

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol:

**ANÀLISI I MILLORES EN EL MECANISME D'AMORTIMENT
D'UNA MOTO DE MOTOCRÒS**

Document 1: Memòria

Alumne: Antoni Riera Puigrefagut

Tutor: Lluís Ripoll Masferrer

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Enginyeria Mecànica

Convocatòria (mes/any): Setembre/2016

ÍNDEX

MEMÒRIA

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓ..... | 4 |
| 1.1. Antecedents..... | 4 |
| 1.2. Objecte..... | 7 |
| 1.3. Especificacions i abast..... | 7 |
| 2. PROBLEMÀTICA I METODOLOGIA..... | 9 |
| 2.1. Sistema d’amortiment..... | 9 |
| 2.2. Funcionament del mecanisme d’amortiment..... | 10 |
| 2.3. Anàlisi i millores en el mecanisme d’amortiment..... | 11 |
| 2.4. Metodologia..... | 12 |
| 3. DETERMINACIÓ DE FORCES DINÀMIQUES..... | 15 |
| 3.1. La moto..... | 15 |
| 3.1.1. Representació de la moto..... | 15 |
| 3.1.2. Preparació de la moto per a la simulació..... | 17 |
| 3.2. El pilot..... | 19 |
| 3.2.1. Representació del pilot..... | 19 |
| 3.2.2. Preparació del pilot per a la simulació..... | 20 |
| 3.3. Simulació..... | 21 |
| 3.4. Validació i extracció de les forces..... | 23 |
| 3.4.1. Forces en les bieletes..... | 23 |
| 3.4.2. Forces en el balancí..... | 24 |
| 4. DETERMINACIÓ DE TENSIONS I MILLORES EN LES BIELETES..... | 25 |
| 4.1. Les bieletes..... | 25 |
| 4.2. Preparació per a l’estudi amb elements finits..... | 27 |
| 4.3. Modelització afegint els rodaments..... | 32 |
| 4.4. Tensions en les bieletes..... | 39 |
| 4.5. Millores en les bieletes..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 5. DETERMINACIÓ DE TENSIONS I MILLORES EN EL BALANCÍ..... | 48 |
| 5.1. El balancí..... | 48 |
| 5.2. Preparació per a l’estudi amb elements finits..... | 49 |
| 5.3. Tensions en el balancí..... | 52 |
| 5.4. Millores en el balancí..... | 55 |
| 6. CONCLUSIONS..... | 59 |
| 7. RELACIÓ DE DOCUMENTS..... | 60 |
| ANNEX A: ESTUDI DINÀMIC..... | 61 |
| A.1. La moto..... | 62 |
| A.1.1. Model escollit..... | 62 |
| A.1.2. Suspensió davantera..... | 64 |
| A.1.3. Constants de la suspensió i l’amortidor..... | 65 |
| A.2. El pilot..... | 69 |
| A.3. Resultats de la simulació..... | 71 |
| A.3.1. Moto-pilot..... | 71 |
| A.3.2. Doble terra..... | 72 |
| A.3.3. Validació..... | 74 |
| A.3.4. Resultats en les bieletes..... | 75 |
| A.3.5. Resultats en el balancí..... | 76 |
| ANNEX B: ESTUDI PER ELEMENTS FINITS..... | 79 |
| B.1. Resultats de les bieletes..... | 80 |
| B.1.1. Càlcul per la simulació dels rodaments..... | 80 |
| B.1.2. Passador..... | 84 |
| B.2. Resultats del balancí..... | 85 |
| B.2.1. Càlcul per la simulació dels rodaments..... | 85 |
| ANNEX C: GEOMETRIES..... | 92 |

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

Les motos en general, tant de carretera com de muntanya, utilitzen sistemes de suspensió per absorbir les oscil·lacions provocades per les irregularitats del terreny. Si no s'utilitzessin aquests sistemes, la conducció per part del pilot seria incòmode i perillosa, ja que la moto no absorbiria les irregularitats del terreny i seria el pilot qui les absorbís. A més a més, aquesta falta d'absorció de les irregularitats podria provocar la pèrdua de control de la moto per part del pilot, amb una conseqüent caiguda.

Els sistemes de suspensió fan que les rodes ressegueixin les irregularitats del terreny sense perdre el contacte amb el terra i que la moto es mogui en línia recta. Aquests sistemes es divideixen amb la forquilla davantera i l'amortidor posterior.

Entrant amb més detall en l'amortidor posterior, la majoria de motos l'amortidor va directament unit al basculant, ja que és un sistema senzill que funciona, tot i que cada cop més s'utilitza un mecanisme instal·lat entre el basculant i l'amortidor que fa que la resposta de l'amortidor sigui més progressiva.

En la branca de les motos de muntanya, concretament el motocròs, totes les marques utilitzen el sistema d'amortiment amb el mecanisme instal·lat entre el basculant i l'amortidor (*Figura 1.1.1*). En canvi, en l'enduro, algunes marques continuen fidels al sistema tradicional (*Figura 1.1.2*) tot i que la majoria ja utilitza el mecanisme entremig. Aquest mecanisme està format les bieletes i el balancí. El fet que utilitzin aquest sistema és perquè tant en el motocròs com en l'enduro el terreny és molt irregular (salts, desnivells, forats, pedres...) i es busca una resposta més progressiva de l'amortidor.



Figura 1.1.1. Moto de motocròs amb l'amortidor unit al basculant mitjançant el mecanisme format per les bieletes i el balanci.



Figura 1.1.2. Moto d'enduro amb l'amortidor unit directament al basculant.

Es vol analitzar un cas concret d’un mecanisme d’amortiment (bieletes-balancí) d’una moto de motocròs de 450cc 4T quan realitza un salt de gran alçada per veure a quines tensions estan sotmeses les bieletes i el balancí, i així poder millorar aquestes dos peces.

1.2. Objecte

L’objecte del present projecte és determinar les forces i les tensions de les bieletes i el balancí del mecanisme d’amortiment d’una moto de motocròs quan realitza un salt de gran alçada. Seguidament es proposaran millores.

1.3. Especificacions i abast

El mecanisme d’amortiment format per les bieletes i el balancí que s’analitzarà és d’una moto de motocròs de 450cc 4T (*Figura 1.3.1*). S’ha escollit aquest model en concret per la facilitat en prendre les dades directament de la moto com per extreure dades del manual del fabricant. El material les bieletes serà alumini, concretament *AA7075-T6*. En canvi, el balancí, serà alumini *AA6082-T6*.

A l’hora de proposar millores, només es proposaran millores de les bieletes i el balancí. En cap cas es proposarà millores en quant als materials de les peces. Tampoc es pot afectar el funcionament del sistema, és per això que es mantindran les mides necessàries per no afectar ni el funcionament ni el muntatge de les peces com serien per exemple les distàncies entre centres, rebaix pels retens i l’amplada de les peces.

