

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Títol:** Disseny i simulació mitjançant anàlisi d'elements finits d'un quadre de bicicleta

**Document:** 1. Memòria i annexos

**Alumne:** Marc Gispert Bos

**Tutor:** Narcís Gascons Clarió

**Departament:** Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

**Àrea:** Enginyeria Mecànica

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

**ÍNDEX**

1. INTRODUCCIÓ .....	4
1.1. Antecedents.....	4
1.2. Objecte .....	4
1.3. Abast .....	4
1.4. Especificacions.....	4
1.4.1. Especificacions principals.....	4
1.4.2. Especificacions secundàries.....	5
2. INTRODUCCIÓ A LA BICICLETA DE MUNTANYA.....	6
2.1 Història .....	6
2.2 Modalitats .....	8
2.3 Parts de la bicicleta de muntanya .....	11
3. DISSENY.....	12
3.1. Descripció de la solució .....	12
3.2. Geometria.....	12
3.3. Material.....	15
3.4. Plantejament de la simulació .....	16
3.4.1. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa) .....	16
3.4.2. Assaig d'impacte (caiguda del quadre) .....	19
3.4.3. Assaig a fatiga amb forces de pedaleig.....	23
3.4.4. Assaig a fatiga per forces horitzontals.....	25
3.4.5. Assaig a fatiga amb una força vertical.....	27
3.4.6. Malla utilitzada .....	28
3.5. Anàlisi dels resultats .....	31
3.5.1. Assaig falsa forquilla .....	31
3.5.2. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa) .....	33
3.5.3. Assaig d'impacte (caiguda del quadre) .....	38
3.5.4. Assaig a fatiga amb forces de pedaleig.....	41
3.5.5. Assaig a fatiga per forces horitzontals.....	52
3.5.6. Assaig a fatiga amb una força vertical.....	60
4. RESUM DEL PRESSUPOST.....	66
5. CONCLUSIONS .....	67
6. RELACIÓ DE DOCUMENTS .....	69
7. BIBLIOGRAFIA.....	70
8. GLOSSARI .....	72
9. AGRAIMENTS .....	73
ANNEXOS .....	74

A.	Estudi de mercat.....	74
B.	Càlculs.....	84
B.1.	Assaig d'impacte (caiguda d'una massa).....	84
B.2.	Assaig d'impacte (caiguda del quadre).....	84
B.3.	Assaig a fatiga amb forces de pedaleig .....	88

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Antecedents

En els últims anys la tendència és dissenyar quadres de bicicleta cada cop més lleugers. S'ha de tenir en compte que encara que la tendència sigui el mínim pes, aquests quadres han de garantir unes bones prestacions mecàniques. És aquí on són de gran ajut els programes de simulació d'elements finits, ja que permeten tenir una idea aproximada del comportament que tindrà el quadre sense haver de fabricar-lo i poder modificar paràmetres sobre la marxa. Això es tradueix en un estalvi de temps i diners.

## 1.2. Objecte

L'objecte d'aquest treball és dissenyar i dimensionar un quadre de bicicleta de muntanya i simular el seu comportament mitjançant l'anàlisi d'elements finits.

## 1.3. Abast

Es definirà la geometria del quadre (tenint en compte l'alçada del ciclista i l'ús al que està destinat el quadre), les dimensions i el material o materials que s'utilitzaran.

Per tal de poder dissenyar el quadre de bicicleta s'utilitzarà el programari adient (software de disseny CAD en 3D i software d'elements finits).

## 1.4. Especificacions

### 1.4.1. Especificacions principals

- El quadre ha de complir els requeriments de la norma UNE-EN ISO 4210-2:2015 quan es porten a terme els assajos establerts a la norma UNE-EN ISO 4210-6:2015.
- Les mesures del quadre seran les adequades per a una talla L, que aniria destinada per a ciclistes d'entre 1,75 i 1,85 metres d'alçada aprox.
- El quadre ha d'estar dissenyat de manera que permeti utilitzar els components normalitzats que es troben al mercat, per exemple: la tija del seient, els rodaments, etc.

**1.4.2. Especificacions secundàries**

- El quadre ha de tenir un pes menor de 2 kg.
- La distància entre els eixos de les rodes ha d'estar compresa entre 100 i 120 cm.

## 2. INTRODUCCIÓ A LA BICICLETA DE MUNTANYA

### 2.1 Història

La bicicleta de muntanya va sorgir a finals dels anys 70, encara que els seus orígens es remunten a l'any 1933 quan Ignaz Schwinn va idear una bicicleta robusta que permetés la seva conducció per camins i muntanyes. Aquesta bicicleta era la Schwinn Excelsior (veure Figura 1), que va ser molt popular als Estats Units gràcies als repartidors de diaris.



*Figura 1. Schwinn Excelsior*

Va ser al 1970 quan es va iniciar la moda d'utilitzar la bicicleta en camins de terra. Van sorgir diversos grups de ciclistes que practicaven aquesta nova modalitat. Un d'aquests grup era l'anomenat "The Canyon Gang", representats per John York, Tom Slifka, Robert i Kim Kraft, que es dedicaven a realitzar carreres muntanya avall a l'estat de Califòrnia. Utilitzaven bicicletes de bicicross, amb unes rodes molt estretes. Va ser idea de Joe Breeze, Charlie Kelly, Gary Fisher i Tom Ritchey col·locar rodes més amples a les seves Schwinn Excelsior per poder controlar millor la bicicleta i poder anar més ràpid.

Cap a mitjans de la dècada dels setanta alguns aficionats van crear competicions de descens, sobretot al nord de San Francisco. Va ser llavors quan es van redescobrir les antigues Schwinn Excelsior, que anaven molt bé per competicions d'aquest estil.

Gary Fisher, un dels pioners del MTB, va modificar la seva Schwinn posant-li canvis de velocitats per poder utilitzar-la també a les pujades. Joe Breeze va entendre que el motiu de què les Schwinn anessin bé era per la geometria del quadre. Això el va portar a construir noves bicicletes amb quadres de geometria similar però equipats més adequadament per a la muntanya.

Va ser cap al 1981 quan Mike Sinyard, cofundador de la marca Specialized, crea la "Stumpjumper", la primera bicicleta de muntanya de producció. A partir d'aquest moment van anar sorgint més marques.

Al 1987 Trek va revolucionar el món de la bicicleta de muntanya incorporant la primera forquilla de suspensió, i tres anys més tard va crear les primers bicicletes de muntanya de doble suspensió del mercat. Aquesta va ser una època de moltes innovacions ja que, per exemple, Gary Fisher alleugerava el pes dels antics quadres utilitzant l'alumini. Més endavant (1991) la marca Yeti va començar a fabricar els primers quadres fets de titani, un material més resistent i lleuger que l'alumini, però també molt més car.

El món de la bicicleta de muntanya no ha parat d'evolucionar. En els últims anys s'han anat introduint nous materials, nous diàmetres de rodes, noves tecnologies a les suspensions i als canvis de marxa, etc.

## 2.2 Modalitats

El ciclisme de muntanya és molt variat. Existeixen bicicletes adequades per a cada tipus de terreny. De manera molt simplificada es podria considerar que existeixen tres modalitats:

- *XC o Cross Country* → És la modalitat més popular. Aquesta modalitat es podria dividir en la vessant competitiva o la vessant més lúdica.

Les bicicletes de XC enfocades a la competició són molt lleugeres i tenen unes geometries agressives, ja que estan pensades per anar el més ràpid possible encara que es perdi comoditat. La comoditat en aquest cas no és primordial ja que les competicions difícilment superen les dues hores de durada. Es pot observar un exemple de bicicleta XC de competició a la Figura 2, amb el model més alt de gama de la marca Scott. El quadre que es simularà en aquest treball és un quadre destinat a aquesta modalitat.



*Figura 2. Bicicleta XC competició (Scott Scale)*

Per la resta d'usuaris, aquesta modalitat és amb el que es pensa quan es parla de ciclisme de muntanya, sobretot per terrenys sense gaires complicacions. Un exemple de bicicleta XC sense pretensions de participar en competicions seria la bicicleta de la Figura 3.



*Figura 3. Bicicleta XC vessant més lúdica (Scott Aspect)*

Se sol practicar amb bicicletes rígides (només amb suspensió davantera) o amb bicicletes de doble suspensió amb recorreguts de fins a 100 mm.

- *Enduro* → Seria la disciplina pròpia de les bicicletes de doble suspensió amb recorreguts entre 100 i 160 mm aprox. Es caracteritza per transcórrer per camins molt tècnics, trialeres, salts varis, ...

Una competició d'enduro consisteix en un recorregut on hi ha diversos trams de baixada cronometrats. Els trams d'enllaç no es cronometren però s'ha de tenir present que cada participant té una hora de sortida per cada tram cronometrat i si no s'arriba a temps a l'inici de cada tram es perd un temps molt valuós.

Un exemple de bicicleta per Enduro seria la de la Figura 4.



*Figura 4. Bicicleta Enduro (Scott Genius)*

- *Descens o DH* → Ens trobem davant de bicicletes reforçades de gran recorregut (180-220 mm) pensades principalment per baixar una muntanya el més ràpid possible. Amb aquestes bicicletes costa molt pedalar, és per això que en les competicions de descens es pugen les bicicletes a l'inici de la baixada amb camions, furgonetes o telecabines (en el cas de ser en una estació d'esquí) i la baixada es fa amb bicicleta.

Un exemple de bicicleta de descens seria la de la Figura 5.



*Figura 5. Bicicleta de descens (Scott Gambler)*

Aquesta podria ser una classificació molt simplificada de les diferents modalitats que ens podem trobar en el ciclisme de muntanya.

## 2.3 Parts de la bicicleta de muntanya

Les parts principals d'una bicicleta de muntanya es poden observar en la Figura 6.



Figura 6. Parts principals bicicleta

Les parts d'un quadre de bicicleta es poden observar en la Figura 7.



Figura 7. Parts d'un quadre

### 3. DISSENY

#### 3.1. Descripció de la solució

El quadre que s'ha dissenyat és un quadre de bicicleta de muntanya per a la categoria de Rally (XC) en la modalitat de competició. Aquest quadre està dissenyat per anar amb rodes de 29 polzades, tal com marquen els estàndards actuals.

#### 3.2. Geometria

Encara que les formes finals dels diferents quadres que hi ha al mercat siguin diferents, realment les mides principals a igualtat de talla són molt similars. Això és degut a què les marques han fet molts estudis per trobar la posició òptima del ciclista sobre la bicicleta per obtenir el màxim rendiment i tots han arribat a conclusions semblants, és a dir, que totes les marques tenen mides semblants.

Per tal d'escollir la geometria adequada per al disseny del quadre s'ha dut a terme un estudi de mercat. S'han comparat les dades d'una sèrie de quadres i finalment s'ha arribat a la geometria escollida fent la mitjana entre totes les marques ja que hi havia poca dispersió entre els valors. Aquest estudi es pot trobar a l'Annex A.

Les dimensions del quadre correspondrien a una talla L, que seria adequada per una persona entre 1,75 i 1,85 m.

Les mides que es necessiten per definir la geometria d'un quadre de bicicleta són les que es poden veure a la Figura 8 amb la seva abreviació provinent de l'anglès.

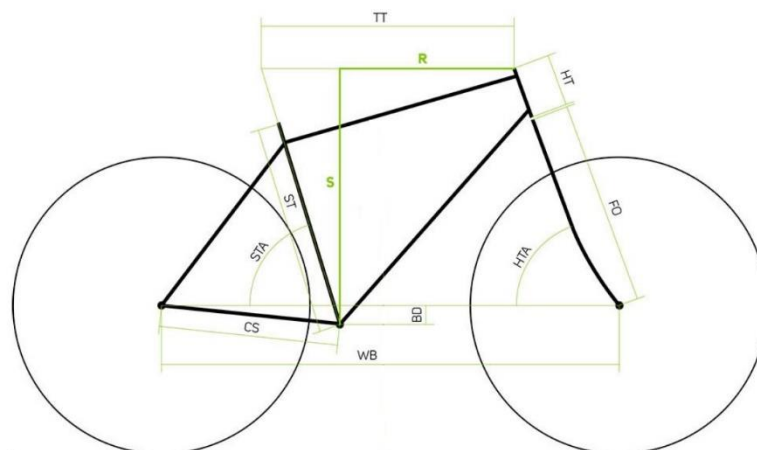


Figura 8. Mides necessàries per definir la geometria

Les mides principals del quadre es poden trobar a la Taula 1.

*Taula 1. Mides principals del quadre*

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	70,23°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	72,93°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	621,5 mm
Tub direcció	Head tube	HT	112,5 mm
Tub seient	Seat tube	ST	481,4 mm
Beines	Chain stay	CS	435,9 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1115,7 mm
Altura del quadre	Stack	S	619,6 mm
Abast del quadre	Reach	R	430,9 mm
Longitud forquilla	Fork length	FO	502,09 mm
Offset del pedaler	Bottom bracket drop	BD	60 mm

A continuació s'explicarà com influeixen en el comportament de la bicicleta algunes de dimensions principals:

- *Angle de la direcció* → És la inclinació (en graus) del tub de la direcció i és el que configura la inclinació de la forquilla respecte a l'eix horitzontal de les rodes. Aquesta mida farà que la bicicleta baixi o pugi millor o que sigui més nerviosa o més lenta. Com més gran sigui l'angle la direcció estarà més tancada i la forquilla atacarà el terreny de manera més recte, que significarà que pujarà millor però perjudicarà a les baixades. Com més pròxim a l'angle recte (90°) sigui aquest angle més nerviosa serà la bicicleta.
- *Angle del tub del seient* → L'angle del tub del seient desplaça la posició del centre de gravetat de la bicicleta. Un centre de gravetat més avançat situa el ciclista més pròxim al centre de l'eix del pedaler i fa que la roda davantera rebi un major pes, que seria una geometria escaladora. Un centre de gravetat més endarrerit proporciona més tracció a la roda de darrere, afavoreix el control de la bicicleta en les baixades però per contra perjudica en les pujades.
- *Longitud entre eixos* → Aquesta mesura es pren d'eix a eix de les rodes. Com més curta sigui la bicicleta més àgilment es mourà però a alta velocitat serà inestable i poc segura. Una bicicleta amb molta distància entre eixos mantindrà fàcilment la línia recta però serà més complicat fer-la girar en corbes tancades.

- *Tub superior efectiu* → Es mesura des de l'eix del tub del seient fins a l'eix del tub de la direcció utilitzant una línia horitzontal virtual (en cas que el tub superior no sigui totalment horitzontal). Com més llarg sigui aquest tub més tombat anirà el ciclista, el cos es col·locarà més paral·lel al terra i es millorarà el repartiment de masses. S'ha de tenir en compte que un tub massa llarg pot arribar a ser incòmode ja que provocarà que el coll del ciclista hagi d'estar més forçat per mantenir la vista al traçat.

S'ha de tenir present que hi haurà certes mides com pot ser el diàmetre interior del tub del seient, els diàmetres interiors dels extrems del tub de la direcció, el diàmetre interior i l'amplada del tub del pedaler, etc. que han de ser mides estàndard ja que si hauran de muntar components que es troben al mercat.

Quan es té la geometria clara és qüestió de pensar en les formes que haurà de tenir cada tub i començar el procés de dibuixar el quadre mitjançant el programa Solidworks.

El quadre dissenyat té un espessor de paret de 1,40 mm amb uns reforços al tub de la direcció, al tub del pedaler i a la part superior del tub del seient. A més a més, els suports de l'eix de la roda de darrere són massissos. El pes total del quadre és de 1,83 kg.

### 3.3. Material

El material que s'ha utilitzat en aquest quadre és un aliatge d'alumini i zinc, en concret l'aliatge 7005-T6, molt utilitzat en la fabricació de quadres de bicicleta. Alguns dels principals fabricants dels tubs d'aquest material pels quadres de bicicleta són Columbus, Nova, ...

La composició química de l'alumini 7005-T6 es troba a la Taula 2.

*Taula 2. Composició alumini 7005-T6*

Component	Percentatge
Alumini (Al)	91 -94,7 %
Crom (Cr)	0,06 - 0,20 %
Coure (Cu)	<= 0,10 %
Ferro (Fe)	<= 0,40 %
Magnesi (Mg)	1,0 - 1,8 %
Manganès (Mn)	0,20 - 0,70 %
Silici (Si)	<= 0,35 %
Titani (Ti)	0,01 - 0,06 %
Zinc (Zn)	4,0 - 5,0 %
Zirconi (Zr)	0,08 - 0,20 %
Altres	<= 0,15 %

Les propietats mecàniques es troben a la Taula 3.

*Taula 3. Propietats mecàniques alumini 7005-T6*

Tensile Strength, Ultimate	350 MPa
Tensile Strength, Yield	290 MPa
Modulus of Elasticity	72 GPa
Poisson's Ratio	0,33
Shear Modulus	26,9 GPa
Shear Strength	215 MPa
Hardness, Brinell	94

### 3.4. Plantejament de la simulació

Es simularà el comportament del quadre pels cinc assajos de la norma UNE-EN ISO 4210-6:2015. A continuació es farà una explicació de cada assaig.

#### 3.4.1. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa)

Aquest assaig consisteix a col·locar el quadre i la forquilla de forma vertical tal com es mostra en la Figura 9 i deixar anar una massa de 22,5 kg des d'una alçada de 360 mm i quan s'aturi mesurar la nova distància entre eixos. La deformació permanent, que és la diferència entre la distància entre eixos inicial i la distància entre eixos després de l'assaig, no hauria de superar els 10 mm.

Medidas en milímetros

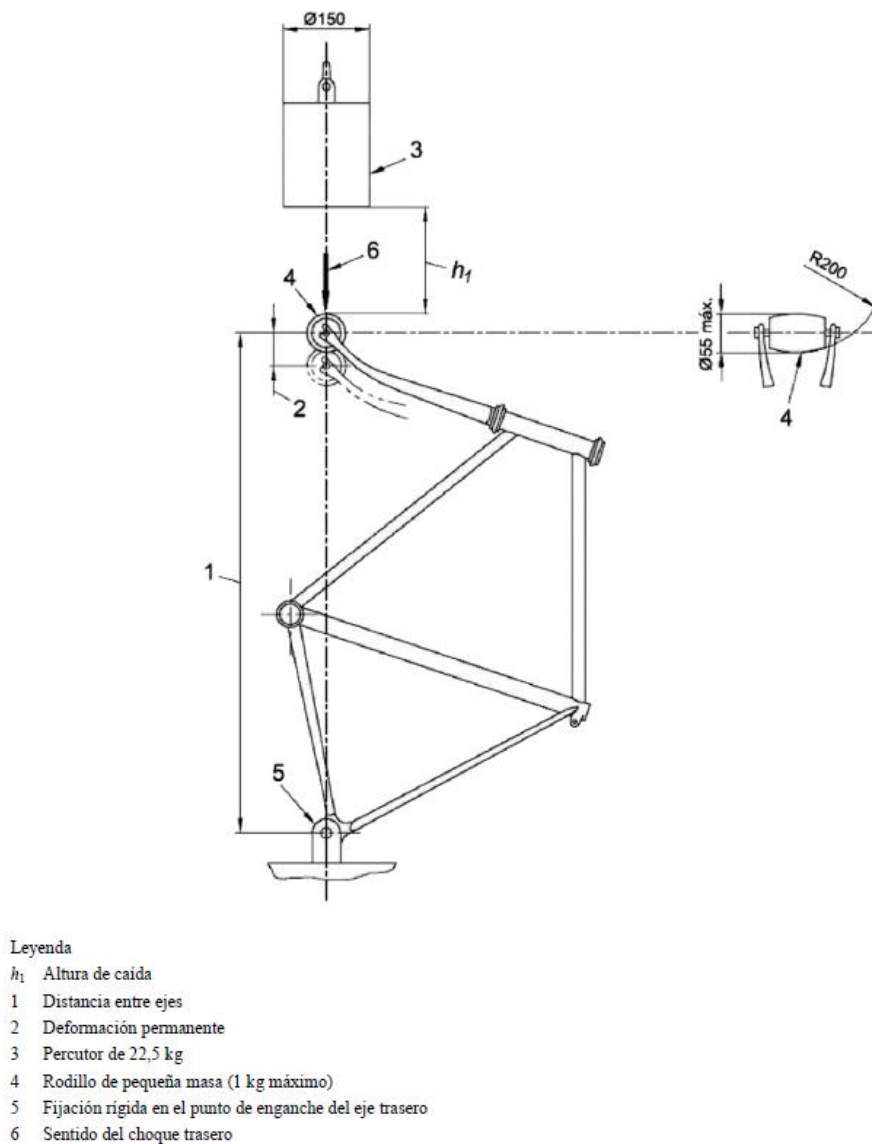


Figura 9. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa)

La fixació del quadre es porta a terme restringint el moviment dels suports dels eixos de les rodes (veure Figura 10) tal com s'indica a la Taula 4.

Taula 4. Graus de llibertat restringits

Suport	Graus de llibertat restringits					
R <sub>1</sub>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
R <sub>2</sub>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
F <sub>1</sub>		U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>			
F <sub>2</sub>		U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>			

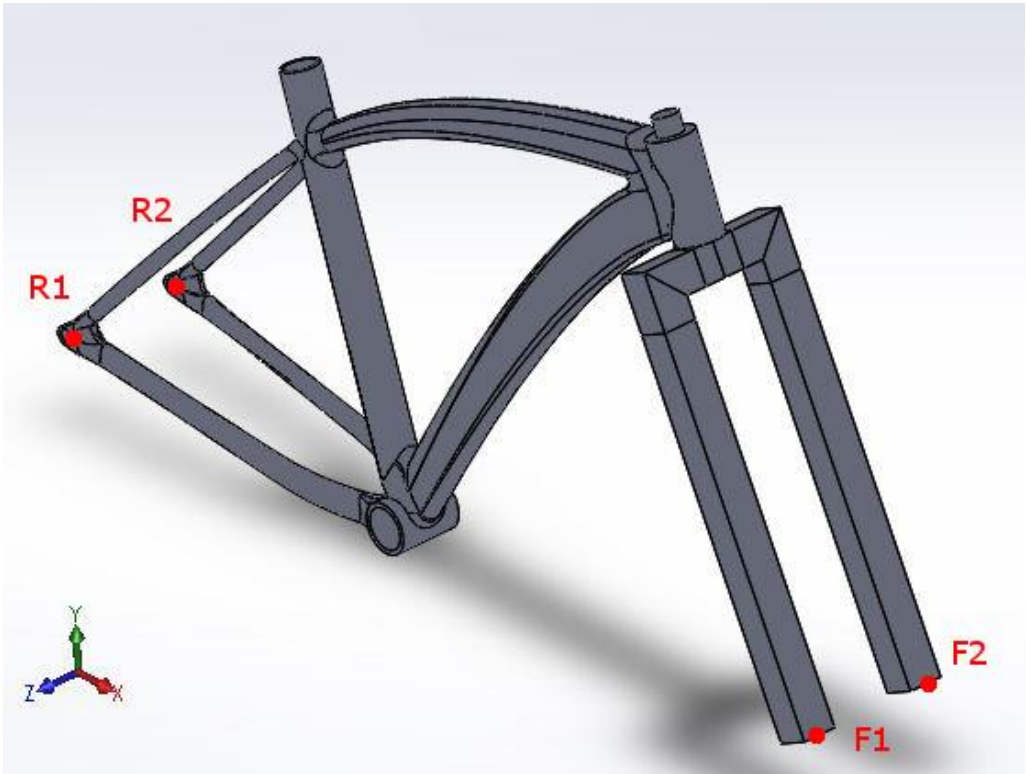


Figura 10. Punts de fixació test caiguda de massa

Per poder fer aquesta simulació s'ha de buscar la força d'impacte que s'aplica als suports de la roda davantera (F<sub>1</sub> i F<sub>2</sub>). La direcció i sentit d'aplicació de les forces d'impacte es presenten en la Taula 5.

Taula 5. Aplicació de les forces

Suport	Força
F <sub>1</sub>	-F <sub>x</sub>
F <sub>2</sub>	-F <sub>x</sub>

El valor de la força d'impacte es calcula segons el següent procediment:

- Primer s'ha de buscar la rigidesa  $K$  del quadre davant d'una càrrega d'impacte com la que descriu la norma. Per a fer-ho s'aplica una càrrega unitària en el mateix lloc, direcció i sentit on s'aplica la força d'impacte amb les condicions de la taula 4 (pàgina anterior).
- Quan tenim el desplaçament  $U$  en el punt d'aplicació de la força unitària es pot calcular la rigidesa mitjançant l'Equació 1.

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{F_u}{U} \quad (\text{Eq. 1})$$

- Un cop coneixem la rigidesa es tracta d'igualar l'energia potencial produïda per la massa de 22,5 kg (veure Figura 11) amb l'energia elàstica que emmagatzema el quadre utilitzant l'Equació 2.

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

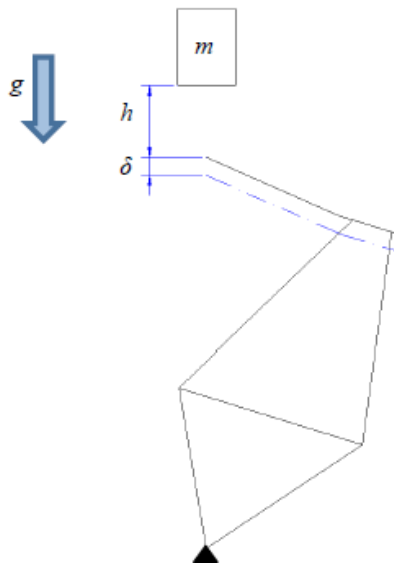


Figura 11. Representació de l'impacte

- Quan es troba la deformació  $\delta$ , mitjançant l'Equació 3 s'obté la força estàtica equivalent a la càrrega d'impacte de la norma. Aquesta força estàtica equivalent és la que s'haurà d'aplicar als punts  $F_1$  i  $F_2$  (la meitat de la càrrega a cada punt).

$$f = K \cdot \delta \quad (\text{Eq. 3})$$

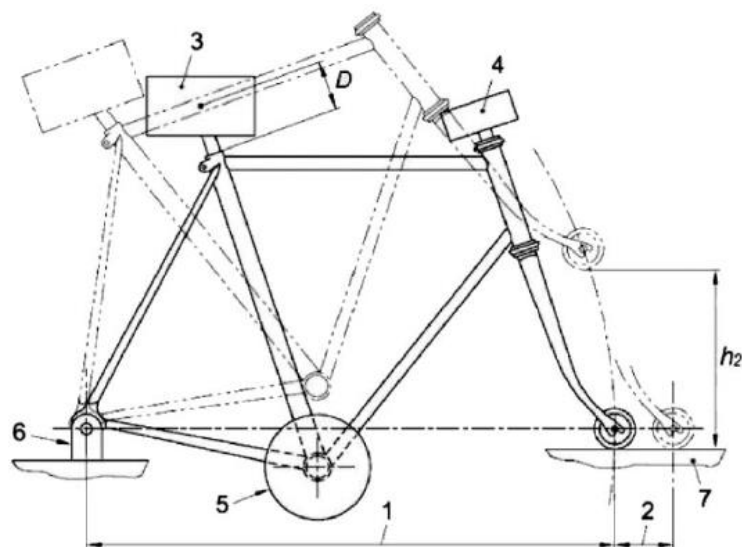
Un cop fets els càlculs necessaris es troba que la força d'impacte a aplicar serà de 17340,12 N, és a dir, 8670,06 N a cada extrem de la forquilla.

