

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol:

**CÀLCUL A RESISTÈNCIA I MILLORA DELS PUNTS DÈBILS D'UN
QUADRE DE BICICLETA DE DESCENS**

Document 1: Memòria i annexos

Alumne: Francesc Castells Sanromà

Tutor: Lluís Ripoll Masferrer

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Juny 2019

ÍNDEX

MEMÒRIA

1.	INTRODUCCIÓ	3
1.1.	Antecedents.....	3
1.2.	Objecte	5
1.3.	Especificacions i abast	5
2.	METODOLOGIA.....	7
3.	DETERMINACIÓ DE LES FORCES D'IMPACTE	10
3.1.	La bicicleta.....	10
3.1.1.	Geometria i pes.....	10
3.1.2.	Suspensió davantera i amortidor.....	11
3.1.3.	Unions dels components	12
3.2.	El ciclista.....	14
3.2.1.	Geometria i pes.....	14
3.2.2.	Unions de les parts del cos	14
3.3.	Entorn i casos	15
3.4.	Simulació i obtenció de les forces.....	16
3.5.	Validació de les forces.....	19
4.	DETERMINACIÓ DELS PUNTS DÈBILS	21
4.1.	Material i geometria	21
4.1.1.	Geometria de la bicicleta.....	21
4.1.2.	Material	24
4.2.	Preparació de l'estudi amb elements finits	24
4.2.1.	Condicions de contorn	24
4.2.2.	Forces	27
4.2.3.	Mallat	29
4.3.	Resultat de l'estudi	32
5.	COMPROVACIÓ EXPERIMENTAL D'UN DELS PUNTS DÈBILS	37
5.1.	Metodologia	37
5.2.	Resultats i comparació	39
6.	RESOLUCIÓ DE LES MILLORES.....	41

6.1.	Problemàtica del disseny anterior.....	41
6.2.	Millora de la problemàtica.....	42
6.2.1.	Primera millora.....	42
6.2.2.	Segona millora.....	44
6.2.3.	Tercera millora.....	46
6.2.4.	Quarta millora.....	48
6.2.5.	Cinquena millora.....	50
7.	CONCLUSIONS.....	53
8.	RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	55
9.	REFERÈNCIES.....	56
ANNEXOS		
	ANNEX A: Quatre casos de caiguda diferents i els seus resultats.....	58
1.	Entorn i casos.....	58
2.	Forces a aplicar.....	61
3.	Resultats, comparació i conclusió.....	63
	ANNEX B: Obtenció de les forces per l'Ansys.....	67
1.	Ciclista.....	67
1.1.	Pes de les parts del cos.....	67
1.2.	Paràmetres molla-esmorteïment d'unió del cos.....	67
2.	Gir de les forces del model WM2D al model Ansys.....	70
	ANNEX C: Especificacions tècniques de la bicicleta.....	75
1.	Pes dels components.....	75
2.	Paràmetres de les molles de la suspensió i l'amortidor.....	76
3.	Geometria de la bicicleta.....	77
	ANNEX D: Detalls del cas experimental.....	80

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Degut a l'extensió del ciclisme han anat sorgint multitud de modalitats diferents, les quals tenen característiques especials. Principalment, podem englobar les diverses modalitats en dues grans branques; bicicleta de carretera i bicicleta de muntanya.

En general, el que diferencia una bicicleta de muntanya respecte la bicicleta de carretera són les rodes i el fet de tenir amortidor a davant i/o a darrere.

Centrant-nos en la disciplina de l'estudi realitzat, la disciplina de MTB (*Mountain Bicycle*) la podem subdividir en dues parts; l'XC (*Cross Country*) i el DH (*Down Hill*).

El Cross Country és una modalitat en que generalment els circuits són camins o pistes amb ascensos llargs i amb baixades de baixa dificultat tècnica. És per això que la majoria d'aquestes bicicletes acostumen a tenir poc pes i un recorregut de suspensió curt (*Figura 1.1*).



Figura 1.1. *Bicicleta de XC (Font: canyon.com)*

Per altre banda, el Down Hill és una modalitat que implica únicament el descens per la muntanya. Els circuits tenen grans dificultats tècniques, on poden aparèixer salts d'alçada considerable, zones amb pedres, forats, grans desnivells, entre d'altres. Els

ciclistes que practiquen aquest esport són portats, mitjançant remolcs mecànics, al cim del circuit per a únicament baixar-lo el més ràpid possible.

És per això que les bicicletes d'aquesta modalitat són les més pesades i les que tenen més recorregut de suspensió, per a poder passar aquests obstacles amb més comoditat i sense cap problema mecànic (*Figura 1.2*).



Figura 1.2. *Bicicleta de DH*



Figura 1.3. *Imatge representativa del DH*

Realment en aquest tipus de disciplina el pes de la bicicleta no és primordial. Tot i així, actualment els fabricants de bicicletes de descens intenten reduir el màxim el pes d'aquestes, sense treure-li rigidesa o robustesa.

Degut a la gran afluència de corredors de la disciplina a nivell mundial, les diferències en les competicions sovint són de dècimes de segons en baixades de més de tres minuts. El fet de tenir una bicicleta més lleugera i més ben estudiada és, possiblement, la petita diferència que el corredor necessita.

Per altre banda però relacionat amb l'anterior, les empreses estan constantment competint per a obtenir la bicicleta més lleugera per a atraure possibles compradors.

1.2. Objecte

L'objecte de l'estudi és realitzar el càlcul a resistència d'un quadre de bicicleta de descens. Per fer l'estudi es consideraran els casos més habituals de sol·licitacions que pot rebre aquest esport.

Finalment, l'última part del treball consisteix en redissenyar els punts dèbils per millorar-lo.

1.3. Especificacions i abast

Per a la realització de l'estudi del quadre de bicicleta de descens es tindrà en compte les seves especificacions tècniques, com ho són el material, la geometria i alguns paràmetres de diversos components. La geometria d'aquest és la següent:



Figura 1.4. Quadre i basculant de la bicicleta de descens (Font: commencal-store.es)

Per a trobar les sol·licitacions, mitjançant el programa WM2D (Working Model 2D) , es realitzarà una simulació d'un salt de 1,5 metres d'alçada.

Un cop obtingudes les forces i reaccions es procedirà a fer una simulació d'elements finits per a observar els punts més desfavorables.

Finalment, es realitzarà les millores necessàries per tal d'augmentar la resistència del quadre sense afegir pes ni variant la dinàmica de la bicicleta (és a dir, mantenint les bieletes intactes).



Figura 1.5. Detall de les bieletes del conjunt (Font: commencal-store.es)

2. METODOLOGIA

El quadre de bicicleta de descens en concret ha estat escollit degut a la facilitat d'obtenció de dades geomètriques, preses directament, juntament amb la informació proporcionada pel propi fabricant. El material del quadre, extret de les especificacions tècniques d'aquest, és un alumini 6066-T6.

Com s'ha comentat anteriorment, únicament es farà el càlcul a resistència del quadre de bicicleta de descens, tot i que per a trobar totes les sol·licitacions, s'usaran paràmetres d'altres components, com poden ser suspensions, amortidors, rodes... Per a obtenir aquestes sol·licitacions, s'usarà el programa WorkingModel2D, considerant varis tipus d'impactes des d'una alçada de 1,5 metres.

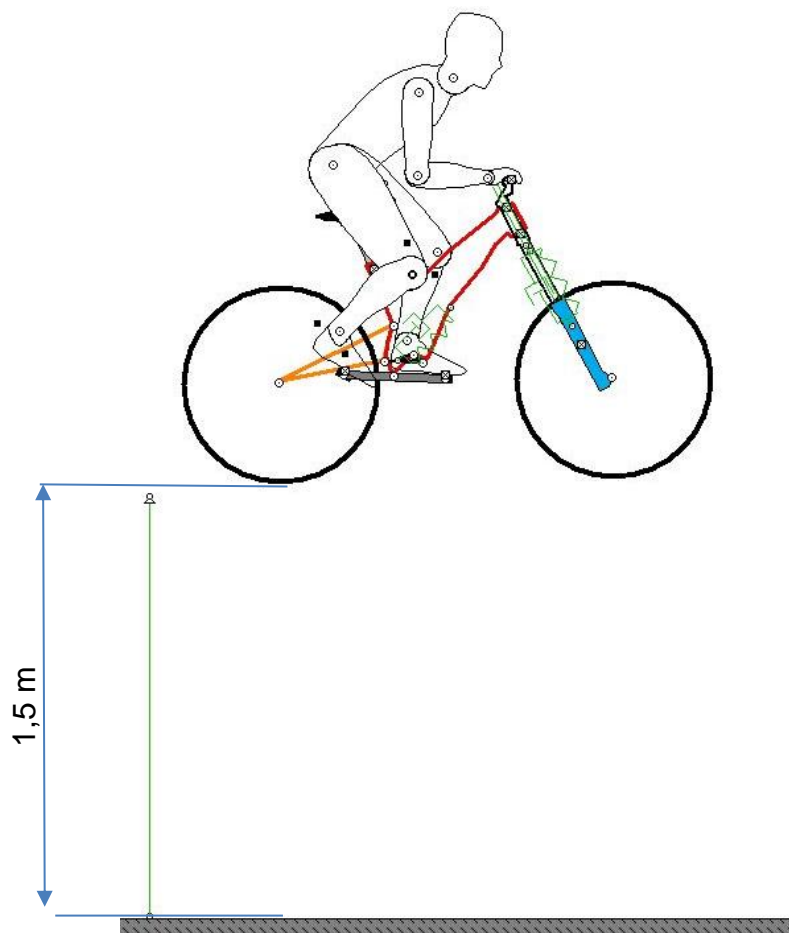


Figura 2.1. Salt des d'1,5 metres d'alçada simulada amb el WorkingModel2D

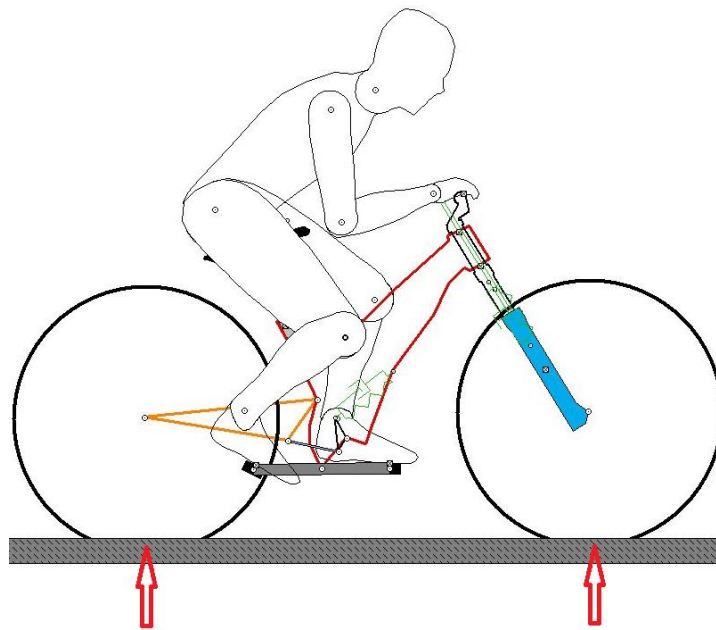


Figura 2.2. Reaccions provocades per un salt de 1,5 metres

Posteriorment, un cop obtingudes les forces i sol·licitacions, s'introduirà la geometria (dibuixada amb el programa SolidWorks) al programa Ansys per a fer la simulació d'elements finits, on s'obtidran els diferents punts dèbils a millorar.

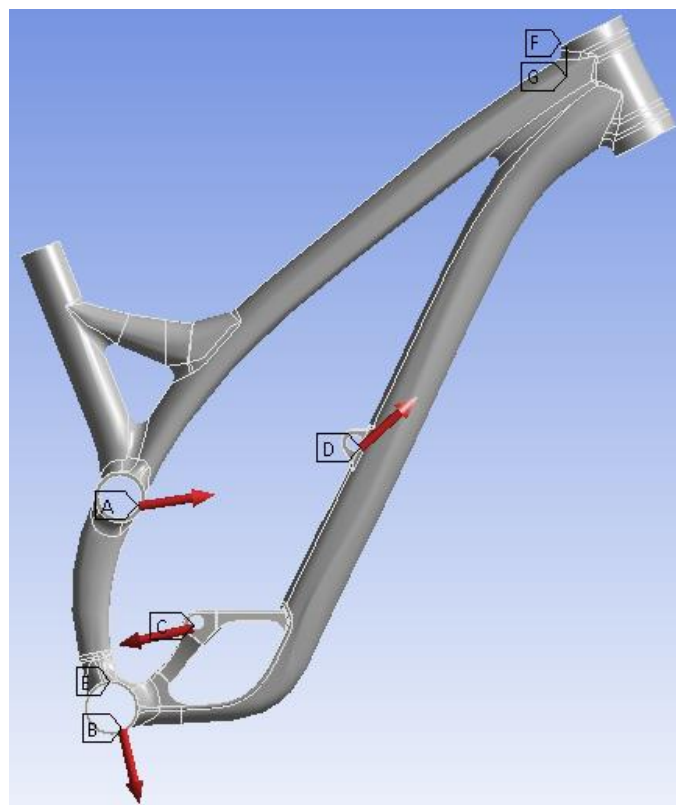


Figura 2.3. Geometria amb les forces obtingudes a partir del programa WM2D

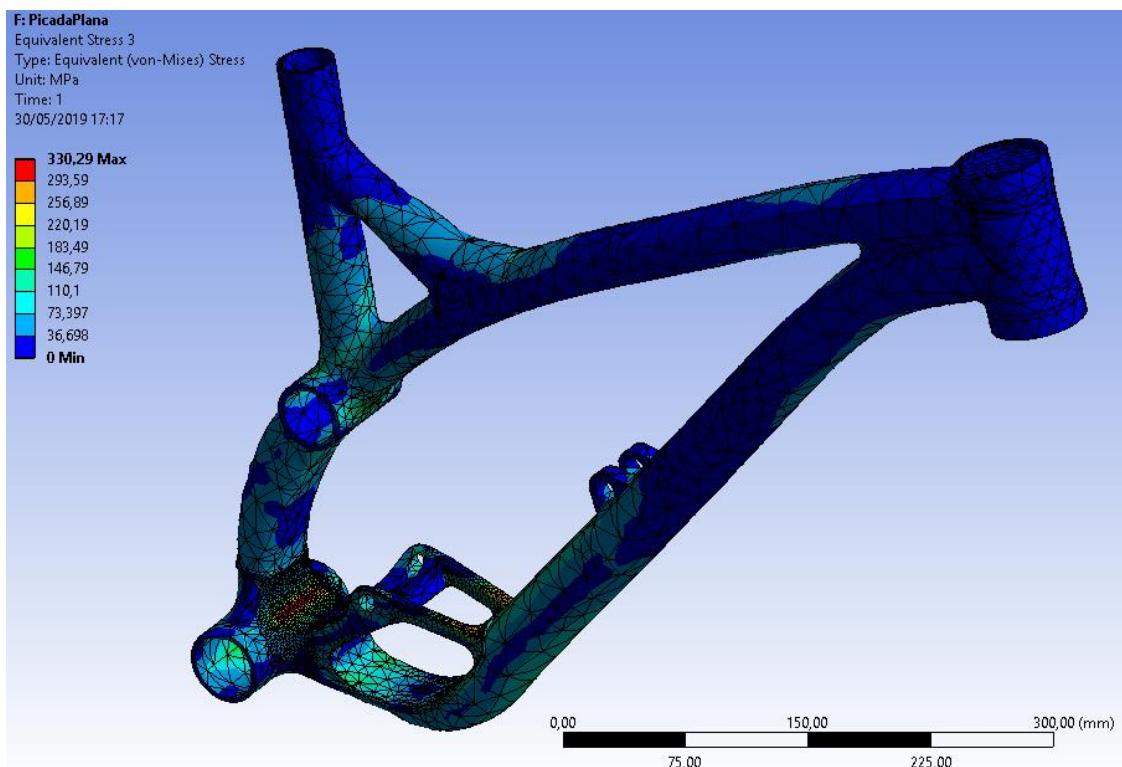


Figura 2.4. Simulació d'elements finits per a veure les zones més desfavorables

A l'hora de proposar les millores, s'intentarà reduir o mantenir el pes del quadre, sempre augmentant el valor de resistència d'aquest i deixant intacte el mecanisme dinàmic de la bicicleta. És a dir, el sistema de bieletes que provoquen el moviment entre el quadre, el basculant i l'amortidor quedarà intacte.

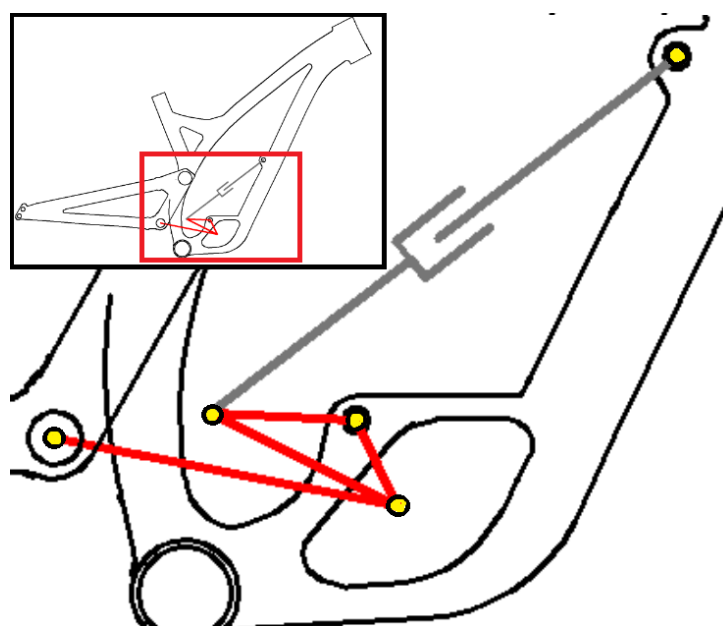


Figura 2.5. Croquis de les bieletes del quadre

3. DETERMINACIÓ DE LES FORCES D'IMPACTE

Per tal de determinar les forces d'impacte a aplicar al programa Ansys per a fer l'estudi d'elements finits, es simularà, mitjançant el programa WorkingModel2D, varis casos d'impacte, tot i que principalment l'estudi es centrarà en un sol cas. Per a determinar les forces correctament, s'han tingut en compte varis paràmetres que s'esmentaran a continuació.

3.1. La bicicleta

3.1.1. Geometria i pes

Per a fer la representació de la bicicleta correctament s'ha utilitzat una imatge del propi quadre. Mitjançant el programa SolidWorks, aquesta s'ha col·locat a escala real, gràcies a les dades geomètriques del fabricant, i posteriorment s'ha realitzat un croquis sobre d'aquesta imatge en perfil. Tot seguit s'ha extret aquest croquis en format DWG per poder-los inserir directament al programa WorkingModel2D.

Per a simular la resta de peces, com poden ser les bieletes, basculant, potència, forquilla... s'ha usat el mateix mètode, mitjançant també una imatge real de la bicicleta.

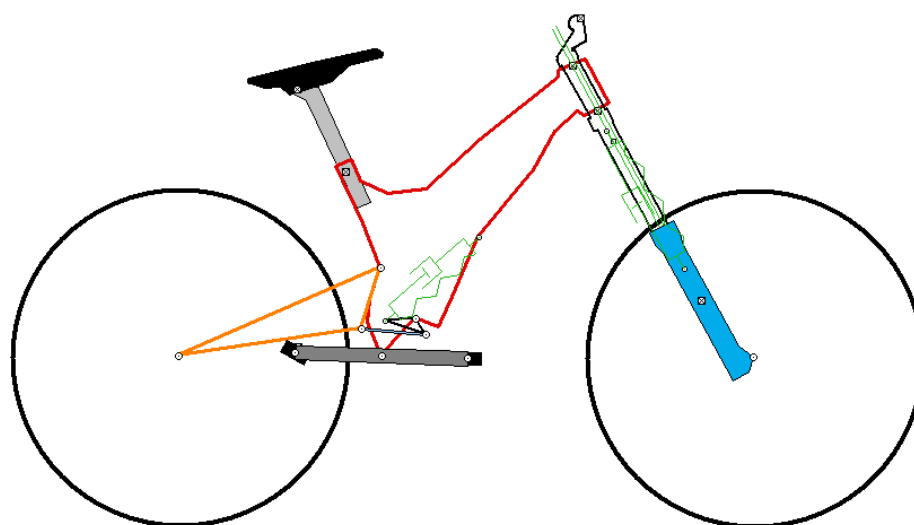


Figura 3.1. Representació de la bicicleta per WM2D

Pel que fa al pes dels diferents components de la bicicleta, com el dels pneumàtics, les llantes, el manillar... s'ha cercat component per component cadascuna de les masses (veure Annex C.1). Algunes d'aquestes peces, per a simplificar el WorkingModel, s'han ajuntat com si fossin una sola peça, i per tant s'hi ha col·locat la suma dels seus pesos respectivament. Un exemple d'aquesta simplificació ho és el conjunt del manillar, potència i part de la suspensió davantera.

3.1.2. Suspensió davantera i amortidor

Al ser una bicicleta de descens, una part molt important de la simulació és fer correctament el comportament dels amortidors i suspensions.

Actualment els amortidors i suspensions de bicicleta són cada vegada més i més complexos. La compressió i el rebot pot variar en funció del tram de recorregut de la suspensió. És per això, que per a simplificar el càlcul, es considerarà unes suspensions amb molla i un esmorteïdor amb paràmetres constants. Per aquest motiu, al programa WorkingModel2D simularem aquests components mitjançant una molla-esmorteïdor.

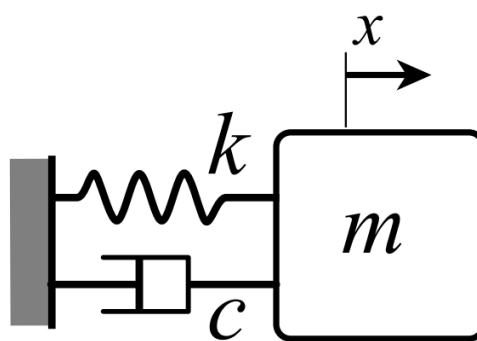


Figura 3.2. Representació del comportament de les suspensions
(Font: MAYUGO, J. Vibracions)

Pel que fa als paràmetres de la molla, aquests els podem extreure directament de les especificacions tècniques del component (veure Annex C.2).

La forquilla davantera és el model RockShox Boxxer Team 650b 200mm i la molla té una rigidesa $k_{forquilla} = 6,1 \text{ N/mm}$.

L'amortidor és el model RockShox Vivid R2C 267x89mm i la molla té una rigidesa de $k_{amortidor} = 61,29 \text{ N/mm}$.

Pel que fa els paràmetres d'esmoreïment, aquests s'han obtingut gràcies a la resposta de la bicicleta. Quan aquesta ha tingut una resposta esperada o semblant a la realitat s'han considerat com a correctes els valors.

Finalment s'obté que la forquilla té un esmoreïment de $C_{forquilla} = 15 \text{ N/mm}$ i l'amortidor té un esmoreïment de $C_{amortidor} = 80 \text{ N/mm}$.

3.1.3. Unions dels components

Un cop representats de forma aproximada tots els components de la bicicleta es procedeix a unir els components de manera que simuli la dinàmica de la bicicleta. Per fer-ho, s'utilitzen diverses opcions depenent del comportament de cadascun d'ells.

Les peces que es comporten com un bloc rígid i no tenen moviment relatiu entre altres (en el pla d'estudi) se les dibuixa juntes o bé se'ls hi col·loca una condició rígida, és a dir, com si les peces estiguessin soldades entre sí. Un exemple d'aquest cas és la unió entre la forquilla i el manillar.

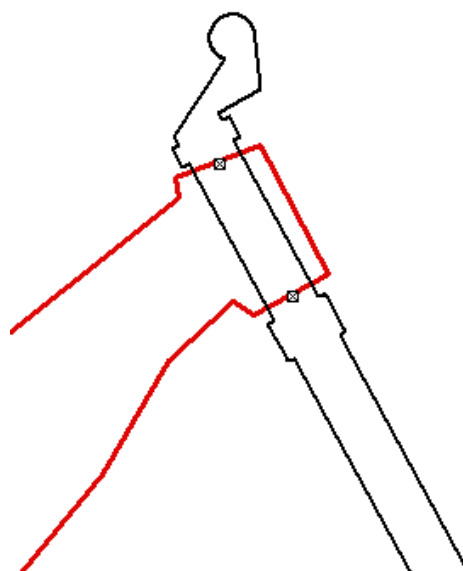


Figura 3.3. Unió entre el manillar i la forquilla de la bicicleta

Per altre banda, les peces que tenen moviment relatiu, com pot ser la unió entre el basculant i les bieletes, se'ls hi ha aplica unes juntes mòbils que simulen el comportament d'una articulació. És cert que, encara que les peces estiguin unides per rodaments o coixinets, entre elles hi haurà una certa fricció que provoca que no sigui exactament una articulació. Tot i així, per simplificar es considera aquest tipus de junta.