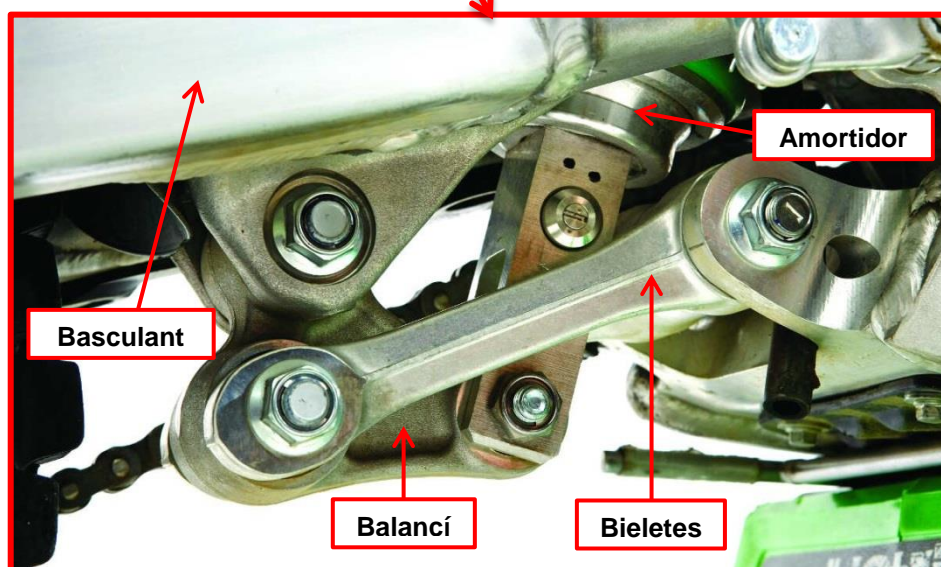


Figura 1.3.1. Moto de motocròs de 450cc 4T escollida on es pot veure amb més detall el mecanisme d'amortiment format per les bieletes i el balancí que s'analitzarà.

S'estudiarà el cas d'un salt de gran alçada, concretament d'uns 2 metres amb caiguda al pla (Figura 1.3.2), ja que és una altura considerable perquè tant les suspensions com l'amortidor facin topes i el pilot pugui aguantar l'impacte sense caure. Pel què fa el pilot, serà un pilot gros, d'aquesta manera es crea una situació encara més desfavorable. Tindrà una estatura de 1,85m i un pes de 80Kg.



Figura 1.3.2. Salt de gran alçada amb caiguda al pla des d’uns 2 metres.

2. PROBLEMÀTICA I METODOLOGIA

2.1. Sistema d’amortiment

L’amortidor pot anar muntat directament sobre el basculant (sistema tradicional), o bé muntat al basculant mitjançant un mecanisme entremig. El sistema tradicional té l’avantatge de ser un sistema senzill de desmuntar, ja que no té cap element entre l’amortidor i el basculant, i alhora és un sistema més lleuger. L’inconvenient principal és que el seu funcionament no és tant suau com el sistema amb mecanisme entremig, ja que l’amortidor ha d’absorbir els moviments del basculant directament, per això necessita un amortidor amb millor funcionament i més precís. També aquest sistema en les frenades fortes fa que la roda posterior tendeixi a votar enlloc de resseguir el terreny com ho faria l’altre sistema.

El sistema d’amortiment amb mecanisme entremig, en canvi, el seu punt fort és el seu funcionament més progressiu (*Figura 2.1.1*). Transmet millor les imperfeccions del terreny ja que les bieletes actuen de filtre dels moviments del basculant fent que l’amortidor treballi de manera més lineal. És per això que en el motocròs s’utilitza aquest sistema. Els punts febles d’aquest sistema és que necessita més manteniment, és més complex, pesa més i al sobresortir per sota de la moto és més vulnerable als possibles cops.

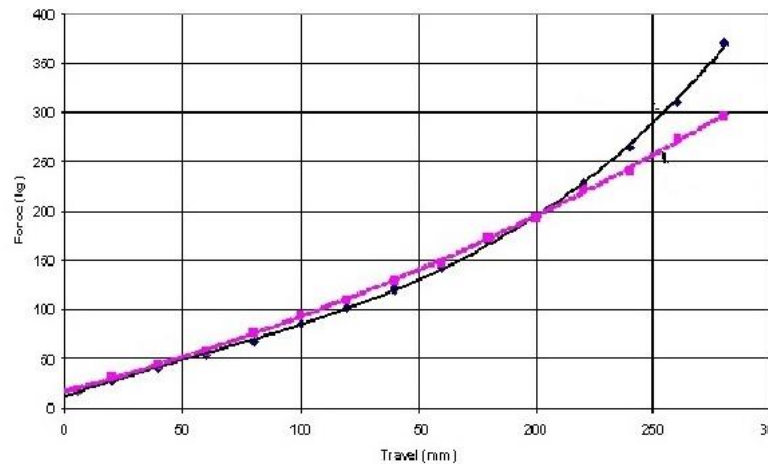


Figura 2.1.1. Gràfica on es pot veure que el sistema de bieletes (negra) és més progressiu que el sistema tradicional (lila).

2.2. Funcionament del mecanisme d’amortiment

Per veure el funcionament del mecanisme d’amortiment que va muntat entre la suspensió i el basculant (*Figura 2.2.1*) s’ha fet un esquema del conjunt (basculant, bieletes, balancí i amortidor) en la posició de repòs i en la posició extrema per veure i entendre millor com treballa quan s’aplica una força vertical a la punta del basculant (*Figura 2.2.2*). Aquesta força vertical seria la que fa el terra a la roda posterior en el moment de la caiguda d’un salt.

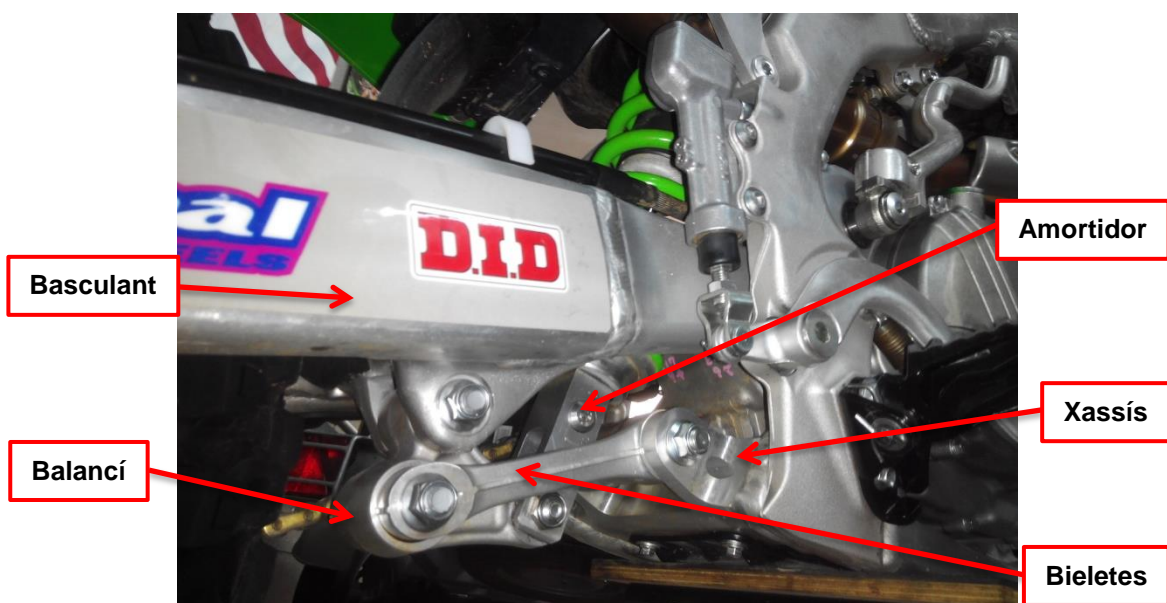


Figura 2.2.1. Mecanisme d’amortiment muntat entre la suspensió i el basculant.