Aquests càlculs es poden trobar a l'annex B.

### 3.4.2. Assaig d'impacte (caiguda del quadre)

Per dur a terme aquest assaig s'ha de fixar el conjunt quadre-forquilla mitjançant els punts de fixació de l'eix de darrere de forma que pugui girar en el pla vertical. Es col·loca una massa  $M_1$  a la tija del seient amb el centre de gravetat a una distància  $D$  ( $=75\text{mm}$ ) al llarg de l'eix de la tija des del seu punt d'introducció, i es fixen unes masses  $M_2$  i  $M_3$  a la part superior del tub de la forquilla i de la caixa del pedaler respectivament, tal com es mostra a la Figura 12. La massa  $M_1$  és de 30 kg,  $M_2$  és de 10 kg i  $M_3$  és de 50 kg.

Es fa girar el conjunt al voltant de l'eix de darrere fins que la distància entre el final de la forquilla i la superfície sigui de 300 mm. A continuació es deixa anar el conjunt i es mesura la nova distància entre eixos. La deformació permanent, que és la diferència entre la distància entre eixos inicial i la distància entre eixos després de l'assaig, no hauria de superar els 60 mm.



#### Leyenda

1	Distancia entre ejes	6	Fijación rígida en el punto de enganxe del eje trasero
2	Deformación permanente	7	Yunque de acero
3	Masa 1 ( $M_1$ )	$D$	Distancia al centro de gravedad (75 mm)
4	Masa 2 ( $M_2$ )	$h_2$	Altura de caída
5	Masa 3 ( $M_3$ )		

Figura 12. Assaig d'impacte (caiguda del quadre)

A la Taula 6 es presenta la relació entre cada suport amb els graus de llibertat que són restringits.

Taula 6. Graus de llibertat restringits

Suport	Graus de llibertat restringits					
<b>R<sub>1</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
<b>R<sub>2</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
<b>F<sub>1</sub></b>		U <sub>y</sub>				
<b>F<sub>2</sub></b>		U <sub>y</sub>				

Les forces d'impacte es tornen a calcular per energies. S'haurà d'aplicar per separat una força unitària vertical i de sentit negatiu a cada un dels punts on hi hauria d'anar una massa. Ens interessa obtenir el desplaçament amb la mateixa direcció que la força unitària en el lloc on s'ha aplicat la força. A continuació es pot trobar la rigidesa per a cada una de les forces (Equació 4). Amb la rigidesa es troba el desplaçament que produiria la massa (Equació 5) i tot seguit s'obté la component vertical (y) de la força equivalent aplicant l'Equació 6.

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{F_u}{U} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$f_y = K \cdot \delta \quad (\text{Eq. 6})$$

La component x de la força equivalent s'obté a través del càlcul de la resultant de les dues components. Per trobar la resultant primer s'haurà de saber l'angle que forma la perpendicular de la línia que va des de l'eix de darrere fins al punt d'aplicació de la força i la direcció y.

En el cas de la força de la tija del seient, la resultant es troba dividint la component y de la força i el cosinus de l'angle  $\theta$ , format per la perpendicular de  $\vec{os}$  i la direcció y (veure Figura

13). L'equació per obtenir la resultant de la força és l'Equació 7 i per trobar la component x s'aplica l'Equació 8.

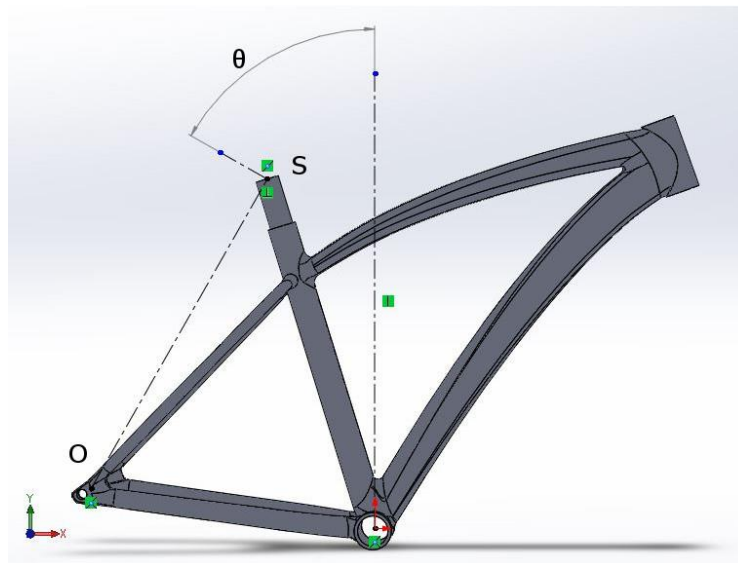


Figura 13. Representació angle  $\theta$  (força tija seient)

$$f = \frac{f_y}{\cos \theta} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$f_x = f \cdot \sin \theta \quad (\text{Eq. 8})$$

Per la força del tub de la direcció, l'angle  $\theta$  és l'angle format per la perpendicular de la recta  $\overline{OD}$  i la direcció y. En la Figura 14 es pot observar la representació d'aquest angle.

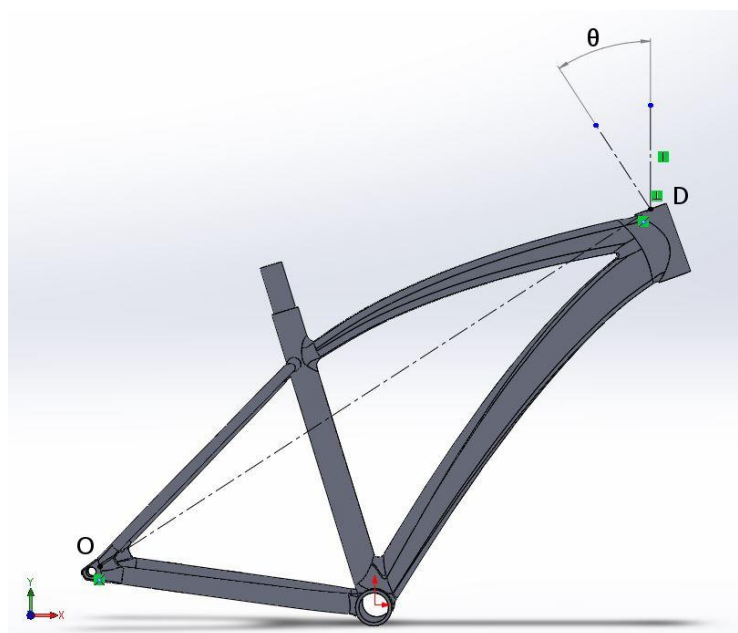


Figura 14. Representació de l'angle  $\theta$  (força tub direcció)

Aplicant les equacions 7 i 8 (vistes anteriorment) ja es pot obtenir la resultant de la força i la component  $x$  de la força equivalent que s'haurà d'aplicar al tub de la direcció.

Per trobar la força equivalent al pedaler es procedeix igual que en els casos anteriors. En aquest cas l'angle  $\theta$  serà el que està representat a la Figura 15.

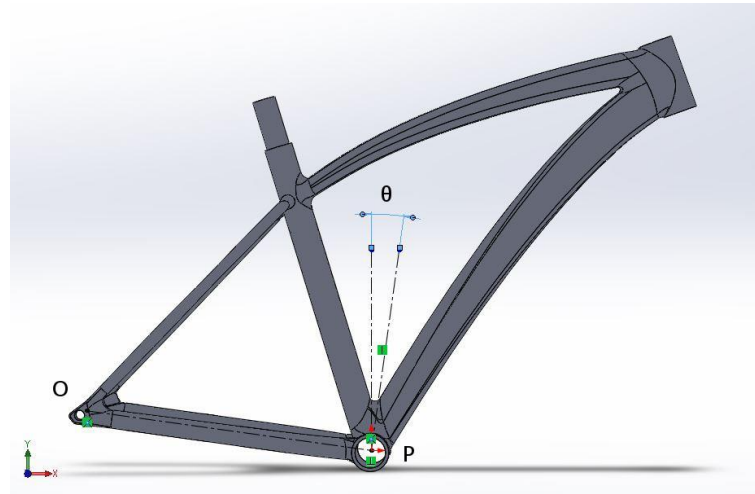


Figura 15. Representació angle  $\theta$  (força pedaler)

A la Taula 7 es presenta les components que pren cada força amb la direcció i sentit corresponent i el seu valor.

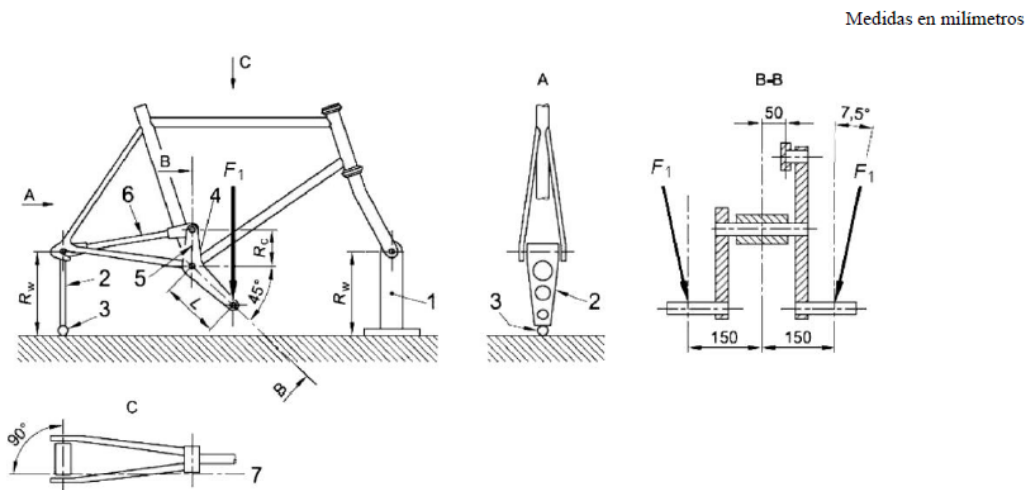
Taula 7. Aplicació de les forces

Punt d'aplicació	Força	Valor
<b>S</b>	$f_x$	25752,06 N
<b>S</b>	$f_y$	-14647,05 N
<b>D</b>	$f_x$	18950,23 N
<b>D</b>	$f_y$	-27738,39 N
<b>P</b>	$f_x$	-678,18 N
<b>P</b>	$f_y$	-4881,11 N

Tots aquests càlculs es poden trobar a l'annex B.

### 3.4.3. Assaig a fatiga amb forces de pedaleig

Aquest assaig consisteix a sotmetre cada eix de pedal a una força repetida de 1200 N en un punt situat a 150 mm del quadre en un pla transversal vertical i amb una inclinació de  $7,5^\circ$  respecte al pla longitudinal del quadre tal com s'indica en la Figura 16. Primer s'aplica la força en un costat del quadre i després a l'altre. S'apliquen les forces d'assaig durant 100000 cicles d'assaig, sabent que un cicle d'assaig consisteix a aplicar i després retirar les dues forces d'assaig.



### Leyenda

- |          |  |
|----------|--|
| $R_w$    | Altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical |
| $R_{cL}$ | Longitud del brazo vertical (75 mm)                        |
| $L$      | Longitud de la biela (175 mm)                              |
| 1        | Montaje rígido   |
| 2        | Unión vertical   |
| 3        | Rótula   |
| 4        | Montaje adaptador  |
| 5        | Brazo vertical   |
| 6        | Tirante  |
| 7        | Eje del tirante  |

*Figura 16. Assaig de fatiga amb forces de pedaleig*

Per tal de simular aquest assaig es faran algunes simplificacions:

- Eliminar la peça que substitueix la cadena de la bicicleta (peça 6 de la Figura 16).
- Es simularà cada costat del quadre per separat i es compararan els resultats.

La fixació del quadre es porta a terme restringint els extrems  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $F_1$  i  $F_2$  (Figura 17) tal com indica la Taula 8.

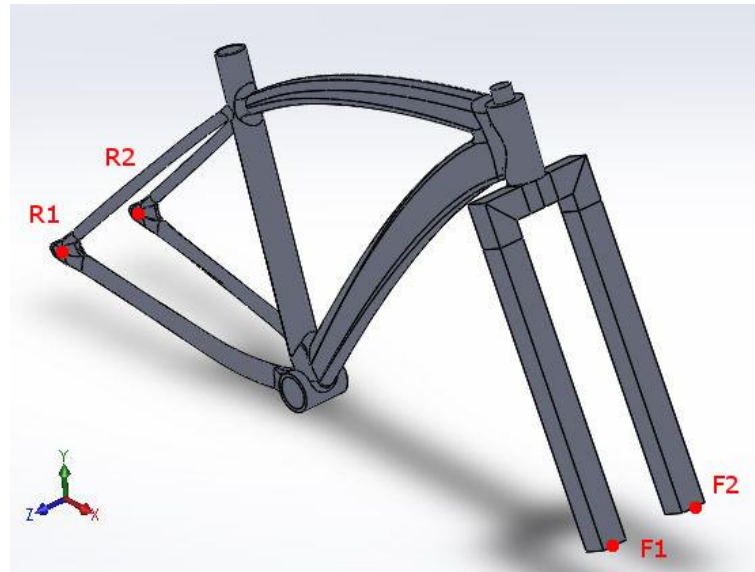


Figura 17. Punts de fixació assaig forces pedaleig

Taula 8. Graus de llibertat restringits

Suport	Graus de llibertat restringits					
<b>R<sub>1</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
<b>R<sub>2</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
<b>F<sub>1</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	
<b>F<sub>2</sub></b>	U <sub>x</sub>	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>	θ <sub>x</sub>	θ <sub>y</sub>	

Els punts on s'aplicaran les forces de pedaleig seran B<sub>1</sub> i B<sub>2</sub>, segons el costat que correspongui. Aquests punts es poden observar en la Figura 18.

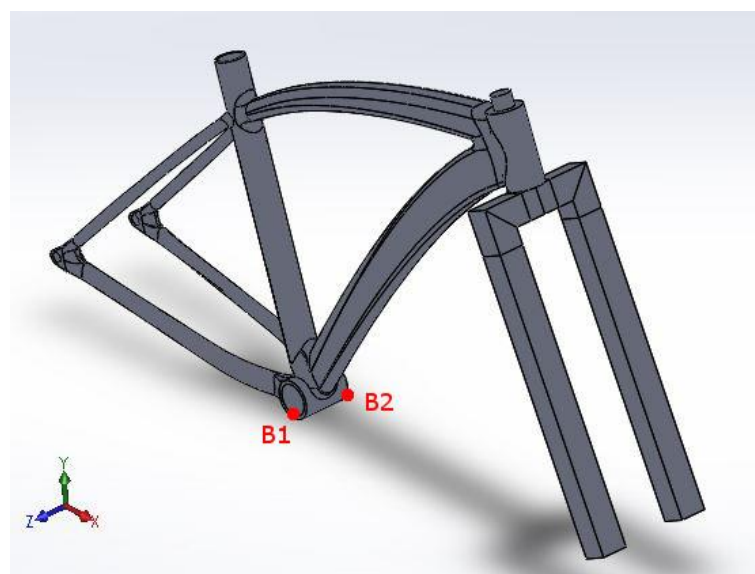


Figura 18. Punts d'aplicació de les forces

En la Taula 9 es presenta les components que pren la força i el moment amb els seus valors.

*Taula 9. Aplicació de les forces*

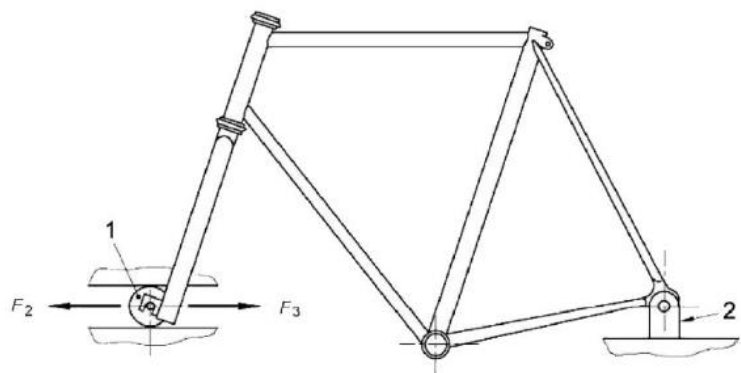
Punt d'aplicació	Força / Moment	Valor
<b>B1</b>	$F_y$	-1189,7 N
<b>B1</b>	$F_z$	-156,63 N
<b>B1</b>	$M_x$	154413 N·mm
<b>B1</b>	$M_y$	19382 N·mm
<b>B1</b>	$M_z$	-147218 N·mm
<b>B2</b>	$F_y$	-1189,7 N
<b>B2</b>	$F_z$	156,63 N
<b>B2</b>	$M_x$	-154413 N·mm
<b>B2</b>	$M_y$	-19382 N·mm
<b>B2</b>	$M_z$	-147218 N·mm

Els càlculs es poden trobar a l'annex B.

El quadre no pot presentar fissures ni fractures visibles al assajar segons el mètode descrit anteriorment.

#### 3.4.4. Assaig a fatiga per forces horitzontals

S'instal·la el quadre en la seva posició normal fixant-lo pels suports de l'eix de darrere de manera que no estigui limitada la seva rotació tal com es mostra a la Figura 19. Es verifica que els centres dels eixos de davant i de darrere estiguin alineats en el pla horitzontal. L'eix davanter pot desplaçar-se en la direcció x.



- Leyenda
- 1 Rodillo guiado que puede girar libremente
  - 2 Montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Figura 19. Assaig de fatiga per forces horitzontals

La fixació del quadre es porta a terme restringint els extrems  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $F_1$  i  $F_2$  (Figura 20) tal com indica la Taula 10.

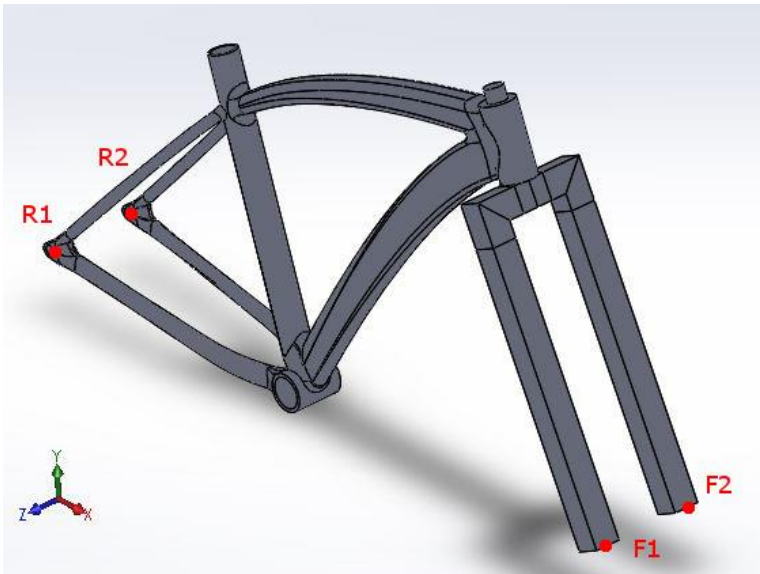


Figura 20. Punts de fixació assaig forces horitzontals

Taula 10. Graus de llibertat restringits

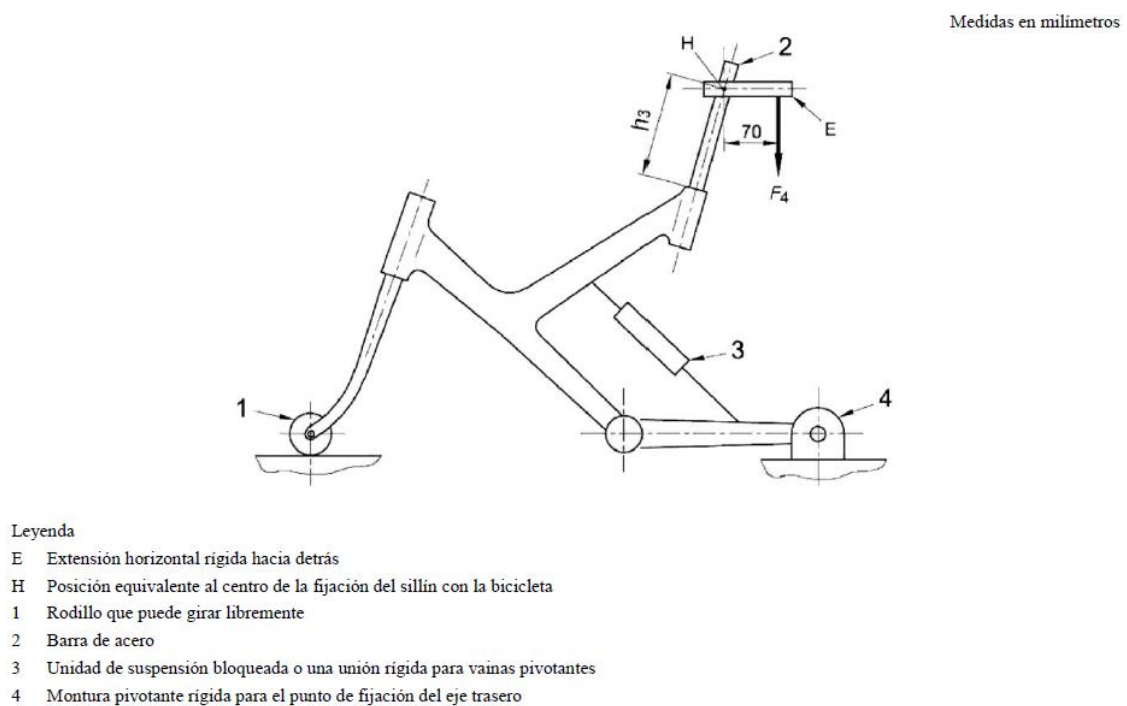
Suport	Graus de llibertat restringits					
$R_1$	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	
$R_2$	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	
$F_1$		$U_y$	$U_z$			
$F_2$		$U_y$	$U_z$			

S'apliquen cicles de forces dinàmiques horitzontals de 1200 N ( $F_2$ ) cap endavant i de 600 N ( $F_3$ ) cap endarrere als extrems de la forquilla durant 50000 cicles, amb la forquilla bloquejada segons la direcció vertical, però amb llibertat per desplaçar-se en la direcció longitudinal sota els efectes de les forces aplicades (veure Figura 19 a la pàgina anterior).

El quadre no pot presentar fissures ni fractures visibles al assajar segons el mètode descrit anteriorment.

### 3.4.5. Assaig a fatiga amb una força vertical

S'instal·la el quadre en la seva posició normal fixant-lo pels suports de l'eix de darrere de manera que no estigui limitada la seva rotació tal com es mostra a la Figura 21. L'eix davanter pot desplaçar-se en la direcció x.



*Figura 21. Assaig de fatiga amb una força vertical*

S'introdueix la tija del seient a una profunditat de 75 mm. Es fixa una extensió horitzontal (E) dirigida cap enrere a una distància de 250 mm ( $h_3$ ) fins al punt d'introducció de la tija al quadre. S'apliquen cicles de força dinàmica verticals de 1200 N ( $F_4$ ) en un punt situat a 70 mm de la intersecció dels eixos de la tija massissa d'acer i de la extensió E durant 50000 cicles d'assaig.

A l'hora de fer la simulació es desplaçarà la força de 1200 N a l'eix de la tija i s'hi aplicarà un moment de 84000 N·mm per no haver de representar l'extensió  $E$ .

### 3.4.6. Malla utilitzada

La malla que s'utilitzarà pels assajos és una malla que s'ha refinat per tal de tenir més elements a les unions entre tubs ja que serà on les tensions seran més altes i on pot ser més interessant de veure el comportament, com es pot observar en la Figura 22. S'ha optat per crear una malla més basta a les zones on les tensions són més baixes per tal de millorar el temps de càlcul del programa.

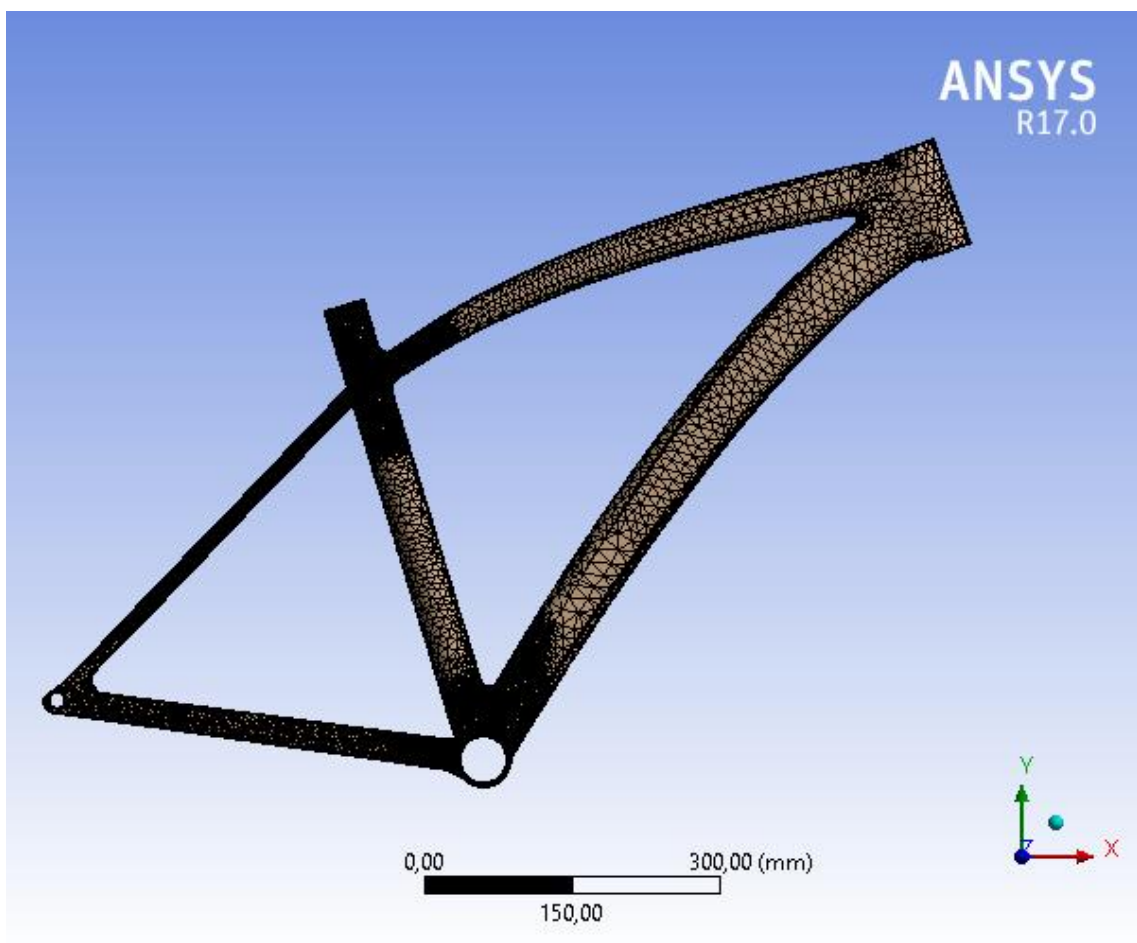


Figura 22. Malla utilitzada pels assajos

A la zona de la unió del tub del seient amb el tub superior i els tirants els elements són de 3 mm. En la Figura 23 es pot observar l'aspecte.