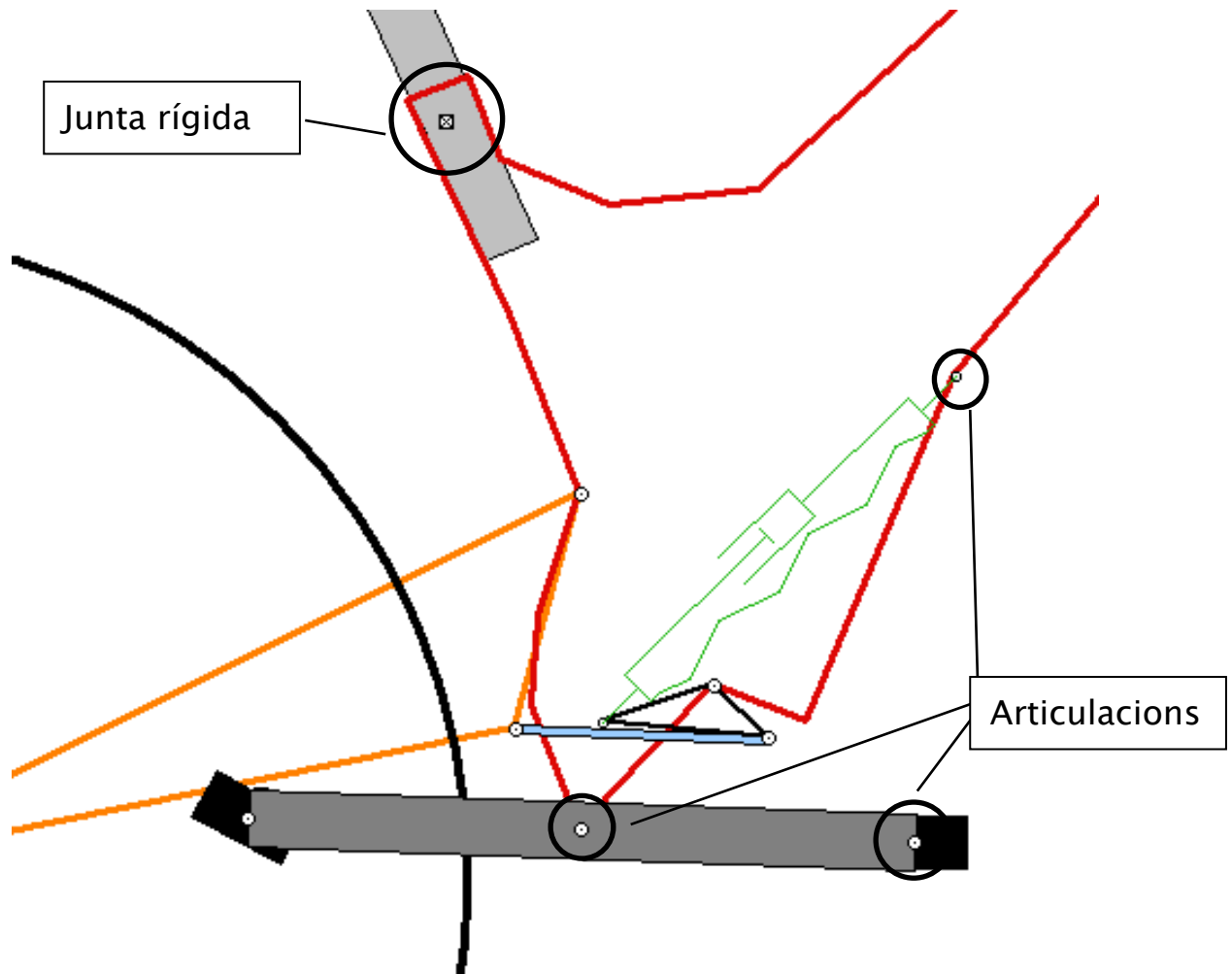


Figura 3.4. Representació de les articulacions i juntes rígides

Finalment, per acabar de representar la bicicleta únicament ens queda unir la molla i l'amortidor als diferents components de la mateixa manera. Ara bé, a la forquilla, degut a que ha de seguir una determinada direcció ja que va guiada per el cartutx de la suspensió, és necessari col·locar-hi una guia articulada.

3.2. El ciclista

3.2.1. Geometria i pes

La persona per estudiar el cas de la caiguda és d'altura mitjana i pes mitjà. Concretament de 1,78 metres d'alçada i 69 quilograms de massa.

Per a simular la persona al WorkingModel2D s'ha seguit un procediment semblant al dels components de la bicicleta. Mitjançant el programa Autocad s'ha dibuixat a escala real i de manera aproximada la forma de les diferents extremitats i parts del cos i seguidament s'han inserit al programa WM2D.

Després a cada una de les parts se li ha assignat un pes aproximat (veure Annex B.1.1), la suma de les quals és d'un total de 69kg.

3.2.2. Unions de les parts del cos

Semblant al procediment de la bicicleta, per a fer les unions entre les diferents parts del cos s'ha utilitzat la unió tipus articulació, ja que en aquest cas totes les peces es mouen unes respecte les altres.

Tot i així, si únicament es col·loqués aquesta articulació, les parts del cos no tindrien cap tipus de resistència entre elles, és a dir, la persona seria una persona sense músculs ni força. Per a simular la força que s'oposa el moviment o que resisteix el moviment s'ha utilitzat, per a cada una de les diferents articulacions, una molla-esmorteïdor.

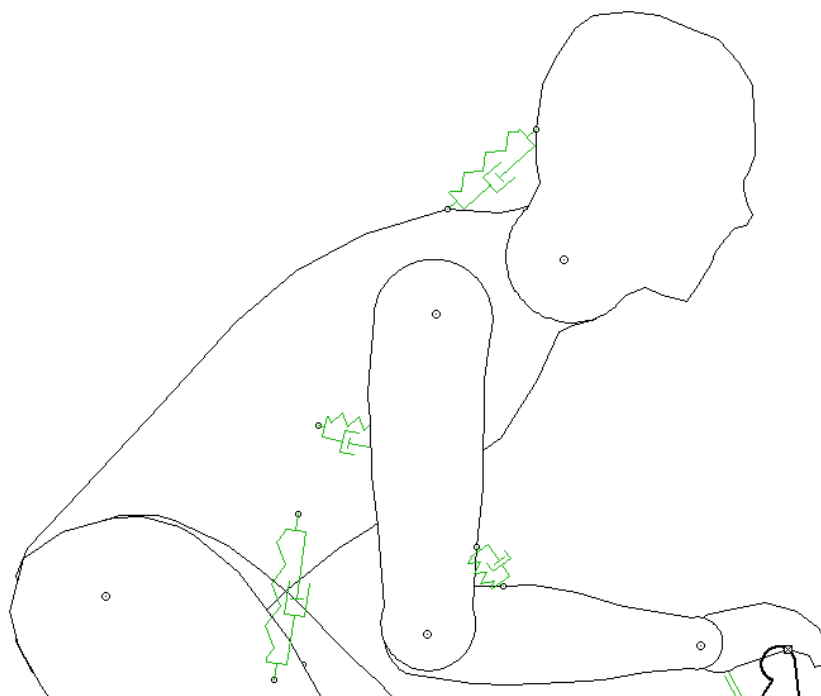


Figura 3.5. Imatge de la persona unint les parts del cos mitjançant articulacions i elements molla-esmorteïdor

Per a cercar els paràmetres de la molla i esmorteïdor s'ha anat iterant, mitjançant el programa, fins a comprovar que el moviment de la persona és semblant al de una persona real al tenir un impacte amb la bicicleta. Cal tenir en compte que aquests paràmetres de la molla i esmorteïdor, en funció de la caiguda, han estat modificats ja que cada impacte té forces diferents i per tant, el cos també té moviments i reaccions diferents (veure Annex B.1.2).

3.3. Entorn i casos

En un circuit de descens hi ha infinitat d'impactes que poden afectar a diferents parts del quadre i a més a més amb proporcions diferents. És per això que per a fer l'estudi més objectivament i correctament s'ha optat per fer l'estudi de quatre tipus de caigudes per obtenir càlculs que s'assimilin a la realitat (veure Annex A).

Per fer el càlcul del quadre original s'ha tingut en compte totes les caigudes, tot i així, al re-disseny posterior únicament s'ha tingut en compte la caiguda plana, la qual consisteix en fer impactar les dues rodes a la vegada.

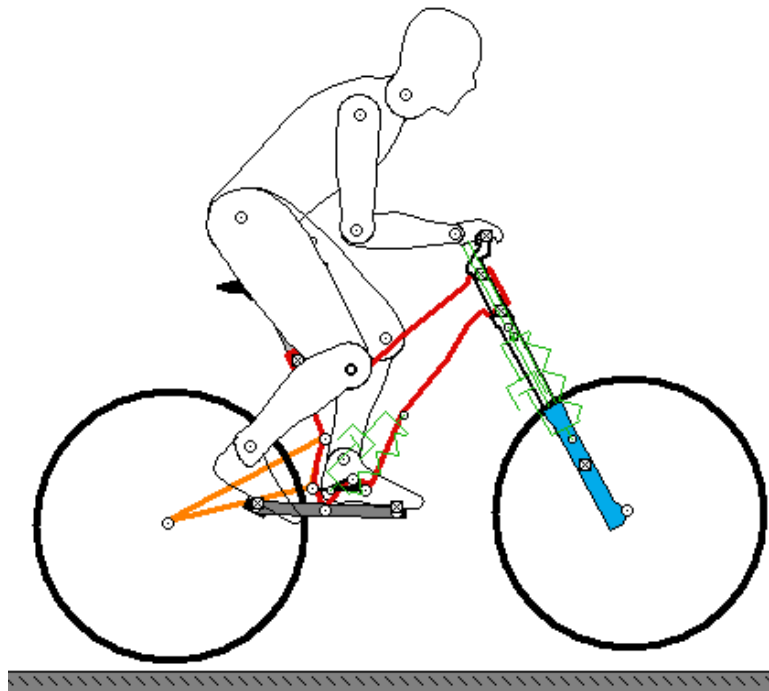


Figura 3.6. Representació de la caiguda plana just abans de l'impacte

3.4. Simulació i obtenció de les forces

Tal i com s'ha comentat anteriorment, la simulació consta en fer caure una persona des de 1,5 metres per a simular un salt amb bicicleta. Després de col·locar el terra rígid i fixat i definir bé el pilot i la bicicleta, es procedeix a fer la simulació.

Per a les diferents simulacions s'ha anat variant alguns paràmetres d'esmoreïment i rigidesa dels components molla-esmoreïment de la persona perquè la simulació s'adeqüi a la realitat. Per fer-ho, s'ha anat iterant valors fins que la resposta simulada semblés el més real possible.

Tot seguit, per obtenir els diferents valors de reaccions i forces de les parts de la bicicleta, s'ha utilitzat, per a cada una de les unions articulació, la pestanya de Mesura->Força (*Measure->Force*), les quals mostren les components x i y de la força resultant en Newtons.

Pel que fa a les unions on es col·loca l'amortidor de darrere no es pot obtenir la força de reacció de manera directe. Tot i així, podem mesurar la tensió de l'amortidor i indirectament trobar les seves reaccions.

Per a cada una de les articulacions, a part de veure el seu valor exacte fins al tercer decimal, és possible també veure la corba Força-Temps (*Figura 3.8*). D'aquesta manera, és possible identificar la força màxima d'aplicació i per tant la que s'usarà per fer el càlcul d'elements finits en cada un dels punts que es mostren a continuació (A, B, C i D):

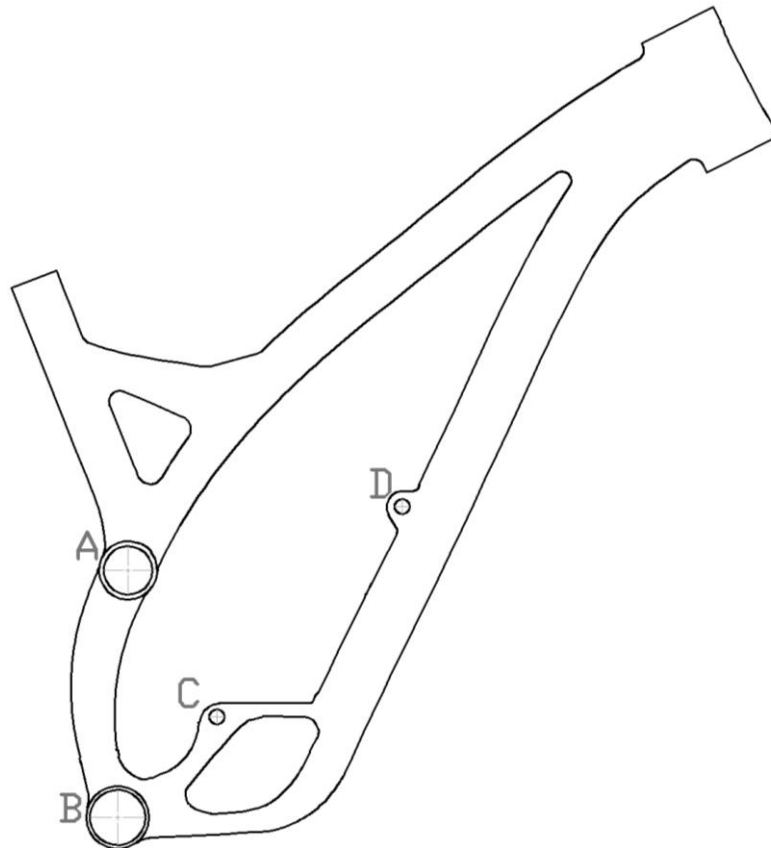


Figura 3.7. Punts necessaris d'aplicació de la força

Tot seguit es mostra el moment just en el que es dona aquesta força màxima en el punt A del quadre (*Figures 3.8 i 3.9*).

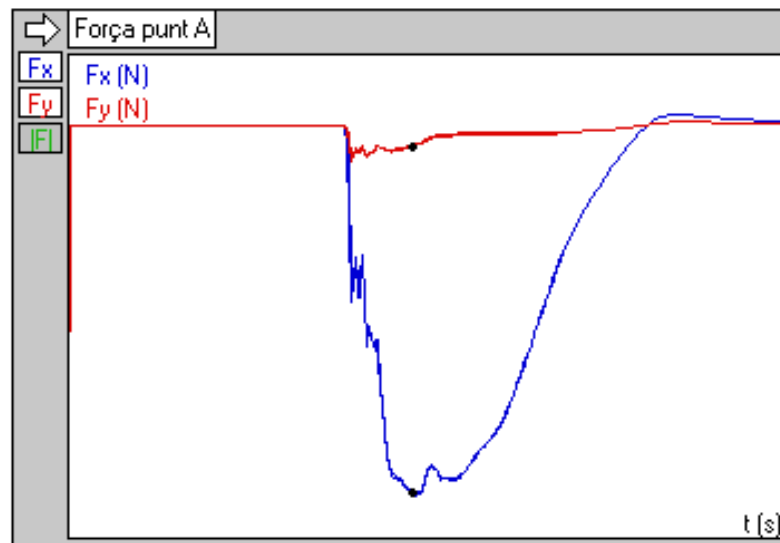


Figura 3.8. Gràfica Força-Temps del punt A en la caiguda plana

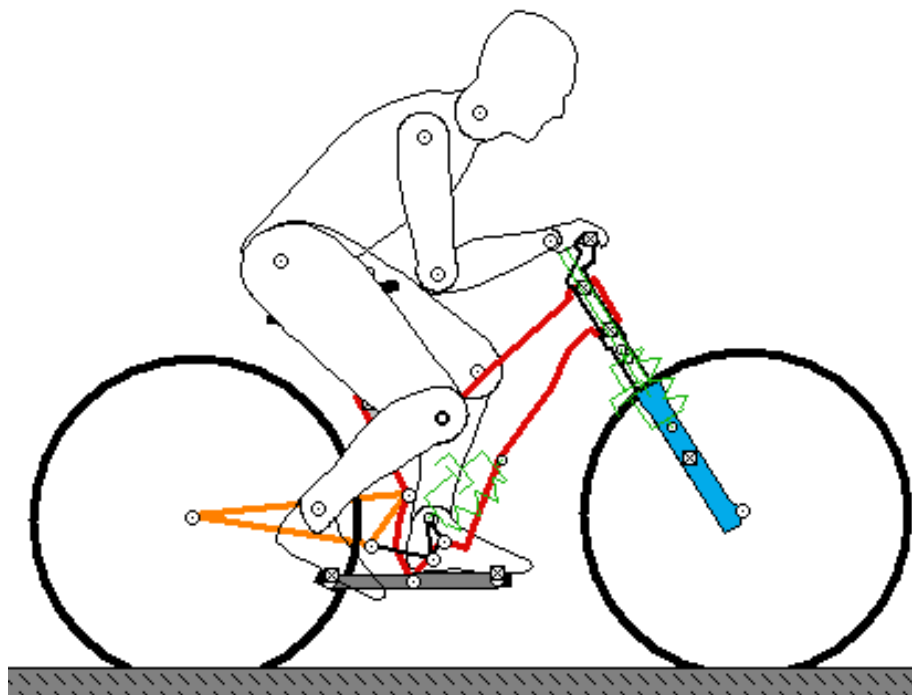


Figura 3.9. Moment de la força màxima en la caiguda plana

Després d'analitzar totes les forces i els seus valors màxims, s'observa que el valor màxim de cada força en particular es dona en el mateix instant que la resta de forces. És a dir, en el mateix instant de temps tots els components de la bicicleta tenen les sol·licitacions màximes.

Encara que per a fer l'estudi d'elements finits únicament es necessiten les forces als punts A, B, C i D s'ha buscat també el valor de les altres reaccions (del basculant, bieletes...) per a comprovar de manera aproximada si el càlcul realitzat per el WorkingModel2D és correcte. Aquesta comprovació s'esmenta al següent apartat.

3.5. Validació de les forces

Per a comprovar si el càlcul de les reaccions donat pel WorkingModel2D és correcte, s'ha fet, de manera aproximada, un sumatori de forces de cada component per separat fent el diagrama de cos lliure d'algunes de les peces. S'ha vist que les forces de cada component s'equilibren i per tant es donen com a correctes.

S'ha acabat de definir correctament el sentit de les forces tenint en compte aquest sumatori de forces ja que sovint el WorkingModel2D canvia automàticament el sentit de les forces.

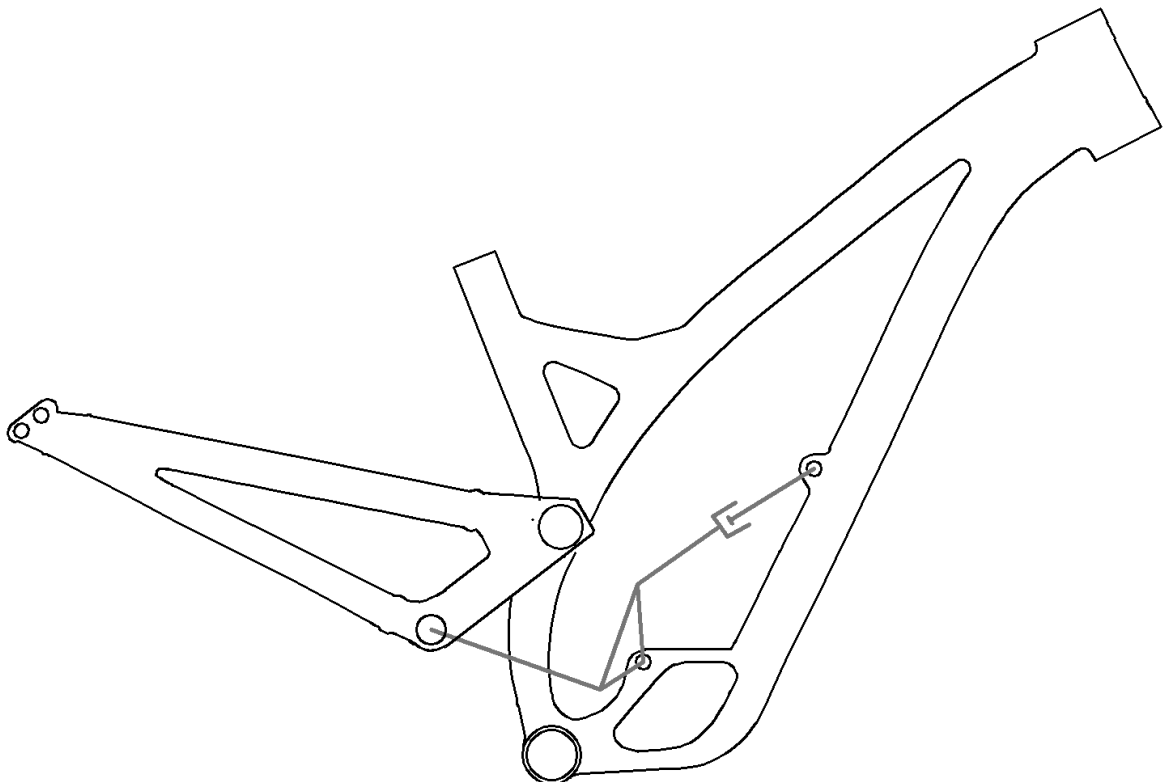


Figura 3.10. Components els quals s'ha fet el diagrama de cos lliure i s'ha calculat el sumatori de forces

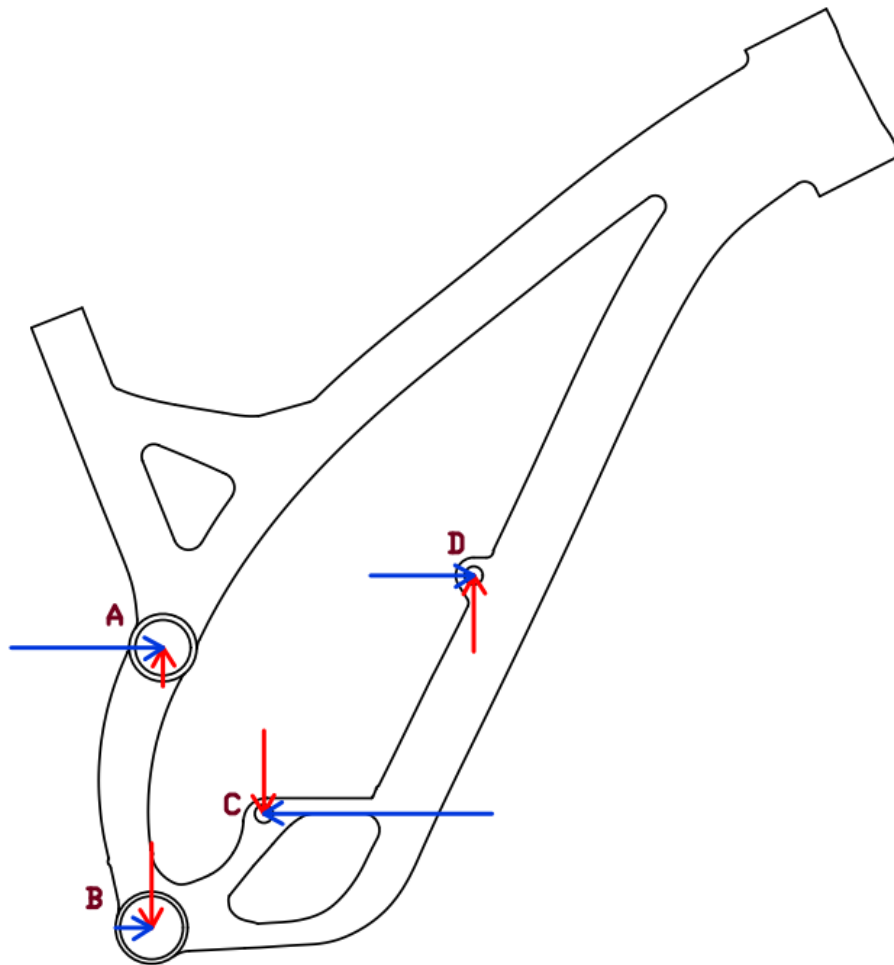


Figura 3.11. Reaccions del quadre de la bicicleta de descens

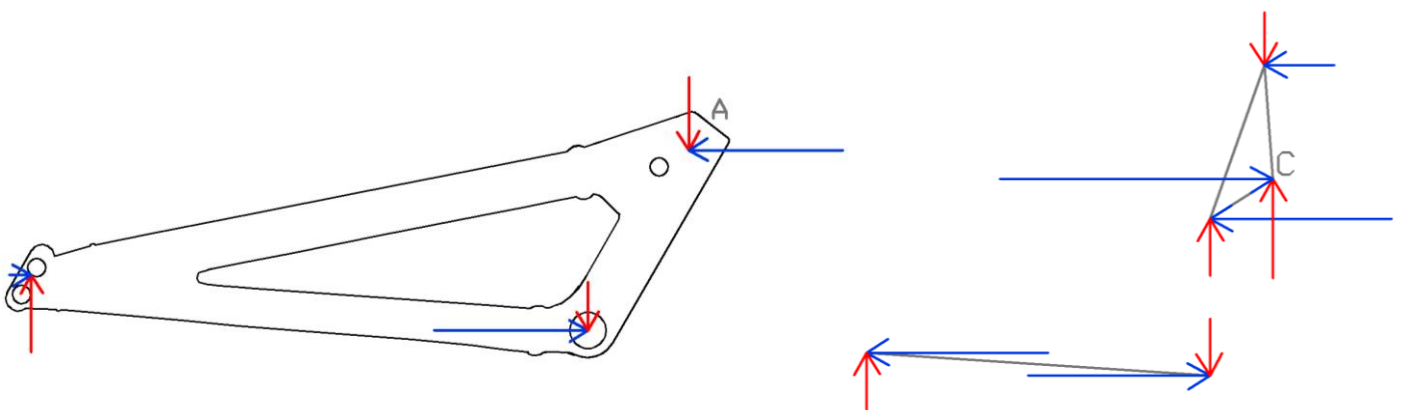


Figura 3.12. Reaccions del basculant i les bieletes

Gràcies als diagrames de força-temps també s'ha pogut considerar la força com a fiable ja que en resulta una corba sense desviacions anormals ni sobre-pics exagerats.

4. DETERMINACIÓ DELS PUNTS DÈBILS

Un cop trobades les sol·licitacions produïes per l'impacte es procedeix a realitzar el càlcul per a determinar els punts dèbils del quadre.

Per fer-ho, s'utilitza, mitjançant la plataforma de software Ansys Workbench, el mètode dels elements finits (FEA).

Amb aquest mètode, es pot observar de manera detallada el comportament del material, observant-ne les deformacions o bé les tensions. El punt que tingui una deformació major o excessiva es considerarà com a punt dèbil.

4.1. Material i geometria

4.1.1. Geometria de la bicicleta

Per a realitzar un càlcul correcte, és necessari introduir la geometria el més exacte possible al model real. Per fer-ho, s'ha tingut en compte el mètode de fabricació d'aquest.

Aquest quadre consta de tubs d'alumini hidroformats (*Hydroformed*), els quals han estat deformats mitjançant un líquid a pressió. Aquest efecte fa que els tubs puguin tenir geometries diferents pel que fa a la seva secció al llarg de la longitud.

A més a més, en aquest cas el quadre d'estudi també té un triple conificat, en anglès *Triple Butted* (*Figura 4.1*). El conificat el que permet és reduir el pes al màxim en els punts on aquest no és necessari. És a dir, les parts del tub que aguanten més tensió tenen un gruix major que els que no és tant necessari. En aquest cas, aquest consta de un triple conificat, és a dir, té més de dos rebaixos de gruix al llarg del tub. Aquest és un sistema que s'utilitza a les bicicletes d'alta gama degut a la dificultat de fabricació.