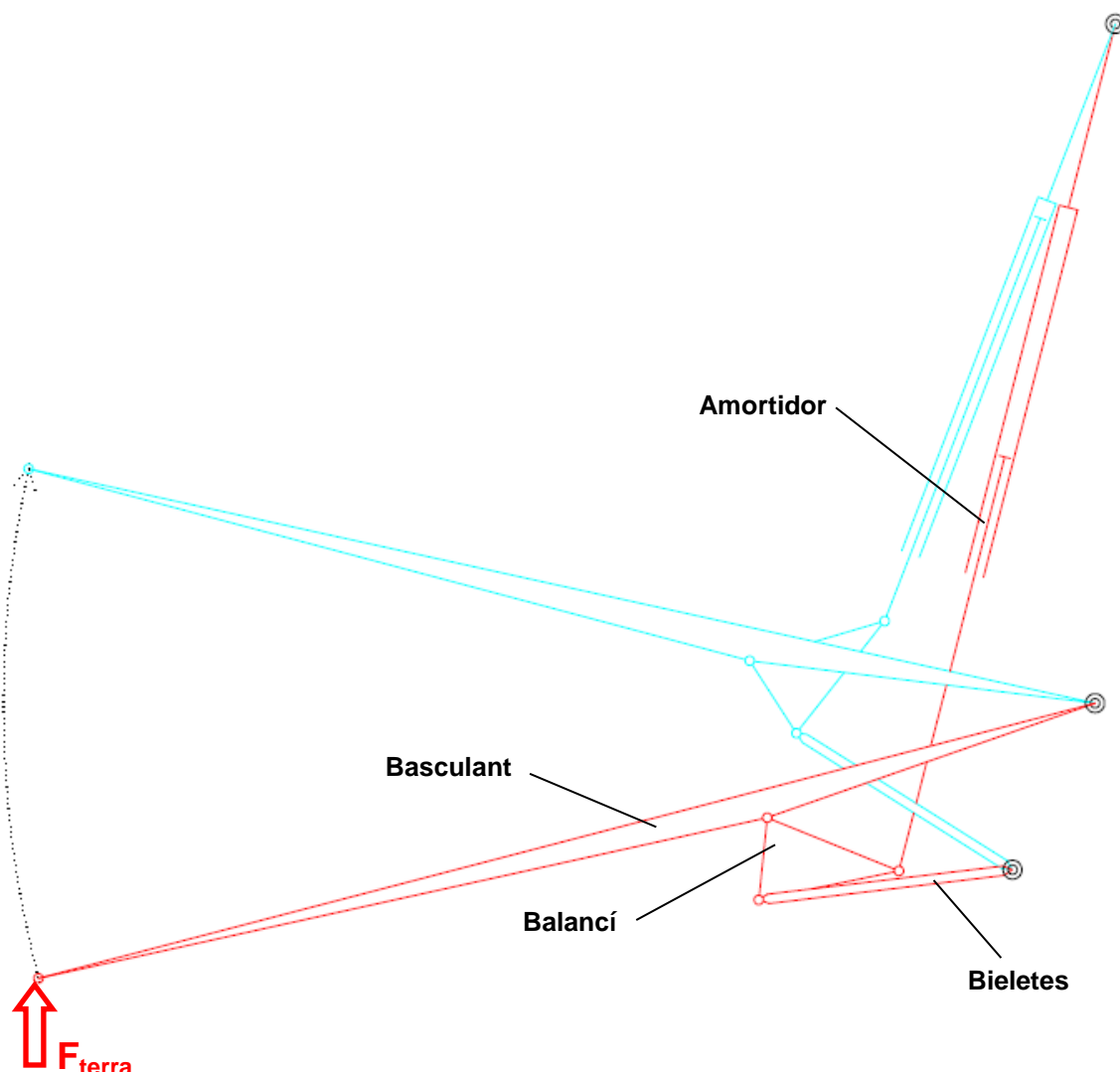


Figura 2.2.2. Esquema del conjunt on es pot veure el funcionament del mecanisme d'amortiment en la posició de repòs (vermell) i la posició extrema (blau) a l'aplicar una força a la punta del basculant. Aquesta força és la que fa el terra a la roda posterior en la caiguda d'un salt.

2.3. Anàlisi i millores en el mecanisme d'amortiment

Un cop vist el funcionament del mecanisme d'amortiment d'una moto de motocròs es vol analitzar a quines tensions estan sotmeses les bieletes i el balancí i proposar possibles millores. Aquestes millores tenen per objectiu reduir les tensions en els punts més desfavorables i paral·lelament intentar reduir el pes de cada peça, ja que aquest mecanisme fa que sistema d'amortiment, tot i tenir millor comportament, sigui més pesat que el sistema tradicional. Quan es proposin les millores s'haurà de seguir els requisits establerts en quant a material i mides.

2.4. Metodologia

Per tal de trobar les tensions que apareixen en les bieletes i el balancí després d’un salt gran, primer de tot s’han de trobar les forces que hi apareixen. Per trobar el valor d’aquestes forces es farà servir el programa de simulació *Working Model 2D* on es simularà un salt gran. Tant la moto com el pilot que s’importaran al programa de simulació hauran estat fets en 2D amb l’*AutoCAD* a escala real. Aquest model de moto i pilot és un model simplificat (*Figura 2.4.1*), ja que sinó el programa de simulació no l’admet.

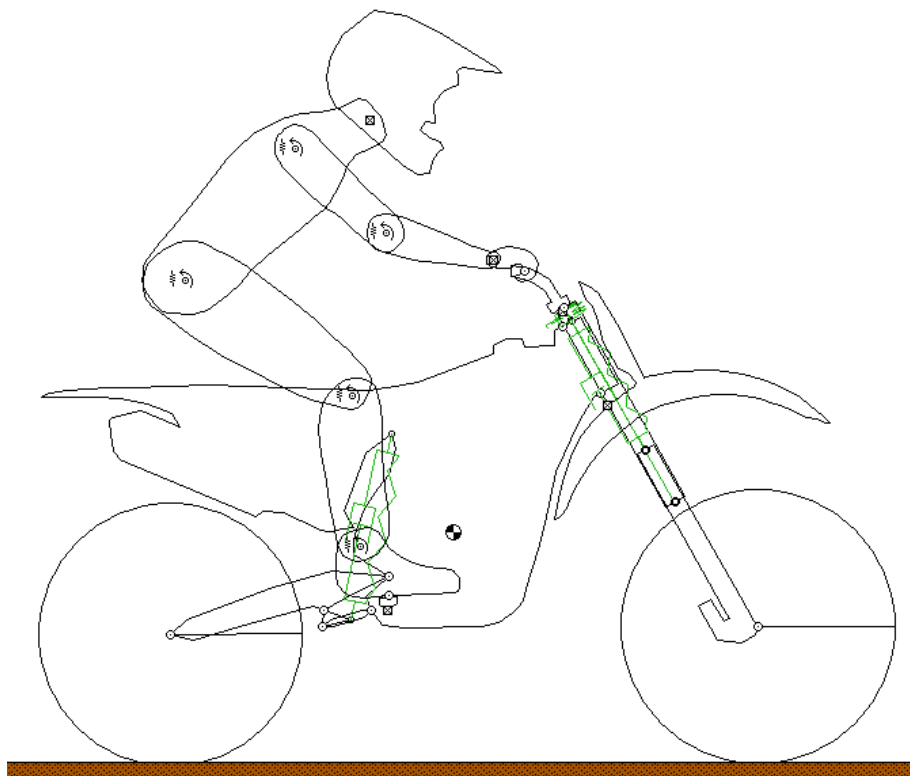


Figura 2.4.1. Model simplificat de la moto i el pilot importat al programa de simulació *Working Model 2D*.