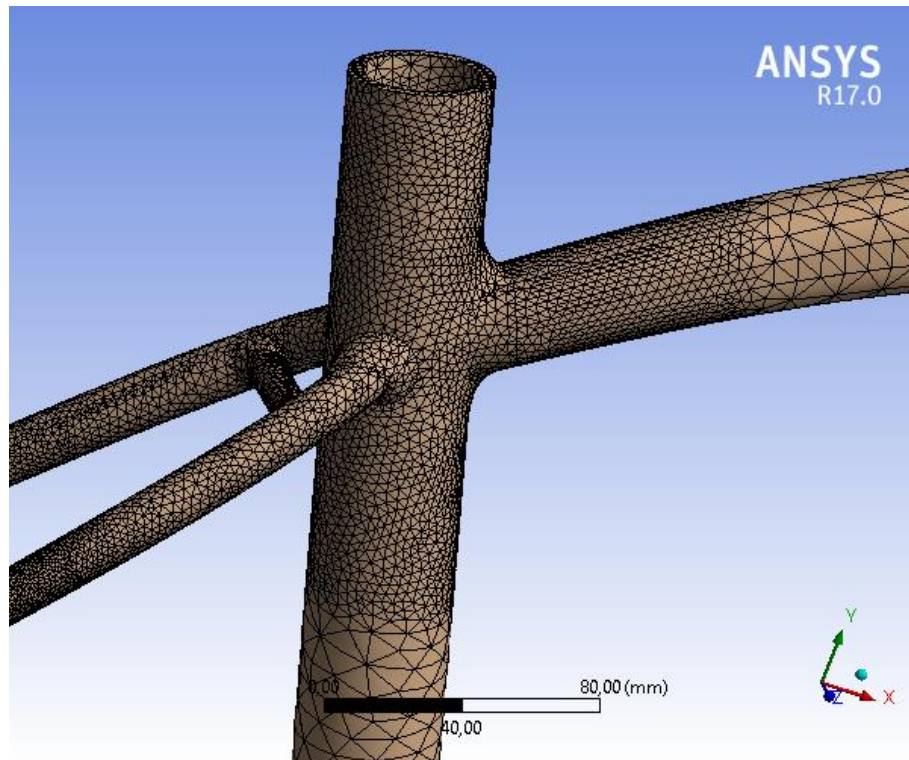


Figura 23. Aspecte malla zona unió tub seient amb tub superior i tirants

A la zona de la unió del tub del seient amb el tub inferior, el tub del pedaler i les beines els elements també són de 3 mm. En la Figura 24 es pot observar l'aspecte.

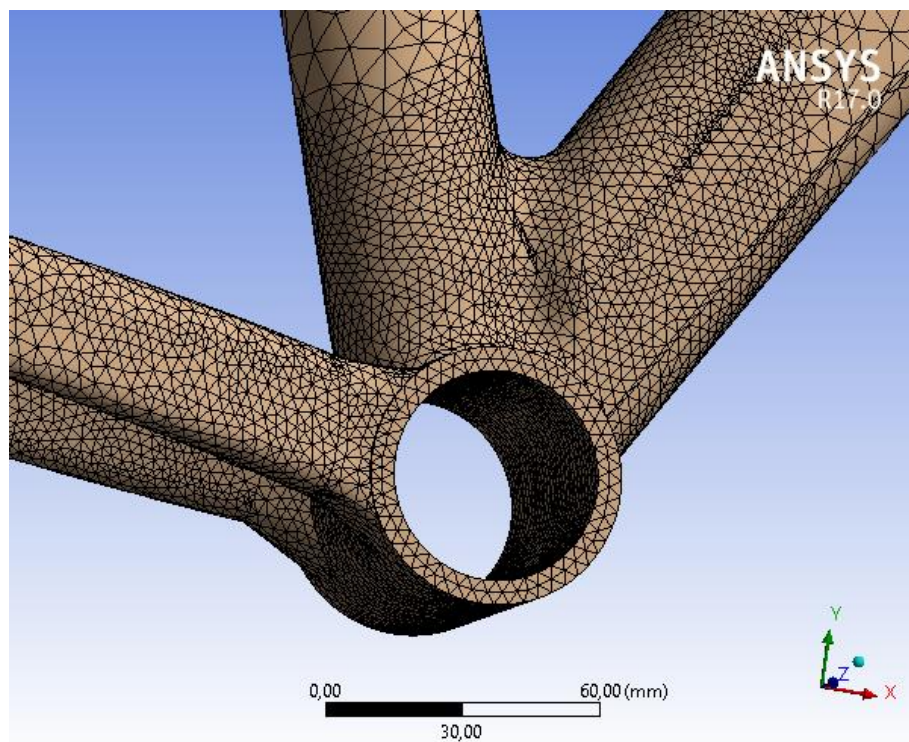


Figura 24. Aspecte malla zona unió tub seient amb tub inferior, tub pedaler i beines

A la zona de les unions de les beines amb els tirants els elements són de 4 mm. En la Figura 25 es pot observar l'aspecte.

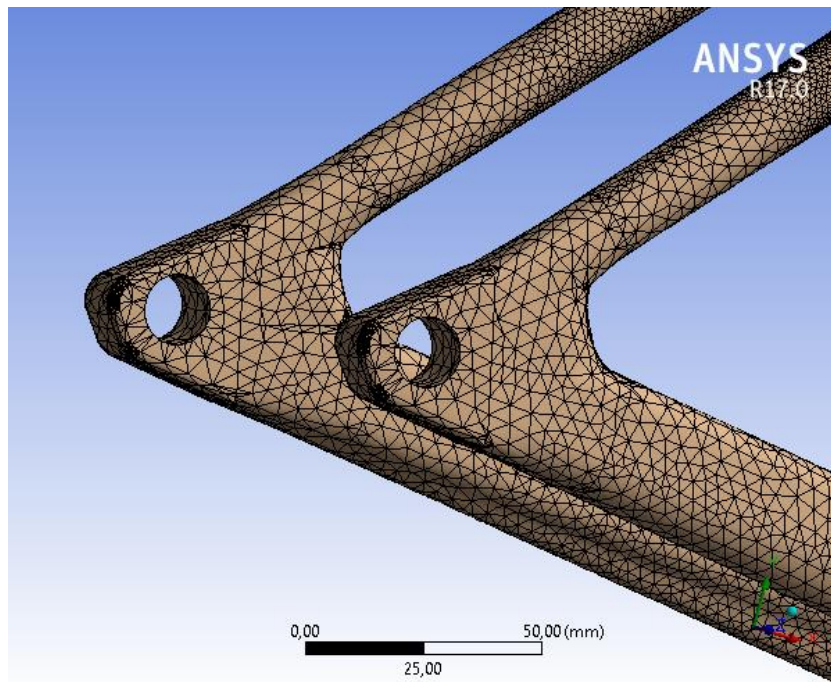


Figura 25. Aspecte malla zona unió beines i tirants

Per tal de poder establir la mida dels elements a les zones que ens interessin s'han creat uns eixos de coordenades a cada zona, que seran el centre de la corresponent esfera d'influència. A continuació es dona el radi de l'esfera, la mida dels elements i es seleccionen les cares de la geometria que volem que l'esfera inclogui.

A la resta del quadre la malla és la que estableix per defecte el Workbench després de configurar-ho tal com s'observa a la Figura 26.

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	40
Shape Checking	Standard Mechanical
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Adaptive
Relevance Center	Fine
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Minimum Edge Length	3.2345e-003 mm

Figura 26. Configuració malla

### 3.5. Anàlisi dels resultats

#### 3.5.1. Assaig falsa forquilla

Tots els assajos s'han simulat amb una falsa forquilla d'acer molt rígida que compleix els requeriments de l'Annex A de la norma UNE-EN ISO 4210-6 V2.

El rati de la fletxa ( $D_r$ ) de la forquilla no ha d'excedir el valor de 1,0 quan es calcula mitjançant l'Equació 9.

$$D_r = \frac{K_2 \cdot 10000 \cdot \delta}{L^3} \quad (\text{Eq. 9})$$

On:

$D_r$  és el rati de la fletxa

$K_2$  és 709 (constant)

$L$  és la longitud de la forquilla (expressada en mm)

$\delta$  és la fletxa (expressada en mm)

La fletxa de la forquilla d'assaig s'ha de mesurar en el sentit d'aplicació de la força com a resultat de l'aplicació d'una força vertical de 1200 N. S'ha d'assegurar la forquilla en una posició horitzontal retenint el tub de la direcció.

Després de simular aquest assaig amb el Workbench aplicant les condicions de contorn requerides s'ha obtingut una fletxa de 0,48852 mm als extrems de la forquilla sota l'acció dels 1200 N tal com es pot observar a la Figures 27 i 28.

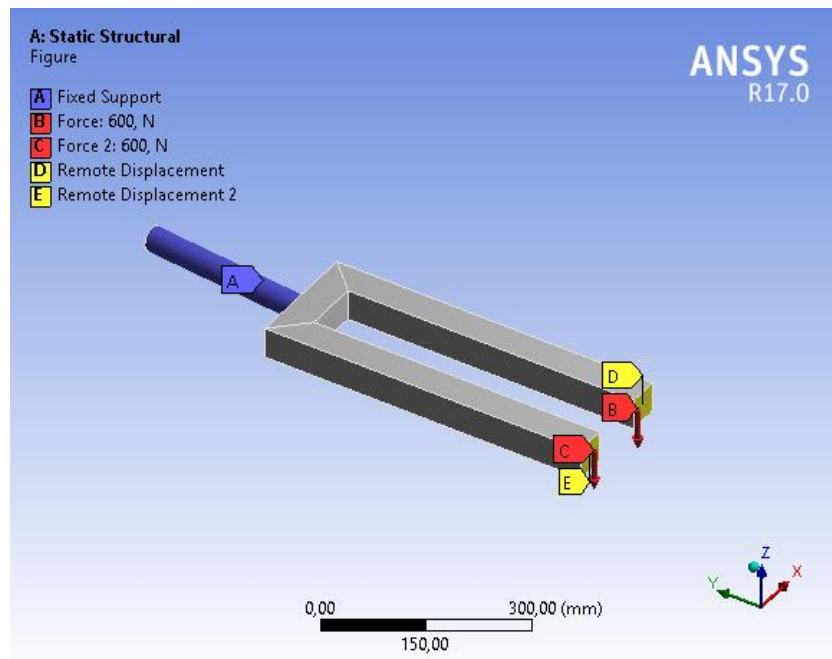


Figura 27. Assaig falsa forquilla

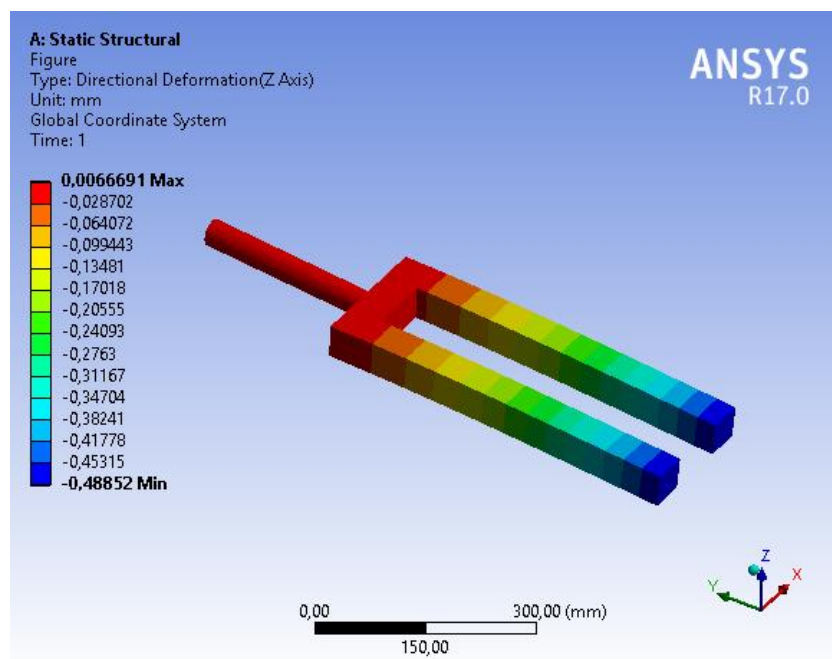


Figura 28. Fletxa assaig falsa forquilla

Quan s'ha trobat la fletxa ja es pot calcular si aquesta forquilla compleix amb la norma utilitzant l'equació 9 (vista anteriorment). Tenint en compte que la longitud de la forquilla és de 502,09 mm s'obté que el rati de la fletxa ( $D_f$ ) és 0,027. Com que aquest valor és menor de 1,0 aquesta forquilla compliria els requeriments de la norma i serà la que s'utilitzarà per fer tots els assajos.

### 3.5.2. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa)

Les càrregues aplicades i les condicions de contorn es mostren a la Figura 29.

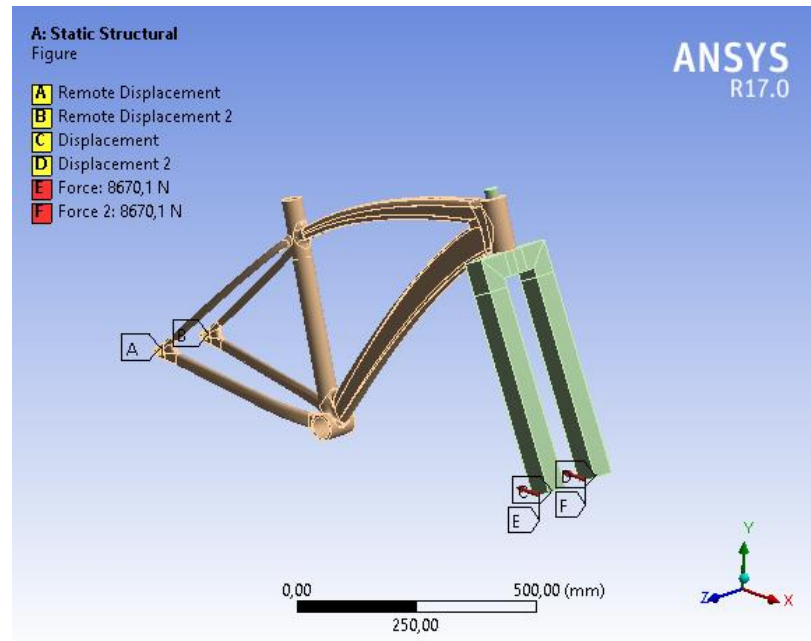


Figura 29. Esquema assaig caiguda d'una massa

S'ha col·locat un “*Deformation probe*” en un extrem de la forquilla per saber el desplaçament d'aquest punt després de realitzar l'assaig i, per tant, saber si compleix la norma o no. S'estableix que indiqui el desplaçament en l'eix X. En la Figura 30 es pot comparar la forma del quadre abans i després de l'assaig i on està col·locat el “*Deformation probe*”.

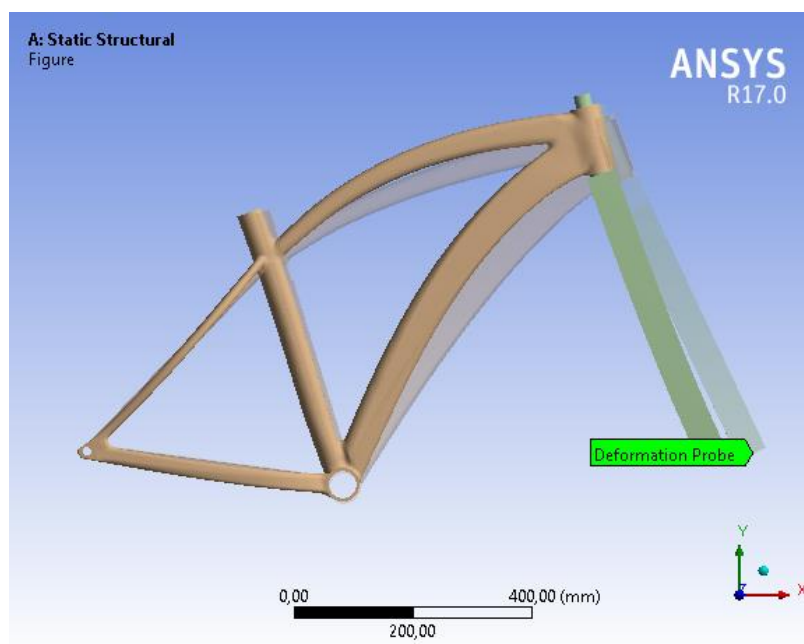


Figura 30. *Deformation probe*

El resultat obtingut és 9,4097 mm, per tant, compliria el requeriment de la norma ja que és menor de 10 mm.

Es podria fer una segona comprovació observant la deformació direccional en l'eix X, que es mostra a la Figura 31. Es pot observar la forma del quadre abans i després de l'assaig.

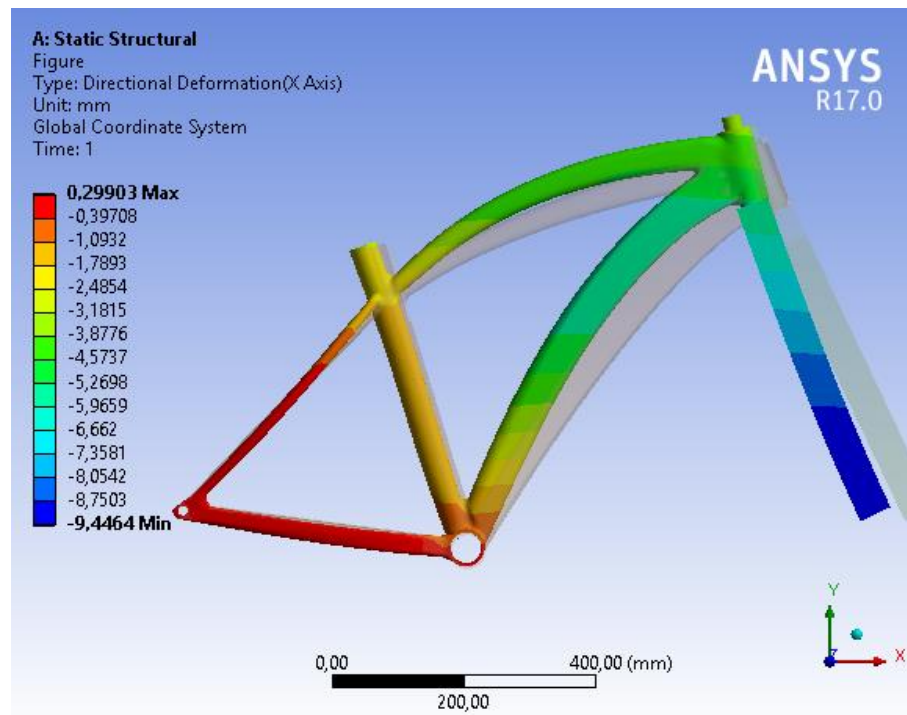


Figura 31. Deformació direccional (Eix X)

Es pot veure que l'extrem de la forquilla està marcat de color blau i segons la llegenda correspon a una deformació de 9,4464 mm. És més precís trobar la deformació d'un punt utilitzant "Deformation Probe" ja que només dóna la deformació en el punt marcat. En canvi, tal com es pot observar a la figura anterior el color blau no marca només l'extrem de la forquilla sinó que marca aproximadament fins a un terç de la forquilla. De totes maneres, s'ha pogut comprovar que tant d'una forma com de l'altre el quadre compliria amb la norma.

També s'ha de comprovar que les tensions de Von Mises no superin la resistència última del material del quadre, que en aquest cas és de 350 MPa. En cas que les tensions sobrepassin el límit elàstic del material (290 MPa) el quadre tindrà una deformació permanent i no podrà recuperar la seva forma inicial quan es deixin d'aplicar les càrregues, però s'ha de tenir en compte que la norma en cap moment demana que el quadre recuperi la forma inicial. Les tensions de Von Mises d'aquest assaig es poden observar a la Figura

32. La llegenda d'aquesta figura està en escala logarítmica per poder apreciar millor els resultats. No es mostra la forquilla ja que no interessa.

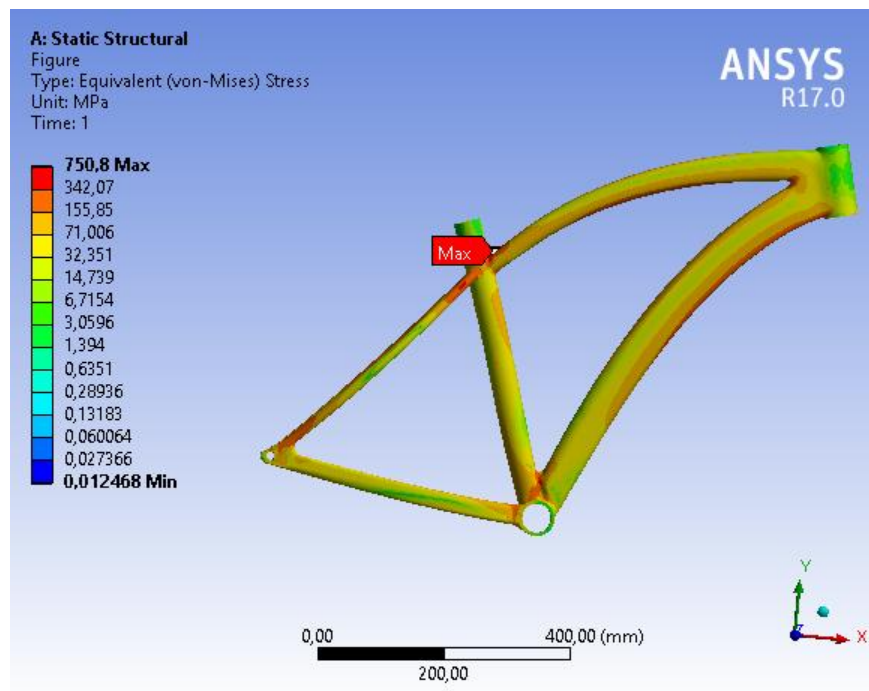


Figura 32. Tensions de Von Mises

El màxim es troba a la part superior de la unió del tub del seient amb el tub superior. En la Figura 33 s'aprecia amb més detall.

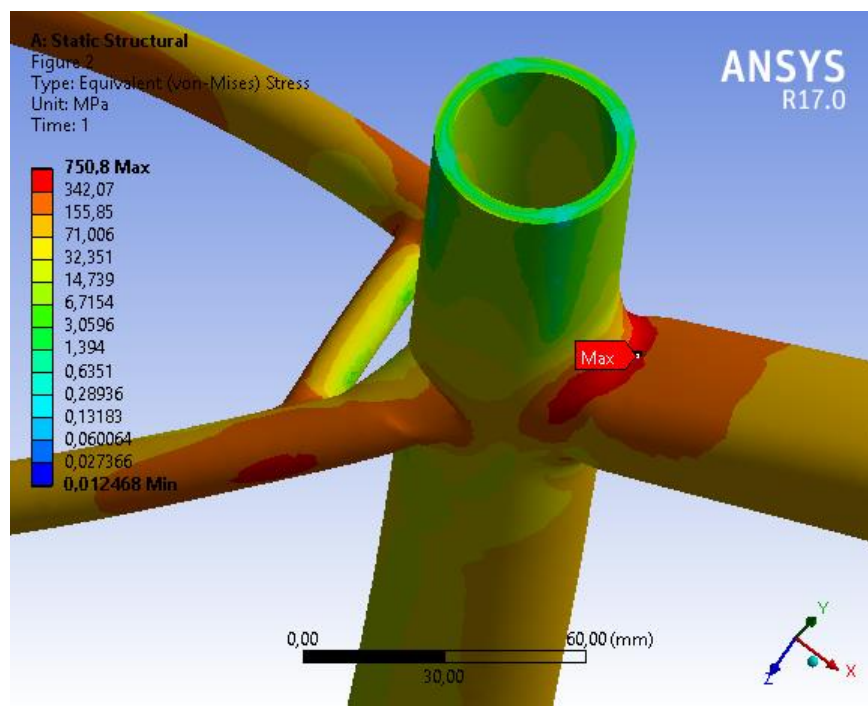


Figura 33. Zona tensió Von Mises màxima

Després de comprovar de manera exhaustiva amb l'eina "Probe" del Workbench les tensions de tot el quadre s'ha pogut arribar a la conclusió de què l'únic lloc del quadre on es sobrepassa la resistència última de l'alumini és en aquesta petita unió dels dos tubs.

A part de la zona de la unió del tub del seient amb el tub superior i els tirants, les altres zones on les tensions són més elevades són les parts inferiors dels tubs superior i inferior (Figura 34), la part interior dels tirants (Figura 35) i la unió del tub del seient amb el tub inferior, el tub del pedaler i les beines (Figura 36).