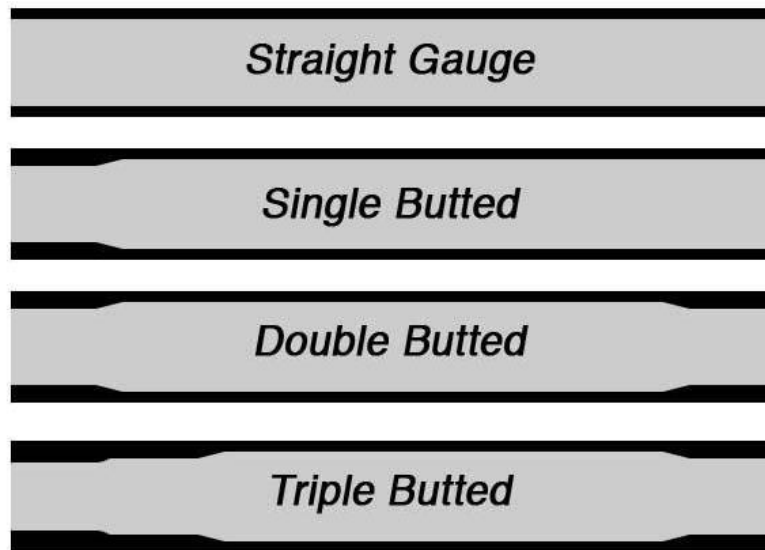


Figura 4.1. Explicació del mètode de fabricació Butted (Font: tribebicycles.com)

Degut a la dificultat d'obtenció de dades del gruix del quadre, aquest s'ha considerat superior als extrems del tubs i inferior als centres. El valor ha estat estimat tenint en compte el pes total que té el quadre. És a dir, els diferents gruixos han estat modificats fins arribar al pes exacte del quadre d'alumini.

Pel que fa als angles de llançament del tub de la forquilla i dels diferents tubs o les distàncies entre eixos, s'ha considerat els paràmetres donats pel fabricant (veure Annex C.3).

Finalment, la geometria del quadre actual és la següent (*Figura 4.2 i 4.3*).



Figura 4.2. Geometria final del quadre de descens



Figura 4.3. Detall de la geometria final del quadre

4.1.2. Material

Igual que algunes especificacions de la bicicleta, el material també ens el proporciona el propi fabricant. Aquest és un Alumini 6066-T6.

Alguns dels paràmetres que s'han utilitzat a l'hora de dibuixar la geometria o fer el càlcul han estat els següents:

- Densitat (ρ): 2720 kg/m^3
- Resistència última a la tracció (S_{ut}): 393 MPa
- Límit elàstic (S_y): 359 MPa
- Mòdul de Young (E): 68.9 GPa

4.2. Preparació de l'estudi amb elements finits

Per a la realització del càlcul mitjançant els elements finits amb l'Ansys Workbench s'ha considerat varies condicions i característiques per obtenir un resultat el més fiable possible. Aquests, s'expliquen a continuació.

4.2.1. Condicions de contorn

En el model s'ha utilitzat varies condicions de contorn per a que el model virtual s'assembli al màxim al model real. A més a més s'ha afegit algunes condicions de contorn per evitar possibles errors de càlcul del programa o bé solucions no desitjades.

La primera condició i una de les més importants de la simulació va relacionada amb la subjecció del quadre. Al introduir les forces als punts A, B, C i D comentats anteriorment s'ha volgut simular com si la bicicleta estigués subjectada pel tub de la forquilla o direcció. Per fer-ho, s'ha introduït dos rodaments a la zona de contacte amb la forquilla i se'ls hi ha aplicat una condició de connexió.

Els rodaments, els quals se'ls hi ha reduït força l'amplada per simular el contacte de les boles, s'han fixat en l'espai. Seguidament, mitjançant la relació de no-fricció (*Frictionless*) s'ha unit el diàmetre exterior del rodament amb el diàmetre interior del tub de la forquilla o direcció (*Figura 4.4*).

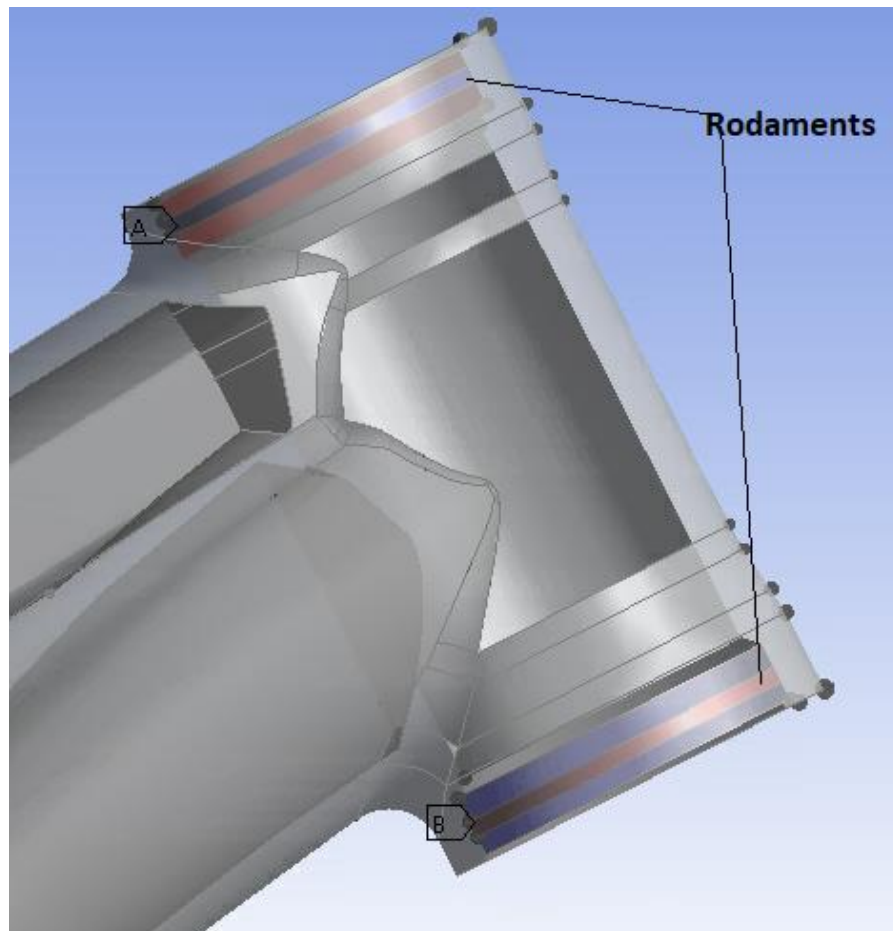


Figura 4.4. Connexió frictionless entre rodaments i tub de direcció

Seguidament, s'ha utilitzat dues condicions de contorn més per acabar de restringir del tot el quadre i per tant evitar possibles moviments innecessaris que impossibiliten la resolució del problema.

S'ha de tenir en compte que l'estudi realitzat és per forces d'un únic pla i per tant sembla que el quadre no es pot moure lliurement en la direcció perpendicular al pla. Tot i així, degut a que aquest quadre no és completament simètric ja que té el tub del pedaler diferent per cada un dels costats, és necessari incloure-hi una restricció per evitar aquest moviment. Per fer-ho s'ha col·locat una restricció en direcció Z, que és la direcció perpendicular al pla d'estudi, provocant que aquest quadre no es pugui moure lliurement. A més a més, per a no interferir excessivament amb possibles deformacions en aquesta direcció s'ha restringit en una àrea molt i molt petita.

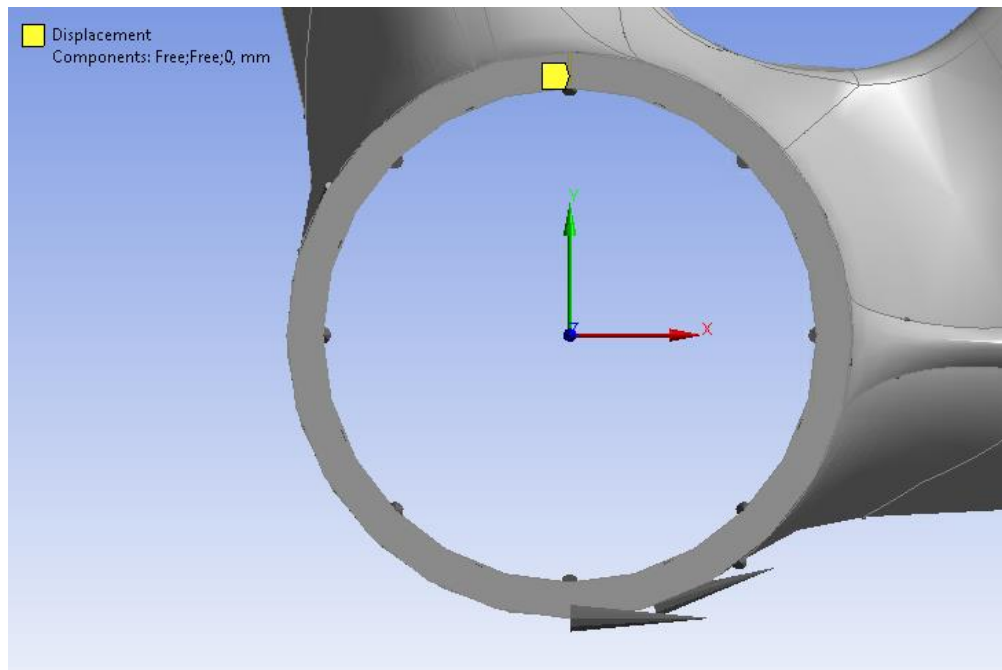


Figura 4.5. Restricció en desplaçament Z per evitar el gir del quadre i per tant un error de càlcul

L'última condició de contorn és molt semblant a l'anterior. Per a evitar que el tub de la forquilla es pugui extreure dels rodaments (ja que s'hi ha col·locat una condició de no-fricció) s'ha restringit una petita àrea en la direcció Y.

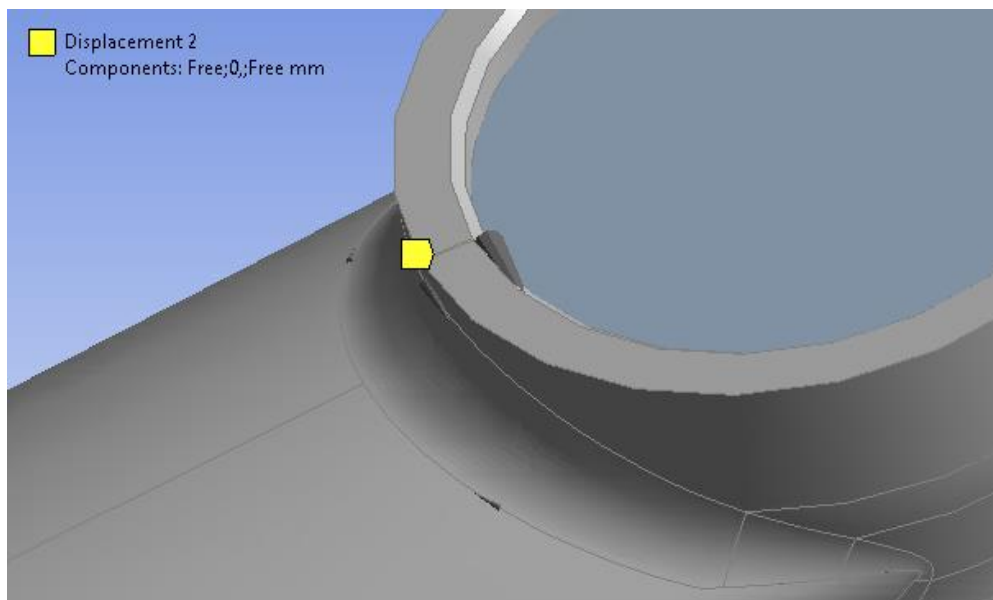


Figura 4.6. Restricció en el desplaçament Y per evitar el moviment del quadre

4.2.2. Forces

Les forces a aplicar a cada una de les articulacions (A,B C i D) mostrades anteriorment no són exactament les donades directament pel WorkingModel2D. Aquestes s’han hagut de modificar lleugerament (veure Annex B.2). Després de la modificació, les forces a aplicar a cada un dels punts pel cas de caiguda plana són les següents:

	Picada plana	
	F_x (N)	F_y(N)
A	10528	1647
B	980	-4178
C	-15445	-3442
D	4904	4452

Taula 4.1. Forces a aplicar a cada una de les articulacions indicades

A part de considerar les forces màximes obtingudes per la simulació, també s’ha contemplat les forces que estan al voltant d’aquest pic màxim, les quals tenen un valor una mica més baix. Això s’ha tingut en compte ja que es pot donar el cas que una força més baixa sigui més desfavorable depenent de la seva inclinació, ja que pot produir flexions i conseqüentment tensions més desfavorables.

Tot i així, després d’estudiar la variació d’angle de la força respecte el sistema de referència fixat s’observa que aquest és gairebé constant i per tant no afecta el càlcul.

Un cop definit del cert el valor de les forces es procedeix a col·locar-les a les superfícies adequades. Com s’ha comentat anteriorment, les forces es col·loquen als punts articulats A, B C i D. Ara bé, s’ha de tenir en compte que degut a que la força té una determinada direcció, aquesta no s’aplica a tota la circumferència en concret sinó que només a un angle determinat de la superfície (*Figura 4.7 i 4.8*). Per a poder col·locar la força repartida en un cert angle s’ha dividit l’àrea de la circumferència en vuit parts iguals de 45°. Finalment, depenent de la direcció de la força, se seleccionat unes zones o les altres (*Figura 4.8*).

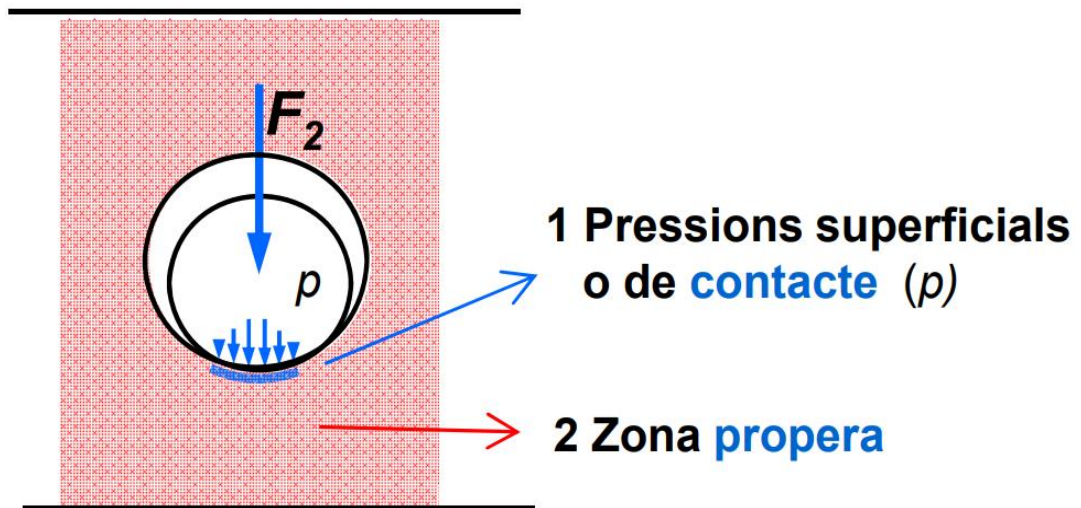


Figura 4.7. Zona d'aplicació de la força (Font: UdG. Tensions en elements de màquines)

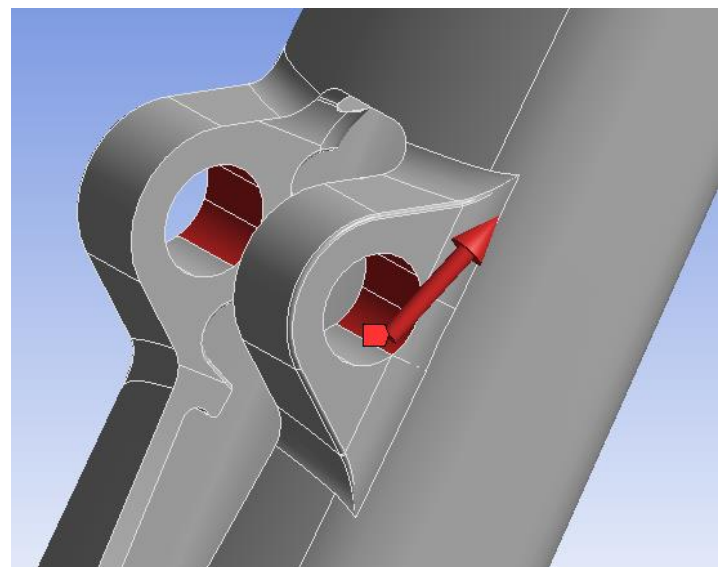
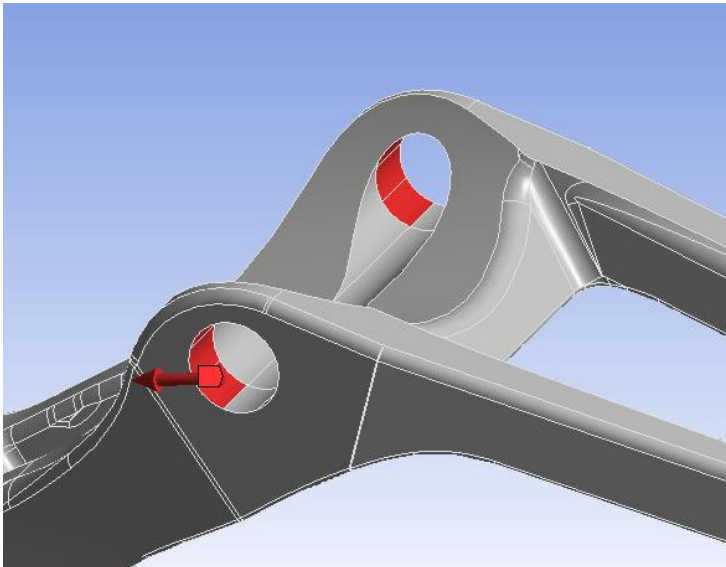


Figura 4.8. Àrees d'aplicació de la força dels punts C i D

Finalment obtenim el següent estat de càrregues per aplicar al programa Ansys:

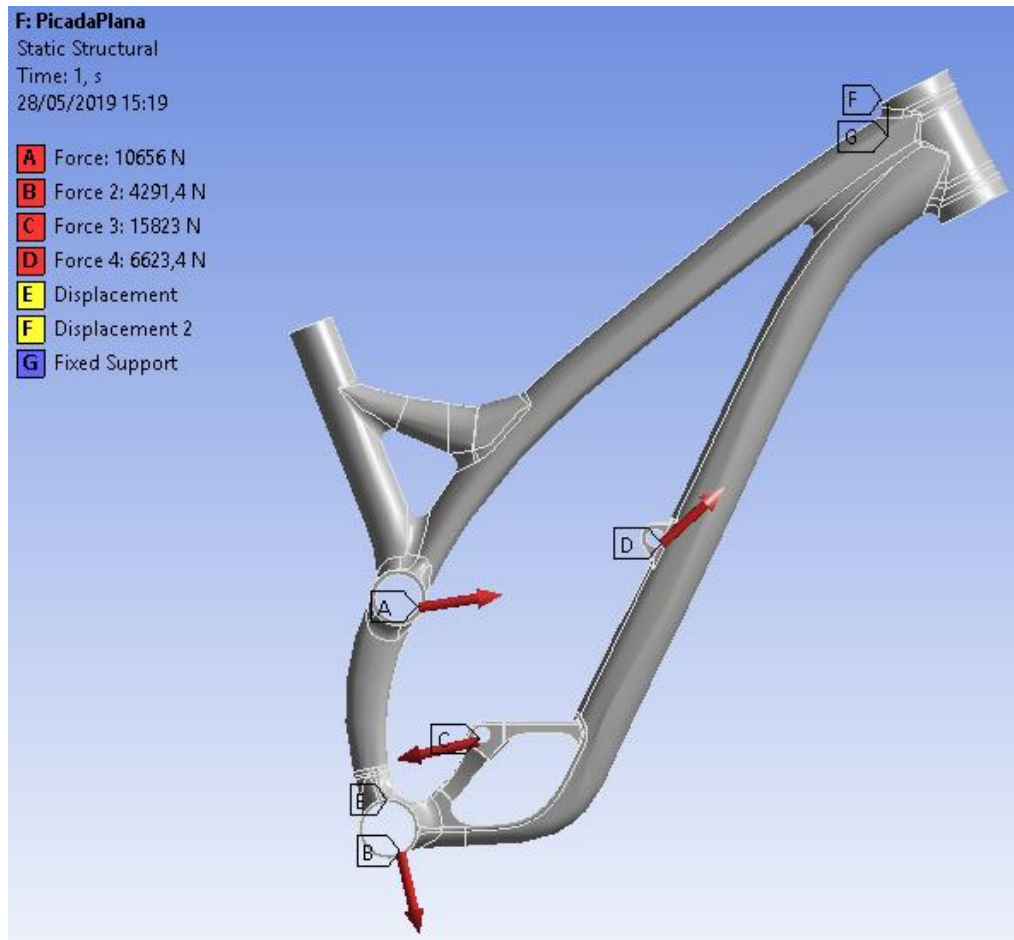


Figura 4.9. Estat de càrregues de l'Ansys

4.2.3. Mallat

Abans de definir concretament el mallat s'ha fet un càlcul previ per observar els punts que són més dèbils. Posteriorment s'ha disminuït la mida dels elements dels punts més desfavorables per així obtenir resultats més concrets.

S'ha augmentat el mallat les zones on les tensions són més desfavorables fins a una mida d'element de 2mm (*Figura 4.10*). No s'ha augmentat més el mallat degut a que a partir d'aquest valor les tensions s'estabilitzen.

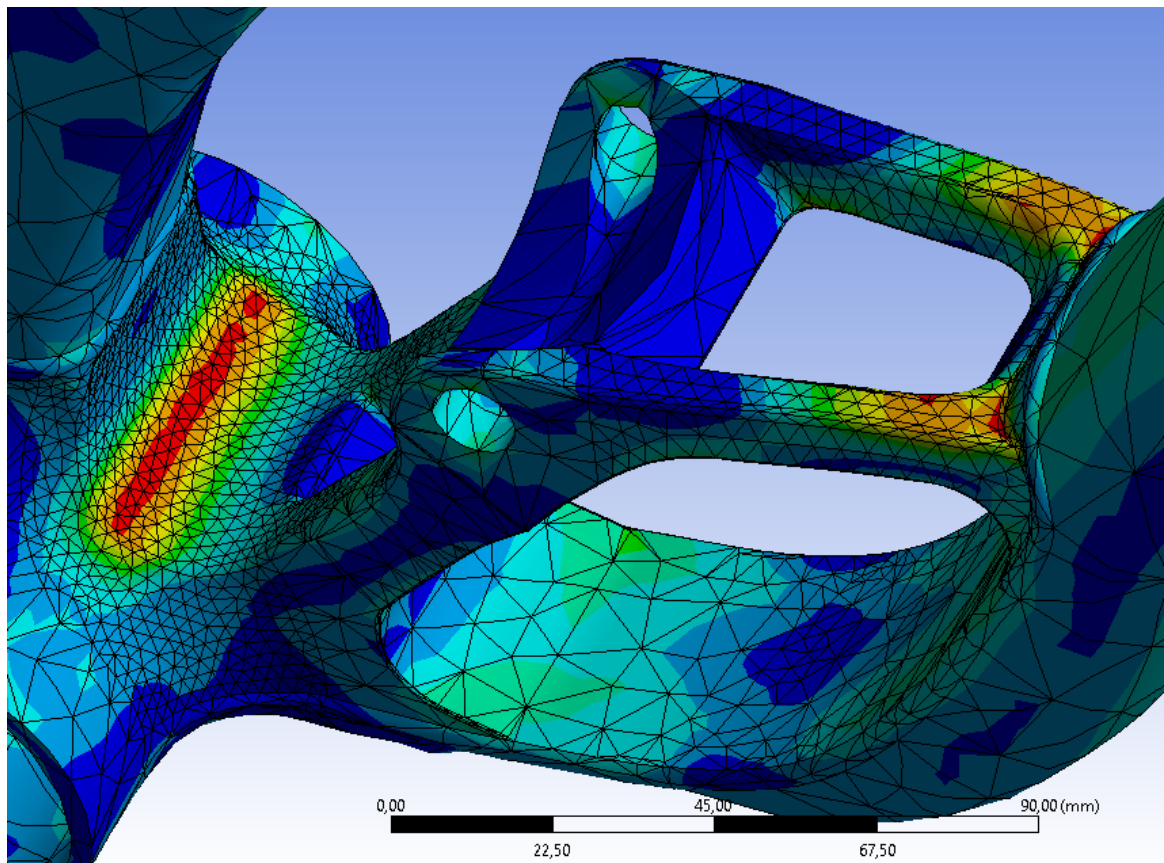


Figura 4.10. Augment de mallat en les zones desfavorables fins a 2mm

En general s’ha pogut augmentar el mallat sense problemes i amb resultats força coherents a totes les zones necessàries. Tot i així, en alguns punts on la geometria té un radi molt petit o un canvi de secció brusca no s’ha pogut augmentar el mallat ja que la tensió tendeix a infinit (*Figura 4.11*). Aquests punts on la tensió tendeix a infinit s’ha intentat augmentar la mida de l’element per a poder estudiar correctament altres zones que realment tenen una tensió significativa.