Un cop admès el model se li han de posar una sèrie de restriccions, unions, molles i esmorteïdors per tal de d’unir les diferents parts simplificades de la moto i el pilot, així com assignar pesos i constants a les molles i als esmorteïdors de manera que la simulació sigui el més real possible. Es donarà la solució com a bona quan el comportament de la moto i el pilot s’assemblin el màxim possible a la realitat a l’hora de simular un salt de gran (*Figura 2.4.2*). Serà en aquest moment quan es podran extreure les forces que apareixen en les articulacions de les bieletes i el balancí.

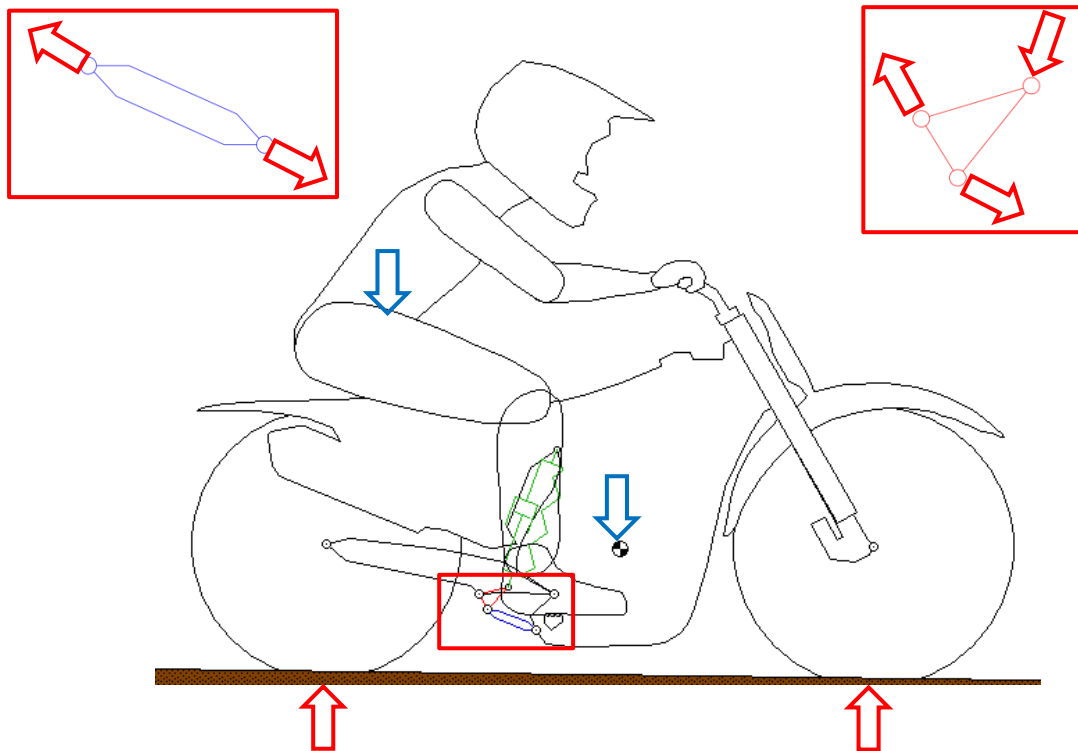


Figura 2.4.2. Simulació de la caiguda d'un salt gran amb el programa Working Model 2D on es pot veure les forces que apareixen en les bieletes i en el balancí.

A continuació es generarà un model a escala real de les bieletes i del balancí (Figura 2.4.3) en 3D amb el programa SolidWorks. Les mides es prendran directament de les bieletes i el balancí de la moto que s'estudia i les mides que no es puguin extreure es deduiran de l'especejament de la moto que ofereix el fabricant, com per exemple els diàmetres dels forats gràcies a les mides dels rodaments i el sistema de muntatge d'aquests.

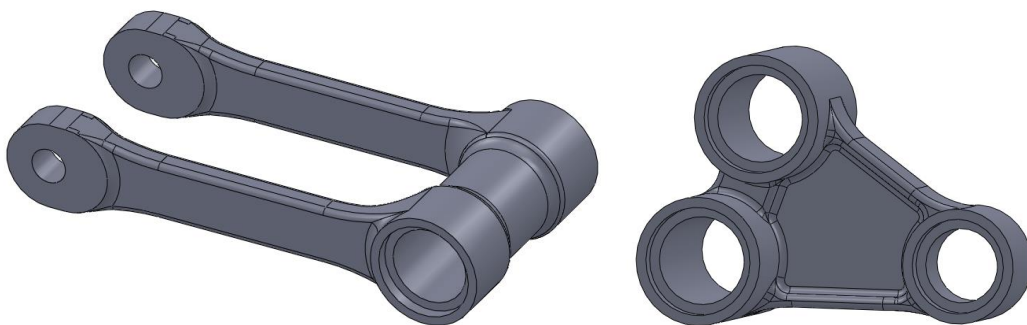


Figura 2.4.3. Bieletes i balancí modelats amb SolidWorks.

Cada un d’aquests models s’entrarà al programa d’elements finits *Ansys*, per tal de trobar les tensions i veure els punts més crítics de la peça (*Figura 2.4.4*). Se li assignarà com a material alumini, el mòdul de Young i el coeficient de Poisson corresponents de cada peça, ja que són d’aluminis diferents. Es mallarà la peça amb els elements més adequats i amb la mida dels elements més adequada. Per què el programa trobi les tensions i els punts més desfavorables se li haurà d’introduir les condicions de contorn, és a dir, les forces trobades en el programa de simulació i col·locar restriccions per tal de que els resultat obtinguts siguin bons i coherents.

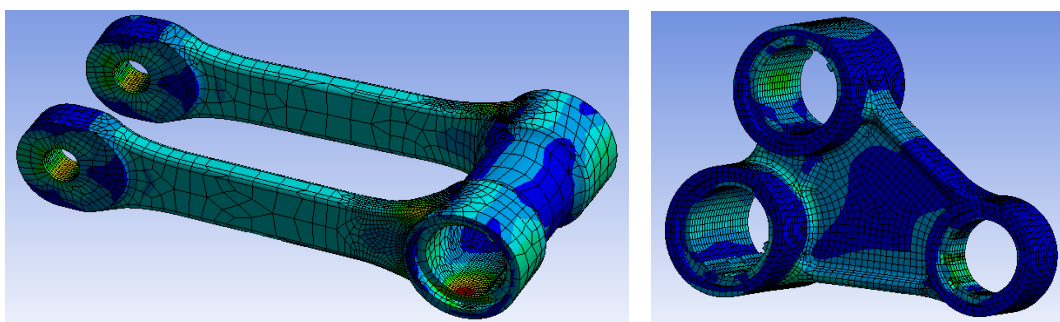


Figura 2.4.4. Tensions en les bieletes i al balancí un cop aplicades les condicions de contorn.

Una vegada trobades les tensions i els punts més crítics tant de les bieletes com del balancí, es proposaran millores per reduir les tensions en aquests punts crítics alhora que també s’intentarà baixar el pes de la peça. Aquests nous models de bieletes i balancí es modelaran de la mateixa forma que les originals, és a dir, amb 3D mitjançant el *SolidWorks*, seguint sempre els requisits marcats. Un cop modelats s’entraran de la mateixa forma que les originals en el programa d’elements finits *Ansys*, s’avaluaran els resultats per veure si s’han reduït les tensions o quines tensions crítiques han aparegut i també es calcularà el pes.

3. DETERMINACIÓ DE FORCES DINÀMIQUES

3.1. La moto

3.1.1. Representació de la moto

Per tal de determinar les forces dinàmiques al qual estan sotmeses les bieletes i el balancí es farà una simulació d’un salt gran per de determinar aquestes forces. Aquesta simulació es durà a terme mitjançant el programa de simulació *Working Model 2D*.