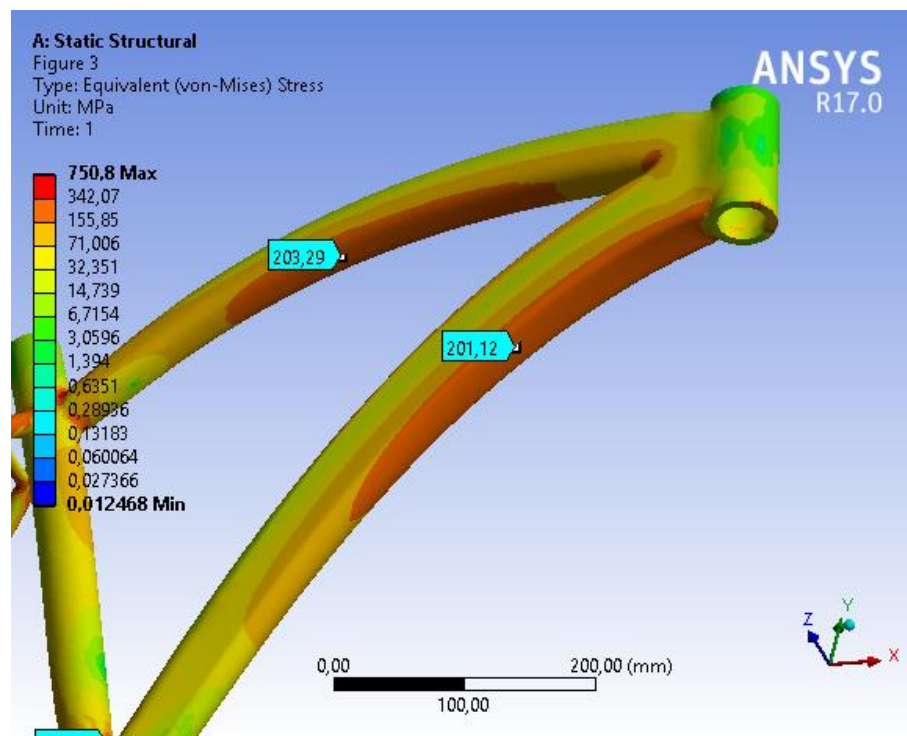
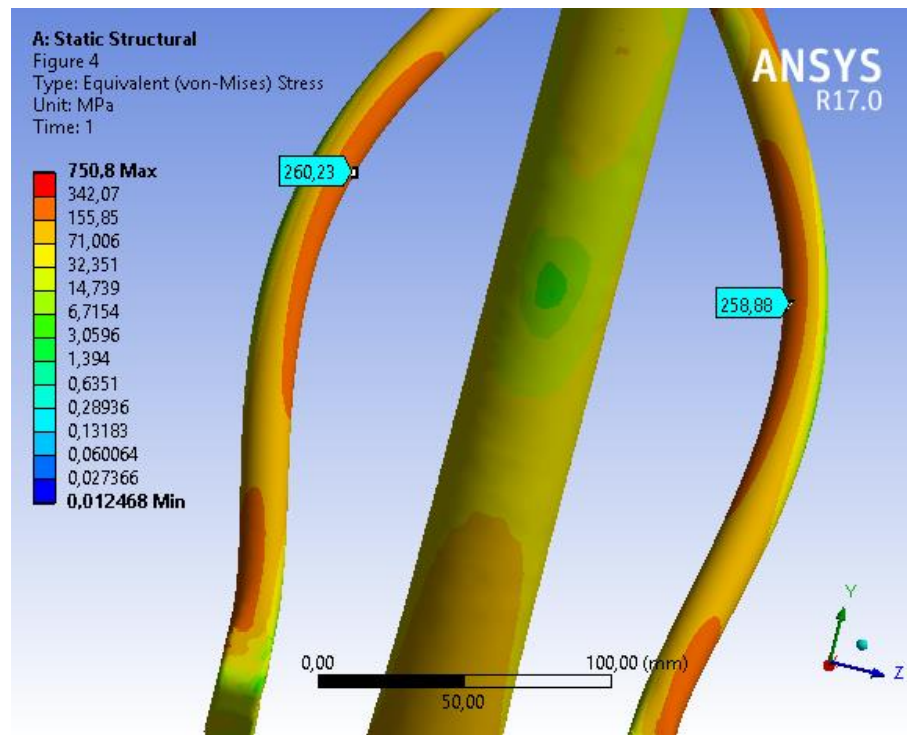
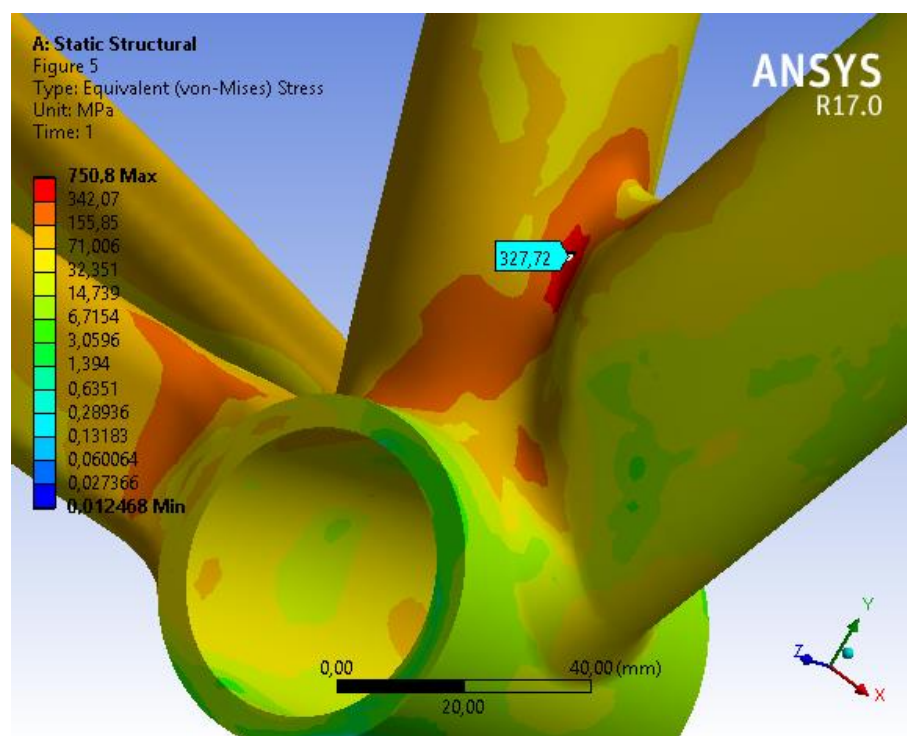


Figura 34. Tensions Von Mises tubs inferior i superior

*Figura 35. Tensions Von Mises tirants**Figura 36. Tensions Von Mises zona pedalier*

S'ha de mencionar que les deformacions que s'observen no són reals, sinó que estan escalades de manera que es puguin observar millor.

### 3.5.3. Assaig d'impacte (caiguda del quadre)

Les càrregues aplicades i les condicions de contorn es mostren a la Figura 37.

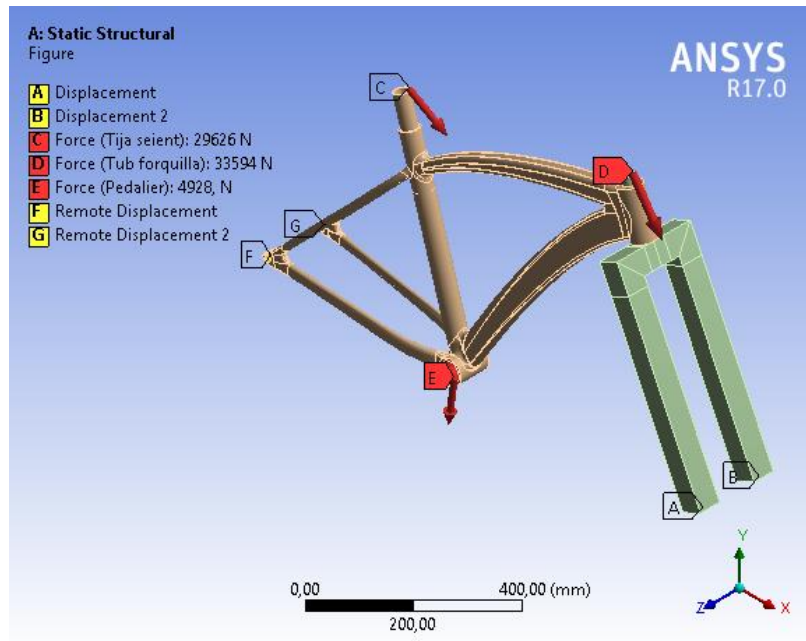


Figura 37. Assaig caiguda del quadre

S'ha col·locat un “*Deformation probe*” en un extrem de la forquilla per saber el desplaçament d'aquest punt després de realitzar l'assaig i, per tant, saber si compleix la norma o no. S'estableix que indiqui el desplaçament en l'eix X. En la Figura 38 es pot comparar la forma del quadre abans i després de l'assaig i on està col·locat el “*Deformation probe*”.

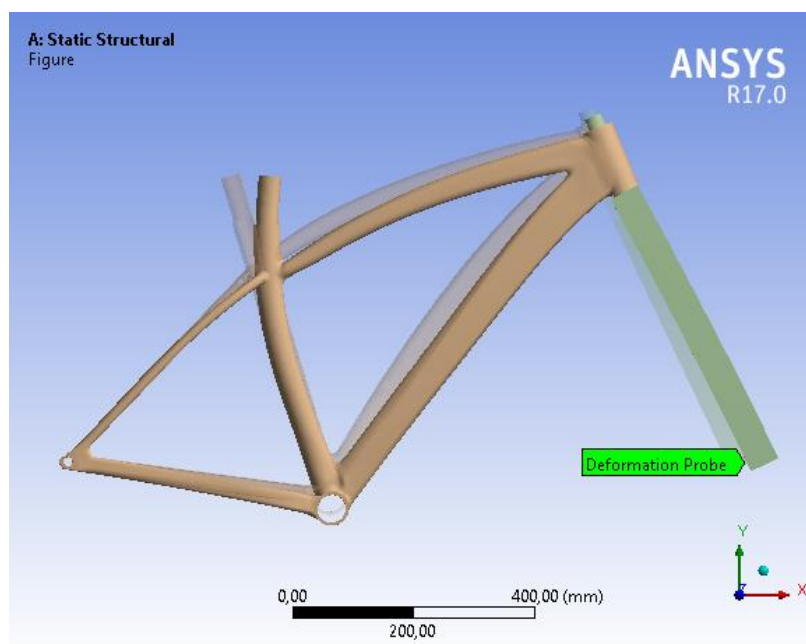


Figura 38. Deformation Probe

El resultat obtingut és 12,546 mm, per tant, compliria el requeriment de la norma ja que és menor de 60 mm.

Les tensions de Von Mises d'aquest assaig es poden observar a la Figura 39. La llegenda d'aquesta figura està en escala logarítmica per poder apreciar millor els resultats. No es mostra la forquilla ja que no interessa.

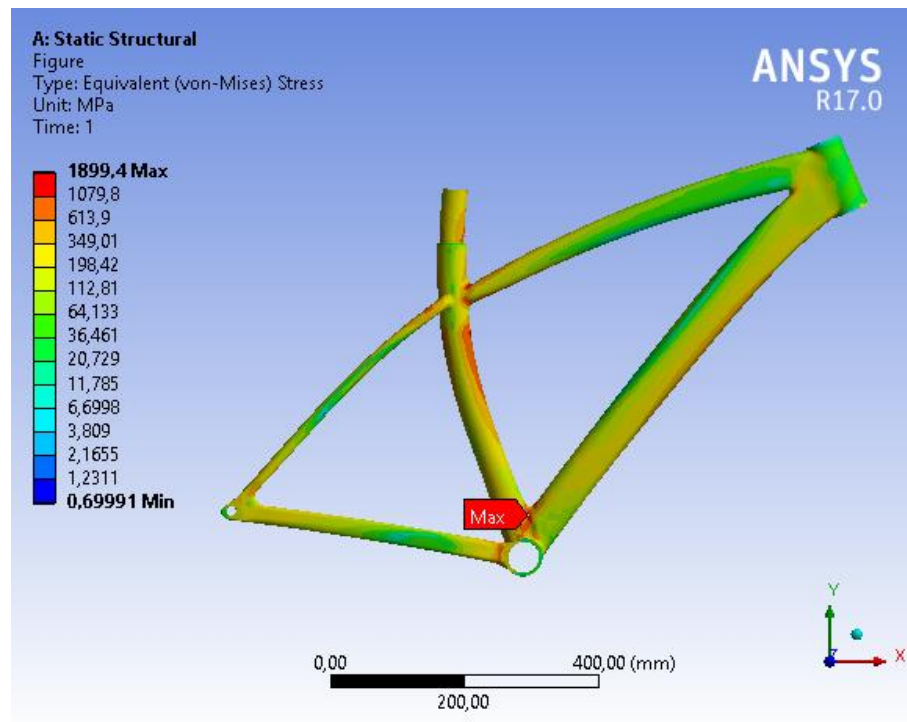


Figura 39. Tensions de Von Mises

S'observa que les tensions màximes són força elevades i sobrepassen els 350 MPa de la resistència última. Les zones on aquestes tensions són més altes es poden veure a la Figura 40 (unió tub seient amb tub superior), Figura 41 (unió tub pedaler, tub seient, tub inferior i beines) i Figura 42 (tub seient).

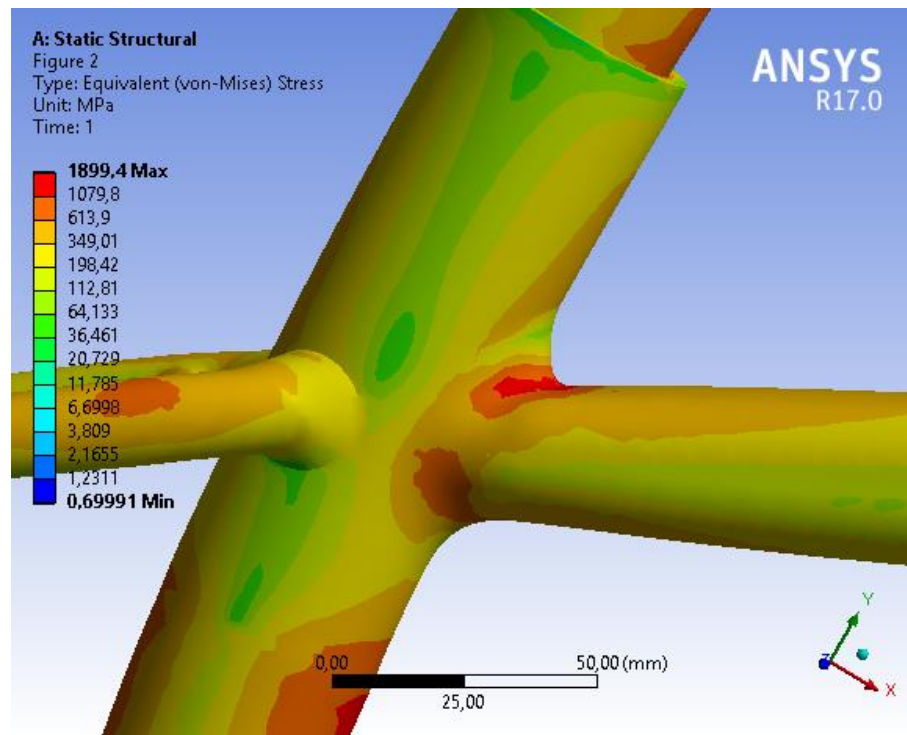


Figura 40. Tensions Von Mises unió tub seient amb tub superior

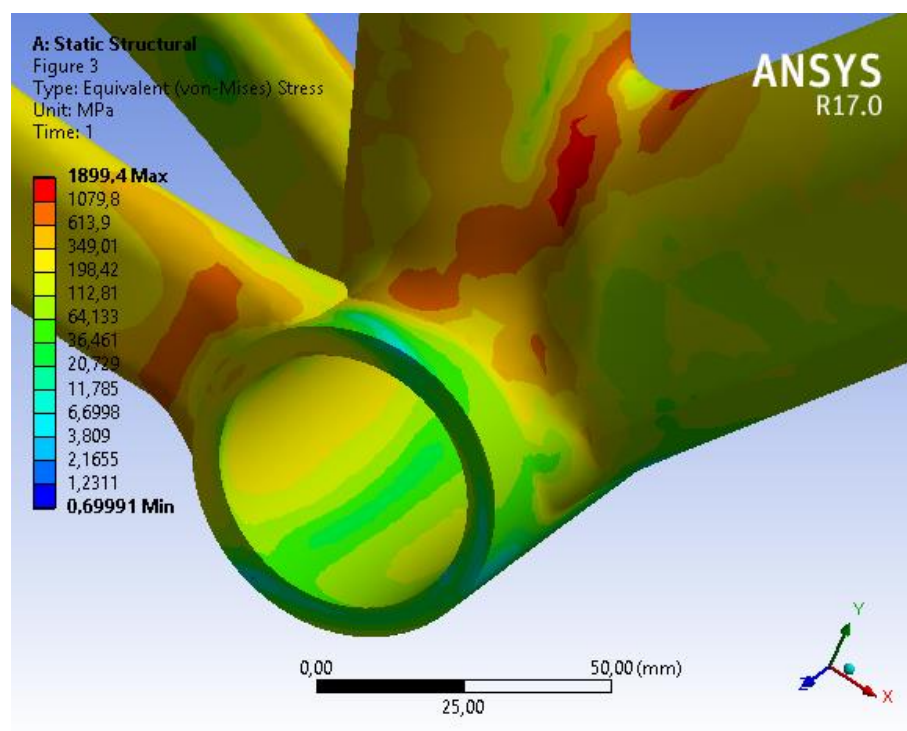


Figura 41. Tensions Von Mises unió tub pedaler, tub seient, tub inferior i beines

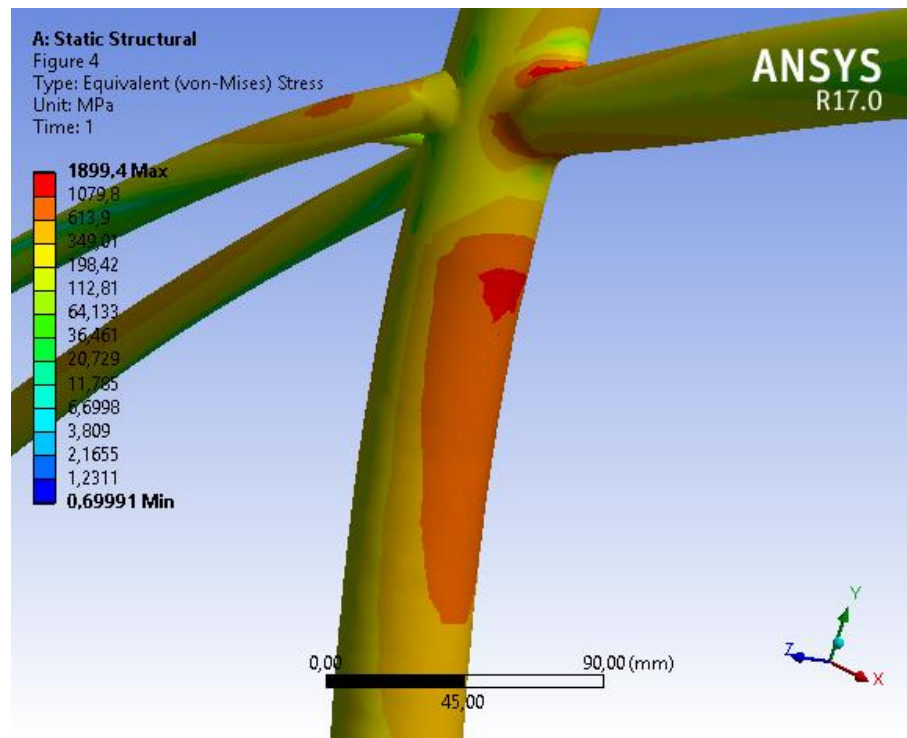


Figura 42. Tensions Von Mises tub seient

Es pot observar que aquestes tensions altes es troben localitzades sobretot a les unions entre tubs mentre que a la resta del quadre no hi hauria problemes.

Amb aquest assaig compliríem la condició de deformació que estableix la norma però les tensions que s'originen són massa elevades i el quadre no ho suportaria, és a dir, es trencaria.

S'ha de mencionar que les deformacions que s'observen no són reals, sinó que estan escalades de manera que es puguin observar millor.

#### 3.5.4. Assaig a fatiga amb forces de pedaleig

Aquest assaig es dividirà en dos assajos: un pel costat dret del quadre i un pel costat esquerre. Es divideix en dos perquè el programa no permet configurar les càrregues tal com seria necessari per fer aquest assaig a fatiga.

Es començarà fent un assaig a estàtica pel costat dret. Les càrregues aplicades i les condicions de contorn es mostren a la Figura 43.

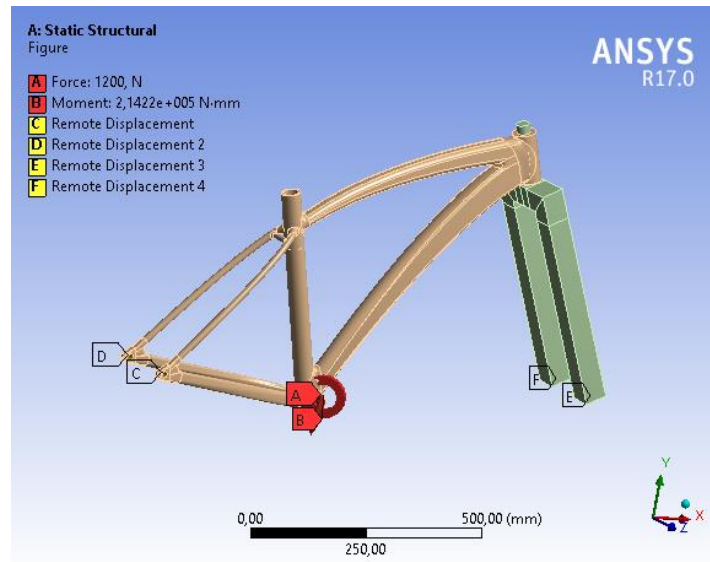


Figura 43. Assaig forces pedaleig costat dret quadre

El moment i la força s'apliquen a la cara lateral del tub del pedaler com s'observa a la Figura 44.

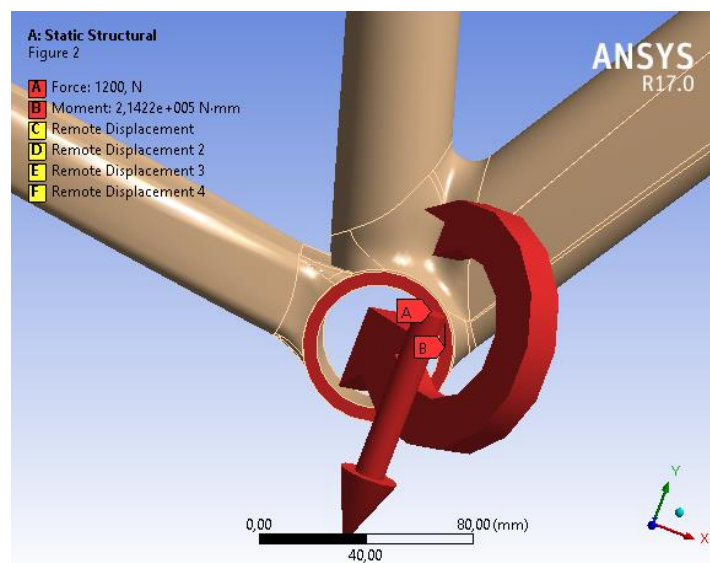


Figura 44. Zona d'aplicació del moment i la força

En les Figures 45 i 46 es mostren les tensions de Von Mises mirant el pla XY i YZ respectivament. Es veu que la tensió màxima és de 286,45 MPa i està localitzada a la zona del pedaler com era d'esperar. No es supera la resistència última ni el límit elàstic del material. La llegenda d'aquesta figura està en escala logarítmica per poder apreciar millor els resultats. No es mostra la forquilla ja que no interessa.

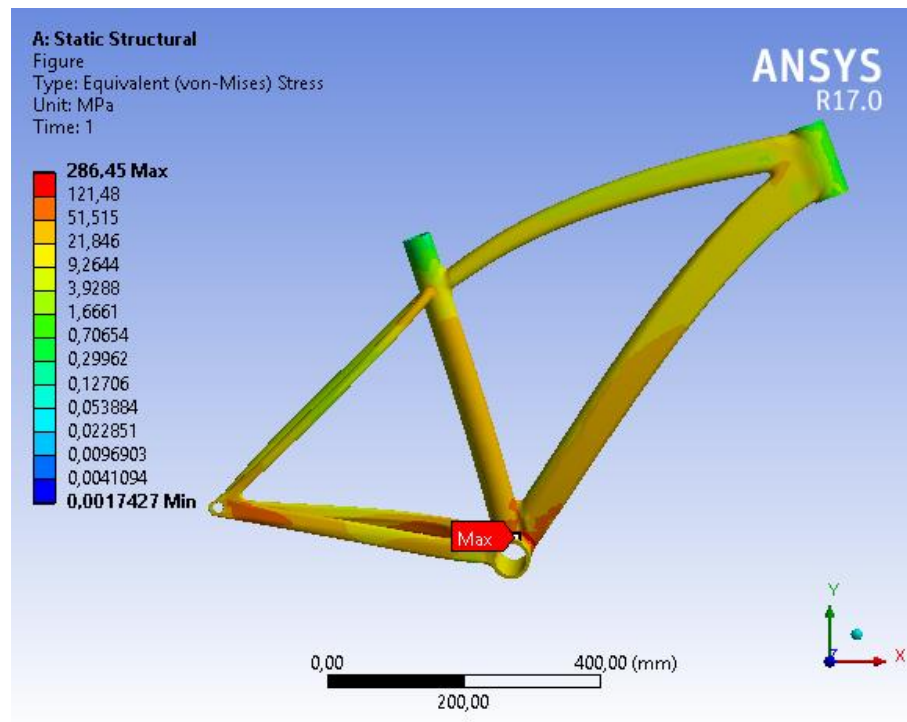


Figura 45. Tensions Von Mises Pla XY

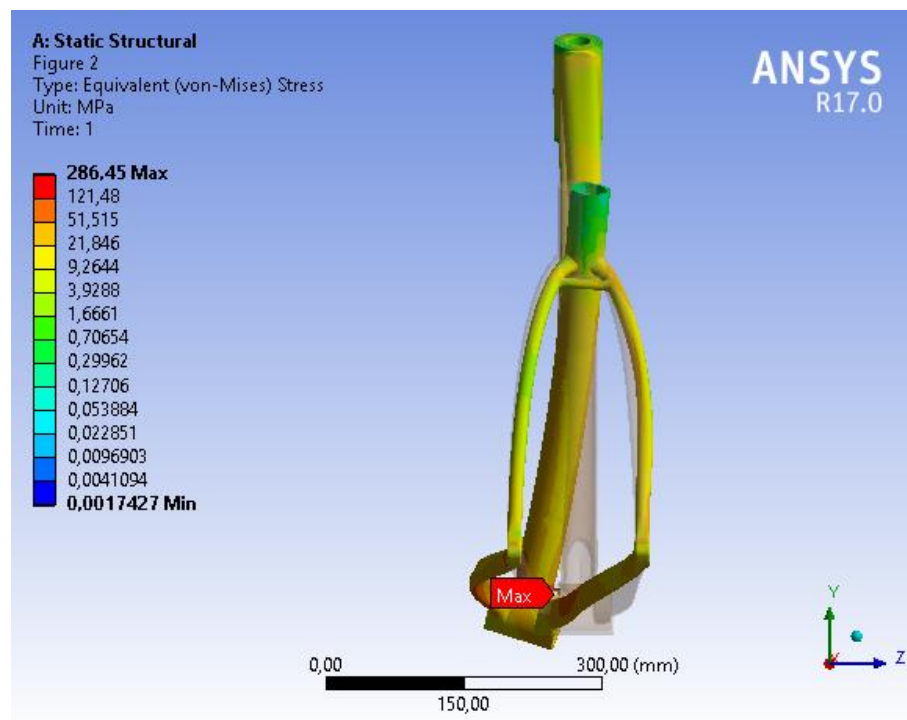


Figura 46. Tensions Von Mises Pla YZ

En aquesta última figura es mostra la forma inicial del quadre per poder comparar l'abans i el després de l'assaig.