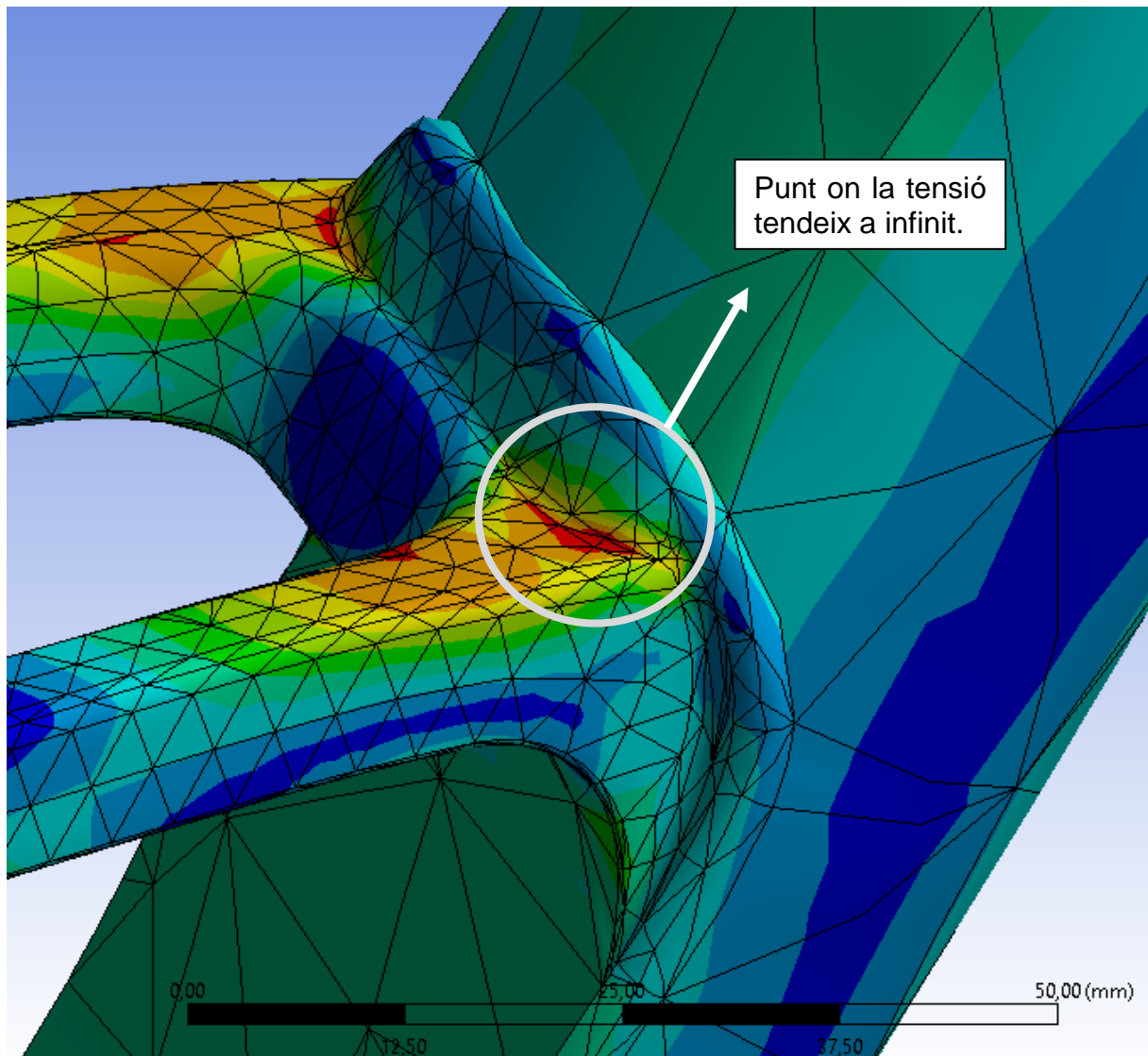


Figura 4.11. Punt el qual si augmentem el mallat la seva tensió tendeix a infinit

Per defecte el programa malla en tetraedres. S'ha intentat canviar el mallat a hexaedres ja que els resultats són més precisos degut a que aquests mallen amb 8 nodes, en canvi, els tetraedres només amb 4. Tot i així, degut a la complexitat de la peça i la limitació del programa no ha estat possible.

4.3. Resultat de l'estudi

Després de col·locar totes les forces, condicions de contorn i mallat es procedeix a obtenir i analitzar els resultats.

Per analitzar els resultats es té en compte principalment la tensió equivalent de Von Mises obtinguda. Tenint en compte els paràmetres del material esmentats anteriorment es pot veure si aquest quadre està molt sol·licitat. A més a més, també es pot identificar quin dels quatre casos de caiguda és el més desfavorable tenint en compte aquesta tensió (veure Annex A).

Un altre aspecte que ajuda a veure més concretament i visualment el comportament del material és el vector d'esforços. Amb aquesta opció, amb anglès anomenada *Vector Principal Stress*, veiem el sentit dels esforços, per tant, podem observar fàcilment flexions, traccions o compressions.

Una vegada calculat el model s'observa dues zones les quals les seves tensions són força elevades.

Primer de tot es comenten els punts més desfavorables (*Figura 4.12*).

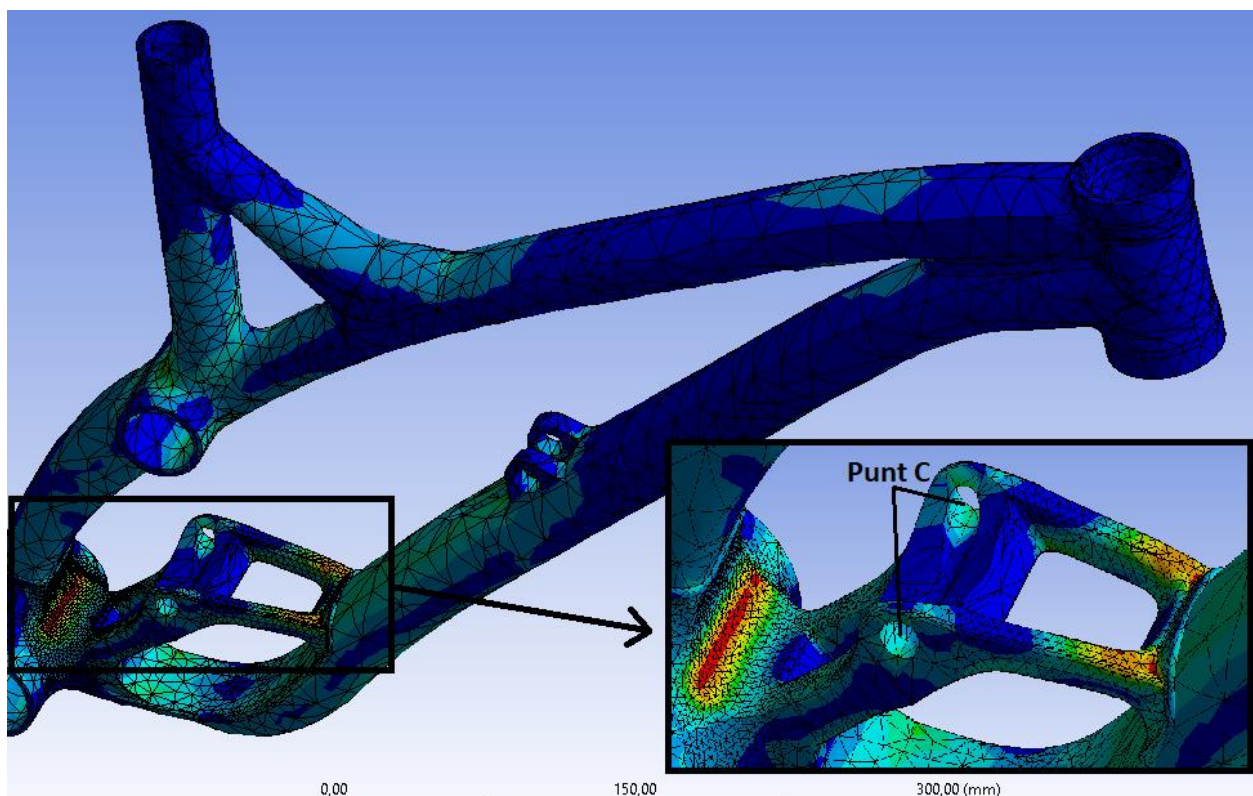


Figura 4.12. Zona més dèbil del quadre

Tal i com es veu a la figura anterior la zona més dèbil del quadre de la bicicleta ve donada per la força que s'aplica al punt C. Aquesta força, en els quatre casos de caiguda, és la que té un valor més gran. A més a més, si analitzem detalladament el comportament de les tensions podem observar unes flexions i concentracions de tensions importants (*Figura 4.13*).

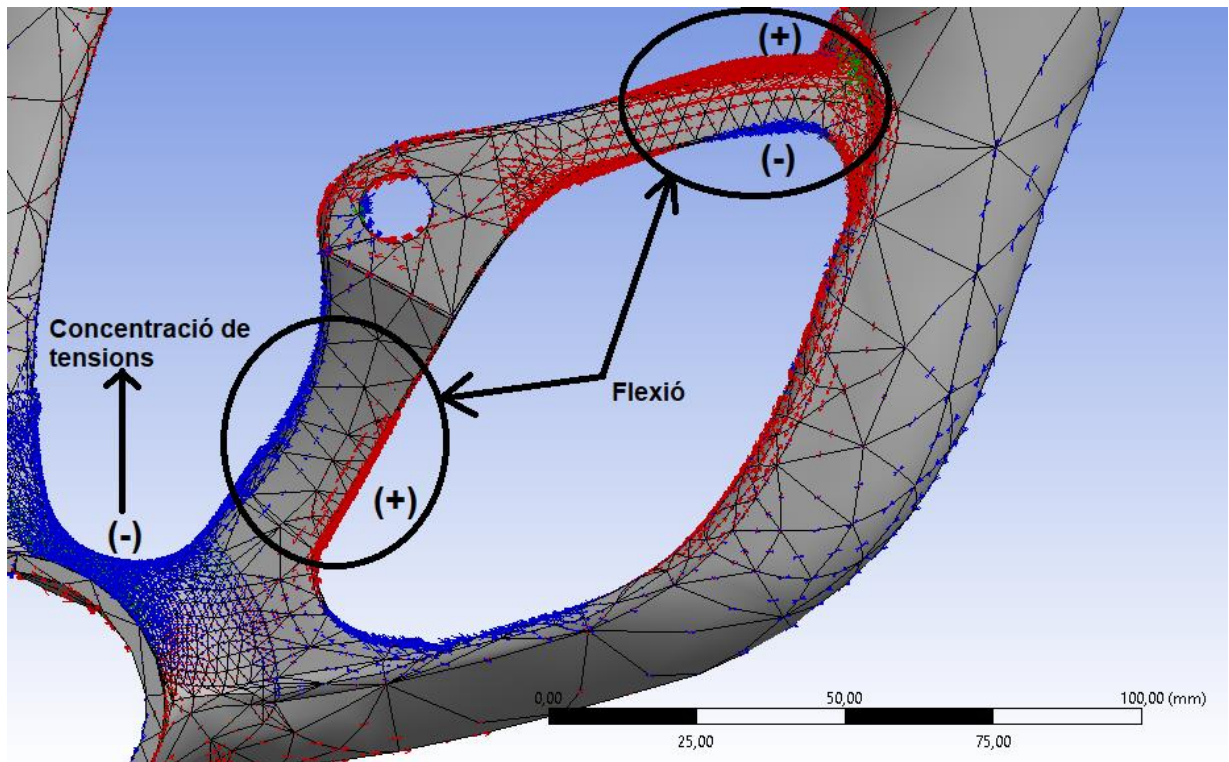


Figura 4.13. Imatge dels vectors principals de tensions mostrant les concentracions de tensions i les flexions

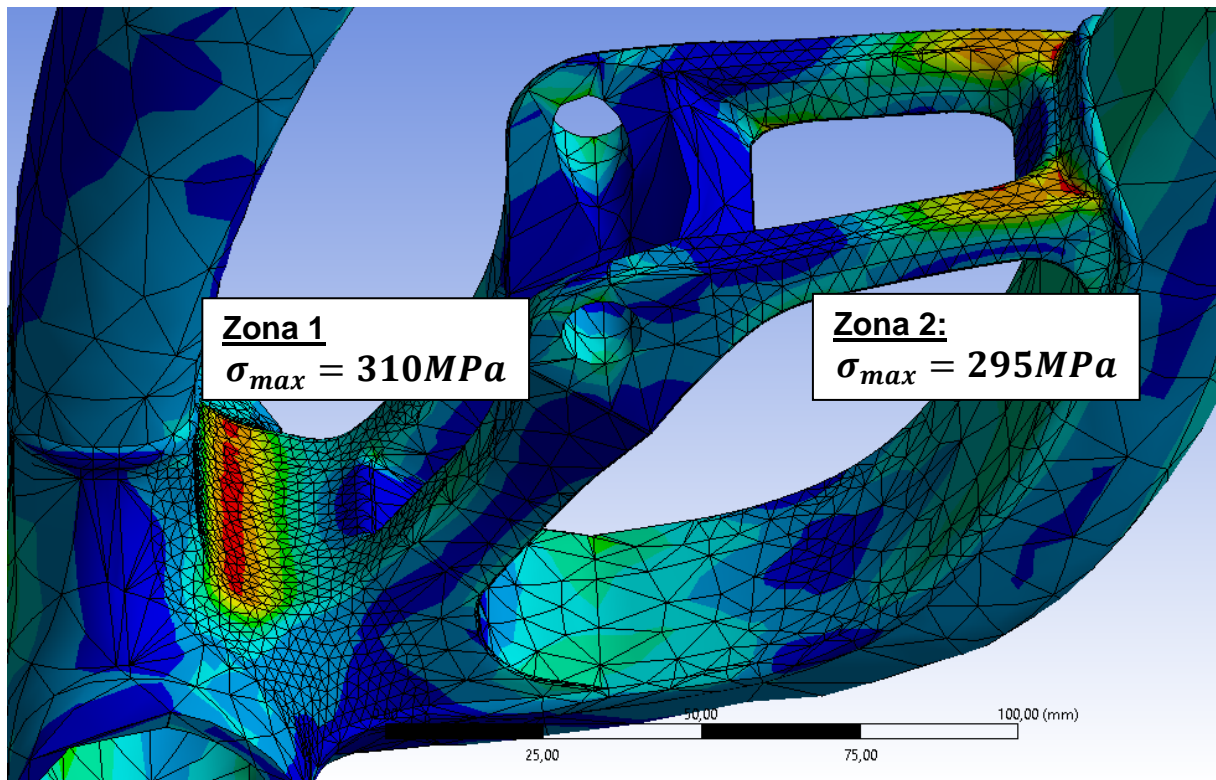


Figura 4.14. Dues zones diferenciades on es donen les tensions màximes

Analitzant els resultats i tenint en compte els diversos paràmetres del material, podem concloure que, per a una caiguda de 1,5 metres d'alçada, el quadre de bicicleta de descens està portat molt a l'extrem.

Les tensions de la Zona 1 són aproximadament de 310 MPa i la Zona 2 d'aproximadament 295 MPa.

Observant aquests resultats es troba que les tensions són molt elevades. A la zona 1 el material només li resten uns 50 MPa per arribar al deformament plàstic.

És possible que amb un salt d'alçada superior a 1,5 metres la tensió equivalent de Von-Misses superi el límit elàstic (359MPa). Això significa que, a partir d'aquest valor, el quadre tindria un deformament plàstic. En el cas que aquest sobrepassés la resistència última a tracció (393 MPa), el quadre patiria una ruptura.

A més a més, un cop estudiades els altres casos de caiguda (veure Annex A), s'observa com en alguns d'ells els valors de límit elàstic i fins i tot tensió última a tracció han estat superats.

Una altre aspecte que s'ha de tenir en compte és que pot haver-hi la possibilitat que la tensió calculada teòricament no s'adeqüi a la realitat pel següent motiu:

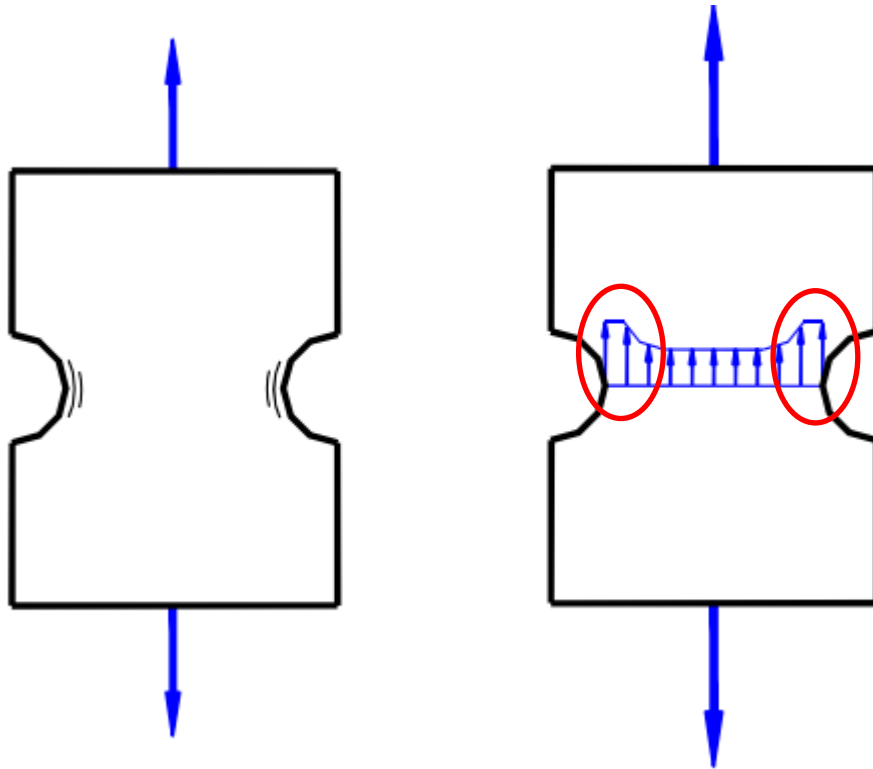


Figura 4.15. Comportament d'un material dúctil: Relaxació de tensions
(Font: UdG. Material dels elements de màquines)

En alguns casos de caiguda la tensió s'ha disparat fins al punt d'arribar a la tensió última a tracció. Degut a que l'alumini és un material dúctil, cal tenir en compte que un cop assolida la deformació plàstica la tensió teòrica queda atenuada tal i com es mostra a la imatge anterior. Per tant, els valors de tensió màxima d'alguns dels casos haurien de ser reduïdes.

A més a més també s'ha de tenir en compte que com que s'aplica la força en un instant de temps molt petit es considera que la resistència és major tal i com es mostra a la següent figura:

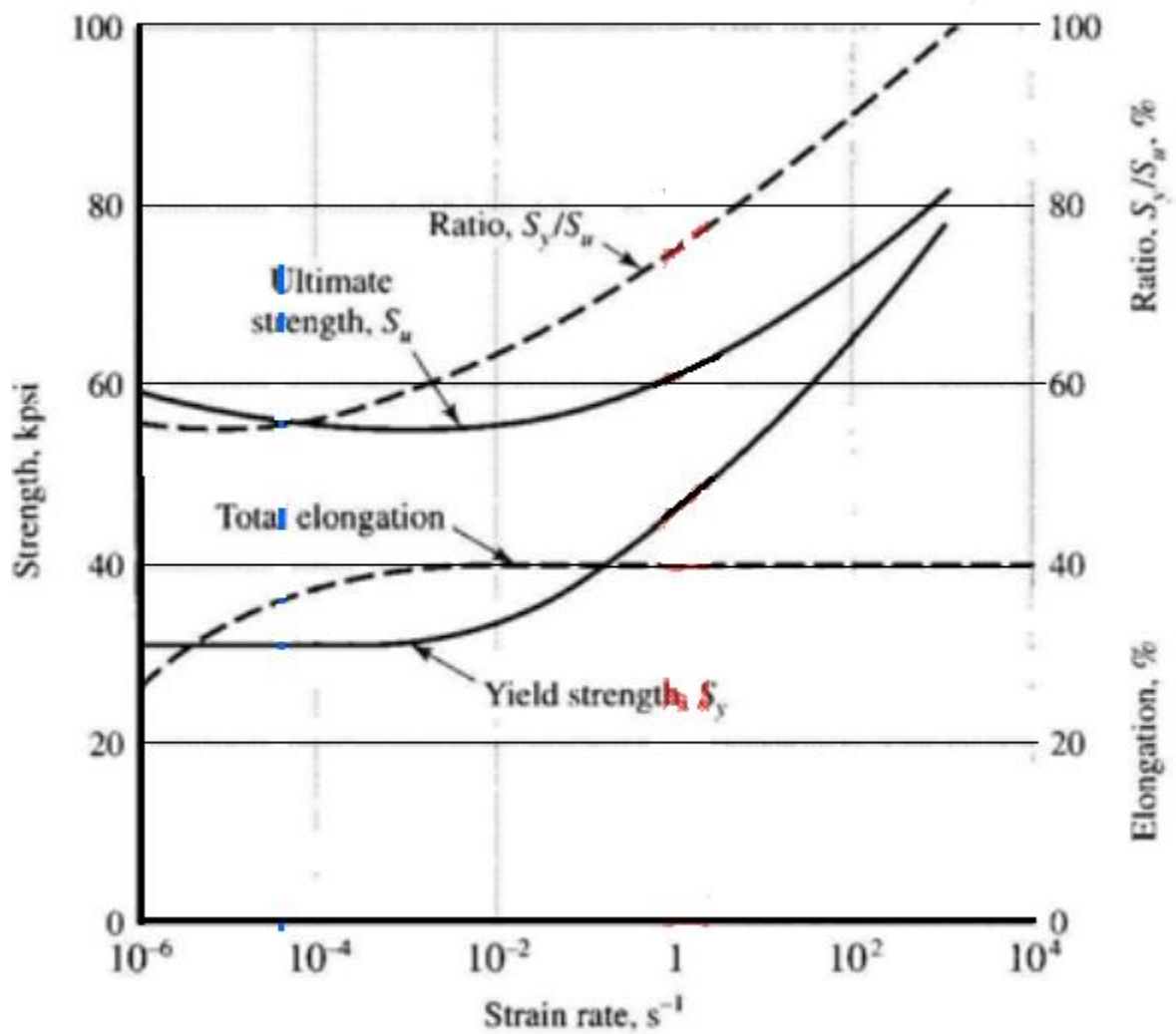


Figura 4.16. Efecte de la velocitat d'aplicació de la força: Augmenta la resistència
(Font: UdG. Material dels elements de màquines)

A mesura que el temps d'aplicació de la força és més petit el límit elàstic i la tensió última a tracció augmenten. Per tant es pot dir que és possible que el límit elàstic del material i la resistència última a tracció siguin lleugerament superiors a les que s'han indicat anteriorment i per tant aquests punts desfavorables estan més lluny dels punts de deformació plàstica i ruptura.

5. COMPROVACIÓ EXPERIMENTAL D'UN DELS PUNTS DÈBILS

Després de trobar els resultats analítics mitjançant el mètode d'elements finits es procedeix a analitzar, de manera experimental, si la simulació es pot assimilar a la realitat. En aquesta prova es simula la caiguda plana ja que, a part de ser la caiguda més senzilla i estable, les altres són més difícils de representar exactament igual que la simulació.

5.1. Metodologia

Mitjançant el programa Ansys s'han obtingut valors de tensió, amb MPa.

Pel que fa la part experimental, s'obtindrà, mitjançant galgues extensiomètriques, les deformacions unitàries del material.

El valor d'aquestes deformacions les podem assimilar directament a les tensions tenint en compte el seu mòdul de Young amb la següent expressió:

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (\text{Eq. 1})$$

on ε són les deformacions unitàries (-), σ la tensió (MPa) i E el mòdul de Young del material (MPa).

Es decideix col·locar una galga extensiomètrica a un dels punts més desfavorables per a comparar el seu valor (*Figura 5.2*). És un punt interessant d'estudi ja que posteriorment es procedirà a fer el re-disseny d'aquest. També se'n col·loca una al basculant de la bicicleta per a observar possibles anomalies (Veure Annex D).



Figura 5.1. Muntatge de la bicicleta pel cas experimental

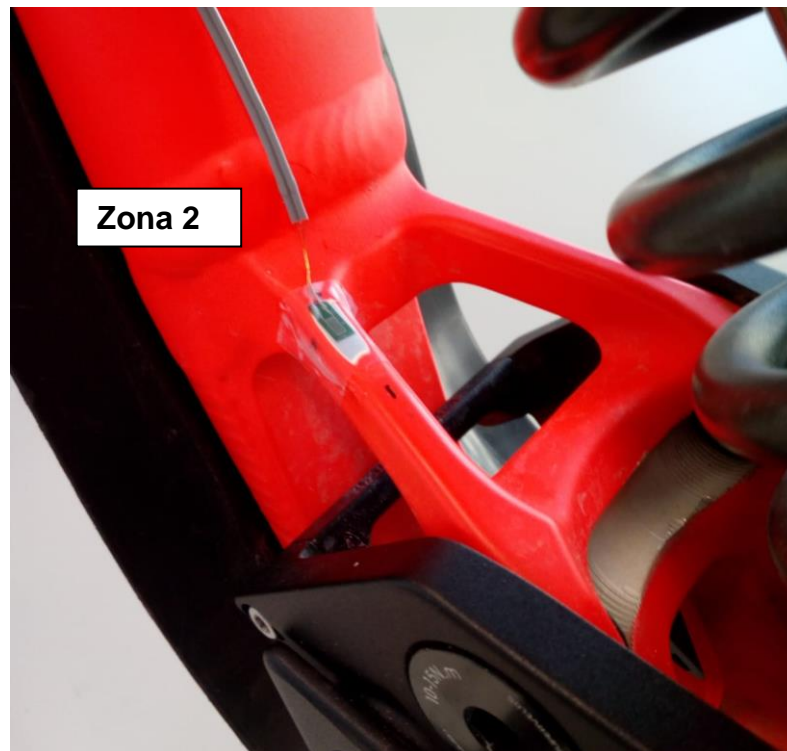


Figura 5.2. Galga extensiomètrica en un dels punts desfavorables

Finalment es procedeix a fer la caiguda plana des de 1,5 metres d'alçada utilitzant dues taules de 75 cm d'alçada, col·locades una sobre l'altre (Figura 5.3).



Figura 5.3. Prova experimental de la caiguda plana

Per a veure possibles interferències es realitza la prova varies vegades.

5.2. Resultats i comparació

Després de fer la simulació es guarden les dades obtingudes i es passen les deformades obtingudes amb la galga a tensions, tenint en compte el mòdul de Young. Finalment obtenim la següent representació:

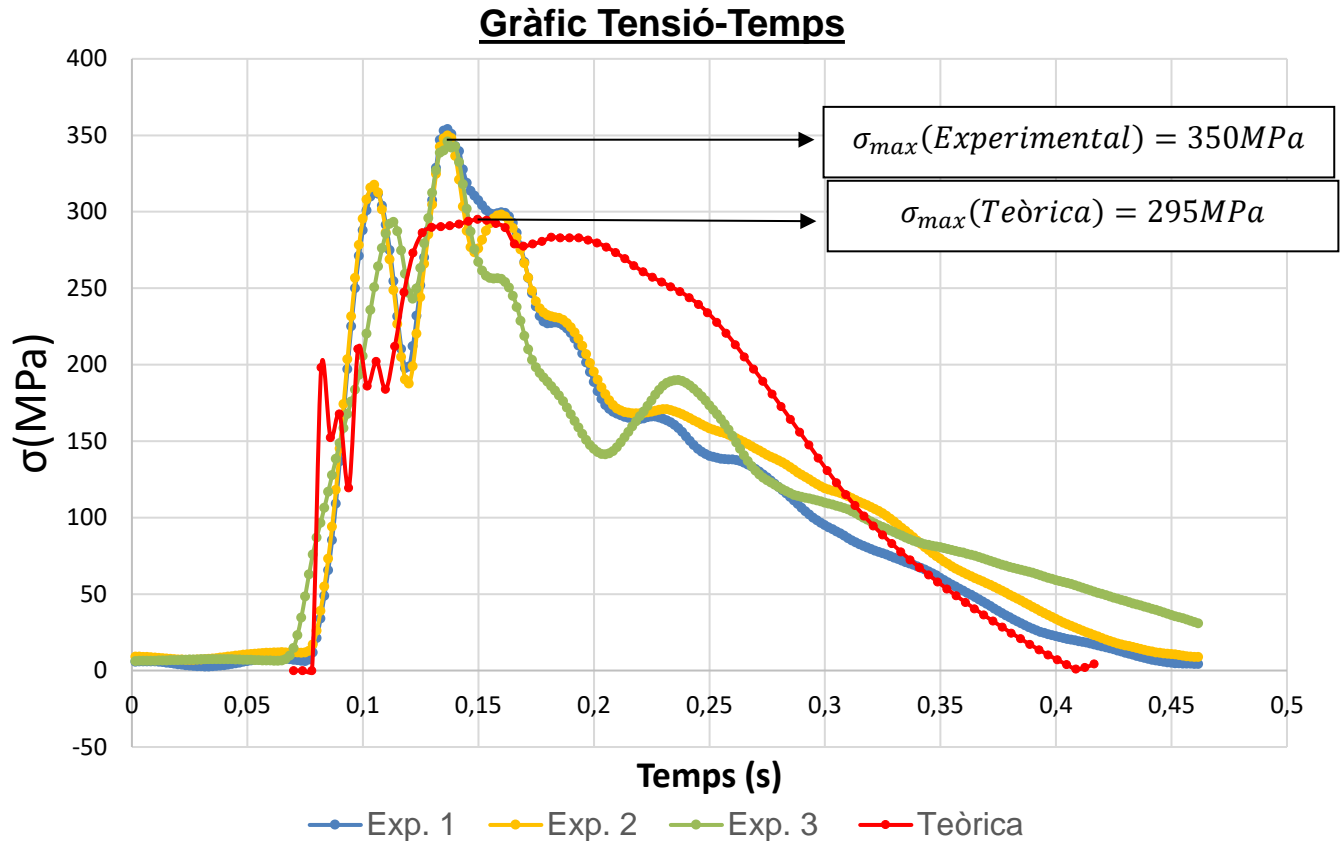


Figura 5.4. Gràfic Tensió-Temps de tres caigudes experimental i teòrica

En el gràfic anterior podem comparar tres models de caiguda experimental (Sèries Exp. 1, Exp. 2 i Exp. 3) respecte el model teòric.