Degut a la simplicitat del programa no hi ha unes bones eines de dibuix, és per això que per dibuixar la moto i el pilot es farà servir l’*AutoCAD*. Es dibuixarà tant la moto com el pilot a escala real.

Per dibuixar la moto es farà servir una foto lateral de la moto estudiada i s’ampliarà a escala real gràcies a algunes mesures conegudes que facilita el fabricant, com seria la distància entre eixos (Veure Annex A.1.1). Un cop dibuixada la moto amb *AutoCAD* (*Figura 3.1.1.1*) s’importarà el dibuix en format DXF al *Working Model*, ja que és un format que el programa pot llegir. Un altre del problema que té el *Working Model* degut a la simplicitat és que els dibuixos entrats han de ser relativament simples, és a dir, han de ser polígons tancats, no poden ser línies. Aquest fet fa que s’hagi de dibuixar la moto de manera molt esquemàtica i simple. Per exemple no es pot dibuixar el motor, el xassís, seient o el dipòsit per separat o amb línies, sinó que s’ha de dibuixar com un sol conjunt.

Alguns dels punts d’intersecció entre les diferents parts de moto (estructura de la moto, basculant, rodes i suspensió) es marquen mitjançant vèrtexs, ja que sinó pot haver-hi problemes a l’hora de preparar la simulació en termes de punts d’unió (*Figura 3.1.1.2*).



Figura 3.1.1.1. Esquema de la moto sobre una imatge real a escala.

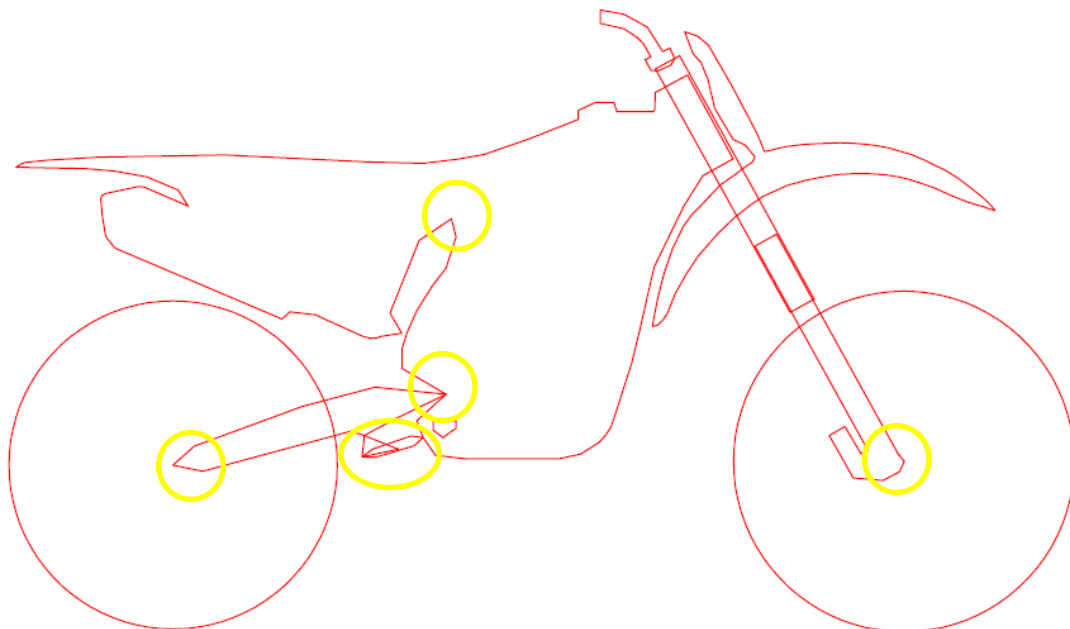


Figura 3.1.1.2. Moto esquemàtica molt simplificada on alguns punts d’intersecció entre les diferents parts són vèrtexs (grocs) per facilitar la unió d’aquestes.

3.1.2. Preparació de la moto per a la simulació

Un cop entrat el model de la moto en el *Working Model*, el conjunt de polígons que formen la moto no estan físicament units i, per tant, s’han d’unir segons la seva funcionalitat.

L’estructura de la moto se li uniran la part superior de les suspensions, els estreps i el manillar mitjançant unions fixes que limiten qualsevol moviment. En canvi, el basculant s’unirà a l’estructura mitjançant unions mòbils, les quals uneixen les dos peces però permeten la rotació d’aquestes. Seguidament, a la part superior de la suspensió davantera se li unirà el parafang davanter amb una unió fixa i a la part inferior de la suspensió se li unirà la roda davantera mitjançant una unió mòbil. La roda posterior s’unirà a l’extrem del basculant amb una unió mòbil com la roda davantera. Finalment les bieletes s’uniran al xassís i al balancí amb unions mòbils i el balancí s’unirà al basculant amb una altre unió mòbil.

Perquè la moto acabi d’estar físicament unida faltará posar una molla-esmorteïdor que faci la funció de l’amortidor posterior de la moto i, per tant, lligui l’estructura de la moto amb el balancí i una altra molla-esmorteïdor que uneixi la part superior de la suspensió davantera amb l’inferior. En el cas de la suspensió davantera, al haver-hi el cos de la suspensió serà necessari posar una guia articulada per tal que la molla i la part inferior de la suspensió segueixin la mateixa direcció i, per tant, la part inferior de la suspensió entri dins la part superior com passa a la realitat.

Una vegada la moto està físicament unida (*Figura 3.1.2.1*) se li ha de donar propietats a cada una de les parts. Tenint en compte quines parts de la moto real engloba cada part de la moto esquemàtica es calcularà el pes de cada una d’aquestes parts i se li assignarà (Veure Annex A.1.1). El fabricant no dona el pes de cada una del les parts que formen la moto, per això les parts que no es sap el pes es pesen directament de la moto estudiada, o bé s’aproximen fent càlculs. L’amortidor al ser directament una molla-esmorteïdor del mateix programa no se li pot assignar el pes i, per tant, el seu pes se li sumarà a l’estructura. Com que l’estructura engloba gran part del pes de la moto se li assignarà la posició del centre de gravetat real aproximadament.

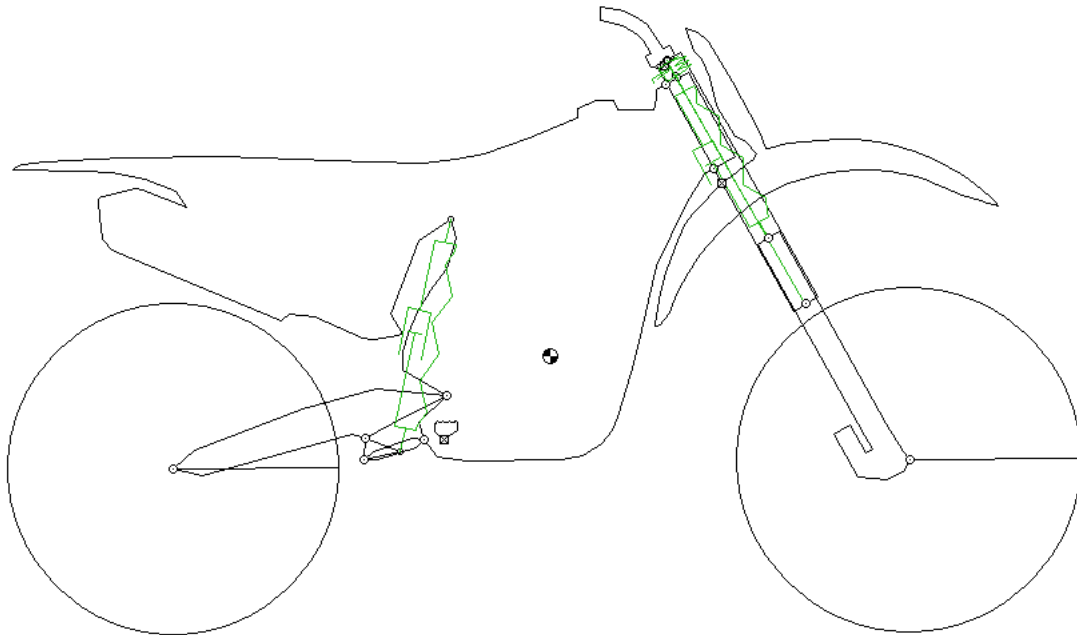


Figura 3.1.2.1. Moto físicament unida i preparada per a la simulació.