Les deformacions totals es poden observar en les Figura 47 i 48. S'observa que la deformació màxima (2,9398 mm), com era d'esperar, es troba a la zona del pedaler ja que

és on s'hi aplica la força i el moment i tenim el moviment del conjunt quadre-forquilla restringit als suports dels eixos de les rodes de manera que només es permet la rotació en Z.

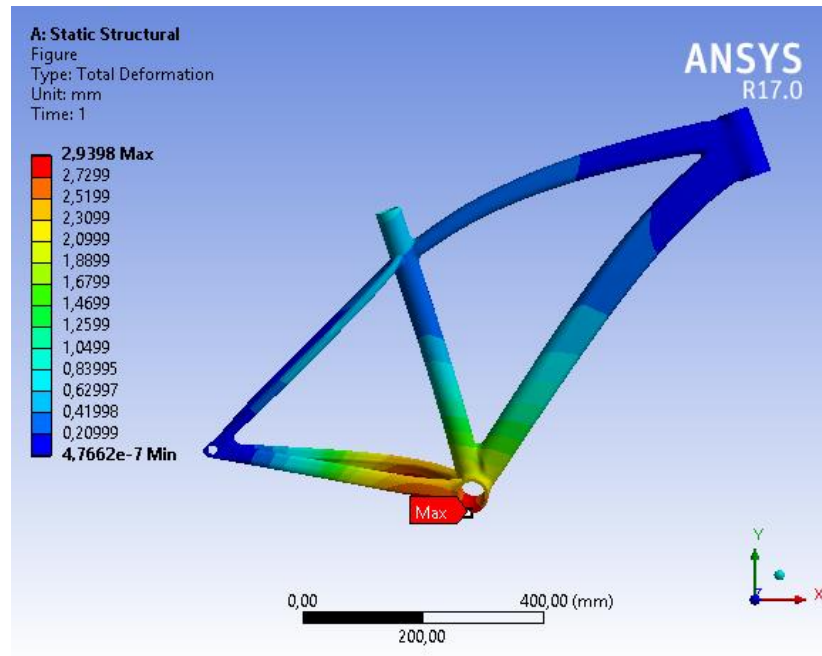


Figura 47. Deformacions totals Pla XY

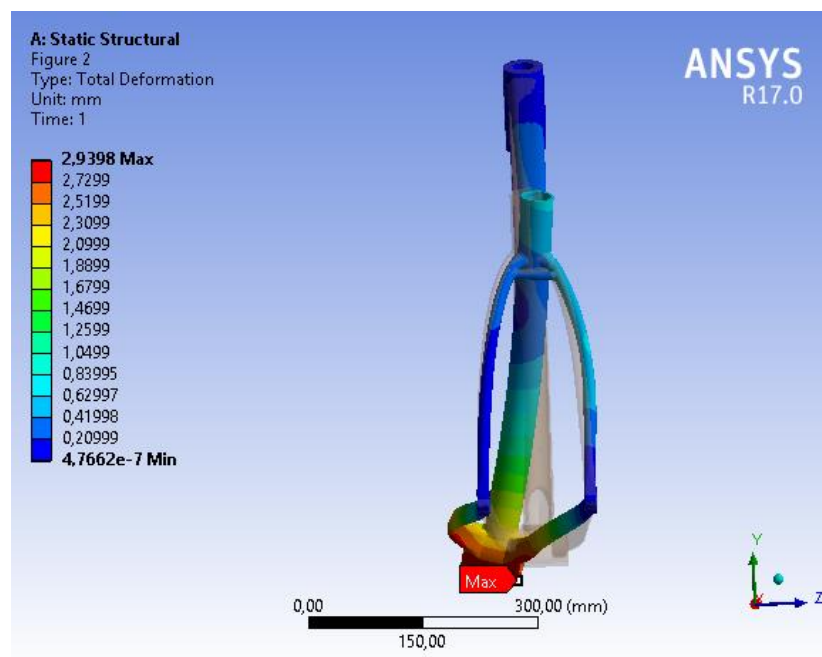


Figura 48. Deformacions totals Pla YZ

En aquesta última figura es mostra la forma inicial del quadre per poder comparar l'abans i el després de l'assaig.

Ara passem a fer l'assaig a estàtica pel costat esquerre del quadre. Les càrregues aplicades i les condicions de contorn es mostren a la Figura 49.

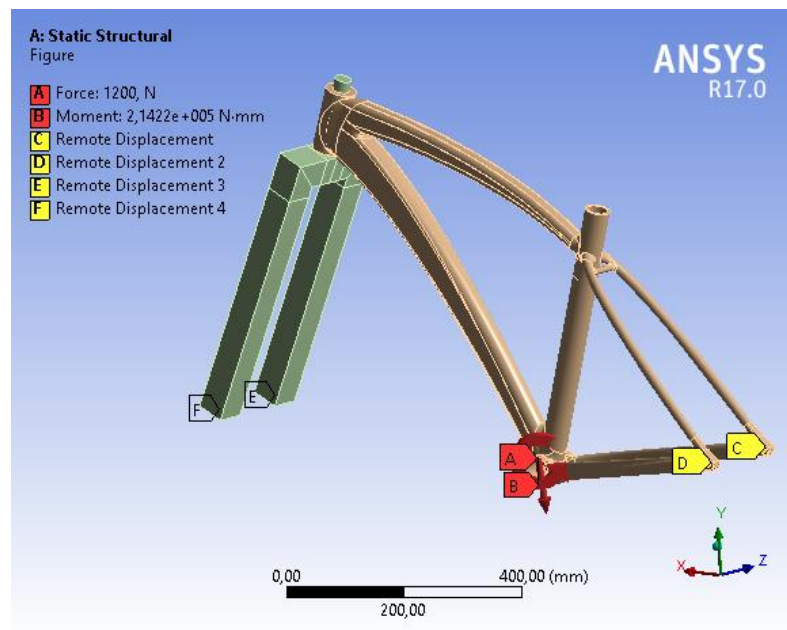


Figura 49. Assaig forces pedaleig costat esquerre quadre

El moment i la força s'apliquen a la cara lateral del tub del pedaler com s'observa a la Figura 50.

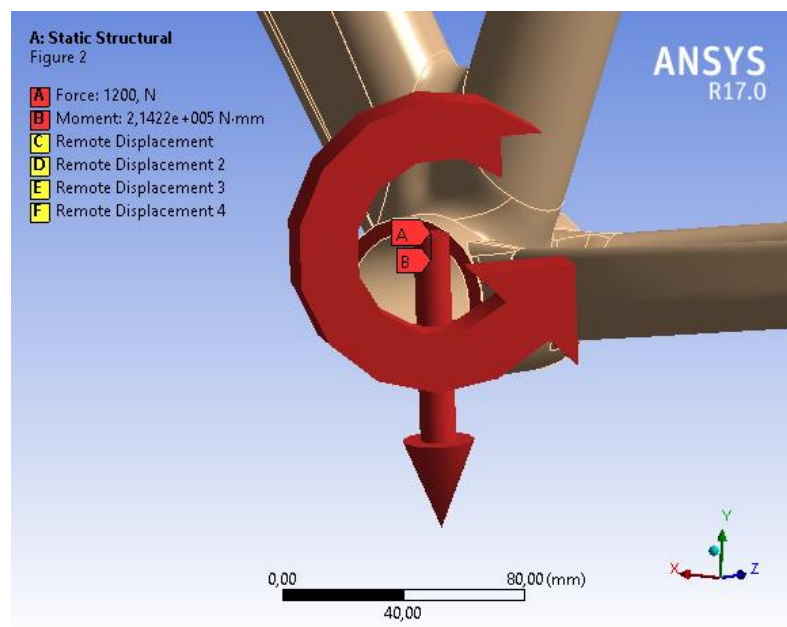


Figura 50. Zona d'aplicació del moment i la força

En les Figures 51 i 52 es mostren les tensions de Von Mises mirant el pla XY i YZ respectivament. Es veu que la tensió màxima és de 285,21 MPa i està localitzada a la zona del pedaler com era d'esperar. No es supera la resistència última ni el límit elàstic del material. La llegenda d'aquesta figura està en escala logarítmica per poder apreciar millor els resultats. No es mostra la forquilla ja que no interessa.

És curiós que la tensió de Von Mises màxima pel costat dret sigui de 286,45 MPa i pel costat esquerre sigui de 285,21 MPa. Segurament això és degut a què a l'hora de dibuixar el quadre hi ha hagut alguna petita diferència que fa que el quadre no sigui totalment simètric.

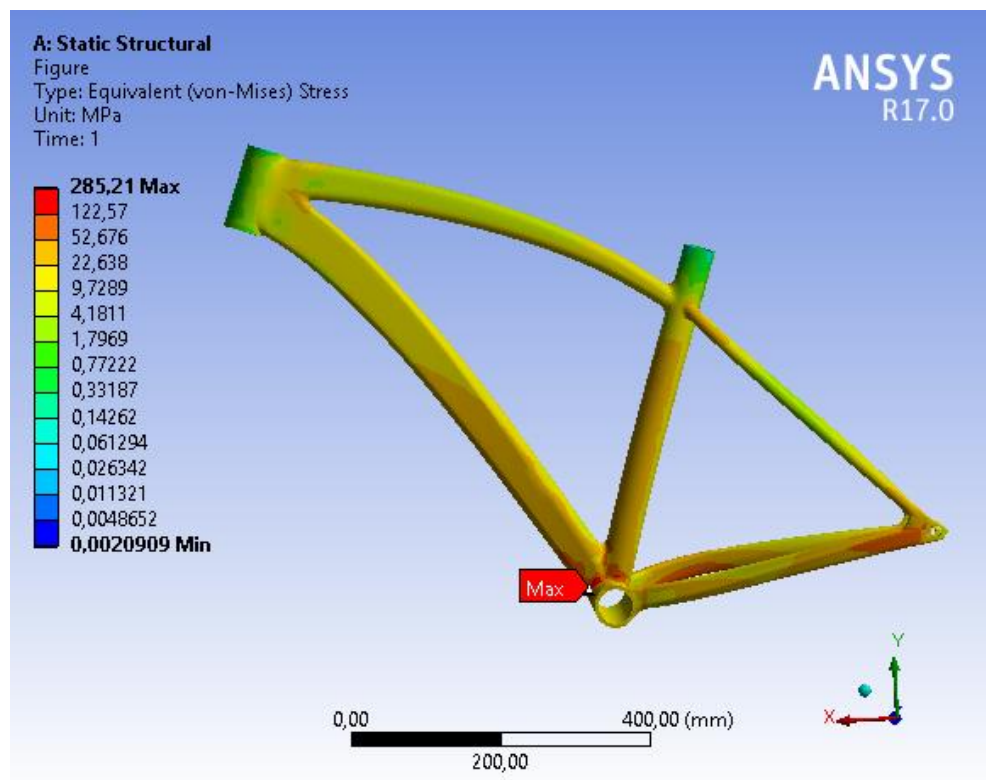


Figura 51. Tensions Von Mises Pla XY

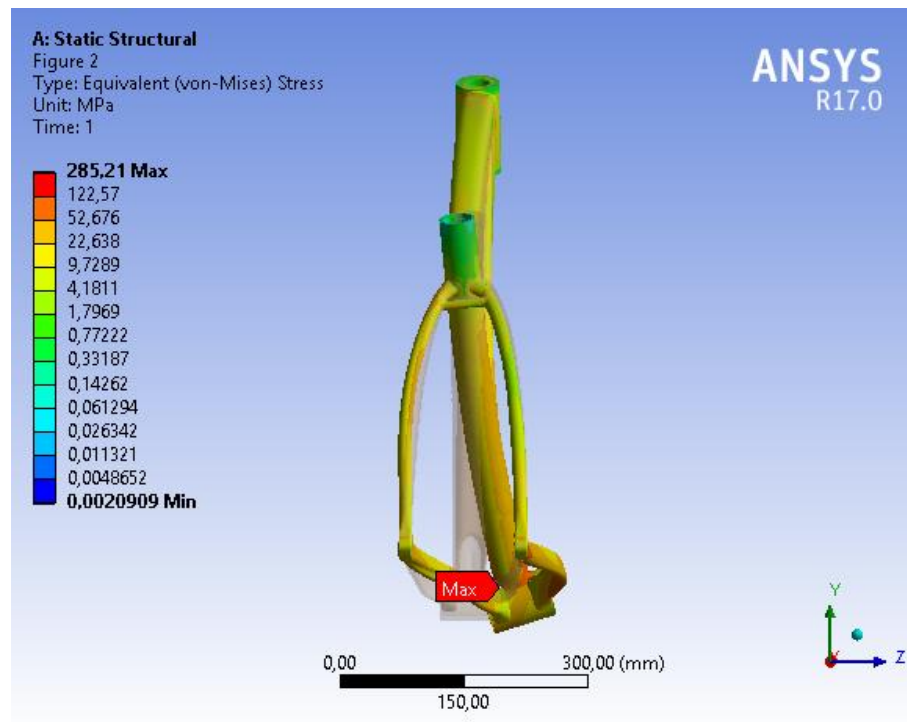


Figura 52. Tensions Von Mises Pla YZ

Les deformacions totals es poden observar en les Figures 53 i 54. S'observa que la deformació màxima (2,9601 mm), com era d'esperar, es troba a la zona del pedaler ja que és on s'hi aplica la força i el moment i tenim el moviment del conjunt quadre-forquilla restringit als suports dels eixos de les rodes de manera que només es permet la rotació en Z.

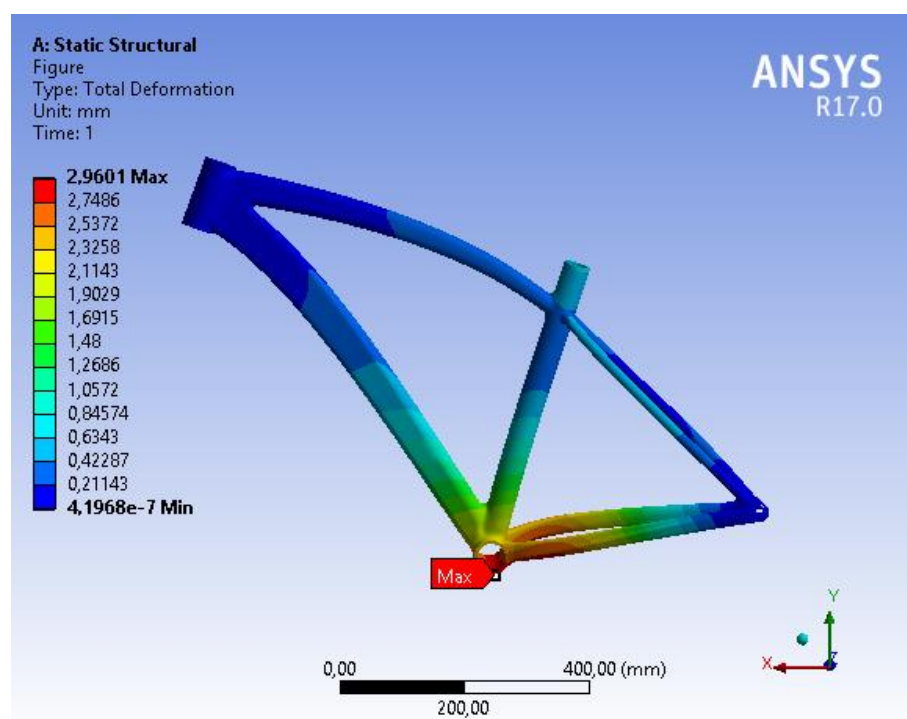


Figura 53. Deformacions totals Pla XY

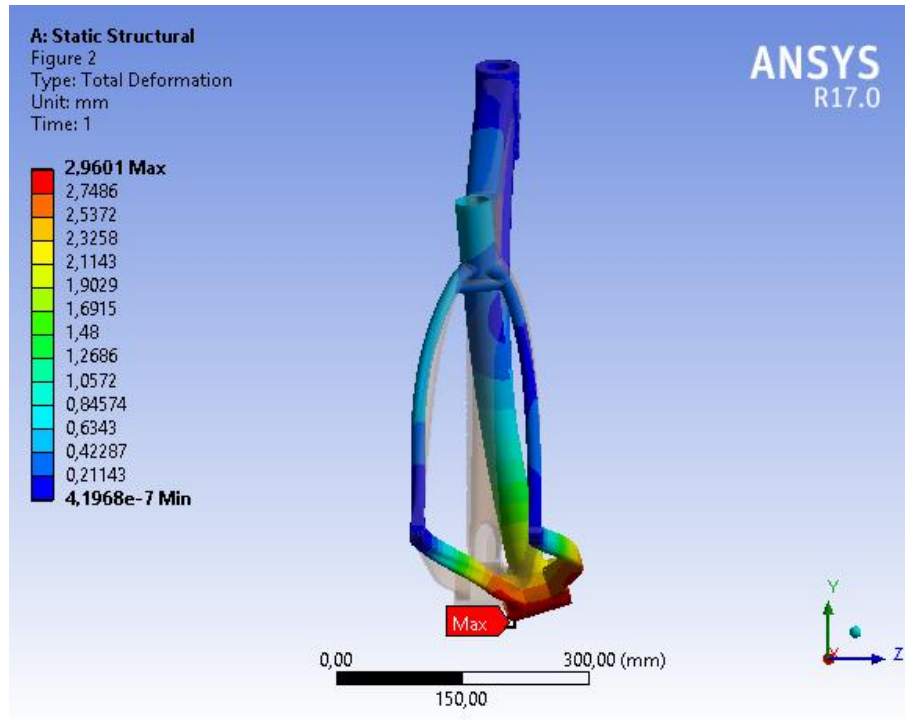


Figura 54. Deformacions totals Pla YZ

En aquesta última figura es mostra la forma inicial del quadre per poder comparar l'abans i el després de l'assaig. S'ha de mencionar que les deformacions que s'observen no són reals, sinó que estan escalades de manera que es puguin observar millor.

Pel que fa a l'assaig a fatiga es començarà pel costat dret del quadre. S'ha d'establir que el tipus de càrrega sigui "Zero Based", que significa que és una càrrega alternant que va des de zero fins al seu valor màxim i torna a zero repetidament tal com es mostra a la Figura 55.

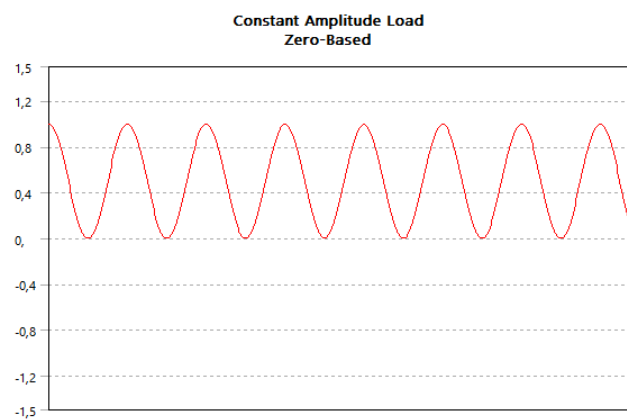


Figura 55. Càrrega d'amplitud constant "Zero-Based"

En la Figura 56 s'observa els cicles que aguantarà el quadre abans de fallar. El punt més dèbil està situat a la zona del pedaler. La zona més dèbil aguantarà  $6,1122 \cdot 10^5$  cicles d'assaig. El quadre no tindrà vida infinita ja que per l'alumini és de  $5 \cdot 10^8$  cicles.

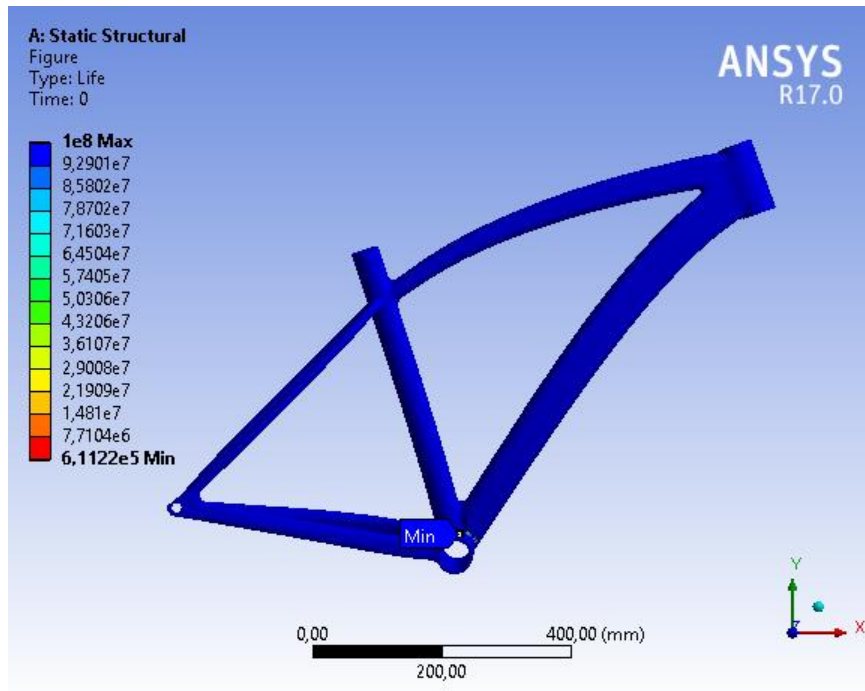


Figura 56. Vida del quadre

En la Figura 57 es pot apreciar amb més detall la zona més dèbil.

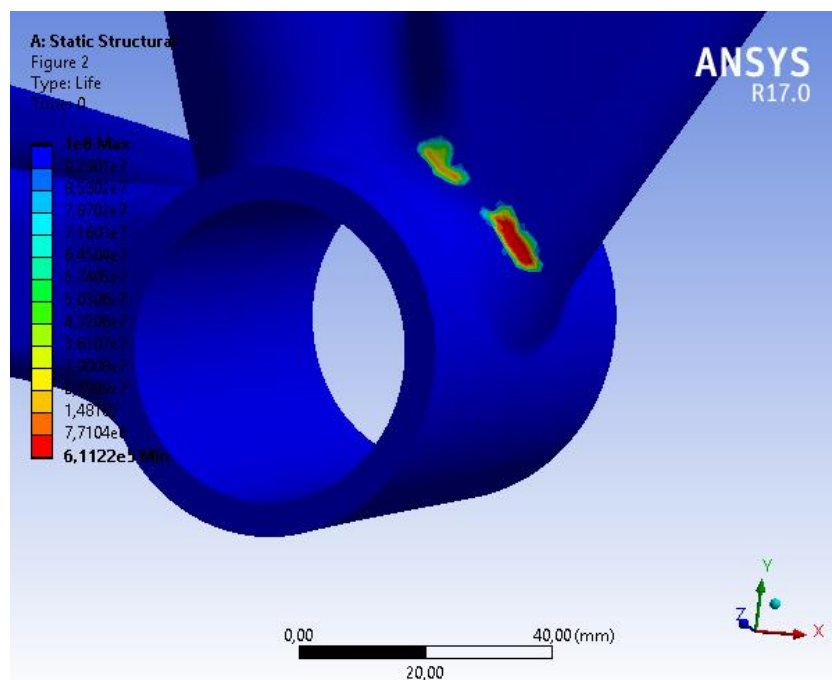


Figura 57. Zona més dèbil

També es pot trobar quin factor de seguretat tindria el quadre pels 100000 cicles d'assaig que estableix la norma. En la Figura 58 s'observa una vista general del quadre amb les zones que tenen un factor de seguretat més alt (en blau) i un factor de seguretat més baix (en verd, taronja i groc). El factor de seguretat del quadre és de 1,2608 i es troba localitzat a la zona del pedaler.

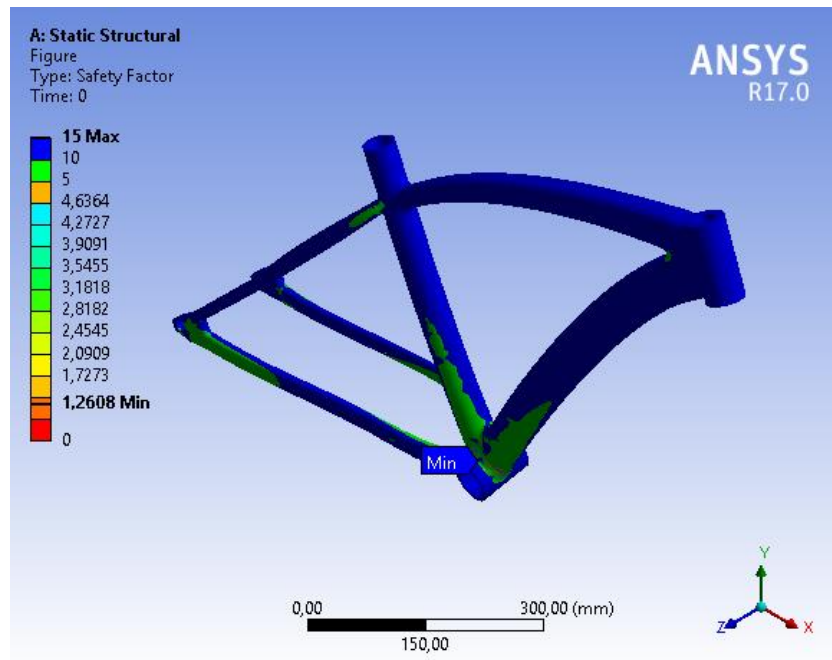


Figura 58. Vista general quadre amb el factor de seguretat

Seria d'esperar que quan es faci l'assaig a fatiga pel costat esquerre del quadre els resultats que s'obtinguin siguin molt similars als del costat dret però es comprovarà igualment.