Per a fer la gràfica del model teòric s'ha buscat la relació aproximada entre la tensió del punt feble de la zona 2 respecte la força obtinguda pel WorkingModel2D al punt C. Degut a que la força té un sentit i direcció gairebé constant es considera que la relació entre aquests dos paràmetres també ho és. Per tant, mitjançant aquesta proporció s'ha pogut obtenir la tensió teòrica aproximada per a cada instant.

Pel que fa a la tensió del punt dèbil, s'observa que aquesta té unes tensions més elevades que la gràfica teòrica.

Al gràfic es veu com la tensió màxima experimental és d'una mitjana de 350MPa, és a dir, pràcticament s'arriba al límit elàstic teòric del material (359MPa).

A la simulació d'Ansys, just en el punt on està col·locada la galga, s'observa una tensió aproximadament de 295MPa.

Si es compara el resultat teòric amb l'experimental es veu que hi ha un error aproximat del 15%.

Aquest petit error del 15% pot ser degut a:

- Lleugeres diferències en la geometria del quadre.
- Diferències en el pes del model simulat. La persona simulada és de 69kg, però no en el seu moment no es va tenir en compte el pes de la roba, casc...
- Possibles interferències en el cas experimental.
- Diferències en la simplificació de l'amortidor i suspensió en la simulació del WM2D.

Finalment, després d'analitzar els diversos resultats es comprova que, tot i tenir un error del 15%, la simulació ha estat força ben representada i els valors obtinguts amb el programa d'elements finits s'assimilen a la realitat.

6. RESOLUCIÓ DE LES MILLORES

Una vegada analitzat el quadre de la bicicleta s'ha trobat varis punts força dèbils o desfavorables. A més a més això ho podem reafirmar gràcies al cas experimental esmentat anteriorment. A continuació es procedeix a redissenyar les zones més dèbils.

Tal i com es comenta en les especificacions i metodologia, s'intenta augmentar la resistència del quadre de bicicleta però sense augmentar-ne el pes. A més a més, el re-disseny es porta a terme sense haver de tocar cap geometria de bieletes, passadors...

Degut a que per tots els casos de caiguda tenim aproximadament els mateixos resultats i punts desfavorables només es farà el re-disseny tenint en compte les forces de la caiguda plana.

6.1. Problemàtica del disseny anterior

Per a tots els casos de caiguda hi ha dues zones (*Figura 6.1*) on la tensió equivalent de Von Mises és força elevada, per tant, s'estudia cada zona per separat per analitzar possibles problemes i proposar-ne millores.

- Zona 1
Degut al brusc canvi de secció i la gran quantitat d'esforços que hi ha en aquesta zona es produeix el fenomen anomenat concentració de tensions. El radi del canvi de secció és bastant reduït i això provoca aquesta concentració.
- Zona 2
A la *Figura 4.13* s'observa com apareix una flexió degut a que la força no està alineada a la secció. Per culpa a aquesta desalineació de la força màxima apareix un moment flector que produeix una tensió elevada. A més a més, també tenim una concentració de tensions important ja que hi ha un canvi brusc de secció.

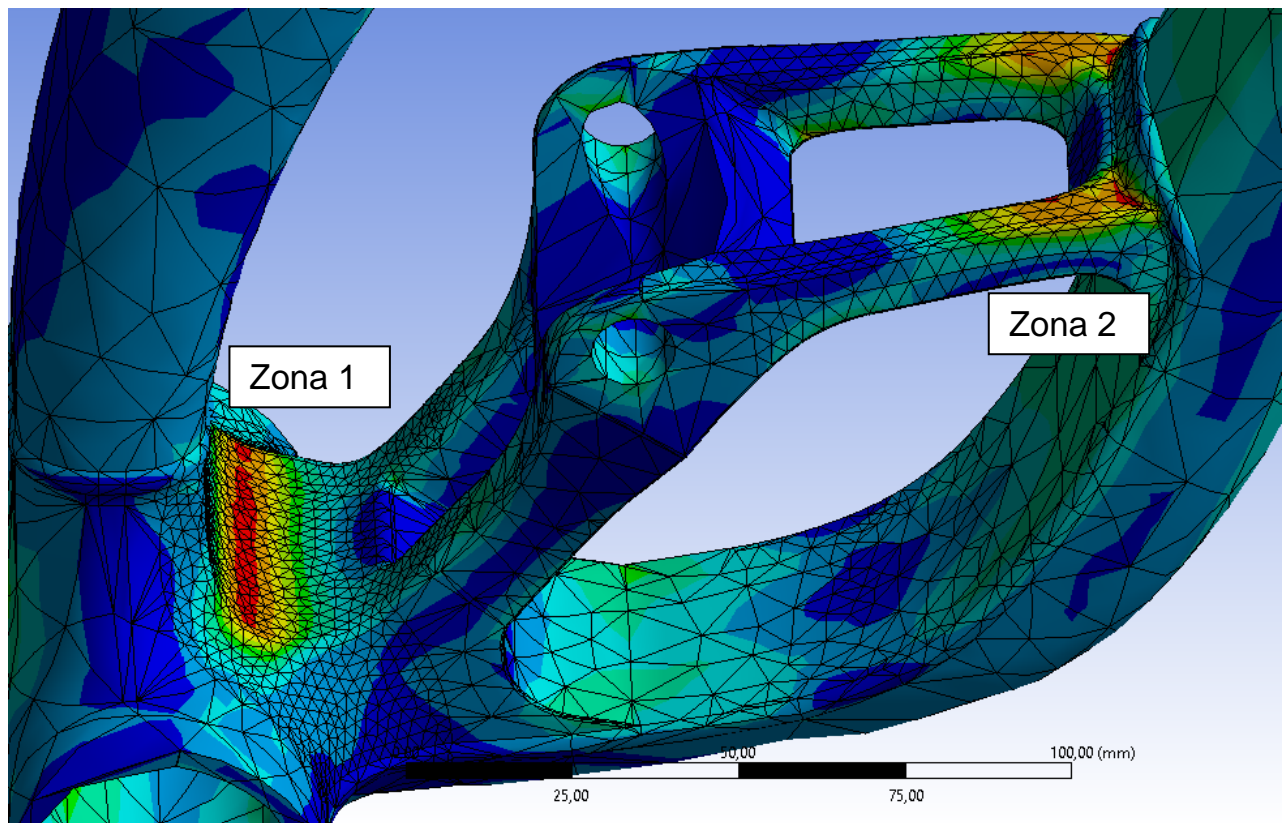


Figura 6.1. Dues zones desfavorables diferenciades

6.2. Millora de la problemàtica

La millora del quadre consisteix en intentar augmentar el màxim la resistència del quadre, per tant disminuir les tensions en els punts comentats, sense augmentar-ne el pes.

Per tant, després d'analitzar els problemes de les dues zones diferenciades es veu la necessitat de disminuir les concentracions de tensions de ambdues zones i intentar eliminar l'efecte de la flexió de la Zona 2.

6.2.1. Primera millora

Primer de tot es proposa eliminar la flexió de la Zona 2 fent que la força i la secció estiguin completament perpendiculars. Fent que la secció treballi únicament a tracció es redueix dràsticament les tensions de flexió i a més a més, gràcies a la geometria del quadre i col·locant uns arrodoniments considerables, no apareix una concentració de tensions tant elevada.

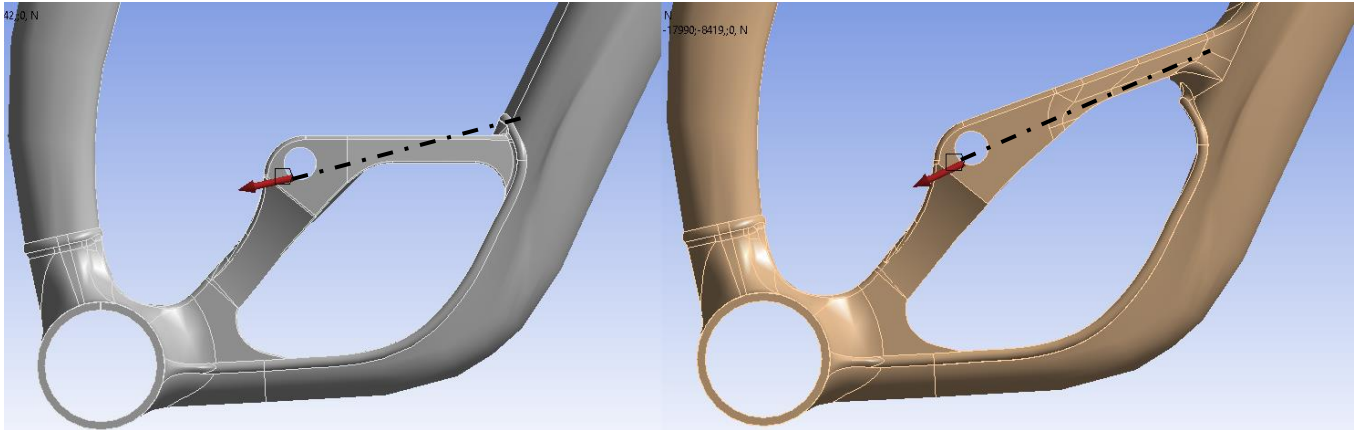


Figura 6.2. Diferències entre el disseny original (esquerre) i el re-disseny (dreta)

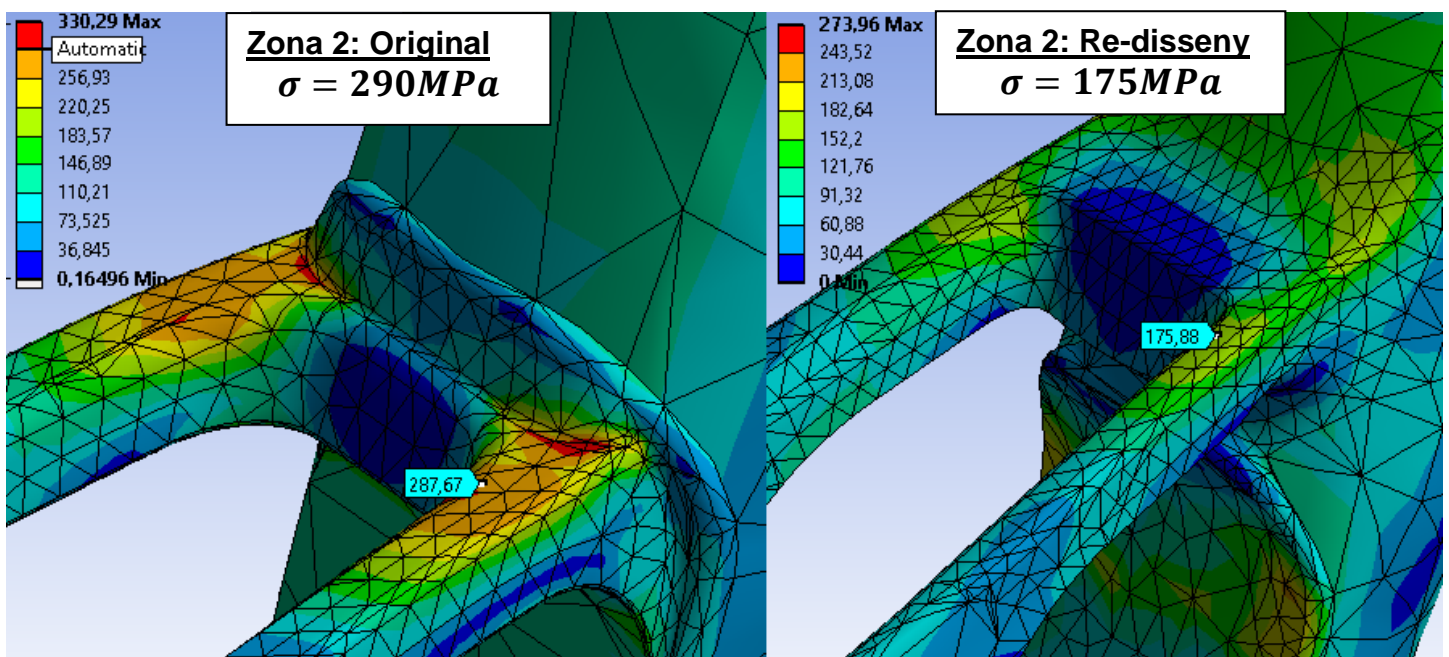


Figura 6.3. Diferències en les tensions del disseny original (esquerre) respecte el re-disseny (dreta) en la Zona 2

Tal i com s'observa en la imatge anterior es pot observar com traient el fenomen de la flexió i reduint la concentració de tensions el valor de la tensió equivalent de Von Mises és molt més favorable. S'ha aconseguit disminuir d'uns 290Mpa fins a 175MPa únicament canviant la direcció del material. Aproximadament s'ha disminuït un 40% de les tensions.

A més a més, si observem les tensions màximes de la peça veiem que encara es donen a la zona 1. Tot i així, degut a que hem fet rígid el conjunt les tensions màximes en la zona 1 també s'han vist disminuïdes de l'ordre d'uns 30MPa, de 310MPa a 281 MPa. (Figura 6.4).

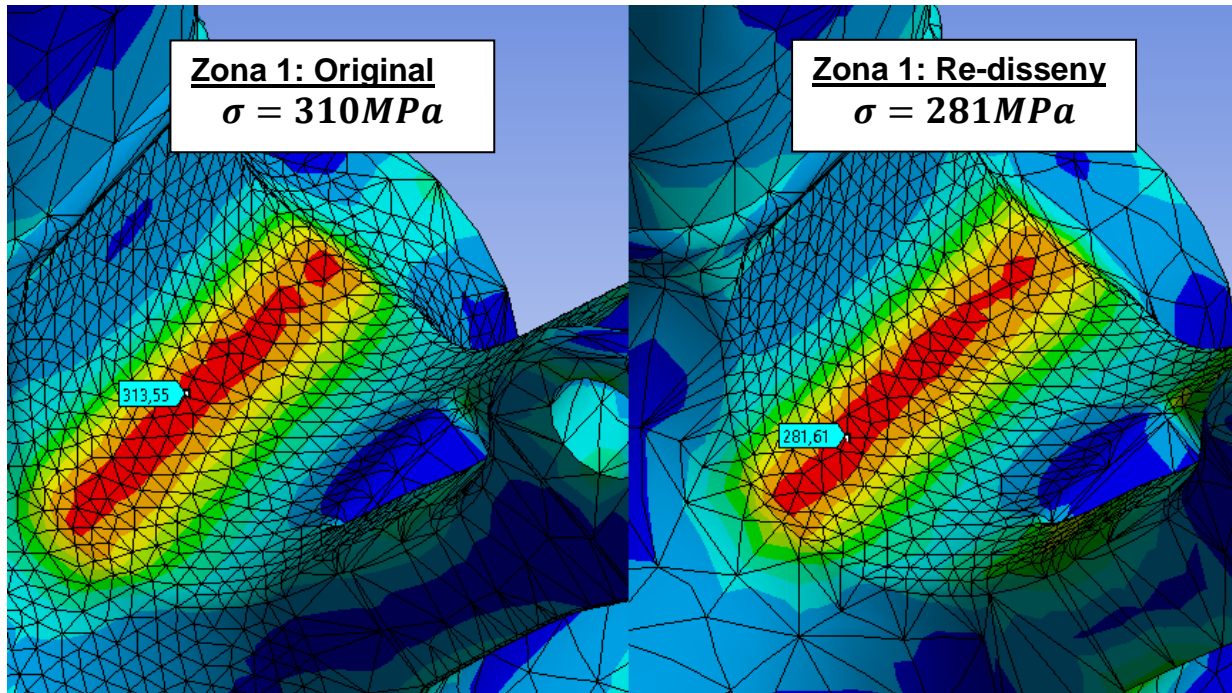


Figura 6.4. Diferències en les tensions del disseny original (esquerre) respecte el re-disseny (dreta) en la Zona 1

L'únic inconvenient d'aquesta millora és que s'ha augmentat lleugerament el pes del quadre, portant-lo d'un pes de 2590 grams a un pes final de 2610 grams. Encara que en una bicicleta de descens aquests 20 grams són poc importants, en un dels re-dissenys posteriors s'intenta reduir el pes el màxim.

6.2.2. Segona millora

La segona millora consisteix en disminuir les tensions de la zona 1, és a dir, el que s'intenta és reduir al màxim la concentració de tensions.

Degut a que hi ha molta limitació d'espai pel fet de que no es poden modificar les bieletes i altres elements, no és possible augmentar el radi de curvatura i fer el canvi de secció més suau.

Si s'analitza detalladament el comportament de la zona, s'observa que el tub del pedaler es deforma excessivament (*Figura 6.5*), provocant una compressió excessiva en la zona 1.

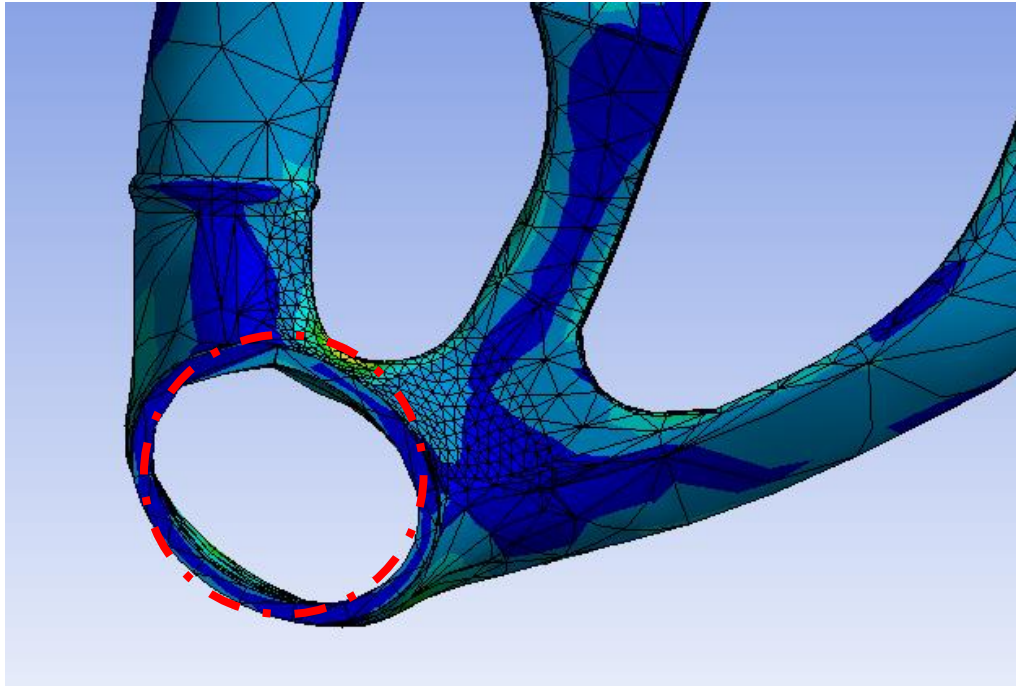


Figura 6.5. Deformació a escala augmentada del tub del pedaler

Per tant, el que s'ha fet és fer el tub del pedaler més gruixut per així afegir més material i fer més robusta la unió entre les diferents seccions, eliminant aquesta compressió i concentració de tensions. S'ha augmentat el gruix 2mm més que el disseny original.

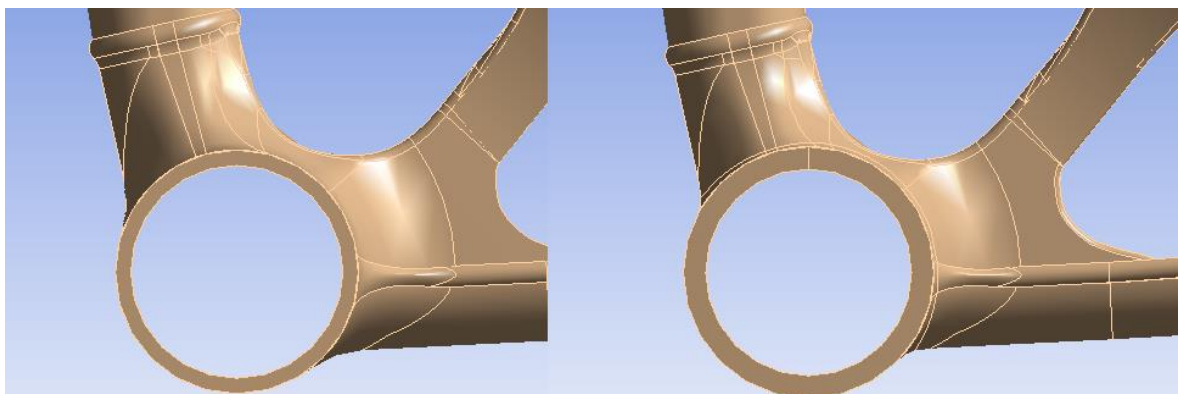


Figura 6.6. Augment del gruix del re-disseny (esquerre) al segon re-disseny (dreta)

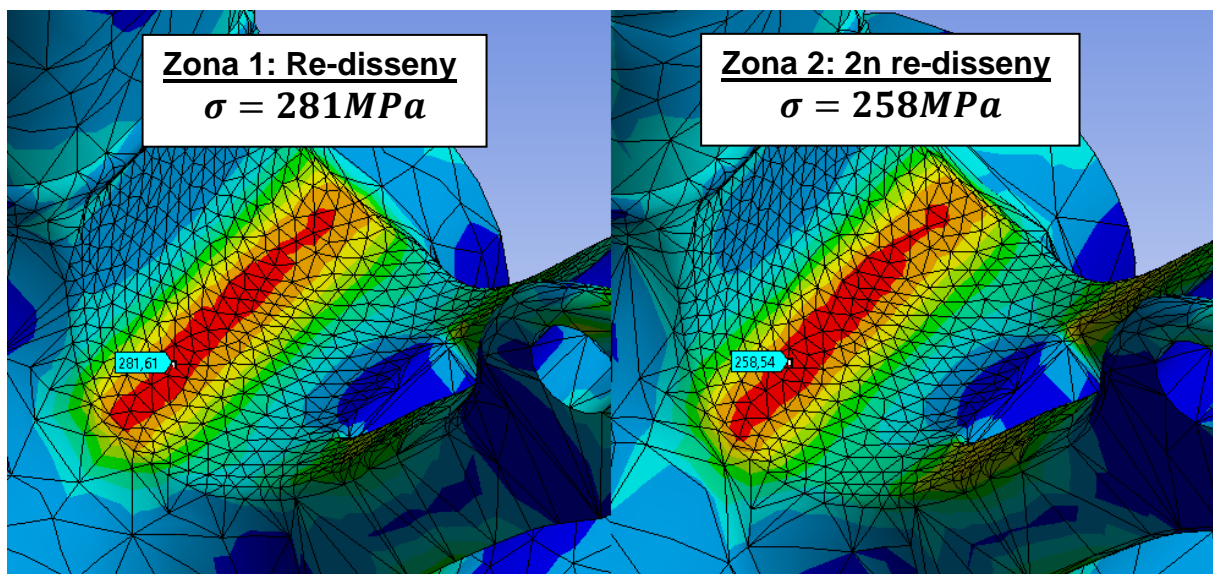


Figura 6.7. Diferències en les tensions del primer re-disseny (esquerre) respecte el segon re-disseny (dreta)

Després de calcular el segon re-disseny s’observa que les tensions en la Zona 1 han disminuït uns 20MPa però consegüentment el quadre ha augmentat el seu pes un total de 40 grams i per aquest motiu es decideix descartar aquest re-disseny.

6.2.3. Tercera millora

Després d’analitzar bé el re-disseny anterior s’ha observat que no s’ha aconseguit disminuir molt la tensió i, a més a més, ha augmentat el pes considerablement. Es per això que es proposa una altre millora, incloent-hi la primera.