Com que les suspensions davanteres tenen un comportament progressiu, és a dir, que tenen una primera part del recorregut més tova que la segona, es decideix posar una doble molla amb esmorteïdor (Veure Annex A.1.2). Aquestes dos molles estan posades en sèrie i la constant de la molla superior és més gran que l'inferior per simular el comportament progressiu (Figura 3.1.2.2).



Figura 3.1.2.2. Suspensió amb doble molla-esmorteïdor per tal de simular el comportament progressiu de la suspensió real.

Pel què fa a les constants de les molles tant de la suspensió davantera com de l’amortidor es treuen del manual de la moto escollida i les constants dels esmorteïdors es fa un càlcul aproximat (Veure Annex A.1.3).

3.2. El pilot

3.2.1. Representació del pilot

La representació del pilot ha de complir els mateixos requisits que la moto a l’hora de ser dibuixat, per tal de que es pugui treballar amb el *Working Model*. L’única diferència és que el punt d’unió de les diferents parts del cos no es realitzarà amb vèrtexs per millorar la presentació, ja que en aquest cas ens ho permet.

Per la representació s’utilitza un esquema de persona vist en perfil format pel: cap, tronc, braç, avantbraç, mà, cuixa, cama i peu. A l’hora de la representació s’aplicaran modificacions per tal que la persona s’assembli a un pilot de veritat, per això es dibuixarà la persona amb casc i la mà amb la forma amb què agafa el puny de gas (*Figura 3.2.1.1*).



Figura 3.2.1.1. Esquema del pilot sobre una imatge d’una figura humana.

Aquesta esquema de persona s’escalarà a mida real, és a dir tindrà una altura de 1,85m. Cal afegir que el pilot amb les botes i el casco l’altura arriba fins a 1,90m més o menys (Figura 3.2.1.2).

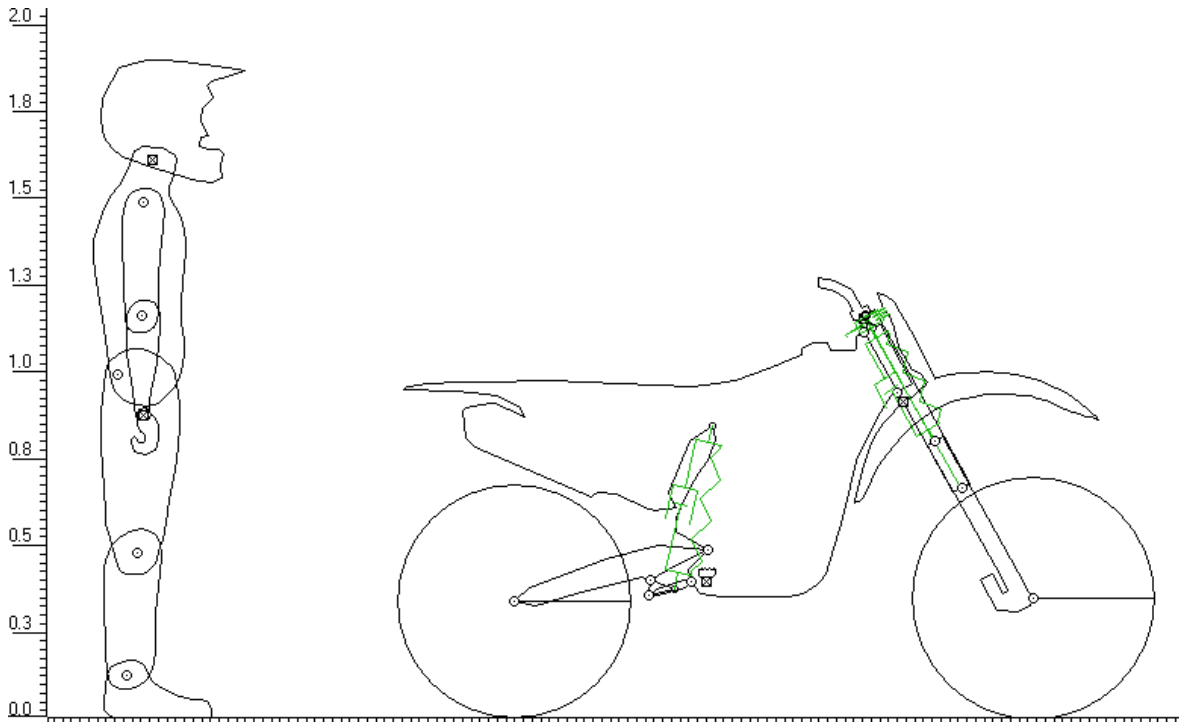


Figura 3.2.1.2. Estatura real del pilot un cop amb botes i casco que fan variar la seva estatura passant de 1,85m a 1,90m més o menys.

3.2.2. Preparació del pilot per a la simulació

Un cop el model del pilot està entrat en el *Working Model*, el conjunt de polígons que formen el pilot no estan físicament units, tal i com passava amb la moto i, per tant, s’han d’unir.

El cap i el tronc s’uniran amb una unió fixa i l’avantbraç i la mà també, ja que no es mouen pràcticament durant la caiguda del salt. La resta de parts del cos s’uneixen amb articulacions mòbils per els punts on hi ha les articulacions pròpies del cos, és dir, per el colze, espatlla, maluc, genolls i turmells. Una vegada el pilot està unit físicament se li ha d’assignar el pes a cada una de les parts en proporció al pes del pilot (Veure Annex A.2). El pes total del pilot és de 80Kg.

En els punts d’articulacions mòbils s’hi posarà una molla a torsió per tal de simular les articulacions. S’utilitzen per limitar el moviment del cos quan es toca a terra després d’un gran salt, ja que sinó el pilot es posaria en posicions no desitjades i irreal. Els valors de les molles no es calculen sinó que s’ajusten a valors que fan que el pilot es comporti de la manera més semblant a la realitat en el moment en què toca el terra quan realitza un salt gran.

3.3. Simulació

Un cop preparada la moto i el pilot s’han d’unir. La mà s’unirà al manillar amb una unió mòbil i el peu amb l’estrep amb una unió mòbil també (Veure Annex A.3.1). En aquest moment ja es pot col·locar el pilot en la posició inicial de l’assaig, és a dir, amb la postura que saltarà. Aquesta postura és el pilot dret sobre la moto i amb les articulacions flexionades (*Figura 3.3.1*), ja que sinó el pilot es podria lesionar. Tot i estar flexionat s’ha de mantenir una certa rigidesa per aguantar l’impacte i no fer-se mal. Aquesta rigidesa se li donarà amb les molles col·locades a les articulacions mòbils i que treballen a torsió.