En la Figura 59 s'observa els cicles que aguantarà el quadre abans de fallar. El punt més dèbil està situat a la zona del pedaler. La zona més dèbil aguantarà  $6,3081 \cdot 10^5$  cicles d'assaig. En la Figura 60 es pot apreciar amb més detall la zona més dèbil.

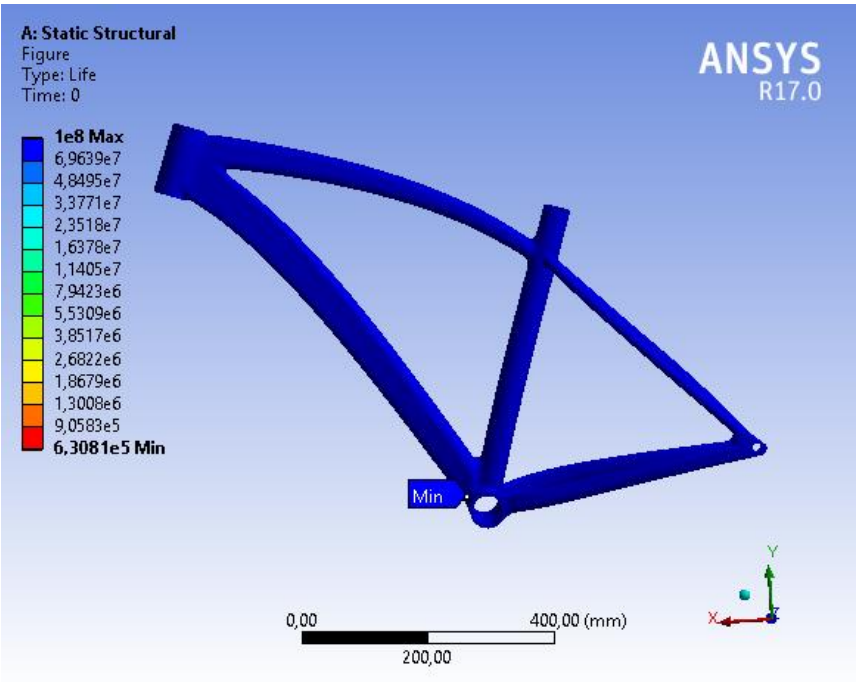


Figura 59. Vida del quadre

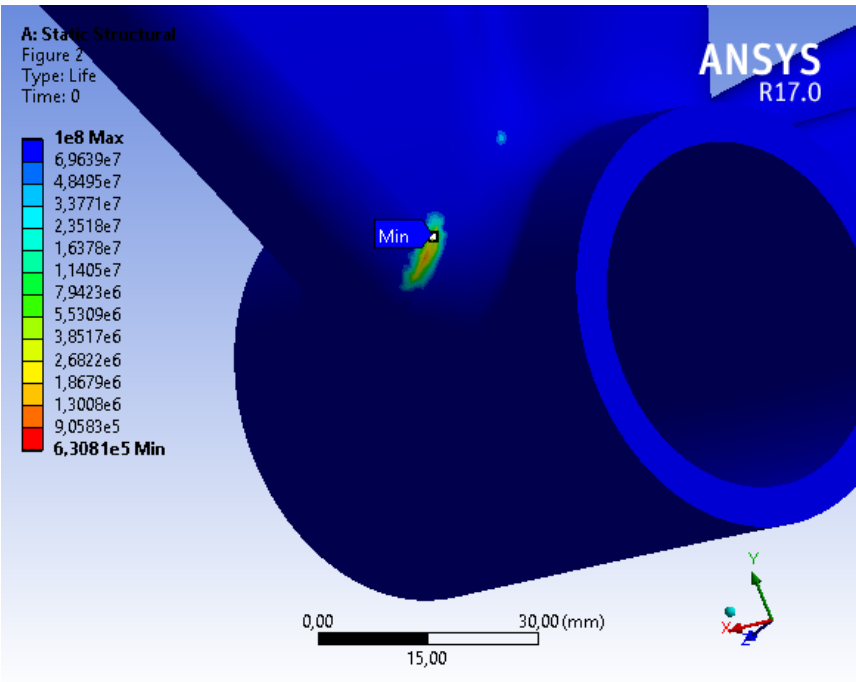


Figura 60. Zona més dèbil

En la Figura 61 s'observa una vista general del quadre amb les zones que tenen un factor de seguretat més alt (en blau) i un factor de seguretat més baix (en verd, taronja i groc). El factor de seguretat del quadre és de 1,2663 i es troba localitzat a la zona del pedaler.

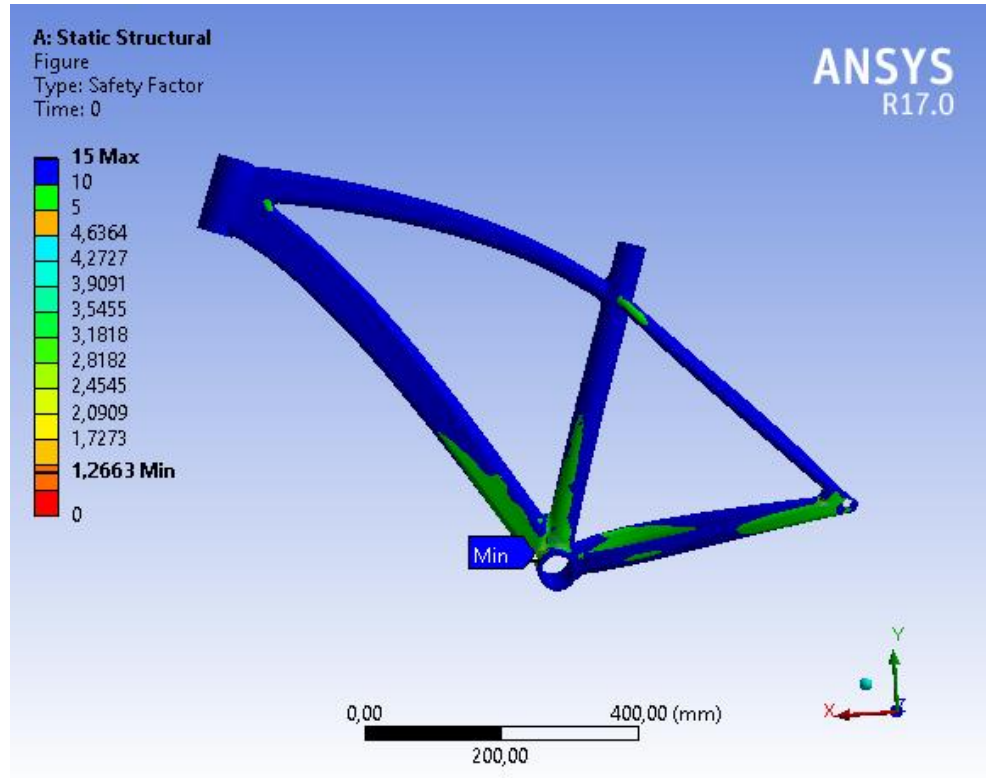


Figura 61. Vista general del quadre amb el factor de seguretat

Tal com s'esperava els resultats dels assajos del costat dret i del costat esquerre han tingut resultats molt similars. El fet que els resultats obtinguts no siguin exactament iguals pot ser degut a què a l'hora de dibuixar el quadre hi ha hagut alguna petita diferència que fa que el quadre no sigui totalment simètric.

### 3.5.5. Assaig a fatiga per forces horitzontals

Les condicions de contorn i les càrregues aplicades es poden observar a la Figura 62.

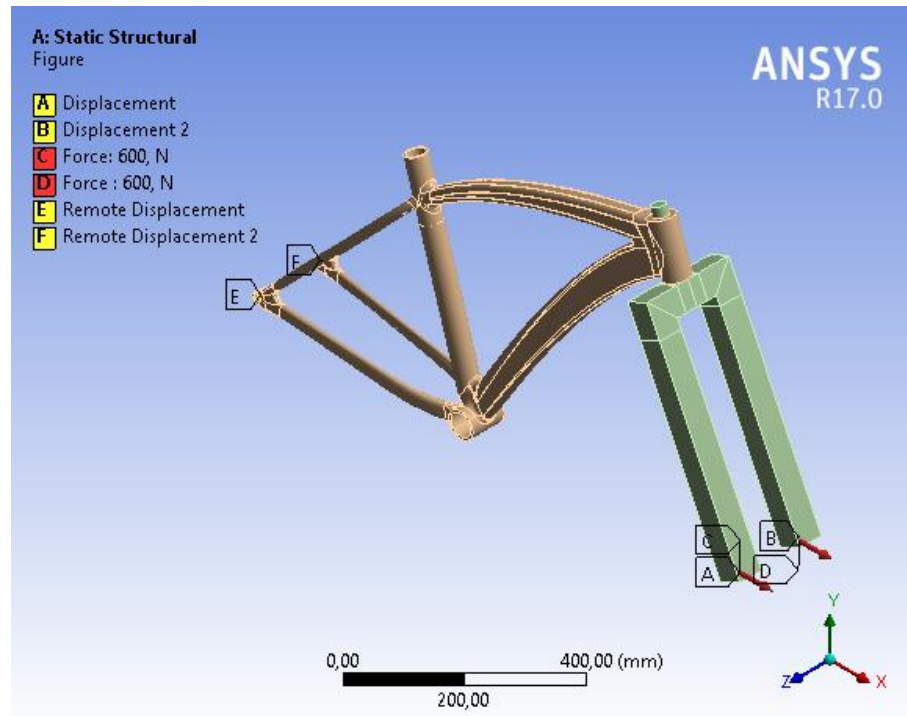


Figura 62. Assaig forces horitzontals

Primer es faran dos assajos estàtics per veure les tensions que es generen en el quadre al aplicar 1200 N cap endavant i després les tensions que es generen quan s'apliquen 600 N cap endarrere.

En la Figura 63 es mostren les tensions de Von Mises quan s'apliquen els 1200 N. S'observa que la tensió màxima es troba a la unió del tub del seient amb el tub superior i és de 49,114 MPa. Com que no es sobrepassa la resistència última no hi ha cap problema. També es pot observar la forma inicial del quadre. La forquilla no es mostra ja que no interessa.

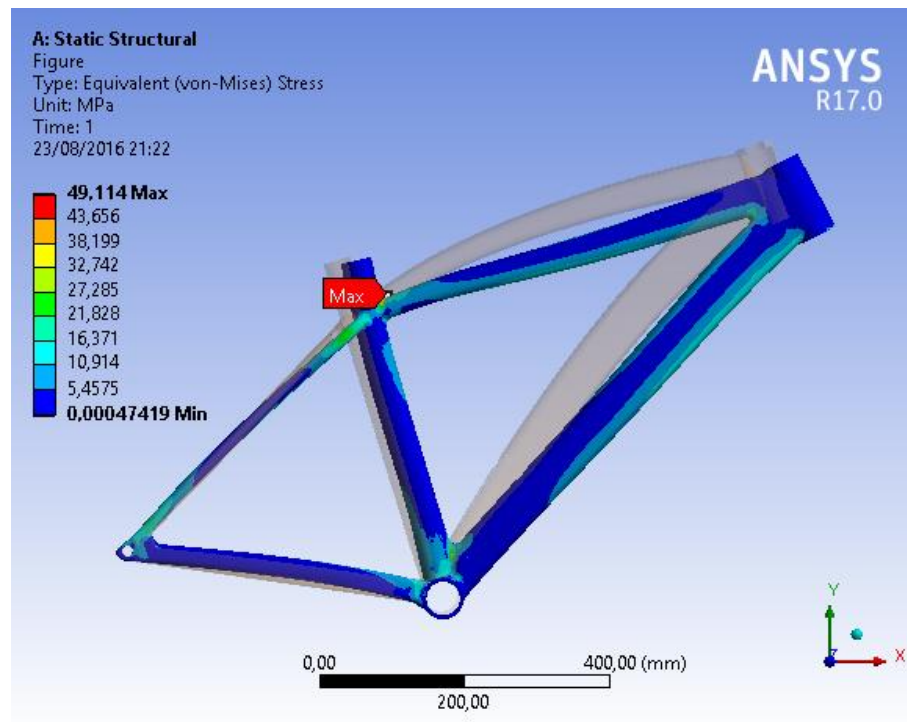


Figura 63. Tensions Von Mises Força 1200 N

En la Figura 64 es pot veure una vista ampliada de la zona on hi ha la tensió més elevada.

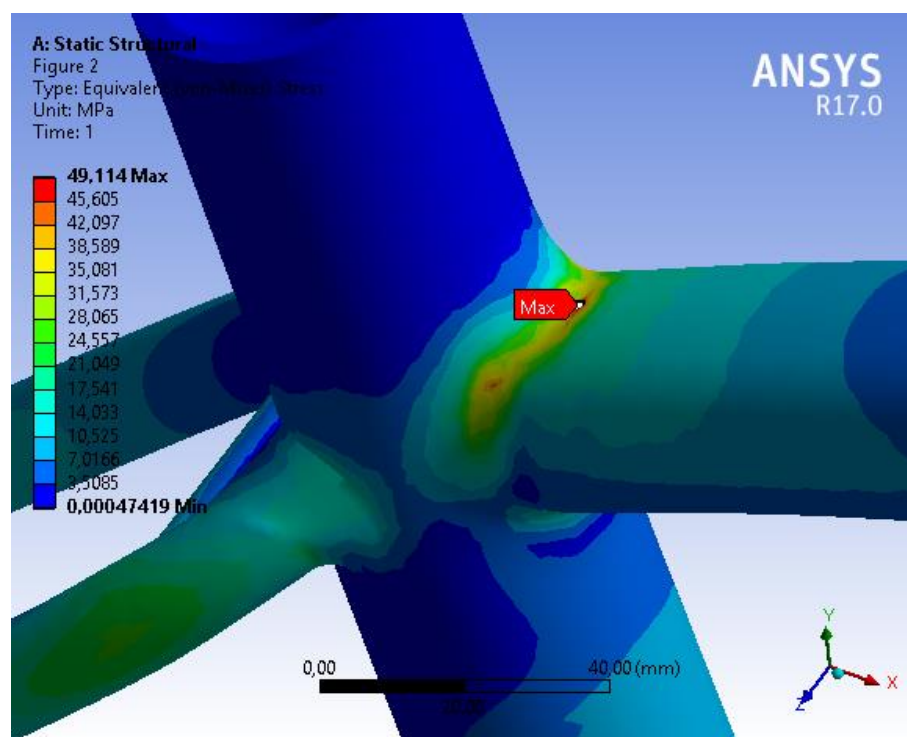


Figura 64. Vista ampliada zona tensió més elevada

Pel que fa a les deformacions totals trobem que la màxima deformació es troba situada a la part de sota del tub inferior tal com es mostra a la Figura 65. La deformació màxima és de 0,65055 mm.

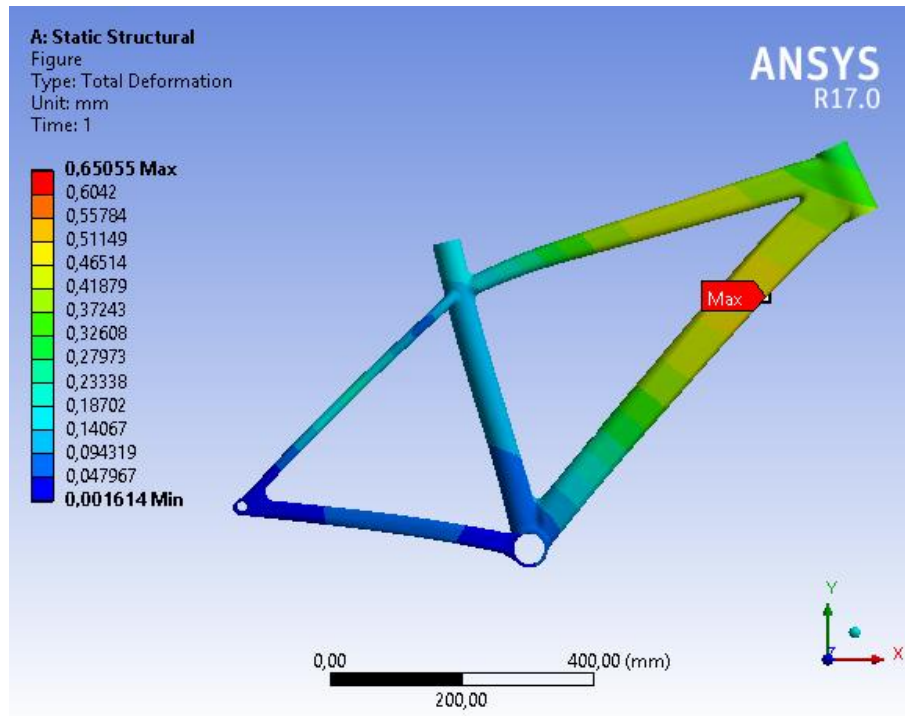


Figura 65. Deformacions totals

En la Figura 66 es mostren les tensions de Von Mises quan s'aplica la força de 600 N. S'observa que la tensió màxima es troba a la unió del tub del seient amb el tub superior i és de 24,557 MPa. Com que no es sobrepassa la resistència última no hi ha cap problema. També es pot observar la forma inicial del quadre. La forquilla no es mostra ja que no interessa.

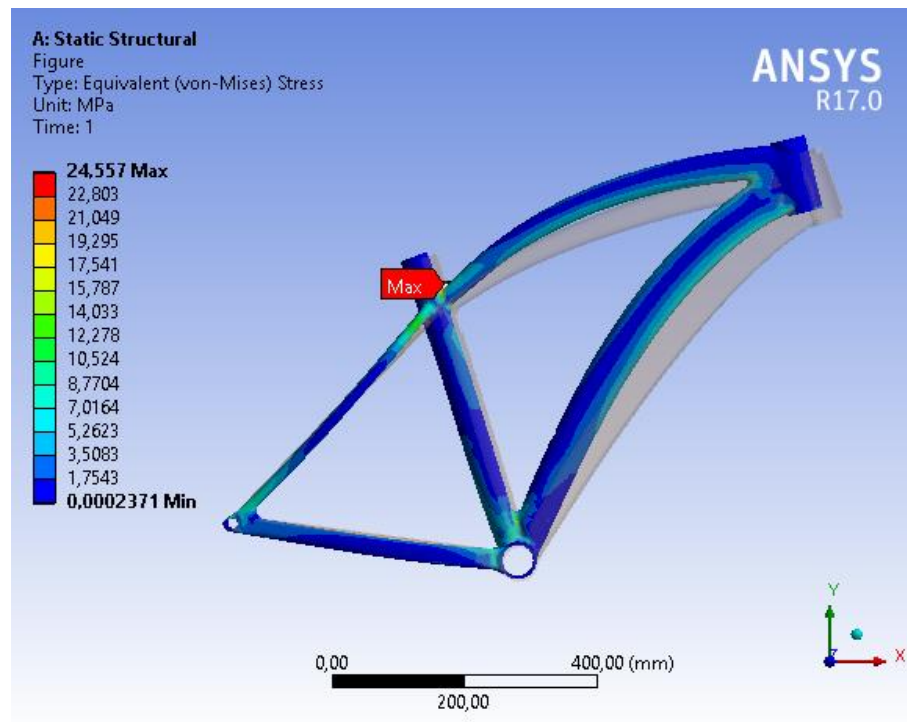


Figura 66. Tensions Von Mises força 600 N cap endarrere

En la Figura 67 es pot veure una vista ampliada de la zona on hi ha la tensió més elevada.

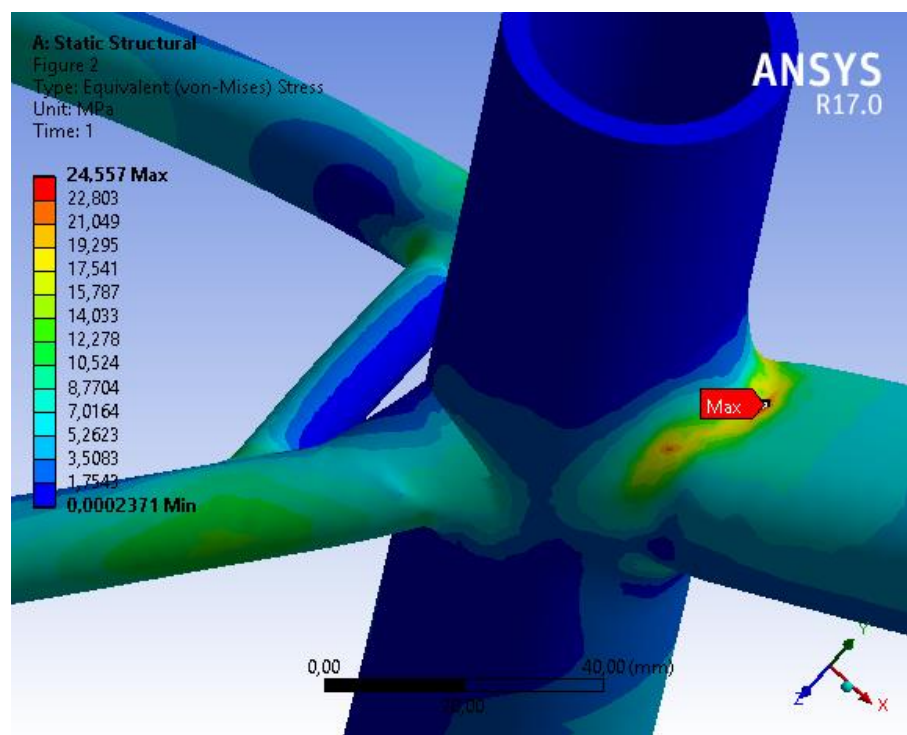


Figura 67. Vista ampliada zona tensió més elevada

Pel que fa a les deformacions totals trobem que la màxima deformació es troba situada a la part de sota del tub inferior tal com es mostra a la Figura 68. La deformació màxima és de 0,32527 mm.

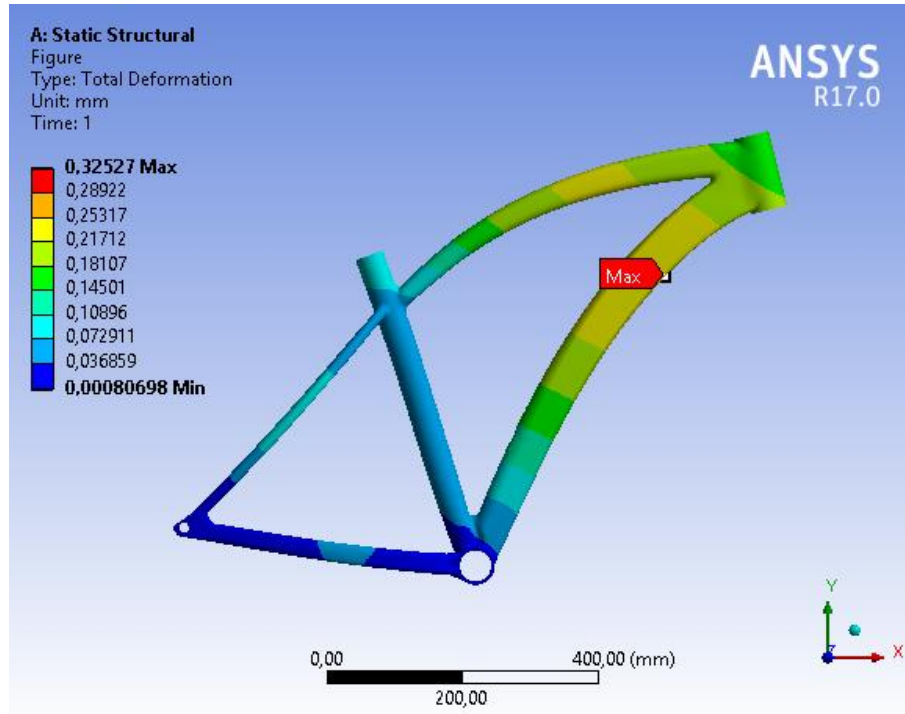


Figura 68. Deformacions totals

Per dur a terme l'assaig a fatiga s'ha d'establir que el tipus de càrrega sigui "Ratio", amb un "Loading Ratio" de -0,5 i un factor d'escala de 1. Això farà que s'apliquin els 1200 N cap endavant i després s'aplicaran -600 N, per tant, cap endarrere. La gràfica d'aquest tipus de càrrega es mostra a la Figura 69.

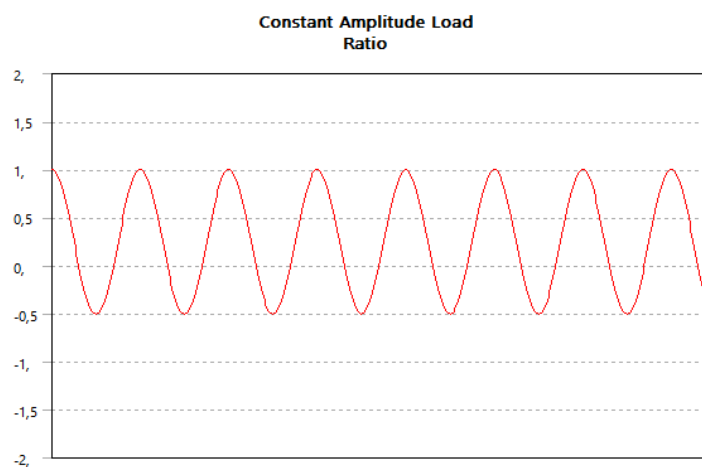


Figura 69. Càrrega de tipus Ratio amb factor de -0,5

En la Figura 70 s'observa que el primer que fallarà és la forquilla. El quadre es veu tot pintat de blau, per tant, segons la llegenda aguantarà  $10^8$  cicles. Es pot arribar a la conclusió que aquest assaig no és especialment perjudicial pel quadre de la bicicleta.