Per a fer la unió més robusta i per tant evitar la compressió excessiva es proposa col·locar-hi varis nervis de la següent manera:

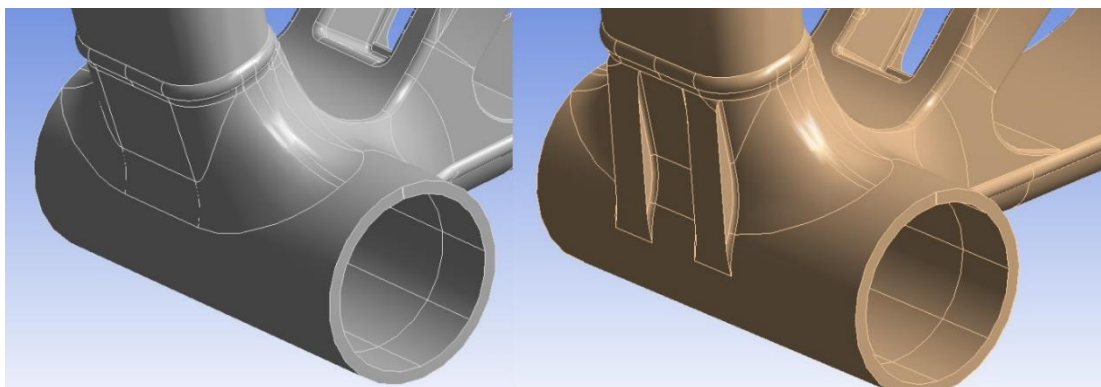


Figura 6.8. Generació de dos nervis del re-disseny (esquerre) al tercer re-disseny (dreta)

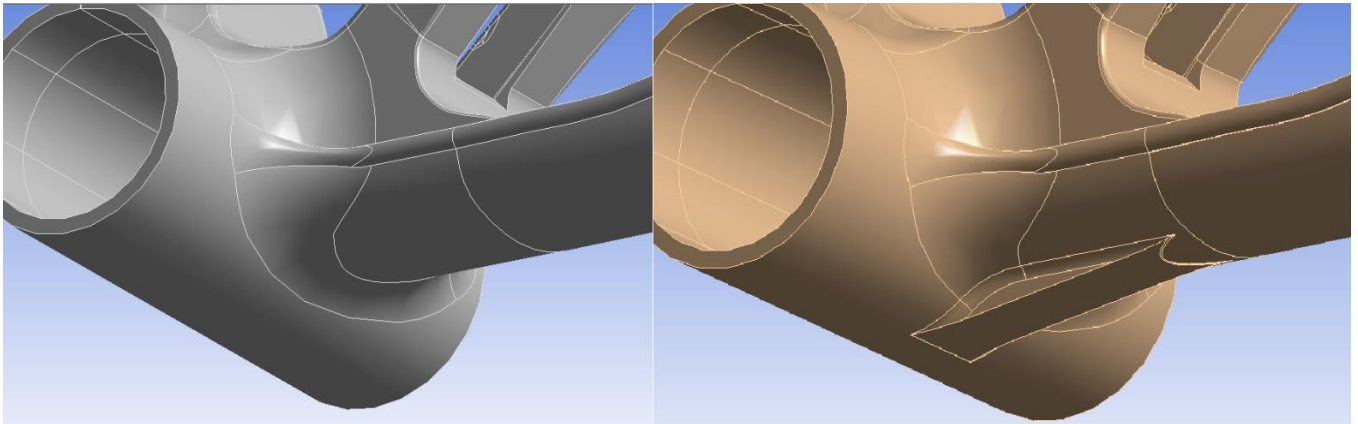


Figura 6.9. Generació d'un nervi del re-disseny (esquerre) al tercer re-disseny (dreta)

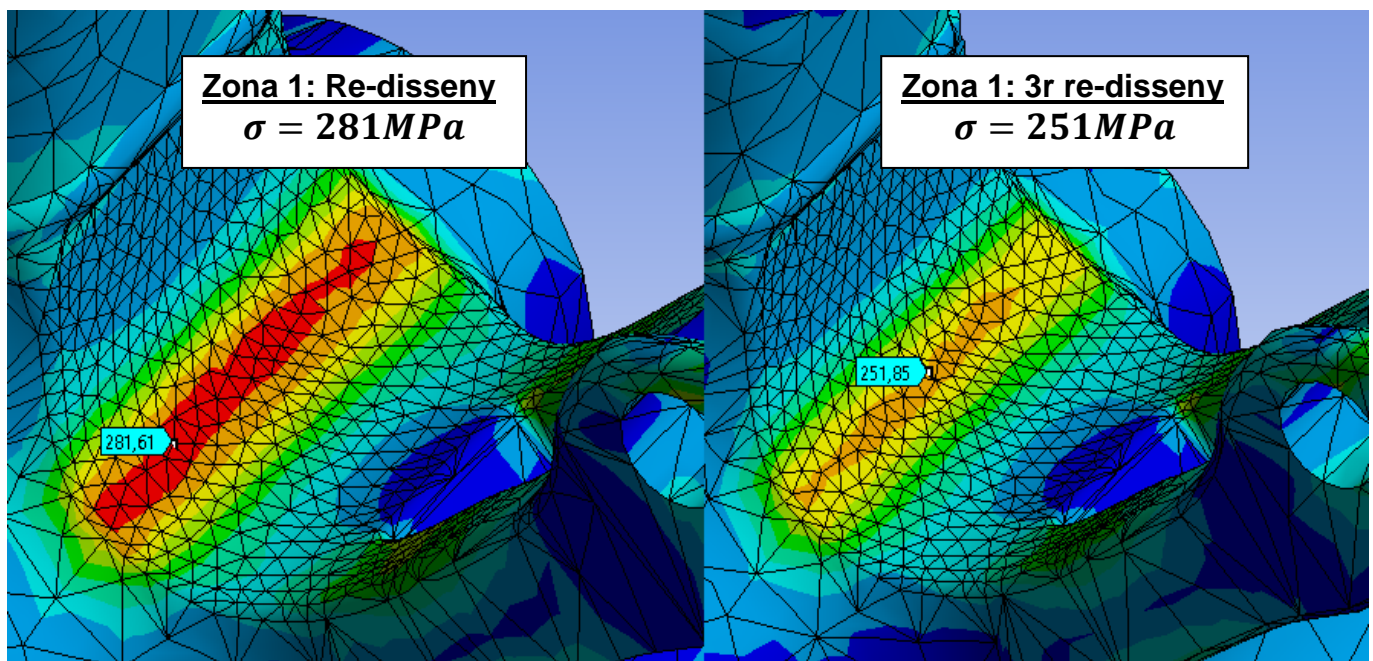


Figura 6.10. Diferències en les tensions sense nervi (esquerre) respecte amb nervi (dreta)

Es comprova que amb la col·locació dels nervis la tensió baixa de l'ordre de 20MPa, igual que el re-disseny anterior, però sense augmentar tant el pes del quadre.

Tot i així ara apareix una zona nova amb tensió elevada, que és als nervis de darrere. Aquests, que estan a tracció, tenen una tensió de 320MPa tal i com es mostra a la següent figura.

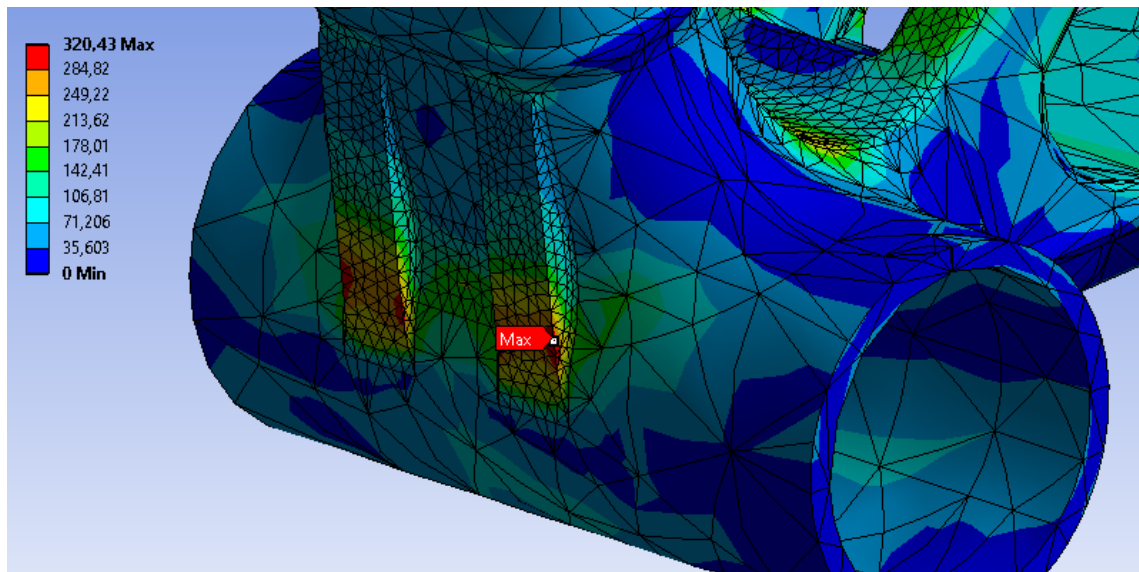


Figura 6.11. Tensió considerable als nous nervis (320 MPa)

Amb aquesta millora s'ha aconseguit disminuir la tensió a la zona 1 sense afegir molt material, per tant, es continua estudiant aquest re-disseny.

6.2.4. Quarta millora

Com s'ha vist al model anterior amb els nervis col·locats s'ha aconseguit disminuir la tensió de la zona 1. Tot i així, ha aparegut unes tensions importants al nervi degut a la flexió que es produeix en aquest punt. És per això que es procedeix a re-dissenyar els nervis distribuïnt el material més uniformement perquè les tensions d'aquesta zona es puguin repartir i no es doni el fenomen de concentració de tensions.

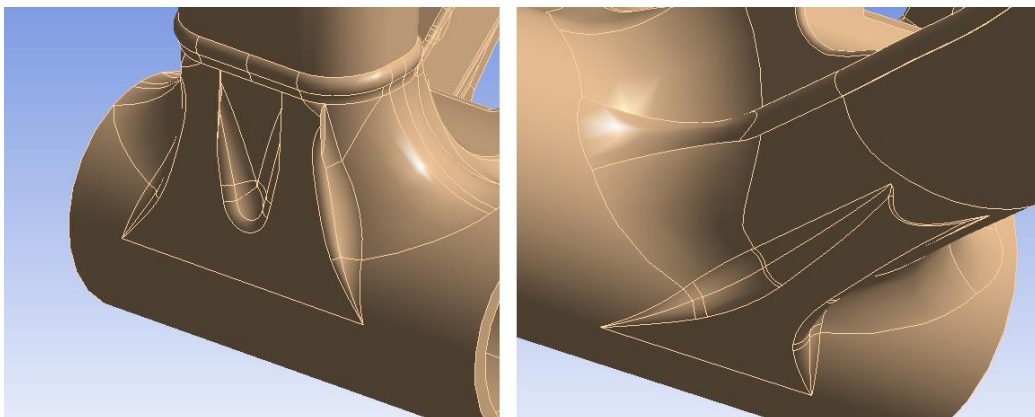


Figura 6.12. Re-disseny dels nervis per eliminar les tensions excessives

Amb els nous nervis s'ha aconseguit reduir les tensions a varies zones:

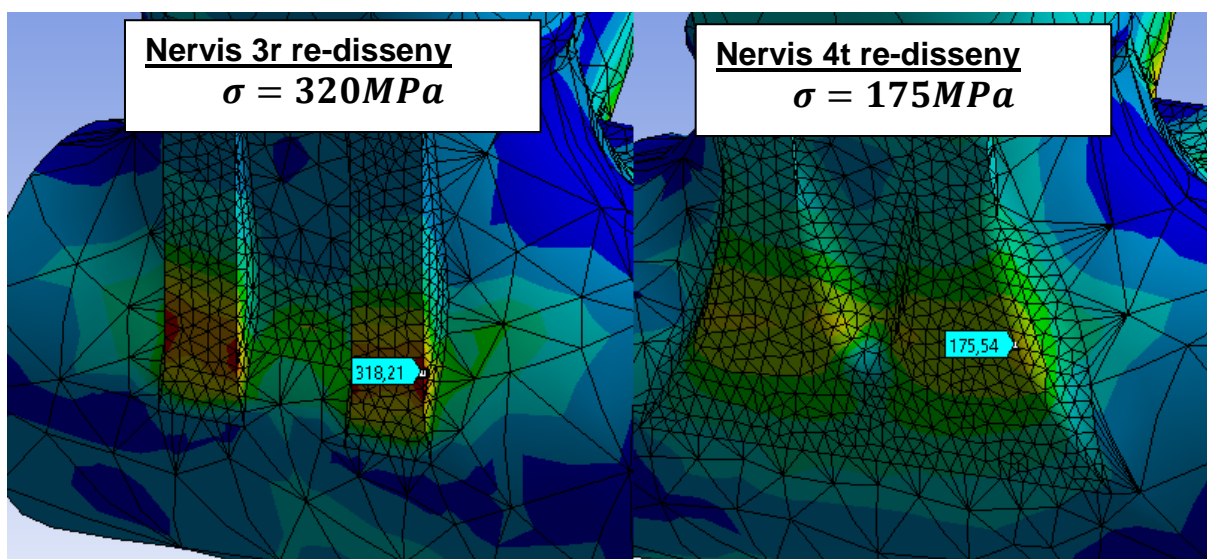


Figura 6.13. Disminució de tensions a la zona dels nervis

Com es pot comprovar a la imatge anterior, únicament afegint material a la zona més desfavorable dels nervis la tensió s'ha vist reduïda de l'ordre d'un 45% respecte el model anterior.

Al nervi inferior la tensió també s'ha reduït respecte el 3r re-disseny. Aquesta ha passat d'uns 250MPa a 180MPa.

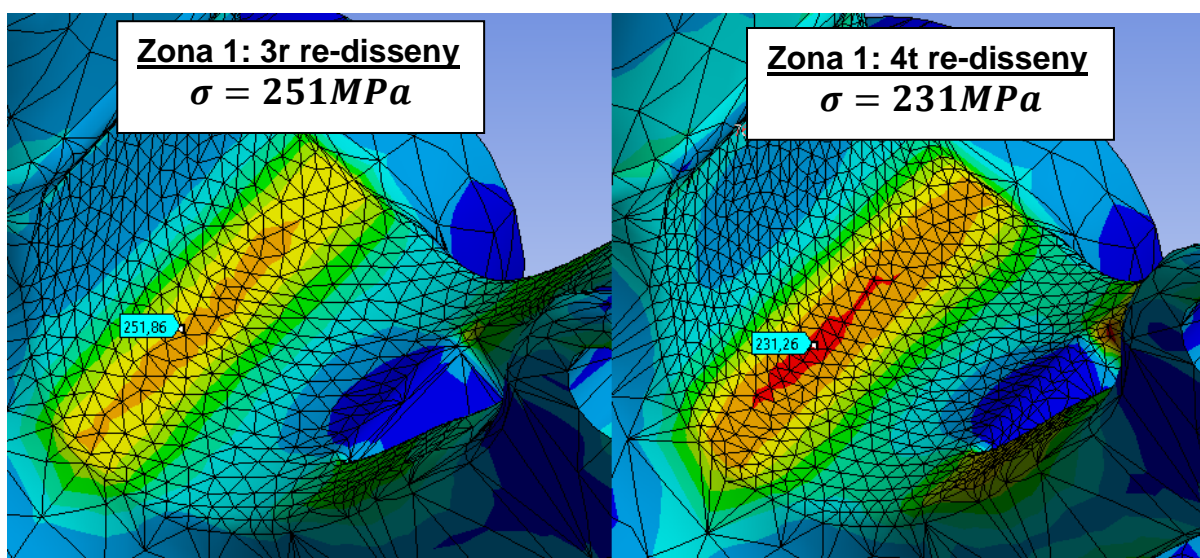


Figura 6.14. Disminució de tensions a la zona 1

Finalment, després de fer aquest últim re-disseny s'ha aconseguit reduir la tensió de la zona 1 un total d'uns 85 Mpa, aproximadament un 25% respecte el disseny original.

A més a més, després d'aquests re-dissenys s'observa que la tensió de la zona 2 també ha disminuït un total de 30 MPa, per tant, un total del 50% respecte el disseny original.

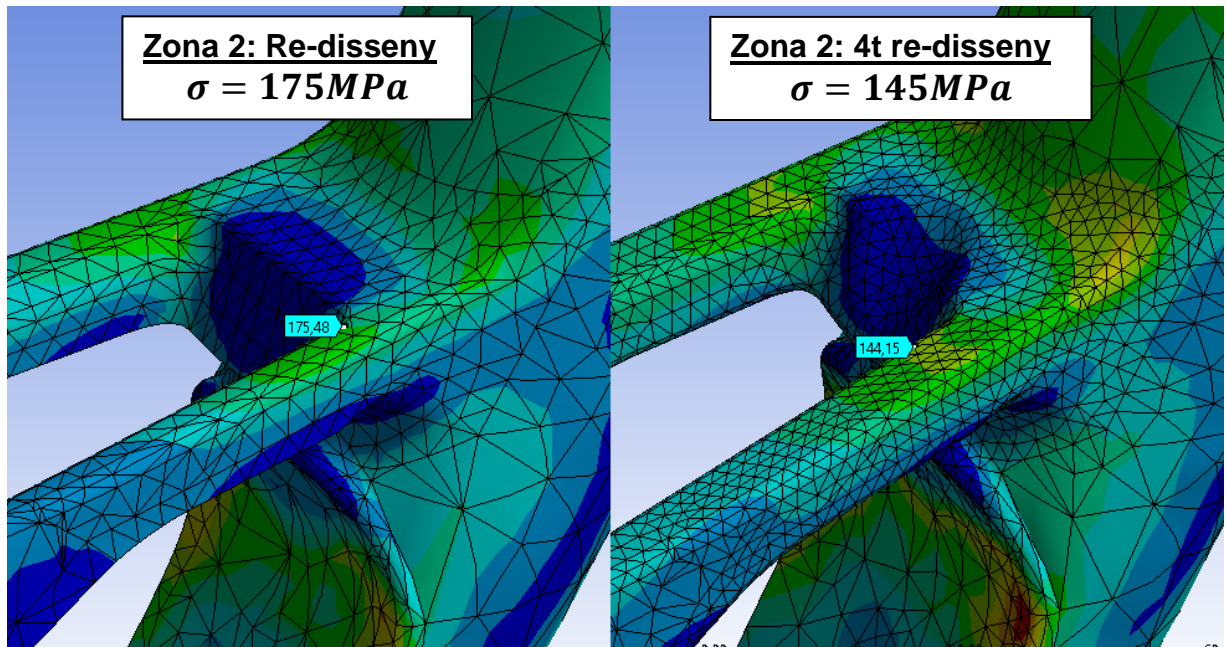


Figura 6.15. Diferències entre les tensions del re-disseny (dreta) i el 4t re-disseny (esquerre) de la zona 2

6.2.5. Cinquena millora

Finalment l'últim re-disseny consisteix en treure pes on no és necessari. Dels re-dissenys anteriors s'ha considerat la millora del primer i quart re-disseny. De fet, la quarta millora ha estat una continuació del primer i el tercer. El segon re-disseny s'ha descartat.

Gràcies a les simulacions d'Ansys s'intenta reduir el màxim el pes extraient material dels punts on la tensió és baixa. Per a fer-ho, s'observa les zones de color blau ja que les que no pateixen deformacions i per tant, són zones que no fan augmentar la resistència del conjunt. A continuació es mostra una imatge sense extreure el material i posteriorment una reduint el material innecessari. Es comprova que al extreure part del material no s'han vist afectades altres zones; les tensions no augmenten a cap punt.

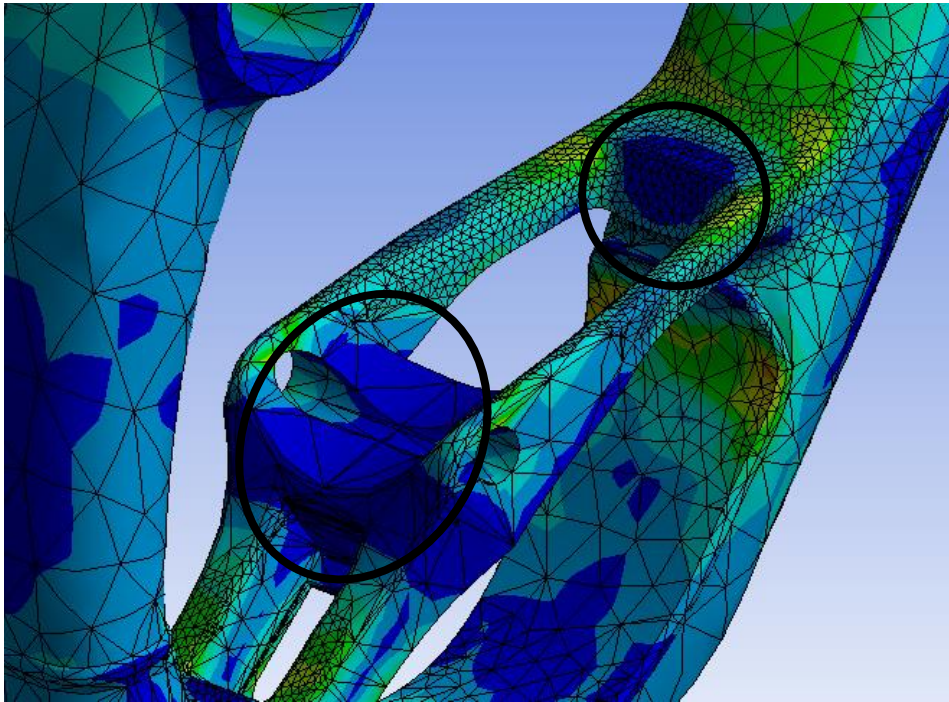


Figura 6.16. Zones on les tensions són baixes i per tant es pot extreure material

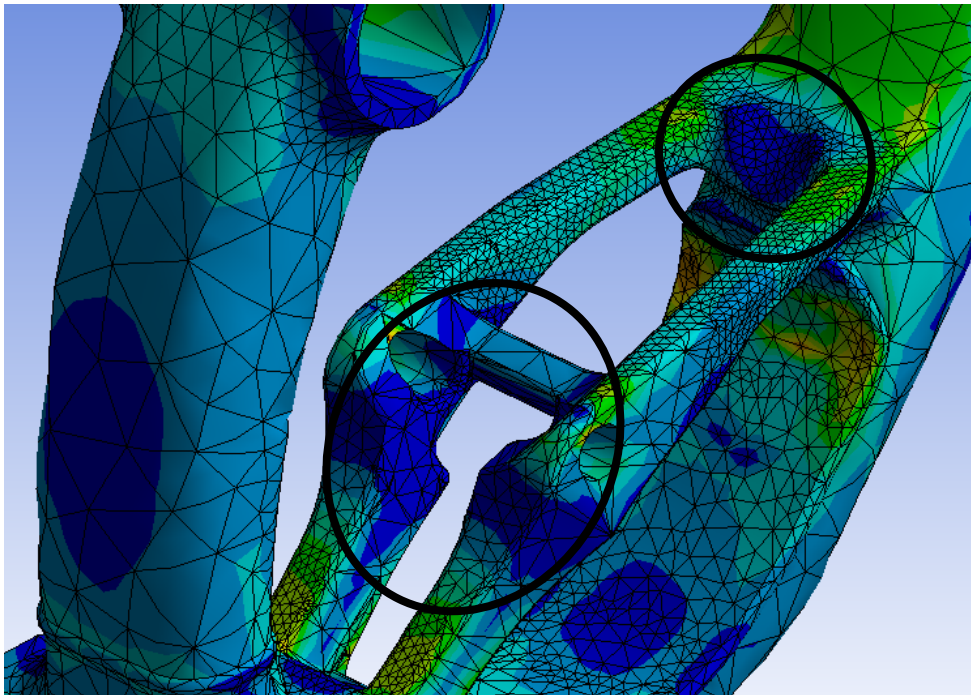


Figura 6.17. Zones les quals se'ls hi ha extret material no necessari

Gràcies a la gran reducció de material s'ha aconseguit reduir el pes fins a 2590 grams, per tant, s'ha igualat el pes que el model original.

Després de tots els re-dissenys no s'ha pogut disminuir el pes del disseny original però s'ha pogut reduir molt les tensions dels punts desfavorables sense afegir-ne.

Finalment, aquí es mostren uns simples renderitzats del disseny original i el re-disseny final.



Figura 6.18. Renderitzat del model original



Figura 6.19. Renderitzat de l'últim re-disseny

7. CONCLUSIONS

Després d'haver realitzat el càlcul a resistència del quadre s'ha pogut observar dues zones clarament desfavorables amb unes tensions força elevades en comparació a la resta del quadre.

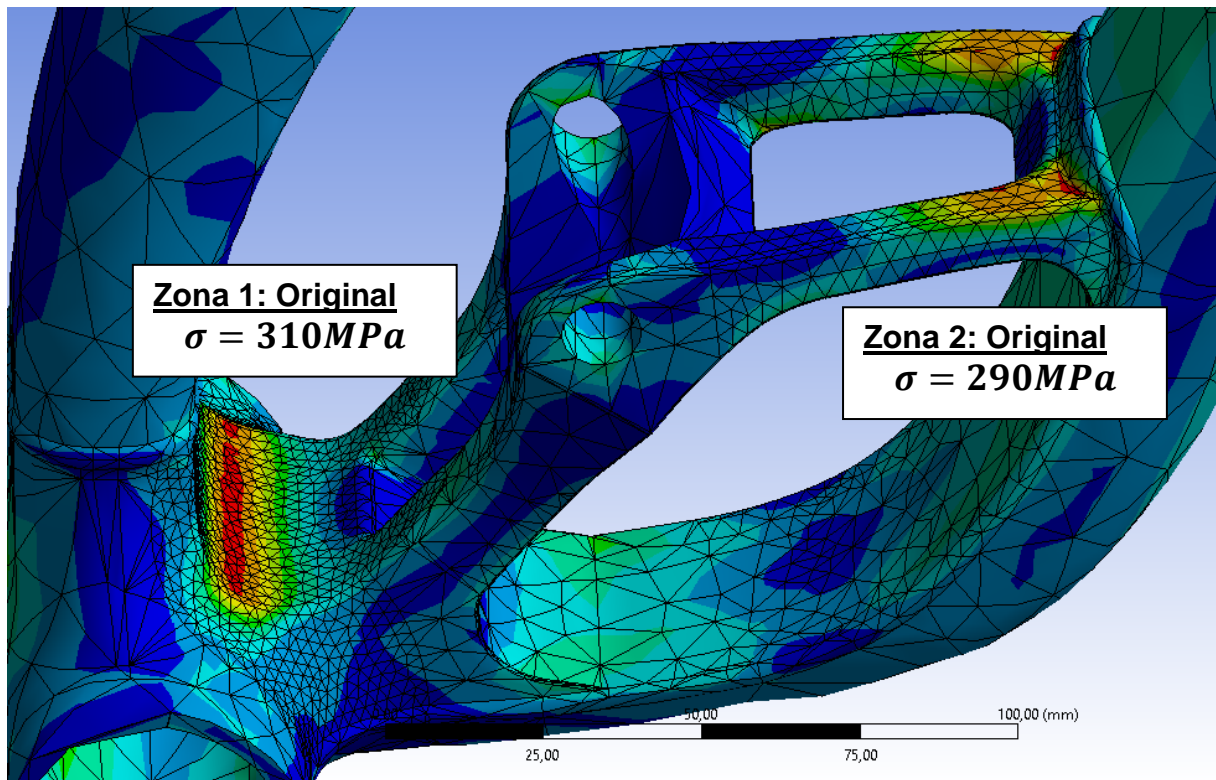


Figura 7.1. Dues zones diferenciades

Gràcies a les simulacions 2D i l'estudi d'elements finits s'ha vist que el quadre d'alumini estudiat és capaç de suportar les càrregues produïdes per una caiguda des d'un metre i mig. A més a més els valors s'han pogut comprovar mitjançant un cas experimental, donant uns resultats amb un error aproximat del 15%. Ara bé, en alguns dels casos estudiats s'ha comprovat que algun dels punts sobrepasa el límit elàstic i per tant, es considera aquest pot patir alguna deformació plàstica.