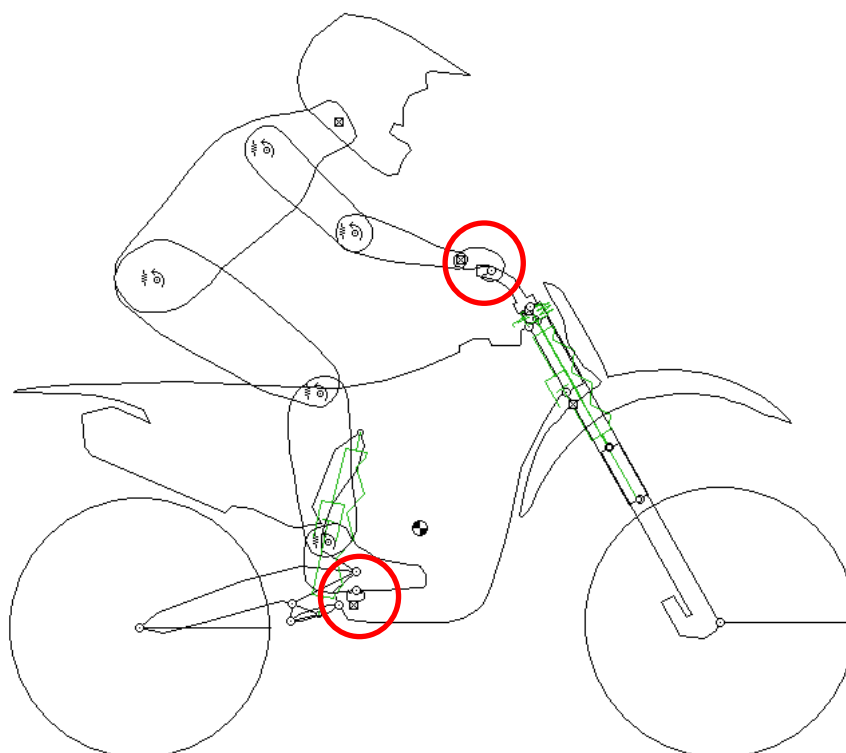


Figura 3.3.1. Pilot en la postura inicial d’assaig. Aquesta postura és dret sobre la moto i amb les articulacions flexionades.

Abans d’iniciar la simulació del salt s’haurà d’assignar als cossos la opció de no col·lisió, ja que sinó es pararia la simulació cada cop que dos cossos entressin en contacte.

La simulació serà d’un salt gran, concretament de 2m. La caiguda del salt serà vertical per tal de facilitar la simulació, ja que simular un salt amb el moviment parabòlic les reaccions són semblants, però hi ha més dificultat a l’hora de controlar les inclinacions en la caiguda perquè caigui completament pla o amb inclinació cap enrere. En canvi, fent-ho vertical la inclinació no es mou i es poden simular més inclinacions fàcilment.

Un altre avantatge de simular la caiguda en vertical és que després de moltes simulacions s’ha vist que es necessita un doble terra (Veure Annex A.3) per simular el comportament del pneumàtic i si es simula amb el moviment parabòlic del salt complica molt la simulació. El motiu d’utilitzar un doble terra per simular el comportament del pneumàtic és que durant totes les simulacions prèvies ha sortit un pic molt elevat a l’instant de tocar a terra a causa de que pel programa les rodes són rígides i no hi ha pneumàtic. D’aquesta forma desapareix el pic de l’inici i el punt màxim es troba en el punt màxim de treball de les bieletes i el balancí.

Aquest doble terra (*Figura 3.3.2*) està format per un terra fix i un altre de mòbil sense pes. Aquest dos terres estan units per una molla que té la constant d’un pneumàtic.

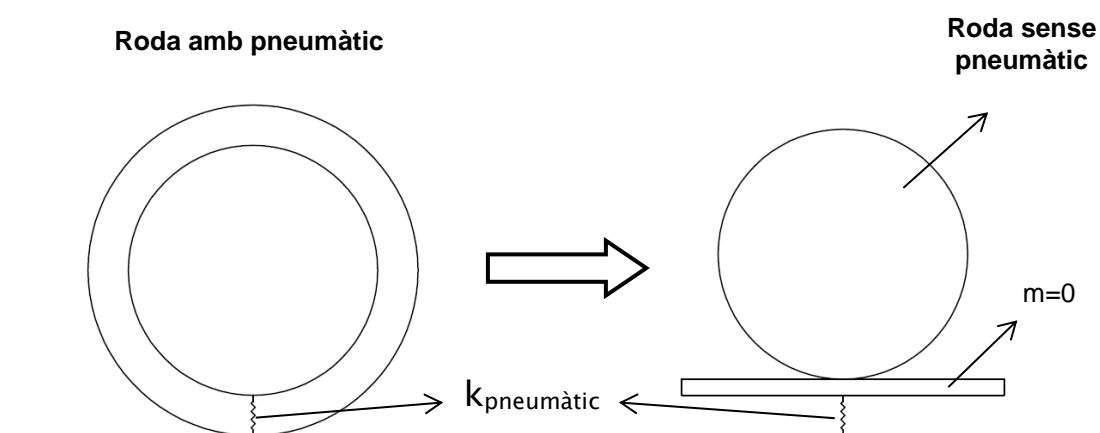


Figura 3.3.2. El comportament del pneumàtic s’ha aconseguit amb un doble terra format per un terra fix i un altre de mòbil sense pes i units per una molla amb la constant del pneumàtic.

3.4. Validació i extracció de les forces

Com ja s'ha dit, la simulació consisteix en deixar caure el pilot des d'una altura de 2m de manera plana sobre el terra. És en aquest moment quan s'ha d'estudiar si el moviment és el correcte, és a dir, si tant el moviment de la moto com el del pilot són el més semblant als d'una moto i un pilot real en aquest tipus de caiguda (*Figura 3.4.1*).

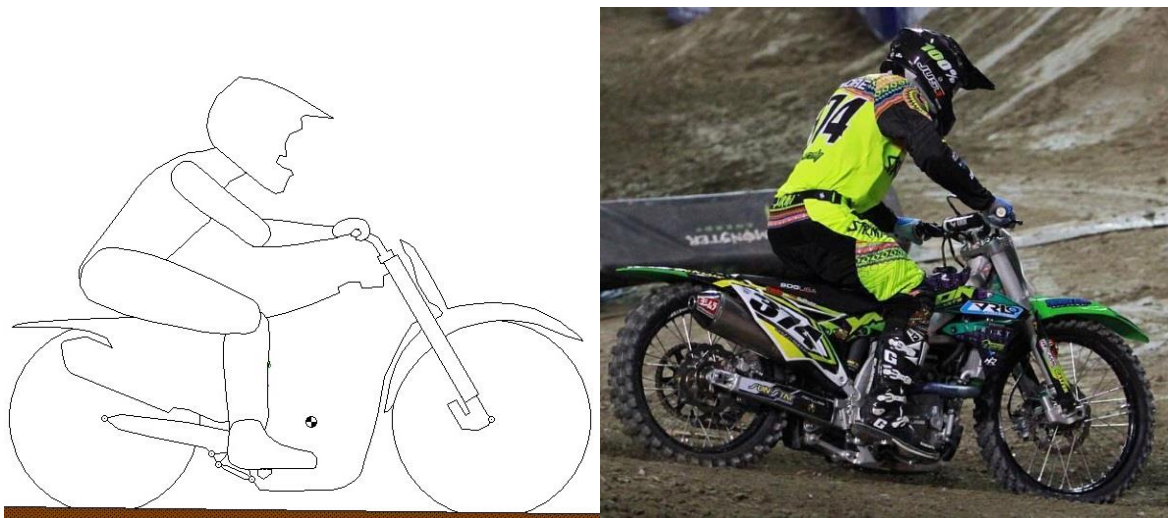


Figura 3.4.1. Simulació de la caiguda d'un salt gran amb el programa Working Model i caiguda d'un salt gran a la realitat.