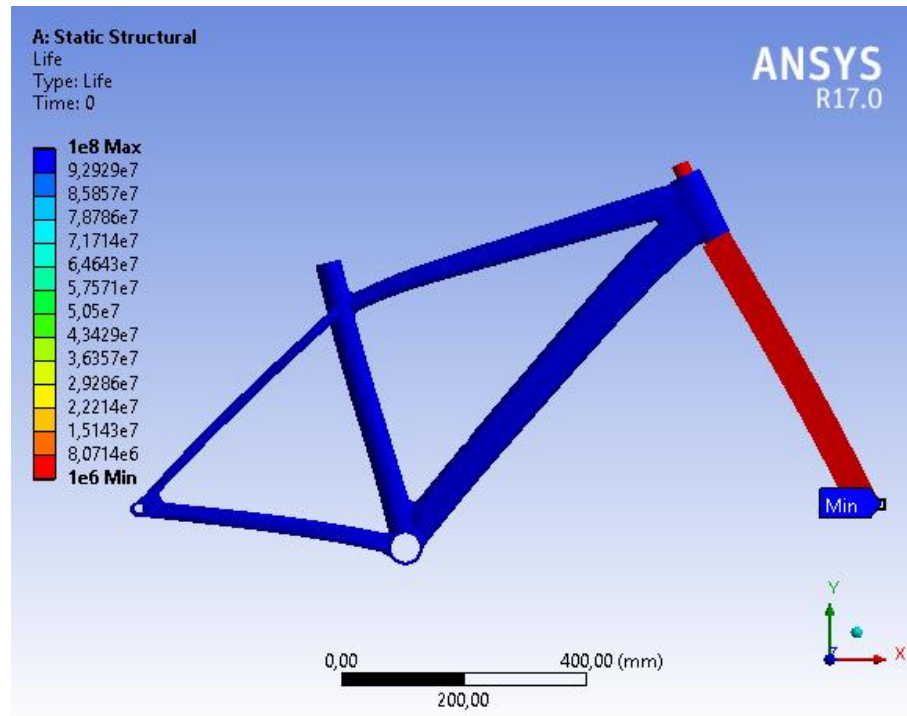


Figura 70. Vida del quadre

Ara es trobarà el factor de seguretat que tindria el quadre pels 50000 cicles d'assaig que estableix la norma. En la Figura 71 es pot observar que el factor de seguretat és de 5,3597 i es troba localitzat a la unió del tub del seient amb el tub superior (Figura 72). Es veu tot el quadre pintat de blau excepte la unió anteriorment mencionada i una petita zona a la unió del tub del seient amb el tub inferior (Figura 73).

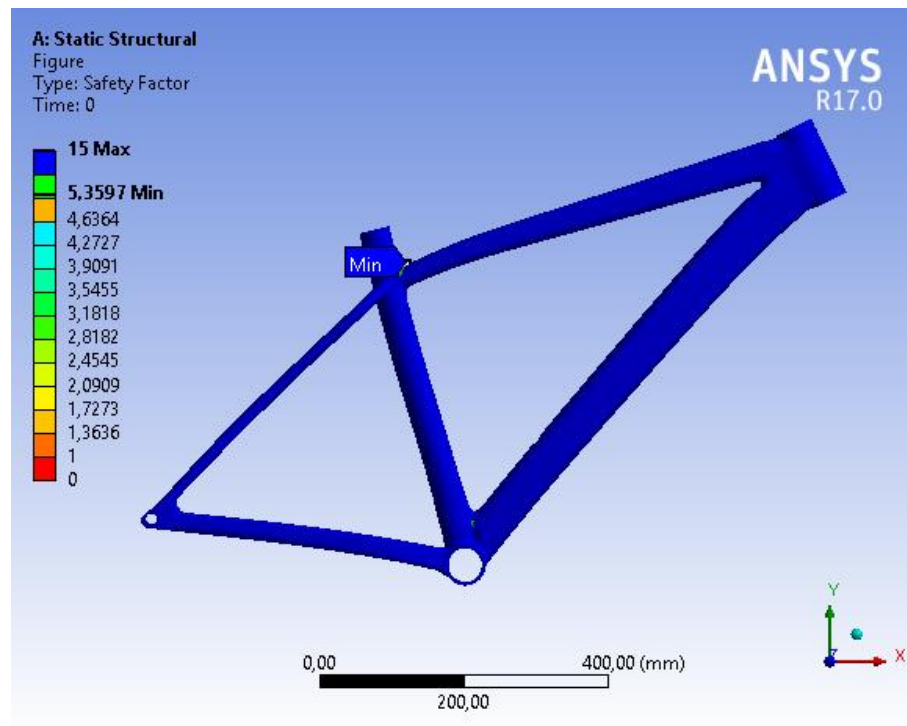


Figura 71. Vista general del quadre amb el factor de seguretat

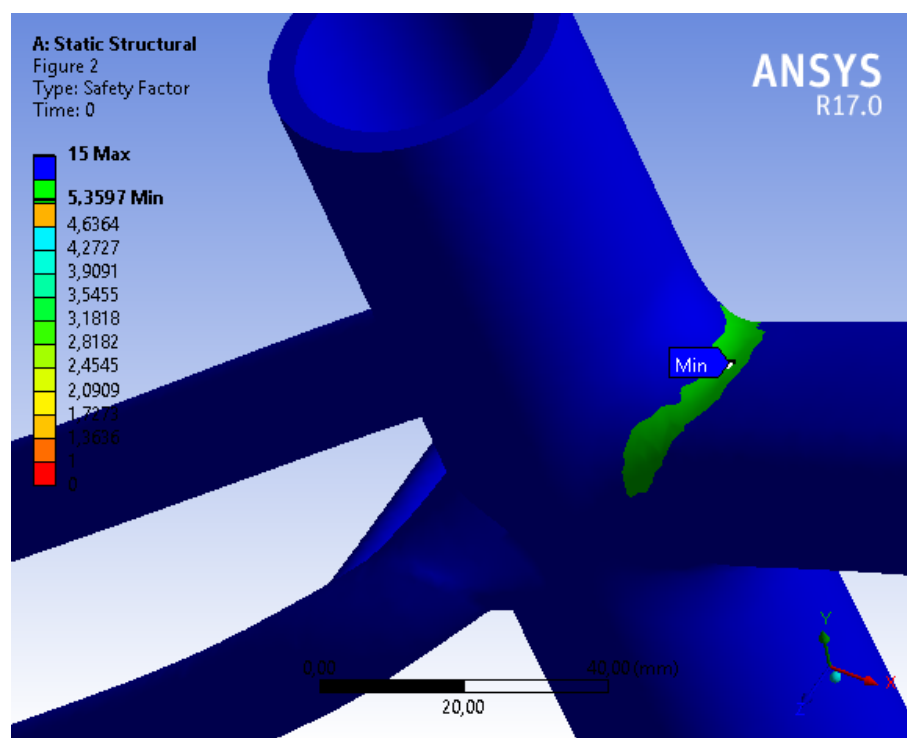


Figura 72. Factor de seguretat unió tub seient i tub superior

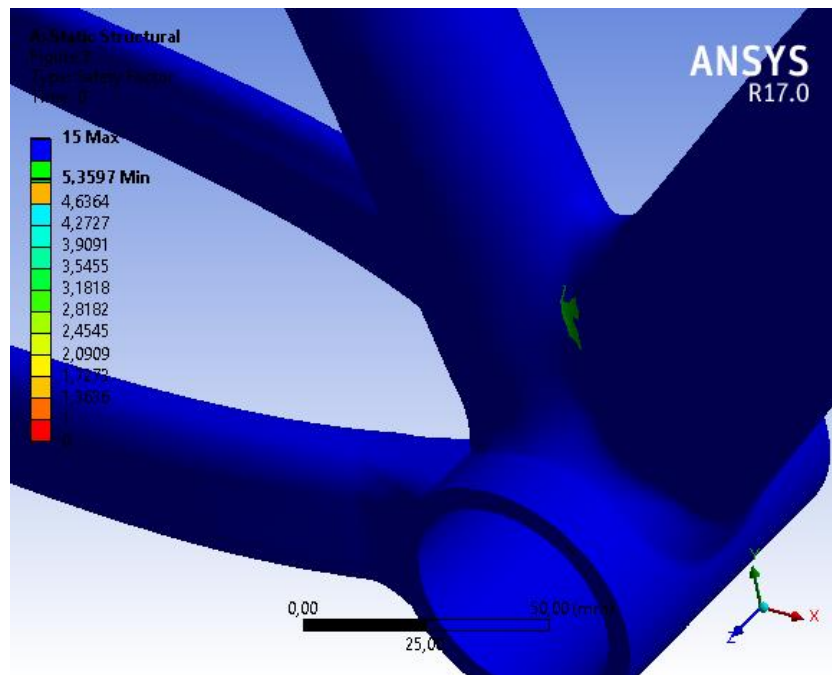


Figura 73. Factor de seguretat petita zona unió tub seient i tub inferior

Un factor de seguretat de 5,3597 és molt elevat i, per tant, es pot concloure que aquest assaig pràcticament no afecta al quadre.

### 3.5.6. Assaig a fatiga amb una força vertical

Les càrregues aplicades i les condicions de contorn es mostren a la Figura 74.

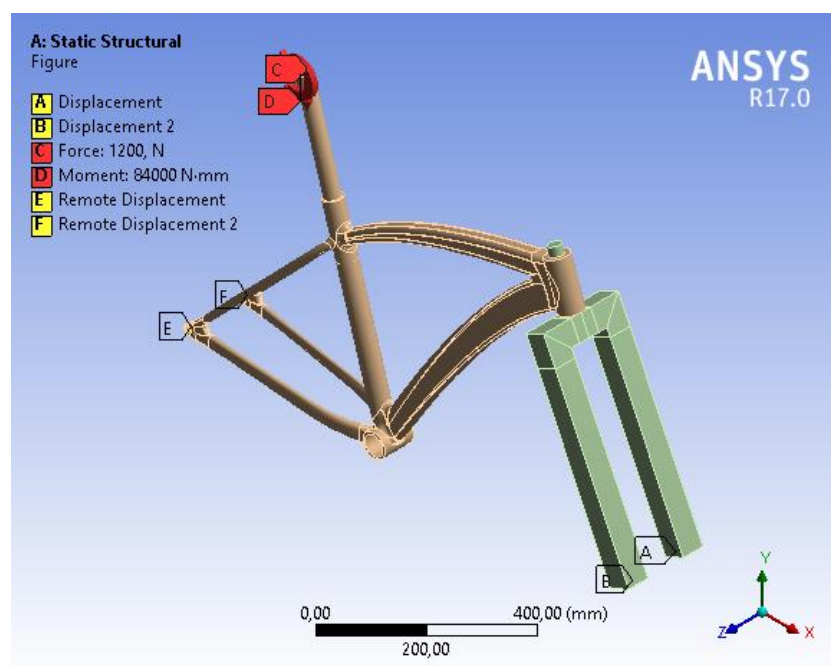


Figura 74. Assaig força vertical

Primer es farà un assaig a estàtica per veure les tensions que es generen en el quadre al aplicar la força i el moment a la part superior de la tija del seient.

En la Figura 75 es mostren les tensions de Von Mises quan s'aplica la força de 1200 N i el moment de 84000 N·mm. S'observa que la tensió màxima es troba a la unió del tub del seient amb el tub superior i és de 84,169 MPa. Com que no es sobrepassa la resistència última no hi ha cap problema. També es pot observar la forma inicial del quadre. La forquilla no es mostra ja que no interessa.

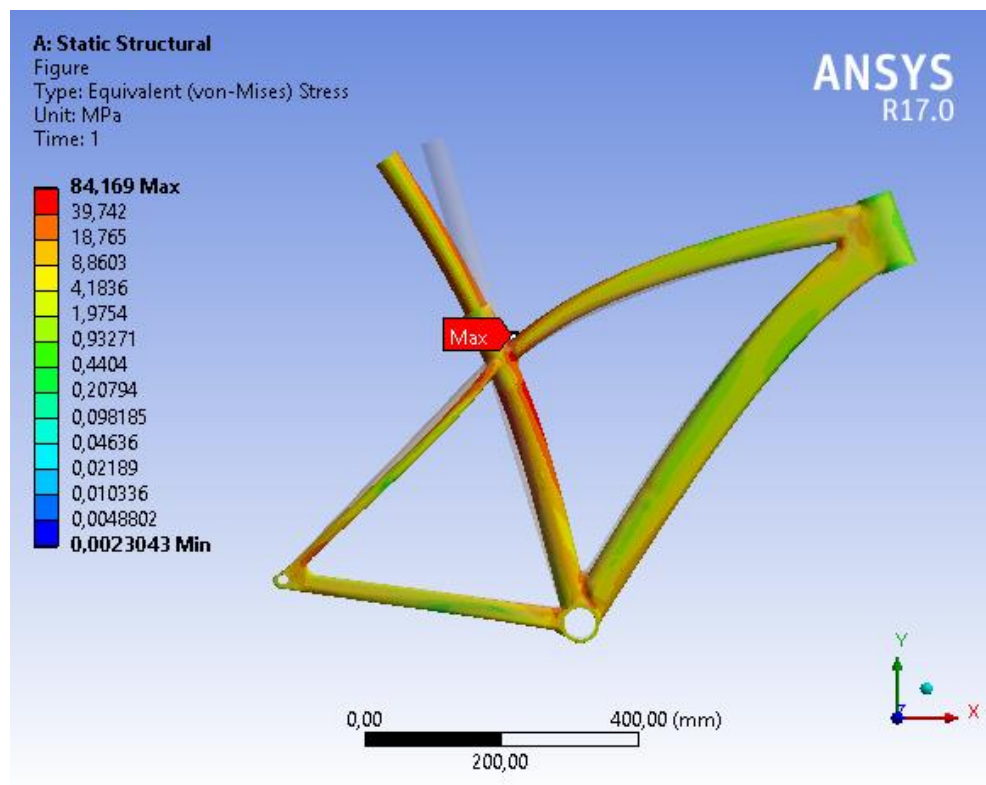


Figura 75. Tensions de Von Mises

En la Figura 76 es pot veure una vista ampliada de la zona on hi ha la tensió més elevada.

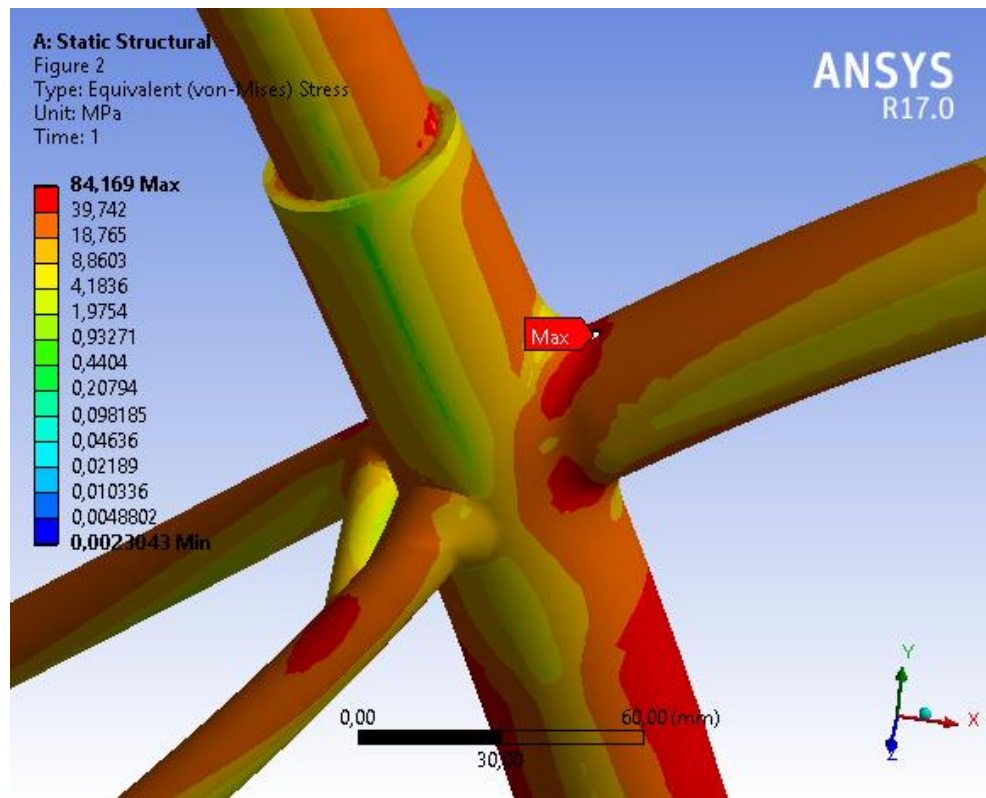


Figura 76. Vista ampliada zona tensió més elevada

A la zona del tub del seient que apareix a la Figura 77 la tensió també és elevada, aproximadament uns 60 MPa (mesurat amb l'eina "Probe").

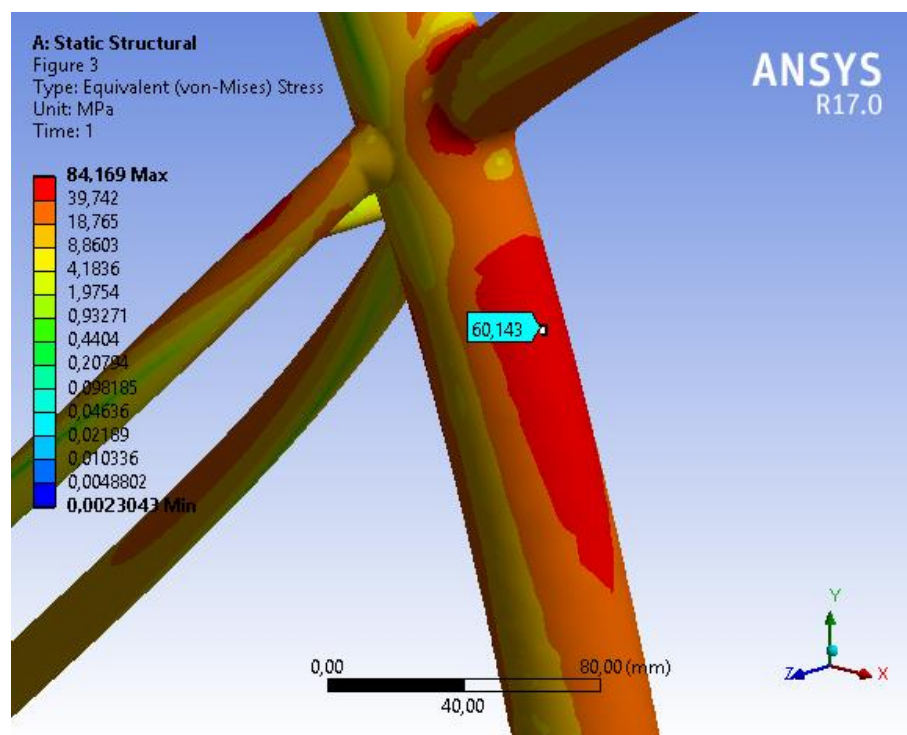


Figura 77. Tensions tub seient

Pel que fa a les deformacions totals trobem que la màxima deformació es troba situada la part superior de la tija del seient (on s'apliquen les càrregues). Això es pot observar a la Figura 78. Com que la tija del seient no forma part del quadre es buscarà amb l'eina "Probe" la màxima deformació del quadre. La màxima deformació total del quadre es troba als tirants i és de 0,53 mm aprox.

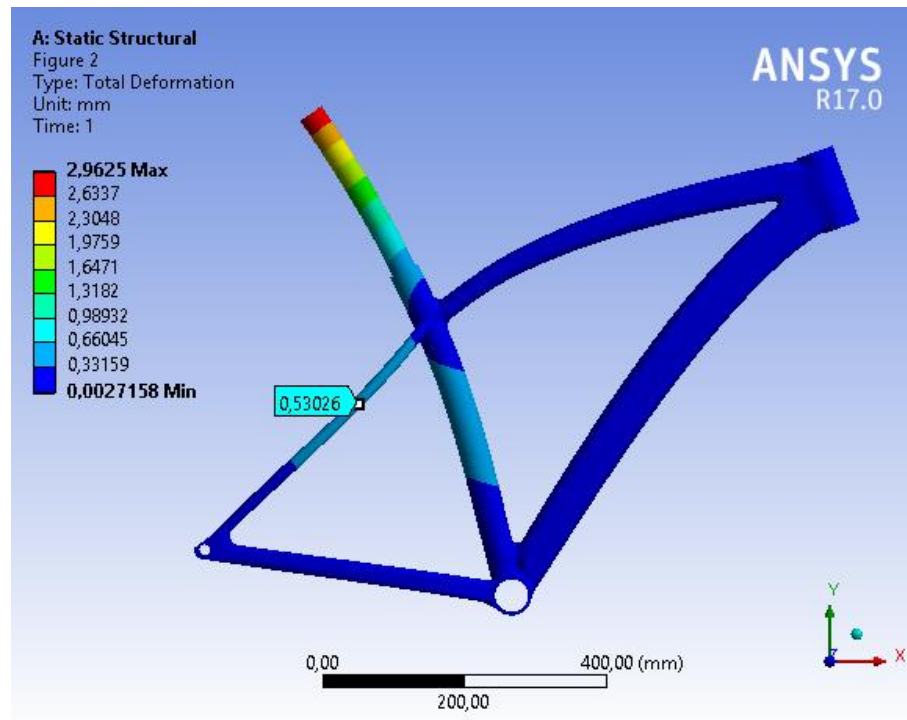


Figura 78. Màxima deformació total del quadre

Pel dur a terme l'assaig a fatiga s'ha d'establir que el tipus de càrrega sigui "Zero Based", que significa que és una càrrega alternant que va des de zero fins al seu valor màxim i torna a zero repetidament tal com es mostra a la Figura 79.

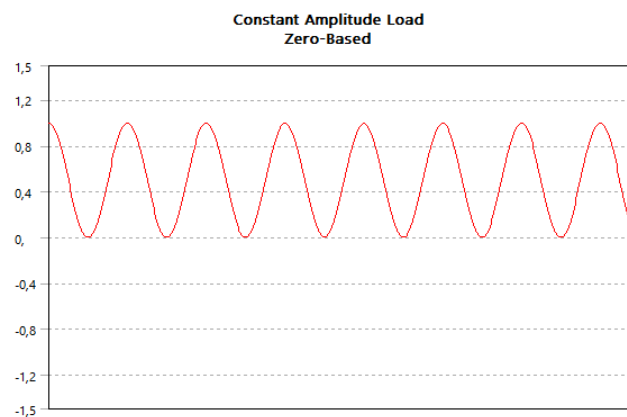


Figura 79. Càrrega d'amplitud constant "Zero-Based"

Tal com ja havia passat a l'assaig a fatiga per forces horitzontals, en la Figura 80 s'observa que el primer que fallarà és la forquilla. El quadre es veu tot pintat de blau, per tant, segons la llegenda aguantarà  $10^8$  cicles. Es pot arribar a la conclusió que aquest assaig no és especialment perjudicial pel quadre de la bicicleta.

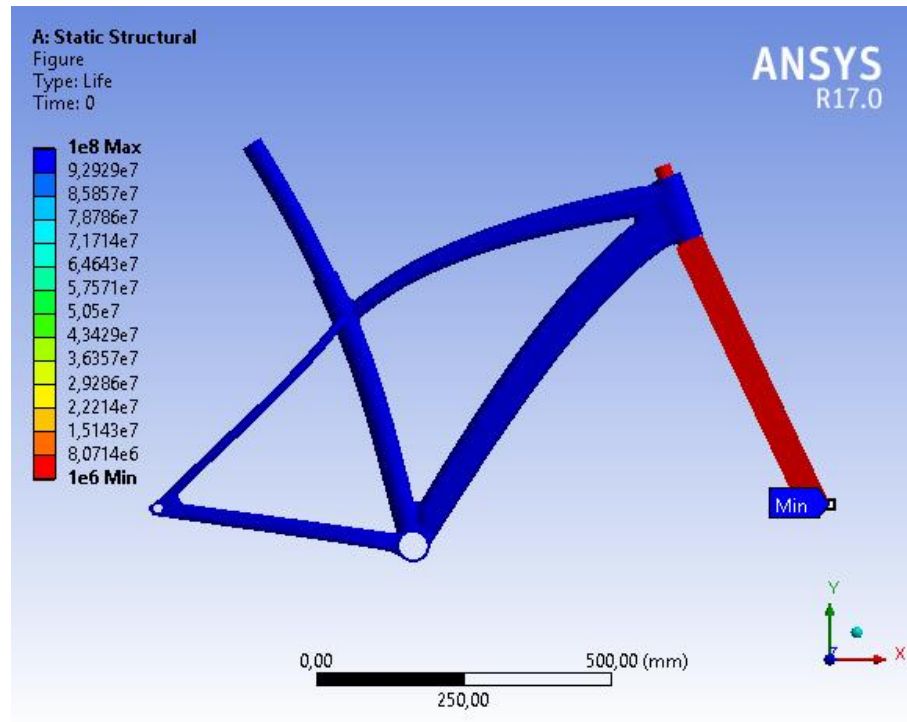


Figura 80. Vida del quadre

Ara es trobarà el factor de seguretat que tindria el quadre pels 50000 cicles d'assaig que estableix la norma. En la Figura 81 es pot observar que el factor de seguretat del quadre és de 4,6912 i es troba localitzat a la unió del tub del seient amb el tub superior (Figura 82).

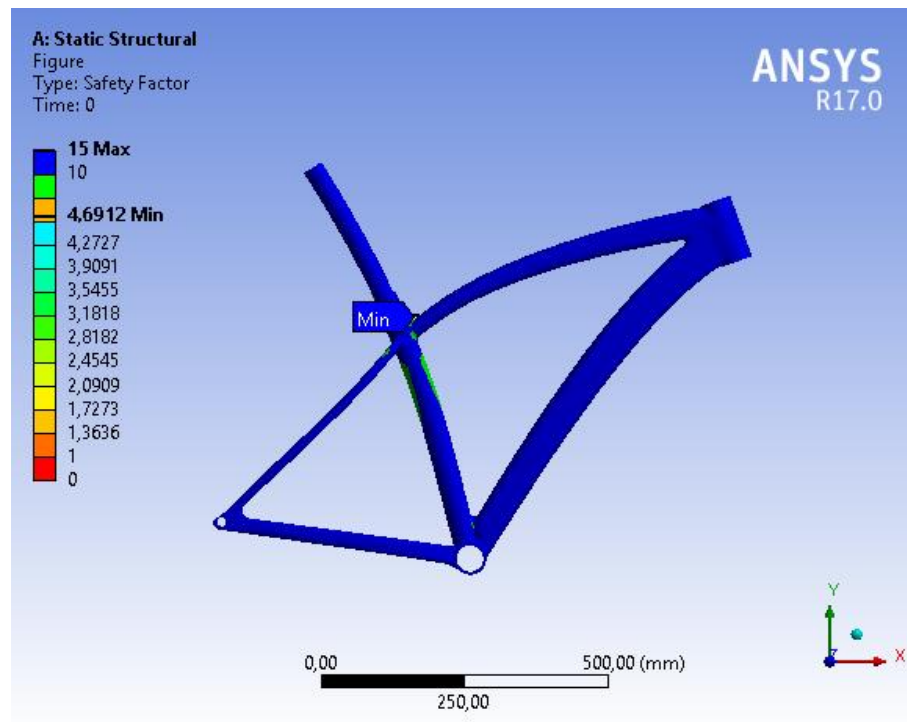


Figura 81. Vista general del quadre amb el factor de seguretat

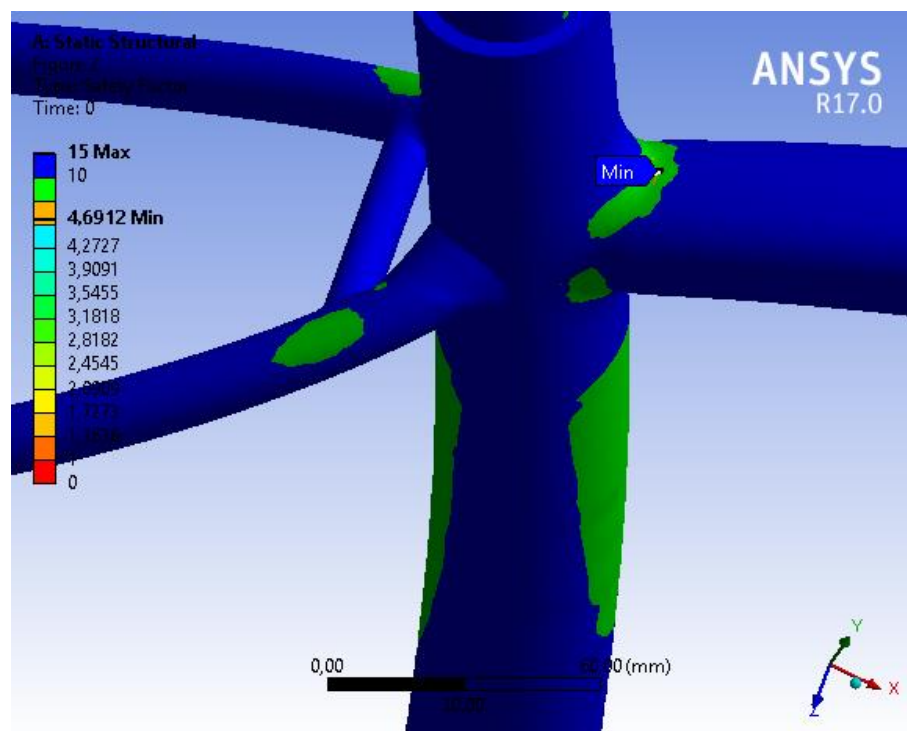


Figura 82. Zones amb el factor de seguretat més baix

Aquest factor de seguretat és molt elevat i es pot arribar a la conclusió que aquest assaig pràcticament no afecta al quadre.

