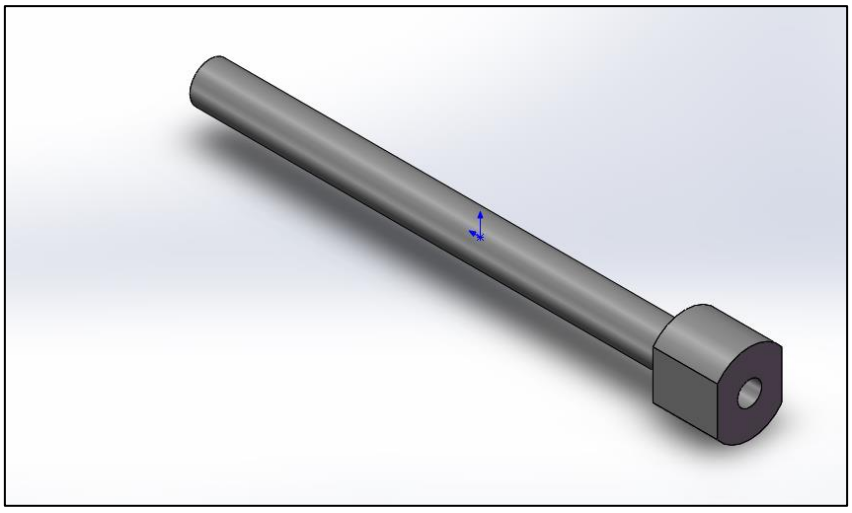
Imatge 4. 2on disseny dels blocs de subjecció.

Tenint en compte que les dimensions del blocs son petites 18x13x30mm, no es necessari fer tres punts d'alineament. Amb el pin i el passador un en cada extrem és suficient, a més s'estalvia temps de mecanització de la peça (se n'hauria de fabricar blocs). Per tant s'ha decidit per la segona opció com a subjecció de la proveta.

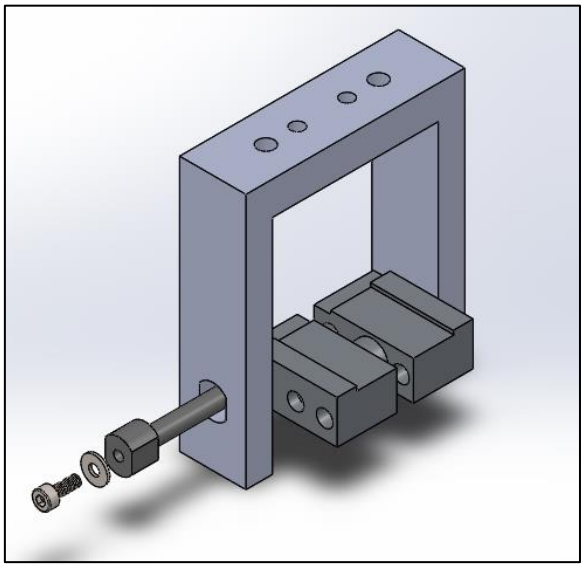
C3. Solucions preliminars del passador.

A l'hora de dissenyar el passador s'ha de tenir en compte que no el propi passador estigui fixe, és a dir, el passador no pot girar. Estudiarem dos dissenys per impedir el gir del passador.

En el primer disseny, el passador disposa d'una ranura recta que anirà encaixat dins d'un adaptador amb un forat de la mateixa mida. A més es mecanitza un forat mètric per collar un cargol i evitar el moviment axial.

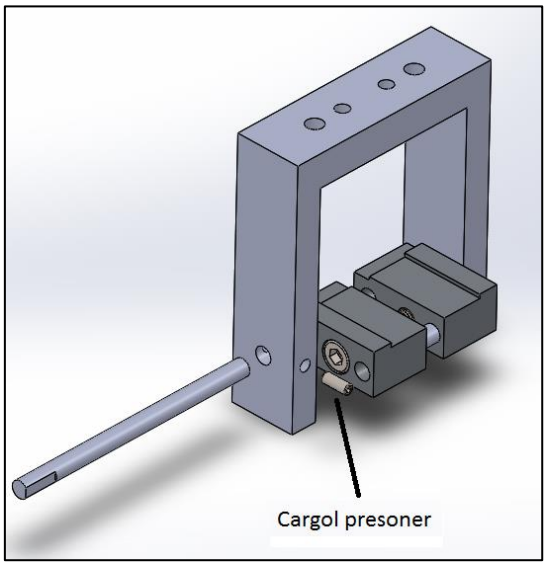


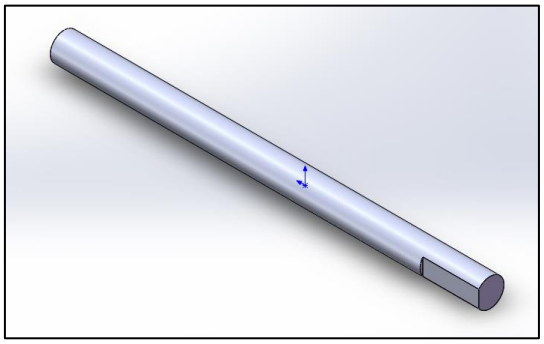
Imatge 5. 1er disseny del passador.



Imatge 6. Muntatge del 1er disseny del passador.

En el sego disseny, es fa una ranura recta a un cilindre calibrat, aquest passador s'introdueix dins l'adaptador i amb un cargol presoner es colla fins fer contacte amb la part plana del passador, així s'impedeix el gir del passador la força de pressió del cargol és suficient per evitar moviment axial del cilindre donat que l'utillatge no rep forces axial.





Imatge 7. 2on disseny del passador.

En aquest cas el segon disseny compleix la mateixa funció però amb un procés de mecanització molt més senzilla. Per tant s'adaptarà aquest disseny per l'utillatge a fabricar.