Finalment, pel que fa el disseny original es pot concloure que en el cas que es realitzi un salt de més de 1,5 metres (Tenint en compte els mateixos paràmetres de la simulació, com ho són el pes, la caiguda en un terra pla...) aquest és possible que

pateixi alguna ruptura ja que, al estar tant al límit, pot sobrepassar la resistència última a tracció.

Després de re-dissenyar les dues zones més desfavorables s'ha aconseguit reduir-ne les tensions, bàsicament anul·lant els moments flectors, flexions i concentracions de tensions. Les tensions a la zona 1 han disminuït de l'ordre d'un 25% i a la zona 2 aproximadament d'un 50%.

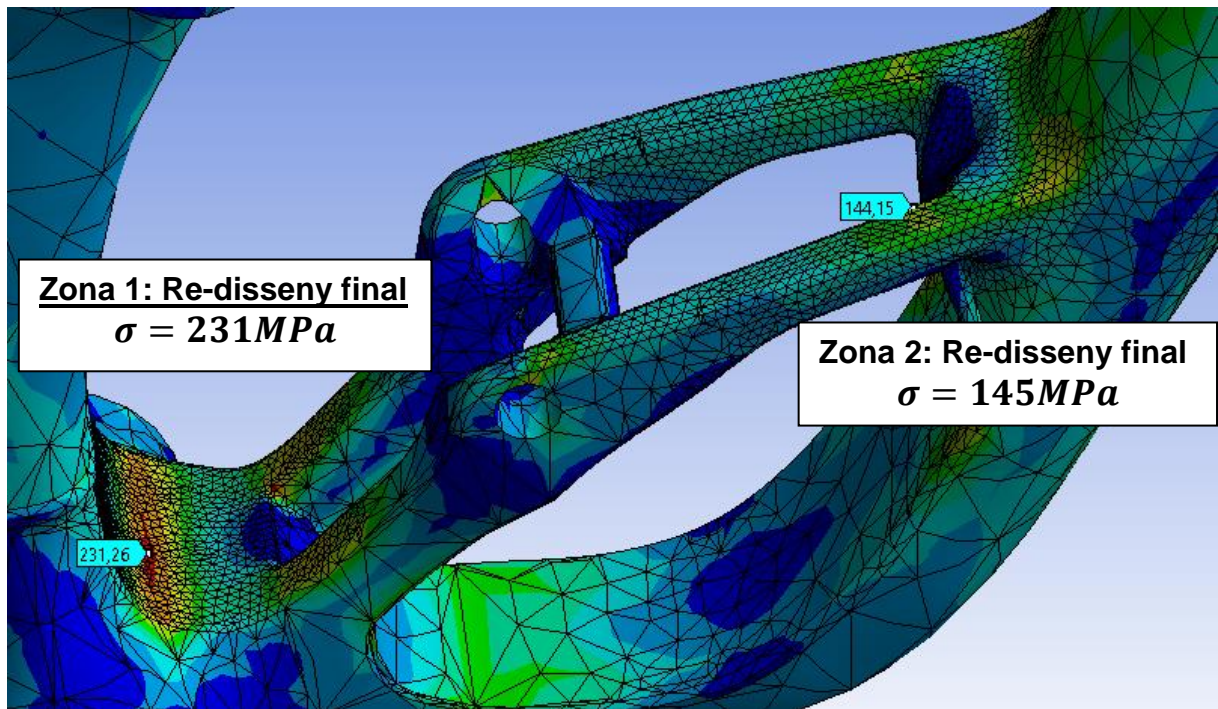


Figura 7.2. Tensions del re-disseny final del quadre

Finalment doncs, s'ha aconseguit re-dissenyar el quadre per obtenir-ne un de més resistent i amb el mateix pes que l'original.

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present estudi consta dels següents documents:

- **DOCUMENT 1. MEMÒRIA I ANNEXOS**

MEMÒRIA

ANNEXOS

- A. Quatre casos de caiguda diferents i els seus resultats
- B. Obtenció de les forces per l'Ansys
- C. Especificacions tècniques de la bicicleta
- D. Detalls del cas experimental

- **DOCUMENT 2. PRESSUPOST**

- A. Annex al pressupost

9. REFERÈNCIES

BIKE ADVISOR, Aluminium Frames: 6061 vs 7005. Which Is the Best?. (<https://bike-advisor.com/bicycle-guides/aluminum-frames-6061-vs-7005-which-is-the-best.html>, 15 de maig de 2019).

CANYON BICYCLES, Canyon Exceed Cross-Country. (<https://www.canyon.com/en-us/mountain-bikes/cross-country-bikes/exceed/>, 4 de juny de 2019)

COMMENCAL BICYCLES, Commencal 2016|Supreme DH World Cup Yellow 2016. (<https://www.commencal-store.co.uk/supreme-dh-world-cup-yellow-2016-c2x16198848>, 15 de maig de 2019).

MATWEB, Aluminium 6066-T6; 6066-T651. (http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=2af4dd4c6d5740489dc5b342ef1ab84b, 5 de juny de 2019).

MAYUGO, J, Universitat de Girona. Vibracions. Càlcul de mecanismes. Girona. 2017.

NO SIN MI BICI, El juego de dirección: Sistemas y estándares. (<https://nosinmibici.com/2016/07/22/el-juego-de-direccion-sistemas-y-estandares/>, 4 de juny de 2019)

SRAM, User Manual. (https://www.sram.com/sites/default/files/techdocs/Boxxer_English.pdf, 10 de maig de 2019).

TRIBE BICYCLE, What does butting mean? Braking down the Tribe CRMO triple-buttet frame. (<https://tribebicycles.com/blogs/news/16951723-what-is-butting-breaking-down-the-tribe-triple-buttet-frame-4130-chromoly-steel-frame>, 15 de maig de 2019).

UNIVERSITAT DE GIRONA. Robot modeling. Disseny de mecanismes. Girona. 2018.

UNIVERSITAT DE GIRONA, 4. Materials dels elements de màquines. Càlcul de màquines. Girona, 2018.

UNIVERSITAT DE GIRONA, 4. Tensions en elements de màquines. Càlcul de màquines. Girona, 2018.

ANNEX A

Quatre casos de caiguda diferents i els seus resultats

ANNEX A: Quatre casos de caiguda diferents i els seus resultats.

1. Entorn i casos

En un circuit de descens hi ha infinitat d'impactes que poden afectar a diferents parts del quadre i a més a més amb proporcions diferents. És per això que per a fer l'estudi més objectivament i correctament s'ha optat per fer l'estudi de quatre tipus de caigudes per obtenir càlculs que s'assimilin a la realitat.

Tots els casos estudiats simulen una caiguda amb bicicleta des de 1,5 metres d'alçada respecte el terra però amb una recepció diferent per cada un d'ells.

- Recepció plana

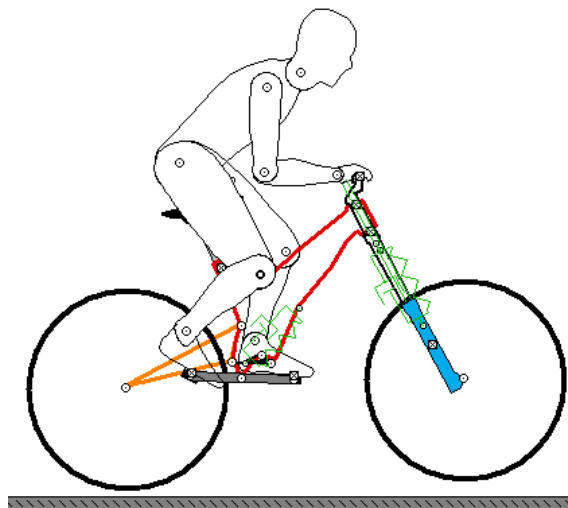


Figura A.1. Caiguda plana

Una de les caigudes més habituals i suaus pel pilot de la bicicleta és una caiguda plana. Aquesta consisteix en impactar amb les dues rodes alhora. Degut a que el pes s'equilibra amb les dues rodes l'impacte és molt estable i per tant suau.

- Recepció amb la roda davantera

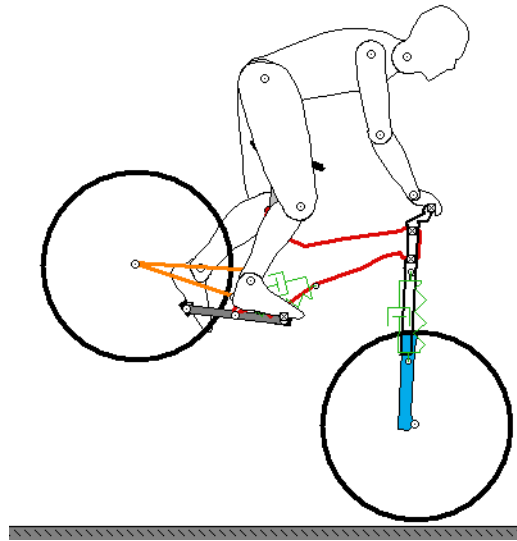


Figura A.2. Recepció amb roda de davant

El segon cas, a diferència de l'anterior, representa un cas accidental. Sovint, després d'enlairar-se o després de caure al buit la bici tendeix a inclinar-se lleugerament cap endavant. Aquest cas simula la caiguda accidental considerant que toca primer la roda davantera i seguidament la posterior. En aquest tipus de recepció la suspensió treballa més bruscament que el cas anterior. A més a més, aquest cas es considera força inestable ja que si la inclinació del cos i de la bicicleta és excessiva o errònia és molt fàcil caure.

- Recepció amb la roda de darrere

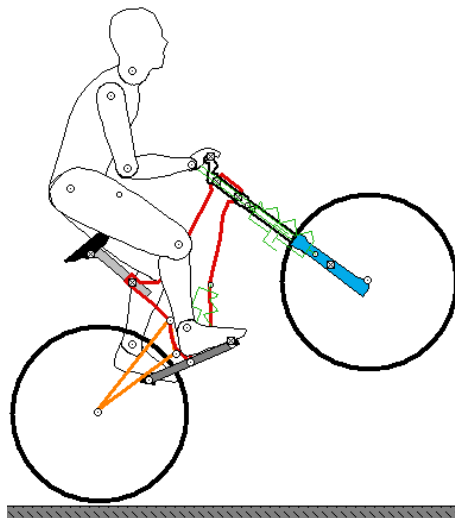


Figura A.3. Recepció amb roda de darrere

A diferència de l'anterior, aquest tipus de recepció és molt habitual ja que és una manera d'assegurar-se la bona recepció sense inclinar-se excessivament cap endavant. L'impacte és força brusca però el moviment del cos és molt favorable permetent un fàcil equilibri sobre la bici. En aquest impacte el primer contacte és la roda de darrere, provocant que l'amortidor de darrere treballi des del moment de l'impacte i força bruscament.

- Recepció sobre el seient

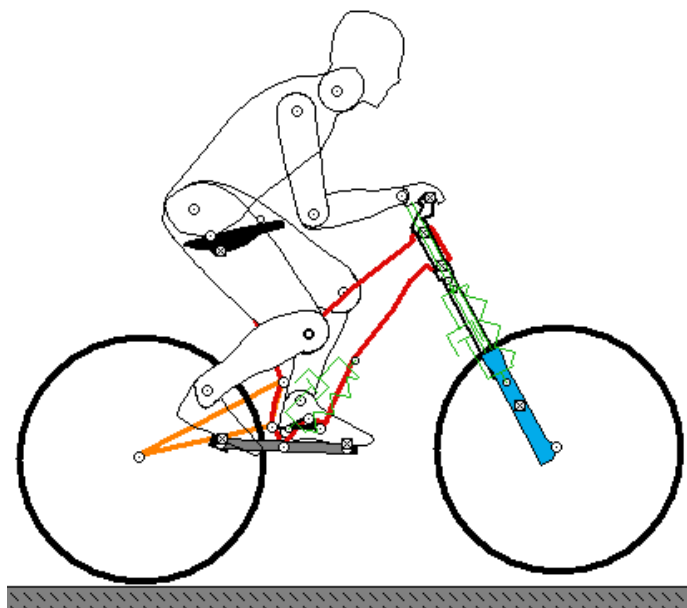


Figura A.4. Recepció sense peus i impacte al seient

Aquest cas és molt poc habitual ja que considera un cas molt desfavorable i accidental. Per fer-ho, s'han tret les condicions de junta dels peus però s'ha col·locat una articulació al cul de la persona unida al seient de la bicicleta. D'aquesta manera, tota la força de l'impacte se l'emporta el tub del seient de la bicicleta.

Aquest estudi s'ha realitzat per a veure si el quadre és capaç d'aguantar una caiguda que no acostuma a ser molt habitual però que, en un cas accidental, es pot donar.

2. Forces a aplicar

Per a cada un dels diferents models obtenim varies forces a aplicar en els punts esmentats.

Aquestes forces es col·loquen als punts A, B, C i D de la següent imatge tal i com es comentava a la memòria.

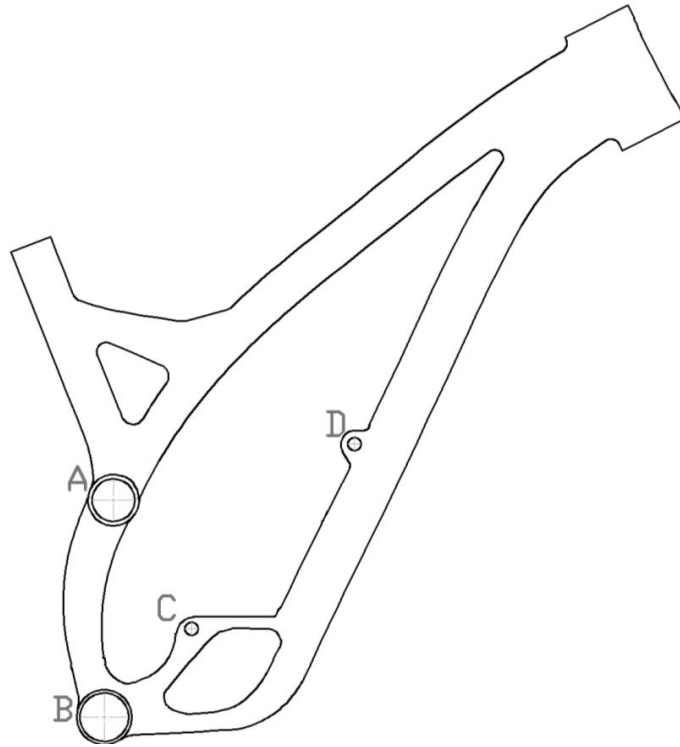


Figura A.5. Punts els quals s'aplica les forces

Tot i així, en el cas de la recepció sense peus i impacte al seient la força el punt C es suprimeix i es col·loca una nova força al tub del seient de la següent manera:

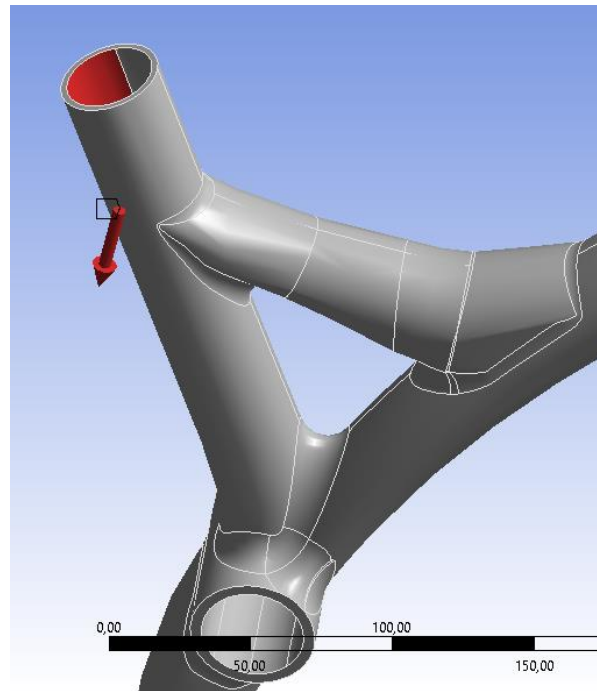


Figura A.6. Aplicació de la força al tub del seient pel cas de caiguda sense peus i impacte al seient

A continuació es mostra una taula amb els valors de les forces de cada punt per cada model per separat.

Picada plana		
	Fx(N)	Fy(N)
A	10528	1647
B	980	-4178
C	-15445	-3442
D	4904	4452
Picada davant		
	Fx(N)	Fy(N)
A	10040	239
B	173	-3791
C	-15435	28
D	5391	3368
Picada darrere		
	Fx(N)	Fy(N)
A	13193	4997
B	2255	-4347
C	-17990	-8419
D	4237	6825

	Picada sense peus	
	Fx(N)	Fy(N)
A	14053	3935
B	0	0
C	-19681	-7021
D	5324	6764
Tub seient	-568	-4130

Taula A.1. Forces a aplicar per cadascun dels punts i models

Es comprova que les forces majors es donen en els models de caiguda amb la roda posterior i amb la roda amb l'impacte al seient. Per tant, és obvi que en aquests dos models les tensions esdevindran superiors que el model de caiguda plana.

3. Resultats, comparació i conclusió

Com es mostra a l'apartat anterior les forces a aplicar per cada un dels models són lleugerament diferents i per tant, els resultats de la simulació varien lleugerament.

Per a tots els casos s'observa com també hi ha les mateixes dues zones desfavorables tal i com es mostra a la memòria.

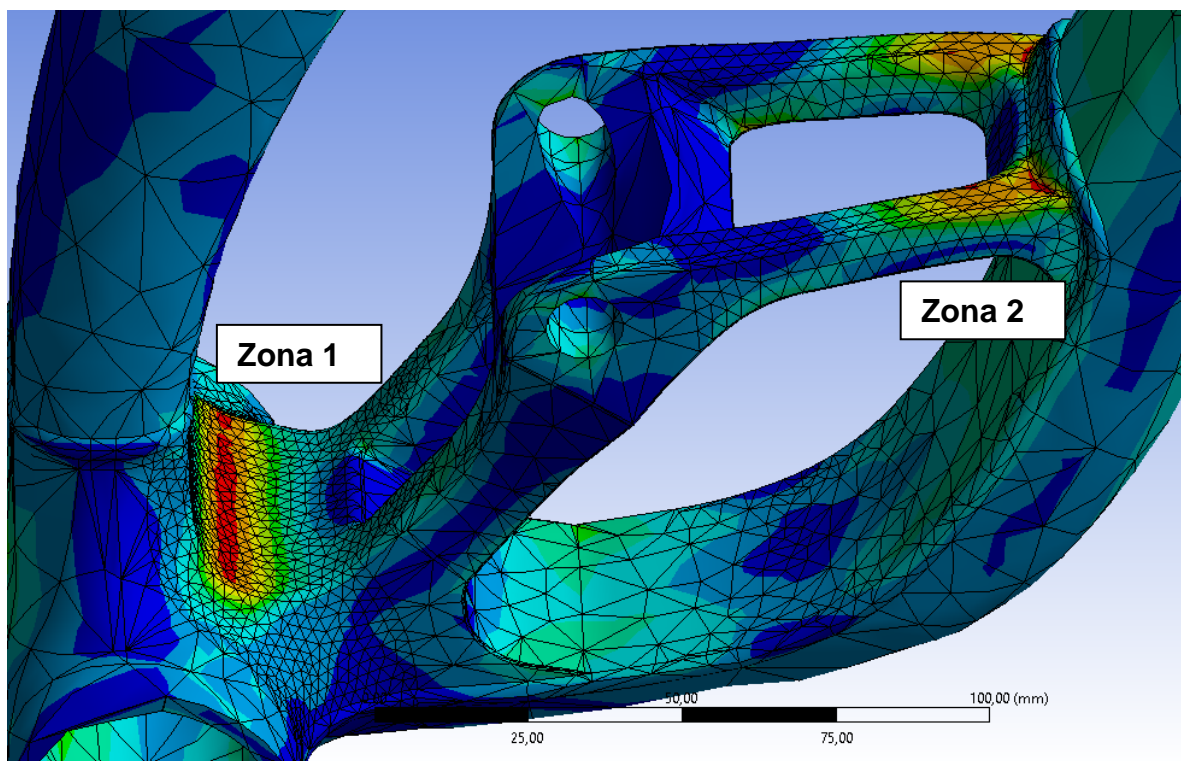


Figura A.7. Dues zones desfavorables

Tot i

tenir les mateixes zones, s'ha observat que en funció de la caiguda aquesta és més desfavorable a una zona o l'altre. Pel que fa la caiguda plana la zona 1 era la que tenia la tensió més baixa, en canvi, per la caiguda amb la roda del davant o sense peus les tensions més desfavorables són a la zona 2.

A continuació es mostra una taula representativa de les tensions màximes aproximades a cada una de les zones pels quatre models de caiguda estudiats.

Tipus impacte	Tensions (MPa)	
	Zona 1	Zona 2
Sense peus	365	410
Roda posterior	390	290
Roda davantera	250	360
Picada plana	313	295

Taula A.2. Tensions màximes per cada model a les dues zones diferenciades

Cal dir també que en el cas del model de caiguda sense peus i impacte al seient, degut a la força aplicada al tub de la tija del seient, ha aparegut una zona amb tensions força elevades. Tot i així, no són tan desfavorables com les de les zones 1 i 2.

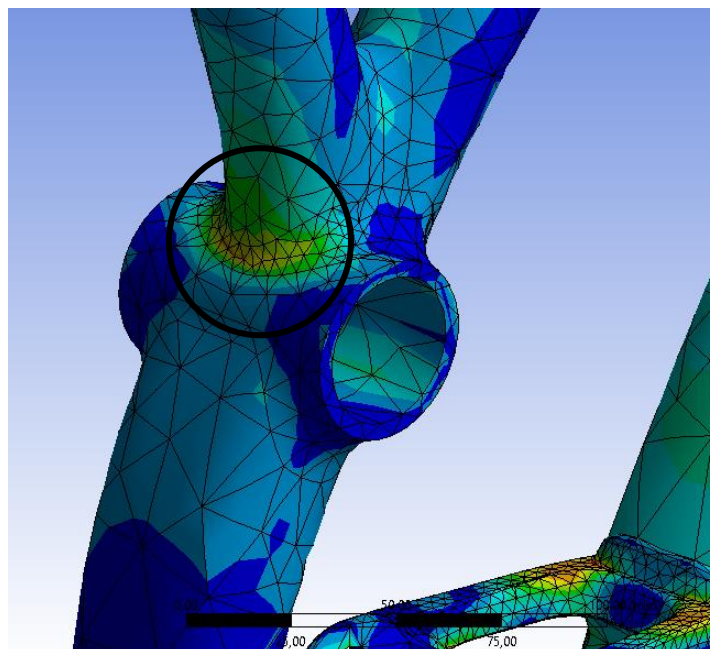


Figura A.8. Augment de la tensió en el model de caiguda sense peus i impacte al seient

Finalment, després de simular i calcular tots els models s'observa que el cas més desfavorable és també el menys habitual. El model de recepció sense peus i impacte al seient té una tensió de Von Misses màxima de 410 MPa, per tant, com que sobrepassa el valor teòric de resistència última a tracció (393MPa) es considera que el quadre fallarà.

Pel que fa a les altres simulacions s'observa que en els models de caiguda amb la roda de davant i posterior es sobrepassa el límit elàstic i per tant es considera que hi ha deformament plàstic.

Per tant podem concloure que a partir d'un salt de més d'1,5 metres d'alçada es pot produir una deformació plàstica o fins i tot una ruptura, sobretot en els casos poc habituals com ho és el cas de la caiguda sense peus i impacte al seient.

ANNEX B

Obtenció de les forces per l’Ansys

ANNEX B: Obtenció de les forces per l'Ansys

1. Ciclista

1.1. Pes de les parts del cos

A continuació es mostra el pes aproximat considerat per cada una de les parts del cos.

Component	Pes (kg)
Cap	5
Tronc	33
Braços	4
Avantbraços	2,5
Mans	0,8
Cuixes	15,5
Tíbia	6
Peus	2
TOTAL	68,8

Taula B.1. Pes aproximat de les diferents parts del cos

1.2. Paràmetres molla-esmorteïment d'unió del cos

Per a cada una de les articulacions s'ha col·locat un element tipus molla-esmorteïdor per poder simular la força i l'esmorteïment que provoca el moviment de la persona sobre la bicicleta.

Per a trobar els valors de rigidesa, longitud natural i esmorteïment adequats s'ha anat variant els seus valors i observant el comportament del cos davant de les diferents caigudes. Quan la representació en el WorkingModel2D ha estat semblant a la realitat s'ha donat els valors com a correctes.

Finalment, per a cada un dels models estudiats s'ha trobat els següents paràmetres de rigidesa, longitud natural de la molla i esmorteïment per a cada unió dels components.

	Caiguda Plana		
	k(N/mm)	L0 (mm)	c(N-s/mm)
Cap-Tronc	30	122,5	10
Tronc-Braç	30	62,1	30
Braç-Avantbraç	30	43,7	30
Avantbraç-Ma	25	75,9	20
Tronc-Cuixa1	50	155,5	35
Tronc-Cuixa2	50	139,7	35
Cuixa1-Tíbia1	120	70,7	40
Cuixa2-Tíbia2	120	41,6	40
Canella1-Peu1	3500	31	35
Canella2-Peu2	3000	55,7	35

Taula B.2. Paràmetres molla-esmorteïdor de la caiguda plana

	Caiguda Darrere		
	k(N/mm)	L0 (mm)	c(N-s/mm)
Cap-Tronc	30	110,5	10
Tronc-Braç	60	62,1	40
Braç-Avantbraç	60	55,4	30
Avantbraç-Ma	40	64	20
Tronc-Cuixa1	40	189,3	35
Tronc-Cuixa2	40	180,5	45
Cuixa1-Tíbia1	75	108,8	45
Cuixa2-Tíbia2	75	64,5	45
Canella1-Peu1	3500	26,8	35
Canella2-Peu2	3000	54,9	35

Taula B.3. Paràmetres molla-esmorteïdor de la caiguda amb la roda del darrere

	Caiguda davant		
	k(N/mm)	L0	c(N-s/mm)
Cap-Tronc	30	110,5	10
Tronc-Braç	30	71,6	30
Braç-Avantbraç	20	129,7	30
Avantbraç-Ma	25	58,7	20
Tronc-Cuixa1	30	201,5	35
Tronc-Cuixa2	30	167,7	35
Cuixa1-Tíbia1	75	190,8	35
Cuixa2-Tíbia2	75	160,3	35
Canella1-Peu1	35000	24,62	35
Canella2-Peu2	3000	51,823	35

Taula B.4. Paràmetres molla-esmorteïdor de la caiguda amb la roda del davant

	Caiguda sense peus		
	k(N/mm)	L0	c(N-s/mm)
Cap-Tronc	30	122,5	10
Tronc-Braç	30	62,1	30
Braç-Avantbraç	100	38,6	30
Avantbraç-Ma	25	83,5	20
Tronc-Cuixa1	50	143,7	35
Tronc-Cuixa2	50	114,5	35
Cuixa1-Tíbia1	120	42,5	40
Cuixa2-Tíbia2	120	14,1	40
Canella1-Peu1	3500	37,3	35
Canella2-Peu2	3000	53,4	35

Taula B.5. Paràmetres de la molla-esmorteïdor de la caiguda sense peus i impacte al seient

Després de fer totes les simulacions s'ha observat que per poder simular correctament amb el WorkingModel2D les molles no poden tenir cap tipus de pretensió. En el cas que aquestes tinguin una pretensió les forces de les diferents articulacions fluctuen abans de que la bici impacti i per tant és difícil d'obtenir la simulació neta i correcta.