#### **4. RESUM DEL PRESSUPOST**

El cost en concepte de disseny i fabricació del present projecte puja a 13.081,93 € (TRETZE MIL VUITANTA-UN Euros amb NORANTA-TRES Cèntims).

## 5. CONCLUSIONS

En el món del ciclisme de muntanya la bicicleta és un dels factors que més afecta al rendiment, i la part més important d'una bicicleta és el quadre. És per aquest motiu, juntament amb la meva passió pel món del ciclisme, que he decidit realitzar aquest projecte.

L'objectiu d'aquest projecte era simular els assajos de la norma UNE-EN ISO 4210-6 mitjançant l'Ansys Workbench, basat en el mètode dels elements finits, i estudiar-ne el comportament.

Per a realitzar l'estudi primer s'ha hagut de dibuixar el quadre mitjançant Solidworks. Tot seguit, s'ha importat al Workbench, s'ha creat la malla i s'han establert les condicions de contorn. A continuació s'han realitzat les simulacions i posteriorment s'han analitzat els resultats.

Després d'haver realitzat les simulacions i haver analitzat els resultats es pot arribar a la conclusió que s'han assolit els objectius d'aquest projecte.

Com s'ha pogut veure el quadre compliria la normativa per cada un dels assajos que s'han dut a terme però per l'assaig de caiguda del quadre s'ha vist que aquest es trencaria degut a les elevades tensions que ha de suportar, però si es té en compte la magnitud de les forces que s'hi apliquen crec que és comprensible. Per solucionar això crec que s'hauria de reforçar les zones més dèbils per millorar les prestacions mecàniques del quadre. Probablement si l'espessor del quadre fos major (en aquest disseny és de 1,40 mm a tot el quadre) també aconseguiríem millors resultats però en contrapartida també augmentaria el pes. Per millorar més el disseny es podria utilitzar el procés d'hidroformat, que ja s'hauria fet servir per aconseguir les formes requerides dels tubs, per aconseguir tenir parts més fines on el quadre hagués de suportar menys esforços i reforçar les zones on els esforços siguin majors. Aquest mètode consisteix a obtenir diferents espessors en un tub mitjançant l'acció d'un líquid a pressió. Això podria servir per reforçar el quadre sense afegir pes.

S'ha observat que tot i que les masses que s'utilitzen pels assajos venen marcades per la norma, per calcular les forces a aplicar s'ha de tenir en compte la rigidesa del quadre i això provoca que en un quadre amb un comportament poc elàstic les forces a aplicar siguin més elevades que en un quadre més elàstic.

Durant la realització d'aquest projecte s'ha arribat varies vegades a solucions no satisfactòries, obligant a modificar el disseny fins a arribar al disseny final que es presenta en aquest projecte. Redissenyar el quadre per fer-lo òptim ha estat un procés enriquidor ja que permet anar observant què implica cada modificació del disseny. Finalment s'ha aconseguit un disseny resistent i relativament lleuger, amb un pes aproximat de 1,83 kg per una talla L, que és més o menys per on es mouen els pesos de quadres d'alumini.

Si s'hagués dut a terme un assaig elastoplàstic probablement s'haguessin obtingut uns resultats més precisos ja que per l'assaig de caiguda del quadre s'està fora del comportament elàstic.

Hauria sigut interessant tenir l'oportunitat de poder construir aquest quadre i provar-lo físicament però, malauradament, això requeria una inversió de temps i diners de la qual no disposàvem.

## **6. RELACIÓ DE DOCUMENTS**

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

## 7. BIBLIOGRAFIA

- CANNONDALE. Technical Specifications. (<http://www.cannondale.com>, 2 de març de 2016)
- CANYON. Technical Specifications. (<http://www.canyon.com>, 2 de març de 2016)
- CEEWAY. Bike Building Suppliers. (<http://www.ceeway.com/index.html>, 25 de juliol de 2016)
- CLOOT BIKE. Breve historia de las bicicletas. (<http://www.clootbike.com/blog/breve-historia-de-las-bicicletas/>, 1 de maig de 2016)
- ECURED. Bicicleta de montaña. ([http://www.ecured.cu/Bicicleta\\_de\\_Monta%C3%B1a](http://www.ecured.cu/Bicicleta_de_Monta%C3%B1a), 1 de maig de 2016)
- LOOK. Technical Specifications. (<http://www.lookcycle.com/es/int.html>, 2 de març de 2016)
- MATWEB. Properties Aluminum 7005-T6. (<http://www.matweb.com>, 15 de maig de 2016)
- MERIDA. Technical Specifications. (<http://www.merida-bikes.com.es>, 2 de març de 2016)
- NOVA CYCLES SUPPLIER. The FrameBuilders Source (<http://www.cycle-frames.com/bicycle-frame-tubing/home.php>, 25 de juliol de 2016)
- OLYMPIA. Technical Specifications. (<http://www.olympia-cycles.com/es>, 2 de març de 2016)
- ORBEA. Technical Specifications. (<http://www.orbea.com>, 2 de març de 2016)
- RECIO, I. Desenvolupament d'una eina virtual 3D per un assaig inicial de xassís de bicicleta. Tesis Master. Master of Science in Mechanics of Materials & Structures. Escola Politècnica Superior. Setembre 2013

- SCOTT. Technical Specifications. (<http://www.scott-sports.com>, 2 de març de 2016)
- SPECIALIZED. Technical Specifications. (<http://www.specialized.com>, 2 de març de 2016)
- TREK. Technical Specifications. (<http://www.trekbikes.com>, 2 de març de 2016)

## 8. GLOSSARI

$F \rightarrow$  Força [N]

$K \rightarrow$  Rigidesa [N/mm]

$U \rightarrow$  Desplaçament [mm]

$F_u \rightarrow$  Força unitària [N]

$m \rightarrow$  Massa [kg]

$g \rightarrow$  Gravetat [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$h \rightarrow$  Alçada [mm]

$\delta \rightarrow$  Desplaçament [mm]

$f_x \rightarrow$  Força en l'eix x [N]

$f_y \rightarrow$  Força en l'eix y [N]

## **9. AGRAIMENTS**

Voldria donar les gràcies al Dr. Narcís Gascons pel seu suport i ajuda a l'hora de desenvolupar aquest projecte.

També m'agradaria agrair al Sr. Ivan Recio pels seus consells a l'hora d'iniciar el projecte.

## ANNEXOS

### A. Estudi de mercat

En aquest estudi de mercat s'ha fet una recerca de la geometria i de la forma del quadre de les bicicletes destinades a la modalitat de Rally (XC) de competició d'algunes de les principals marques de bicicletes.

Com a referència les mides del quadre que es donaran seran les que apareixen en la Figura 83. En la Taula 11 es troba que significa cada abreviació. Hi ha alguna marca que no proporciona totes aquestes mides.

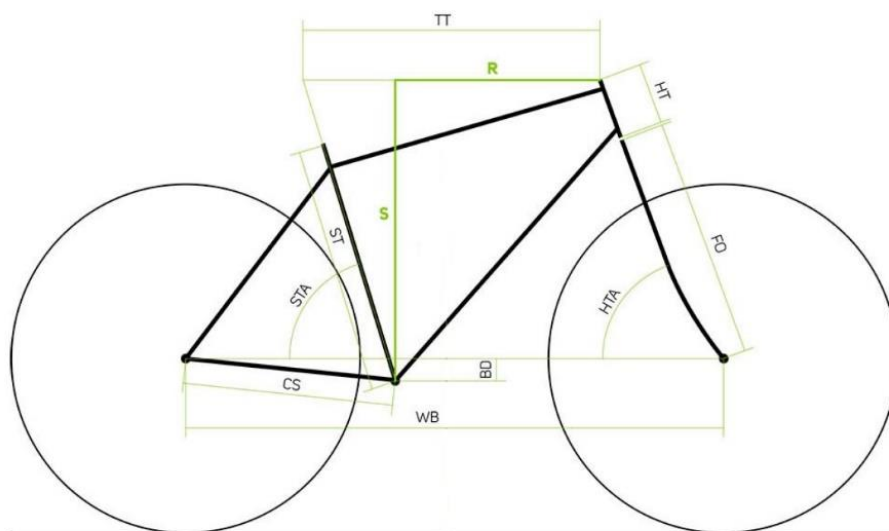


Figura 83. Mides de referència

Taula 11. Mides principals del quadre

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA
Angle tub seient	Seat tube angle	STA
Tub superior efectiu	Top tube	TT
Tub direcció	Head tube	HT
Tub seient	Seat tube	ST
Beines	Chain stay	CS
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB
Alçada del quadre	Stack	S
Abast del quadre	Reach	R

### Cannondale F-SI

En la Figura 84 s'observa la forma del quadre i en la Taula 12 les dimensions principals.



Figura 84. Cannondale F-SI

Taula 12. Mides Cannondale F-SI

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	69,8°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	73,1°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	622 mm
Tub direcció	Head tube	HT	110 mm
Tub seient	Seat tube	ST	485 mm
Beines	Chain stay	CS	-
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1112 mm
Altura del quadre	Stack	S	615 mm
Abast del quadre	Reach	R	435 mm

## Canyon Exceed

En la Figura 85 s'observa la forma del quadre i en la Taula 13 les dimensions principals.



Figura 85. Canyon Exceed

Taula 13. Mides Canyon Exceed

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	69,5°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	74°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	620,3 mm
Tub direcció	Head tube	HT	115 mm
Tub seient	Seat tube	ST	485 mm
Beines	Chain stay	CS	432 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1130,2 mm
Altura del quadre	Stack	S	-
Abast del quadre	Reach	R	441 mm

**Look 989**

En la Figura 86 s'observa la forma del quadre i en la Taula 14 les dimensions principals.



Figura 86. Look 989

Taula 14. Mides Look 989

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	-
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	-
Tub superior efectiu	Top tube	TT	633,9 mm
Tub direcció	Head tube	HT	110,1 mm
Tub seient	Seat tube	ST	770 mm
Beines	Chain stay	CS	440 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	-
Altura del quadre	Stack	S	615 mm
Abast del quadre	Reach	R	440 mm

En aquest quadre s'observa que el tub del seient és molt més llarg que en els altres ja que porta la tija del seient integrada.

**Merida Big Nine 9000**

En la Figura 87 s'observa la forma del quadre i en la Taula 15 les dimensions principals.



Figura 87. Merida Big Nine 9000

Taula 15. Mides Merida Big Nine 9000

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	70,5º
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	70,5º
Tub superior efectiu	Top tube	TT	619 mm
Tub direcció	Head tube	HT	110 mm
Tub seient	Seat tube	ST	483 mm
Beines	Chain stay	CS	440 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1102 mm
Altura del quadre	Stack	S	633 mm
Abast del quadre	Reach	R	416 mm

Olympia Iron

En la Figura 88 s'observa la forma del quadre i en la Taula 16 les dimensions principals.



Figura 88. Olympia Iron

Taula 16. Mides Olympia Iron

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	71,5°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	74,3°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	620 mm
Tub direcció	Head tube	HT	125 mm
Tub seient	Seat tube	ST	495 mm
Beines	Chain stay	CS	440 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1111 mm
Altura del quadre	Stack	S	-
Abast del quadre	Reach	R	-

Orbea Alma

En la Figura 89 s'observa la forma del quadre i en la Taula 17 les dimensions principals.



Figura 89. Orbea Alma

Taula 17. Mides Orbea Alma

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	70,5°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	73,5°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	613 mm
Tub direcció	Head tube	HT	110 mm
Tub seient	Seat tube	ST	483 mm
Beines	Chain stay	CS	436 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1106 mm
Altura del quadre	Stack	S	621 mm
Abast del quadre	Reach	R	423 mm

## Scott Scale

En la Figura 90 s'observa la forma del quadre i en la Taula 18 les dimensions principals.



Figura 90. Scott Scale

Taula 18. Mides Scott Scale

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	69,5°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	72,5°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	620 mm
Tub direcció	Head tube	HT	115 mm
Tub seient	Seat tube	ST	480 mm
Beines	Chain stay	CS	438 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1117 mm
Altura del quadre	Stack	S	-
Abast del quadre	Reach	R	422 mm

Specialized S-Works Epic HT

En la Figura 91 s'observa la forma del quadre i en la Taula 19 les dimensions principals.



Figura 91. Specialized S-Works Epic HT

Taula 19. Mides Specialized S-Works Epic HT

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	71°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	73,5°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	620 mm
Tub direcció	Head tube	HT	115 mm
Tub seient	Seat tube	ST	470 mm
Beines	Chain stay	CS	430 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1105 mm
Altura del quadre	Stack	S	625 mm
Abast del quadre	Reach	R	437 mm

Trek Procaliber 9.9 SL

En la Figura 92 s'observa la forma del quadre i en la Taula 20 les dimensions principals.



Figura 92. Trek Procaliber 9.9 SL

Taula 20. Mides Trek Procaliber 9.9 SL

Mida (en català)	Dimension (en anglès)	Abreviació	Valor
Angle tub direcció	Head tube angle	HTA	69,5°
Angle tub seient	Seat tube angle	STA	72°
Tub superior efectiu	Top tube	TT	638 mm
Tub direcció	Head tube	HT	100 mm
Tub seient	Seat tube	ST	470 mm
Beines	Chain stay	CS	435 mm
Longitud entre eixos	Wheelbase	WB	1132 mm
Altura del quadre	Stack	S	604 mm
Abast del quadre	Reach	R	443 mm

## B. Càlculs

### B.1. Assaig d'impacte (caiguda d'una massa)

Quan s'aplica una càrrega d'1 N en el mateix lloc, direcció i sentit que la força que estableix la norma s'obté un desplaçament  $U$  de  $5,4235 \cdot 10^{-4}$  mm en aquest punt. Ara s'aplica l'Equació 10 per trobar la rigidesa.

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{F_u}{U} \rightarrow K = \frac{1}{5,4235 \cdot 10^{-4}} \rightarrow K = 1843.83 \text{ N/mm} \quad (\text{Eq. 10})$$

Un cop coneixem la rigidesa es tracta d'igualar l'energia potencial produïda per la massa de 22,5 kg amb l'energia elàstica que emmagatzema el quadre utilitzant l'Equació 11.

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \rightarrow 22.5 \cdot 9.81 \cdot (360 + \delta) = \frac{1}{2} \cdot 1843.83 \cdot \delta^2 \rightarrow \quad (\text{Eq. 11})$$

$$\delta = 9.4 \text{ mm}$$

Quan es troba la deformació  $\delta$ , mitjançant l'Equació 12 s'obté la força estàtica equivalent a la càrrega d'impacte de la norma.

$$f = K \cdot \delta \rightarrow f = 1843.83 \cdot 9.4 = 17340.12 \text{ N} \quad (\text{Eq. 12})$$

La força de 17340,12 N s'haurà de dividir entre 2 ja que s'aplica la meitat de la força a cada extrem de la forquilla, és a dir, 8670,06 N a cada extrem de la forquilla.

### B.2. Assaig d'impacte (caiguda del quadre)

Per poder trobar les forces equivalents el primer pas és saber les distàncies i angles que es mostren a la Figura 93.

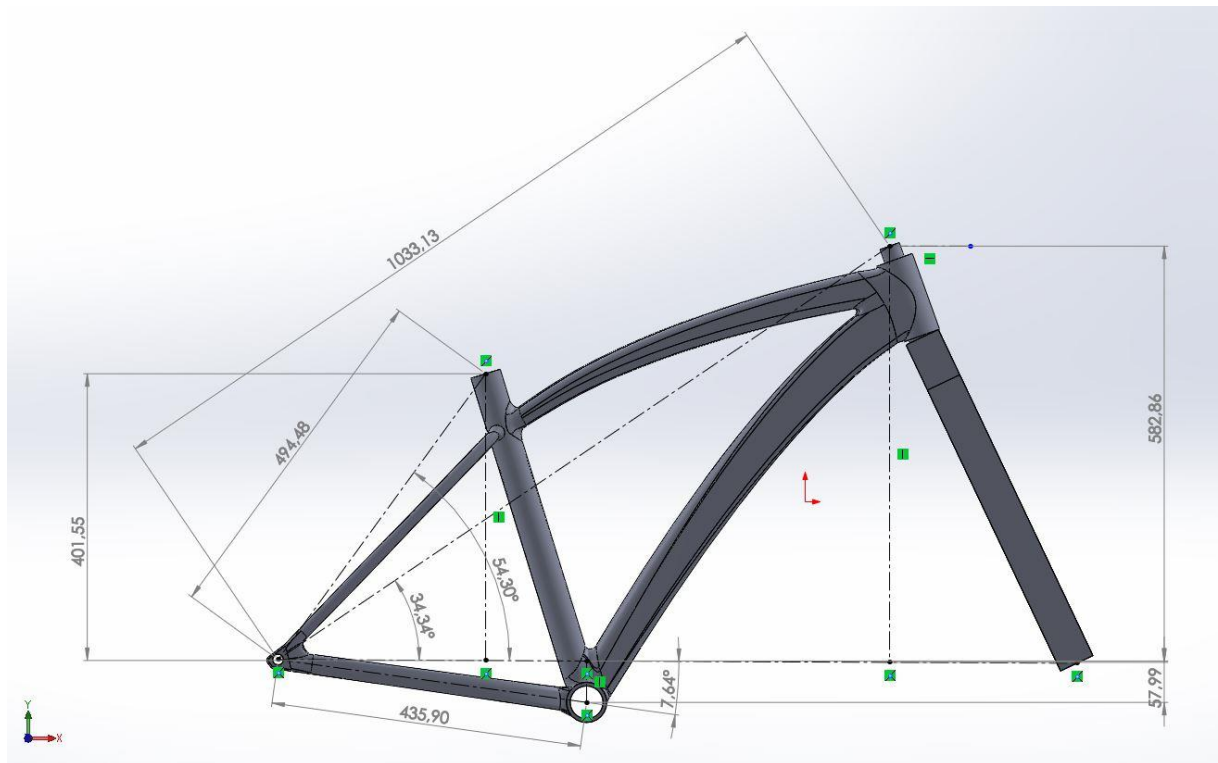


Figura 93. Mides i angles quadre

Quan els extrems de la forquilla es troben a l'alçada de 300 mm que estableix la norma, l'angle format entre la línia que uneix els dos eixos i el terra és de 15,6°. Aquest angle s'ha trobat aplicant l'Equació 13. La distància entre eixos és de 1115,7 mm.

$$\sin \alpha = \frac{300}{1115.7} \rightarrow \alpha = 15.6^\circ \quad (\text{Eq. 13})$$

Ara s'haurà de sumar aquest angle a els angles que apareixen a la Figura 94 per tal de trobar els angles corresponents als tres punts on hi hauria les masses quan els extrems de la forquilla estan a 300 mm d'alçada.

$$\text{Angle punt direcció} \rightarrow 34,34^\circ + 15,6^\circ = 49,94^\circ$$

$$\text{Angle punt seient} \rightarrow 54,3^\circ + 15,6^\circ = 69,9^\circ$$

$$\text{Angle punt pedaler} \rightarrow -7,64^\circ + 15,6^\circ = 7,96^\circ$$

A continuació es trobaran les alçades de cada punt a l'inici de l'assaig mitjançant les Equacions 14, 15 i 16.

$$\sin(49.94^\circ) = \frac{h_{direcció}}{1033.13} \rightarrow h_{direcció} = 790.73 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\sin(69.9^\circ) = \frac{h_{seient}}{494.48} \rightarrow h_{seient} = 464.36 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\sin(7.96^\circ) = \frac{h_{pedaler}}{435.9} \rightarrow h_{pedaler} = 60.36 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 16})$$

Tot seguit es trobaran les diferències entre les alçades inicial i final de cada punt (Equacions 17, 18 i 19) ja que aquestes diferències seran les alçades que s'hauran de col·locar a la fórmula de l'energia potencial.

$$\Delta h_{direcció} = 790.73 - 582.86 = 207.87 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$\Delta h_{seient} = 464.36 - 401.55 = 62.81 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\Delta h_{pedaler} = 60.36 - 57.99 = 2.37 \text{ mm} \quad (\text{Eq. 19})$$

Ara ja es pot procedir a trobar les forces equivalents a cada punt d'aplicació. Les forces d'impacte es calculen per energies. S'utilitzaran les Equacions 20, 21, 22, 23 i 24 (s'utilitzarà els mateixos n° d'equacions per la direcció, pel seient i pel pedaler ja que les equacions són les mateixes). (Veure explicació detallada de l'assaig a l'apartat 3.4.2 de la memòria).

#### Direcció

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{1}{5.3384 \cdot 10^{-5}} = 18732.2 \text{ N/mm} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \rightarrow 10 \cdot 9.81 \cdot (207.87 + \delta) = \frac{1}{2} \cdot 18732.2 \cdot \delta^2 \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\rightarrow \delta = 1.4808 \text{ mm}$$

$$f_y = K \cdot \delta \rightarrow f_y = 18732.2 \cdot 1.4808 = 27738.39 \text{ N} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f = \frac{f_y}{\cos \theta} \rightarrow f = \frac{27738.39}{\cos(34.34^\circ)} = 33593.59 \text{ N} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$f_x = f \cdot \sin \theta \rightarrow f_x = 33593.59 \cdot \sin(34.34^\circ) = 18950.23 \text{ N} \quad (\text{Eq. 24})$$

Seient

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{1}{1.7954 \cdot 10^{-4}} = 5569.79 \text{ N/mm} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \rightarrow 30 \cdot 9.81 \cdot (62.81 + \delta) = \frac{1}{2} \cdot 5569.79 \cdot \delta^2 \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\rightarrow \delta = 2.63 \text{ mm}$$

$$f_y = K \cdot \delta \rightarrow f_y = 5569.79 \cdot 2.63 = 14647.05 \text{ N} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f = \frac{f_y}{\cos \theta} \rightarrow f = \frac{14647.05}{\cos(60.37^\circ)} = 29626.08 \text{ N} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$f_x = f \cdot \sin \theta \rightarrow f_x = 29626.08 \cdot \sin(60.37^\circ) = 25752.06 \text{ N} \quad (\text{Eq. 24})$$

Pedaler

$$F_u = K \cdot U \rightarrow K = \frac{1}{1.2213 \cdot 10^{-4}} = 8187.99 \text{ N/mm} \quad (\text{Eq. 20})$$

$$m \cdot g \cdot (h + \delta) = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \delta^2 \rightarrow 50 \cdot 9.81 \cdot (2.37 + \delta) = \frac{1}{2} \cdot 8187.99 \cdot \delta^2 \quad (\text{Eq. 21})$$

$$\rightarrow \delta = 0.596 \text{ mm}$$

$$f_y = K \cdot \delta \rightarrow f_y = 8187.99 \cdot 0.596 = 4881.11 \text{ N} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f = \frac{f_y}{\cos \theta} \rightarrow f = \frac{4881.11}{\cos(7.91^\circ)} = 4927.99 \text{ N} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$f_x = f \cdot \sin \theta \rightarrow f_x = 4927.99 \cdot \sin(7.91^\circ) = 678.18 \text{ N} \quad (\text{Eq. 24})$$

**B.3. Assaig a fatiga amb forces de pedaleig****Punt d'aplicació B1**

Per trobar les forces i moments al punt B1 (veure explicació de l'assaig a l'apartat 3.4.3 de la memòria) s'utilitzaran les Equacions 25, 26, 27, 28 i 29.

$$F_y = -1200 \cdot \cos(7.5^\circ) = -1189.7 \text{ N} \quad (\text{Eq. 25})$$

$$F_z = -1200 \cdot \sin(7.5^\circ) = -156.63 \text{ N} \quad (\text{Eq. 26})$$

$$M_x = |F_y| \cdot \left(150 - \frac{73}{2}\right) + F_z \cdot 175 \cdot \sin(45^\circ) = 154413 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 27})$$

$$M_y = |F_z| \cdot 175 \cdot \cos(45^\circ) = 19382 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 28})$$

$$M_z = F_y \cdot 175 \cdot \cos(45^\circ) = -147218 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 29})$$

**Punt d'aplicació B2**

Per trobar les forces i moments al punt B2 (veure explicació de l'assaig a l'apartat 3.4.3 de la memòria) s'utilitzaran les Equacions 30, 31, 32, 33 i 34.

$$F_y = -1200 \cdot \cos(7.5^\circ) = -1189.7 \text{ N} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$F_z = 1200 \cdot \sin(7.5^\circ) = 156.63 \text{ N} \quad (\text{Eq. 31})$$

$$M_x = F_y \cdot \left(150 - \frac{73}{2}\right) + F_z \cdot 175 \cdot \sin(45^\circ) = -154413 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 32})$$

$$M_y = F_z \cdot 175 \cdot \cos(45^\circ) = -19382 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 33})$$

$$M_z = F_y \cdot 175 \cdot \cos(45^\circ) = -147218 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad (\text{Eq. 34})$$

Marc Gispert Bos

Girona, setembre de 2016