A la següent representació observem com abans de l'impacte la força a una determinada articulació és zero abans d'impactar amb el terra. Això és perquè la força no té una pretensió (Al moment d'iniciar la simulació té la longitud igual a la longitud natural de la molla).

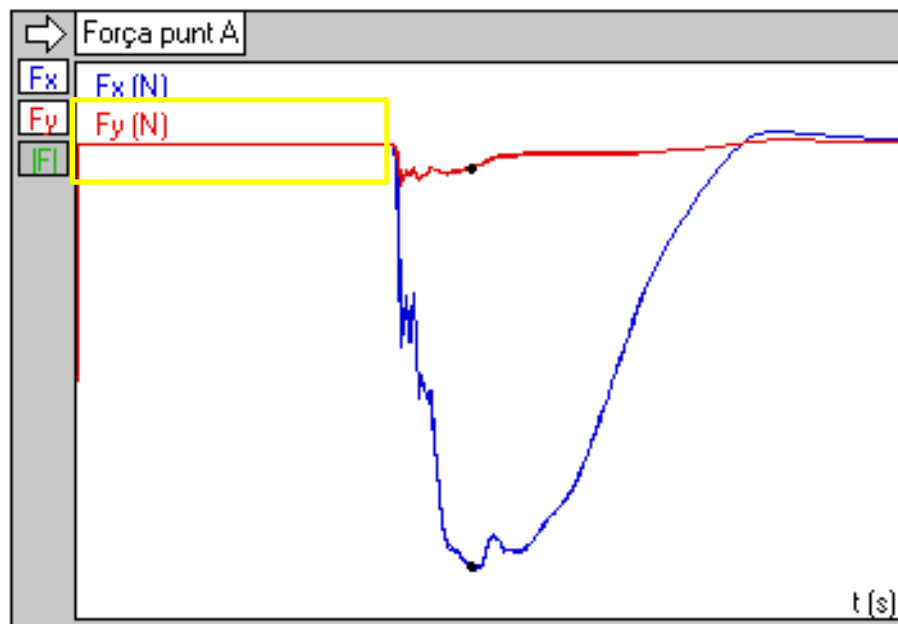


Figura B.1. Resposta correcta a la iniciació de la simulació (no hi ha pretensions)

2. Gir de les forces del model WM2D al model Ansys.

El valor en x i y de les forces obtingudes amb el model del WM2D no són exactament les mateixes que les que s'introdueixen a la simulació d'elements finits. Això és així ja que els sistemes de referència de ambdues simulacions són diferents.

Els eixos x i y de l'Ansys corresponen exactament als eixos del model en SolidWorks. Per altra banda, en el WorkingModel2D, degut a que és una simulació dinàmica, les forces x i y són respecte un sistema de referència global, no de una única peça. En aquest model el quadre té un cert moviment i per tant l'angle no coincideix amb el del model de l'Ansys.

És per això que és necessari utilitzar una matriu de rotació per poder passar les forces del WorkingModel2D a l'Ansys, considerant de manera aproximada l'angle de gir del quadre del WM2D respecte el de l'Ansys, que està completament fixat.

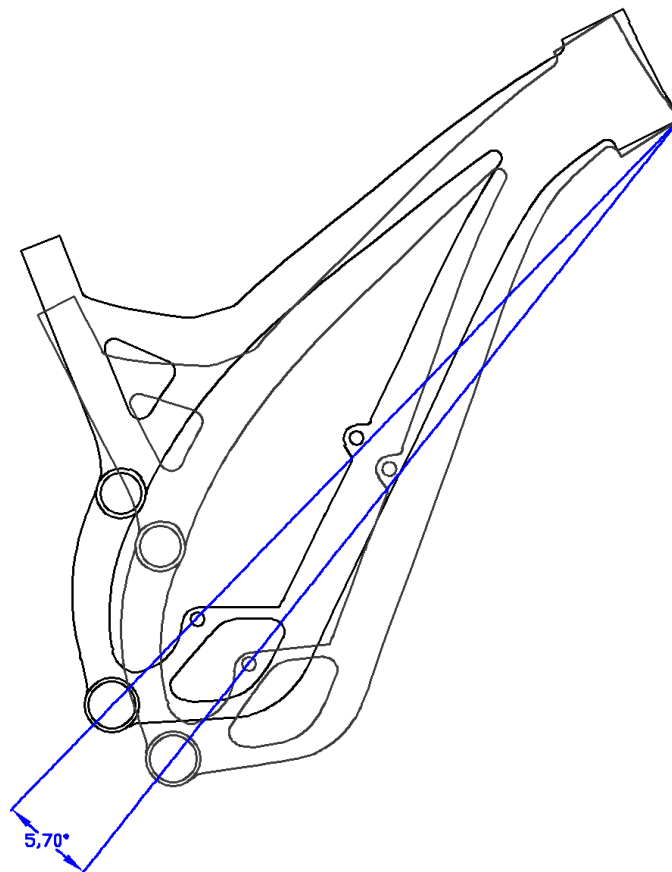


Figura B.2. Variació d'angle en el model WorkingModel2d (gris) respecte el model de l'Ansys (en negre) en el model de caiguda plana

Per a moure les forces del model gris (Working Model) al model negre (Ansys), s'haurà de moure les forces obtingudes a la simulació 2D un total de 5,7° en sentit antihorari. Per fer-ho s'utilitza una matriu de rotació.

Rotation about the X axis:

$$R_X(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Rotation about the Y axis:

$$R_Y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Figura B.3. Fórmules per a canviar el sistema de referència
(Font: UdG. Robot modeling)

Sabent el moment exacte de la força màxima i comparant la posició del quadre en el WorkingModel2D respecte la del SolidWorks es pot obtenir aproximadament l'angle que cal girar per a trobar les forces correctes.

Seguidament, per a cada una de les caigudes s'ha obtingut un angle determinat de gir i per tant s'ha pogut trobar finalment la força correcta a aplicar utilitzant la matriu de rotació anterior.

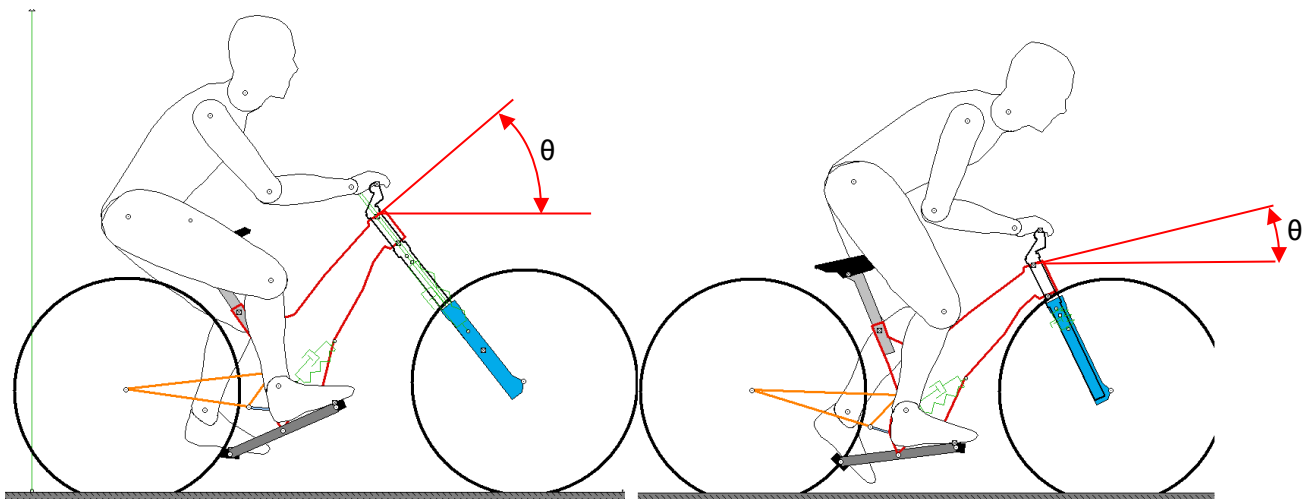


Figura B. 4. Representació de l'angle de gir en el moment de força màxima en la caiguda amb la roda de darrere vs. davant

El canvi de sistema de referència de les forces es troba a les següents taules:

	Picada plana				
	Forces Working Model		Angle de gir (°)	Forces per l'Ansys	
	Fx (N)	Fy (N)		Fx (N)	Fy(N)
A	10640	593	5,7	10528	1647
B	560	-4255	5,7	980	-4178
C	-15710	-1891	5,7	-15445	-3442
D	5322	3943	5,7	4904	4452

Taula B.6. Canvi de referència de la caiguda plana

	Picada davant				
	Forces Working Model		Angle de gir (°)	Forces per l'Ansys	
	Fx (N)	Fy (N)		Fx (N)	Fy (N)
A	10030	502	-1,5	10040	239
B	272	-3785	-1,5	173	-3791
C	-15430	-376	-1,5	-15435	28
D	5301	3508	-1,5	5391	3368

Taula B.7. Canvi de referència de la caiguda amb la roda del davant

	Picada darrere				
	Forces Working Model		Angle de gir (°)	Forces per l'Ansys	
	Fx (N)	Fy (N)		Fx (N)	Fy (N)
A	13930	2230	11,65	13193	4997
B	1331	-4713	11,65	2255	-4347
C	-19320	-4613	11,65	-17990	-8419
D	5528	5829	11,65	4237	6825

Taula B.8. Canvi de referència de la caiguda amb la roda del darrera

	Picada seient				
	Forces Working Model		Angle de gir (°)	Forces per l'Ansys	
	Fx (N)	Fy (N)		Fx (N)	Fy (N)
A	14510	1562	9,5	14053	3935
B	0	0	9,5	0	0
C	-20570	-3676	9,5	-19681	-7021
D	6367	5793	9,5	5324	6764
Tub seient	-1242	-3980	9,5	-568	-4130

Taula B.9. Canvi de referència de la caiguda sense peus i impacte al seient

ANNEX C

Especificacions tècniques de la bicicleta

ANNEX C: Especificacions tècniques de la bicicleta.

1. Pes dels components

A continuació es mostra el pes de cada un dels components de la bicicleta i el total d'aquesta.

Per saber els seus valors s'ha buscat la especificació tècnica de cada un d'ells.

Component	Pes (kg)
Quadre	2,6
Basculant	1,9
Bieleta 1	0,8
Bieleta 2	0,3
Bieles	0,8
Pedals	0,4
Roda darrere	2,9
Roda davant	2,4
Tija seient	0,3
Seient	0,2
Amortidor	0,5
Manillar-Barres forquilla	1,9
Cartutx forquilla	1,6
TOTAL	17

Taula C.1. Pes dels components de la bicicleta

Com es comenta en el document memòria alguns components, com el manillar i les barres de la forquilla, es comptabilitzen com un conjunt ja que són components rígids entre ells. Per tant, el que s'ha fet és sumar el pes de ambdues parts per obtenir-ne un global.

2. Paràmetres de les molles de la suspensió i l'amortidor

- La rigidesa de la molla de la suspensió davantera és la següent:

BOXXER DOWNHILL SPRING RATE TUNING

*(RATES BASED ON A DOWNHILL RACING APPLICATION)

Rate	Rider Weight	Fork Leg #1	Fork Leg #2
Extra Soft (20 lb.)	<45 kg. (<100 lb.)	White	White
Soft/Extra Soft (25 lb.)	45 to 54 kg. (100 to 120 lb.)	White	Silver
Soft (30 lb.)	54 to 63 kg. (120 to 140 lb.)	Silver	Silver
Medium/Soft (35 lb.)	63 to 72 kg. (140 to 160 lb.)	Silver	Yellow
Medium - standard (40 lb)	73 to 82 kg. (160 to 180 lb.)	Yellow	Yellow
Medium/Firm (45 lb.)	82 to 91 kg. (180 to 200 lb.)	Yellow	Red
Firm (50 lb.)	91 to 100 kg. (200 to 220 lb.)	Red	Red

Figura C.1. Rigidesa en lb. de les molles de la suspensió davantera (Font: sram.com)

Les unitats de rigidesa que ens dona el fabricant són amb lliures partit per polzada (lb/1"). Per tant, si fem la conversió a sistema internacional obtenim una rigidesa d'aproximadament 6N/m.

- Gràcies a la indicació de la pròpia molla de la bicicleta podem veure com la rigidesa de la molla de l'amortidor és 350 lb/1".



Figura C.2. Rigidesa de la molla de l'amortidor indicada a la pròpia bicicleta

Si aquest valor el passem a sistema internacional obtenim una rigidesa d'aproximadament 61,298 N/m.

3. Geometria de la bicicleta

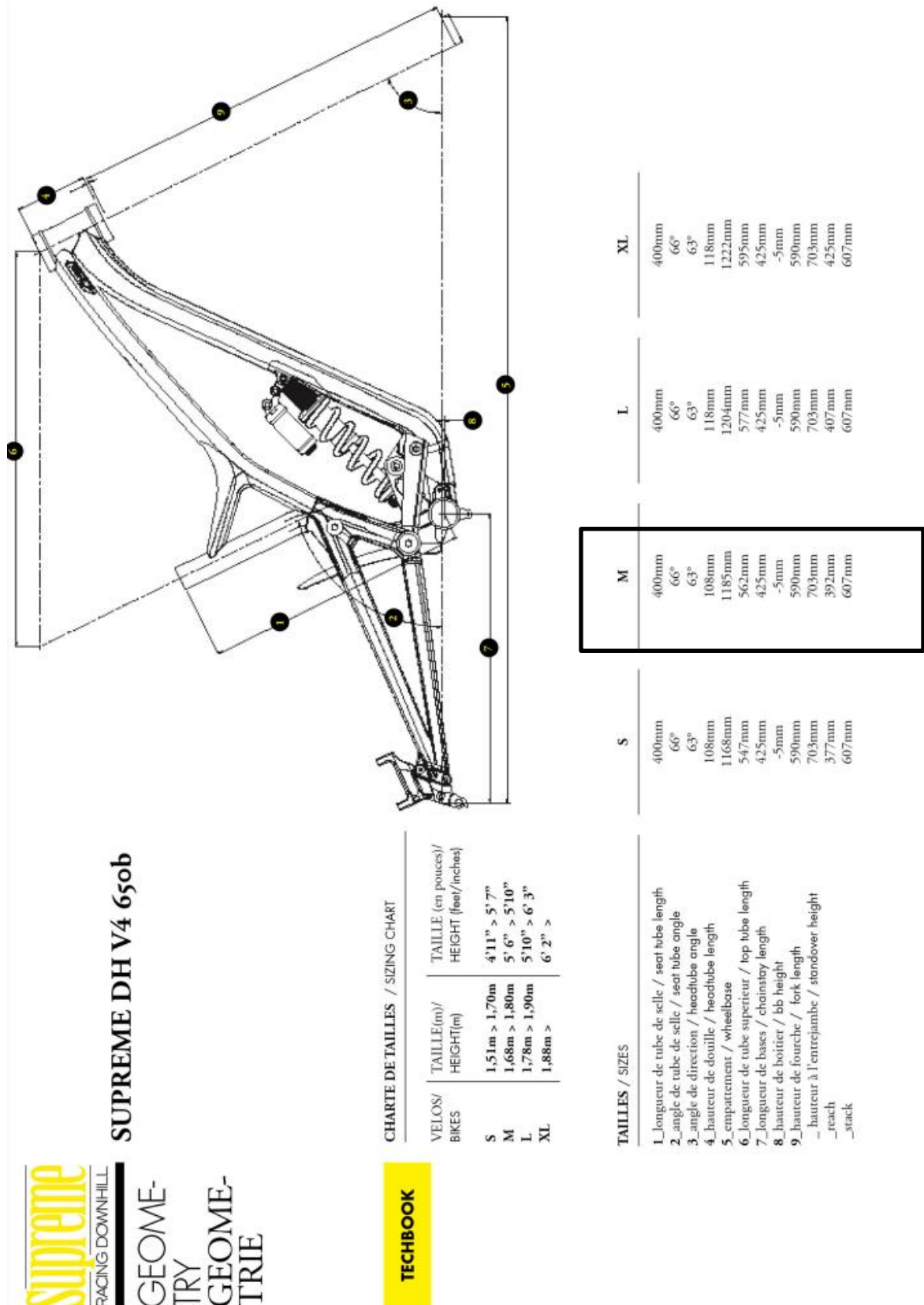


Figura C.3. Geometries principals de la bicicleta (Talla M)
(Font: commenal-store.es)

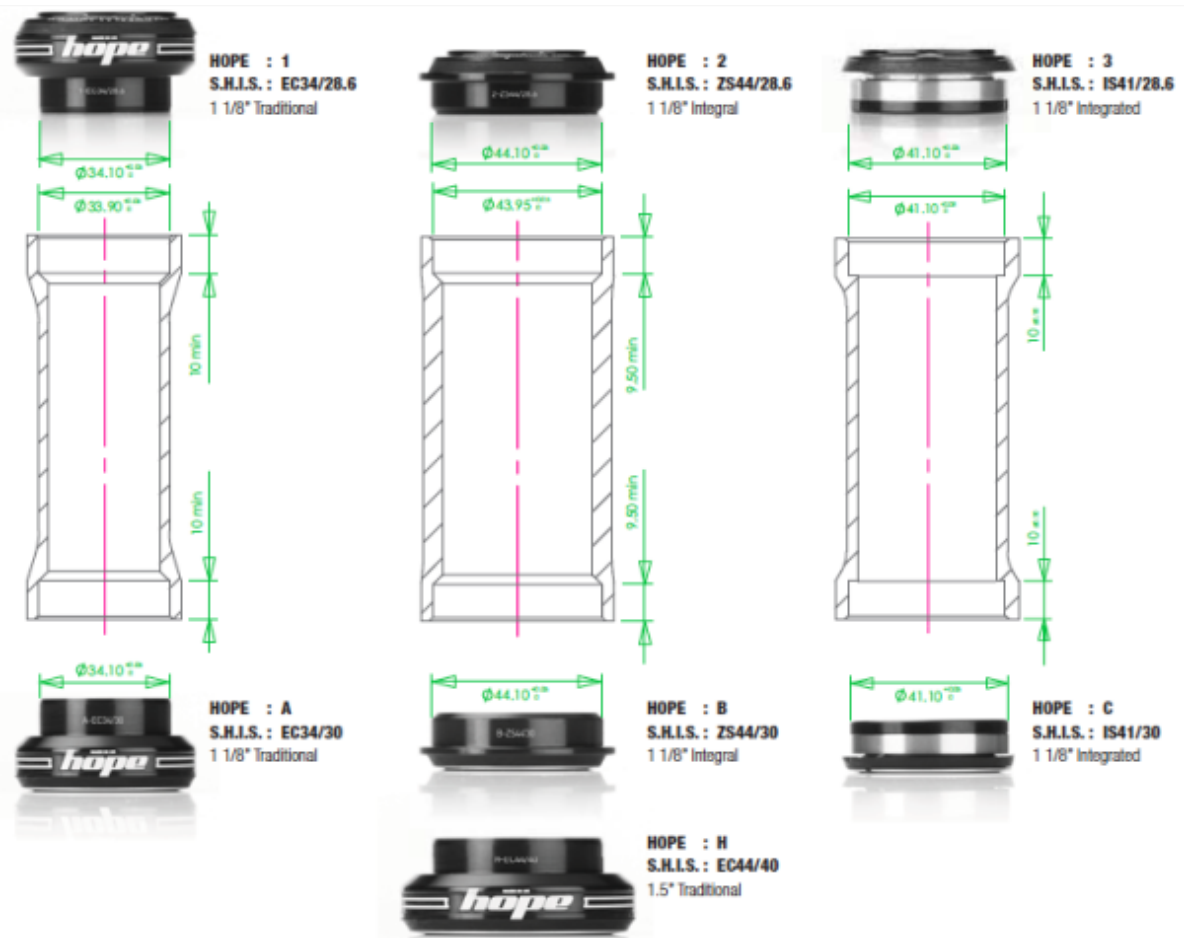


Figura C.4. Geometries del tub de la direcció (Font: nosinmibici.com)

ANNEX D

Detalls del cas experimental

ANNEX D: Detalls del cas experimental

Per a la bona col·locació dels cables i per evitar interferències entre el cos i el cablejat s'ha utilitzat cinta aïllant enganxada al quadre.



Figura D.1. Muntatge del cablejat

Pel que fa a la correcta obtenció de dades s'ha utilitzat un pont de *Wheatstone*, i s'ha soldat cada una de les connexions corresponents a les galgues.

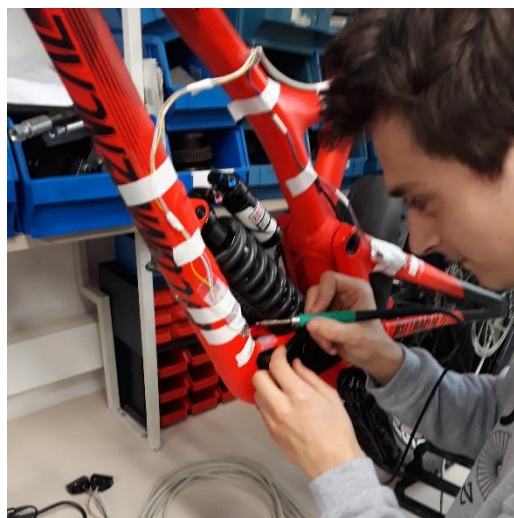


Figura D.2. Soldadures per les connexions

Per a fer la connexió entre la galga i l'ordinador s'ha usat un cable de 10 metres de longitud per no tenir problemes a l'hora de fer el salt, ja que abans de fer-lo és necessari agafar una certa distància d'arrencada. Per fer la distància d'arrencada s'han ajuntat les taules de la següent manera.



Figura D.3. Dues taules ajuntades per fer la distància mínima d'arrencada

Com s'ha comentat en el cas experimental, una de les galgues es col·loca a la zona 2 ja que és un dels punts més desfavorables pel que fa a les tensions.

Tot i així, a part d'aquesta galga, també se'n col·loca una altre al basculant per a poder veure possibles anomalies o relacions en el cas que els resultats no s'assimilin a la realitat. (Figura D.4).



Figura D.4. Galga al basculant per veure possibles relacions

Degut a que els resultats surten com s'esperava, els valors resultants d'aquesta galga no s'estudien i es prenen com a correctes i coherents. Tot i així, s'observa la següent gràfica, on es pot veure el valor experimental de les tensions de les dues galgues; la del basculant i la del punt desfavorable.

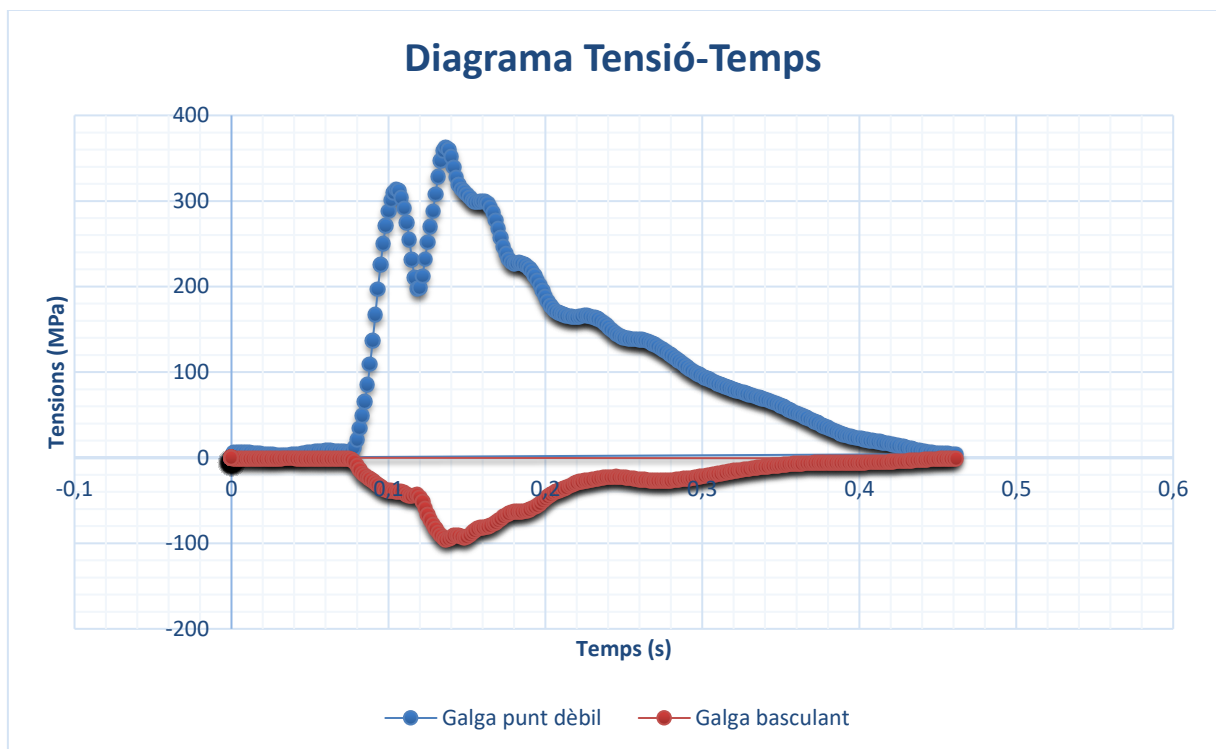


Figura D.5. Gràfic Tensió-Temps de la galga en el punt desfavorable i la galga en el basculant

Com era d'esperar, la tensió en la part superior del basculant és negativa, és a dir, està a compressió. A més a més si observem el seu valor veiem que no és molt considerable en comparació al punt desfavorable que s'ha estudiat.