Un cop el moviment de la caiguda és el més real possible, així com els resultats obtinguts també són coherents, ja es poden extreure les gràfiques de les forces que apareixen en les articulacions bieletes i el balancí (Veure Annex A.3.3). Concretament s'extraurà la gràfica de la força en la unió de les bieletes amb el balancí i del balancí amb el basculant. A més a més, es traurà la taula de valors de la gràfica per tal de treballar amb valors més exactes, ja que de la gràfica no es poden treure els valors exactes directament.

3.4.1. Forces en les bieletes

Un cop extretes les gràfiques necessàries i les taules de valors corresponents es passen a analitzar quines són les forces màximes que apareixen. En el cas de les bieletes se sap que treballen a tracció (*Figura 3.4.1.1*) (Veure Annex A.3.4).

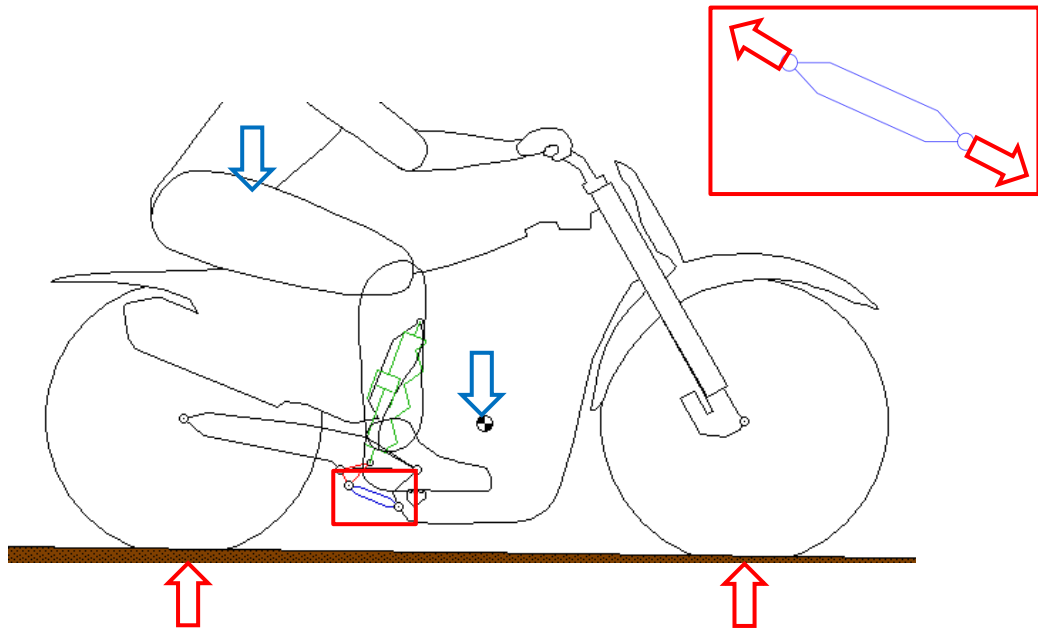


Figura 3.4.1.1. Forces que apareixen a les bieletes.

La taula de valors de la gràfica del punt d'unió de les bieletes amb el balancí indica que en el punt màxim la força té un valor de 31.054,77N, però s'arrodoneix a 30.000N. Aquest arrodoniment no afecta pràcticament al resultat final, a més a més, durant l'estudi s'han hagut de fer algunes aproximacions.

S'ha de tenir en compte que el programa és en 2D i les bieletes vistes en planta tenen forma de U, per tant, aquest 30.000N s'hauran de dividir per 2 a l'hora d'aplicar la força a cada extrem de la U. A cada extrem s'aplicaran 15.000N.

3.4.2. Forces en el balancí

En el cas del balancí hi ha tres punts de forces diferents: la unió amb les bieletes, amb el basculant i amb l'amortidor. El programa només permet extreure la força en la unió del balancí amb les bieletes i del balancí amb el basculant, ja que la unió amb l'amortidor no el dóna i, per tant, s'haurà de calcular (Veure Annex A.3.5).

La força màxima en la unió del balancí amb les bieletes serà la mateixa que s'ha trobat en l'apartat anterior, és a dir, 31.054,77N. La força màxima en la unió del balancí amb el basculant també és màxima en aquesta posició i té un valor de 33.972,83N. La força en la unió amb l'amortidor es calcula a partir de les forces màximes trobades en la unió amb les bieletes i en la unió amb el basculant. Aquesta força té un valor de 10.596,13N. En aquest cas del balancí no s'arrodoneixen els valors de les forces, ja que a l'hora de calcular el valor de la força de la unió amb l'amortidor es calcula a partir de les components x i y. Si s'arrodonís el valor de les forces, després les inclinacions de les forces calculades no correspondrien amb el valor de les forces arrodonides i es generarien moments no desitjats (*Figura 3.4.2.1*).

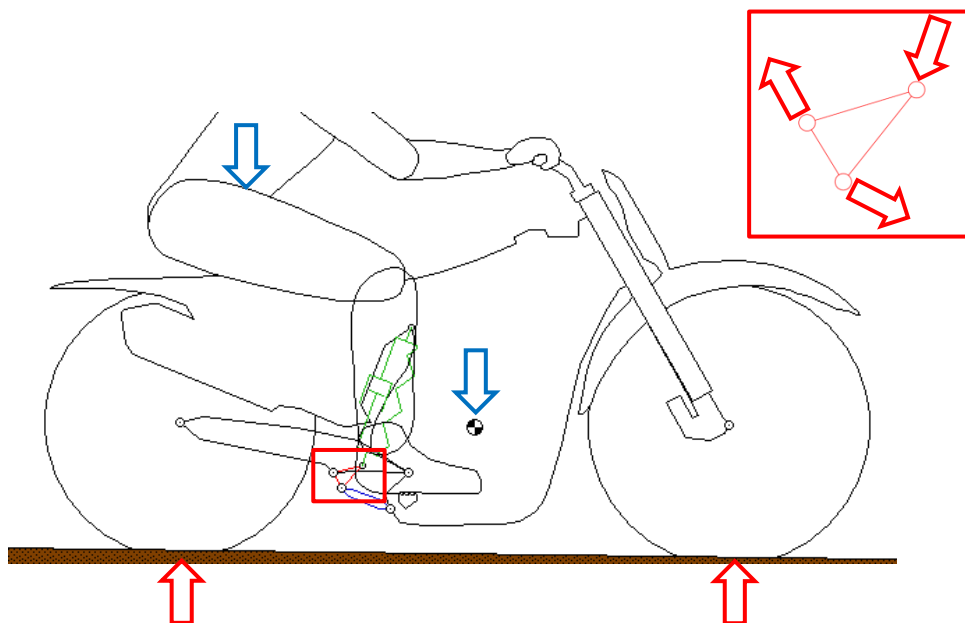


Figura 3.4.2.1. Forces que apareixen al balancí.

4. DETERMINACIÓ DE LES TENSIONS EN LES BIELETES

4.1. Les bieletes

Una vegada trobades les forces que apareixen tant en les bieletes com en balancí, es passa a determinar a quines tensions es troben sotmeses les bieletes. Per tal de determinar les tensions, primer de tot s'ha de generar un model de les bieletes a escala real amb el *SolidWorks* (*Figura 4.1.1*) (Veure Annex C) i posteriorment entrar el model al programa d'elements finits *Ansys*.

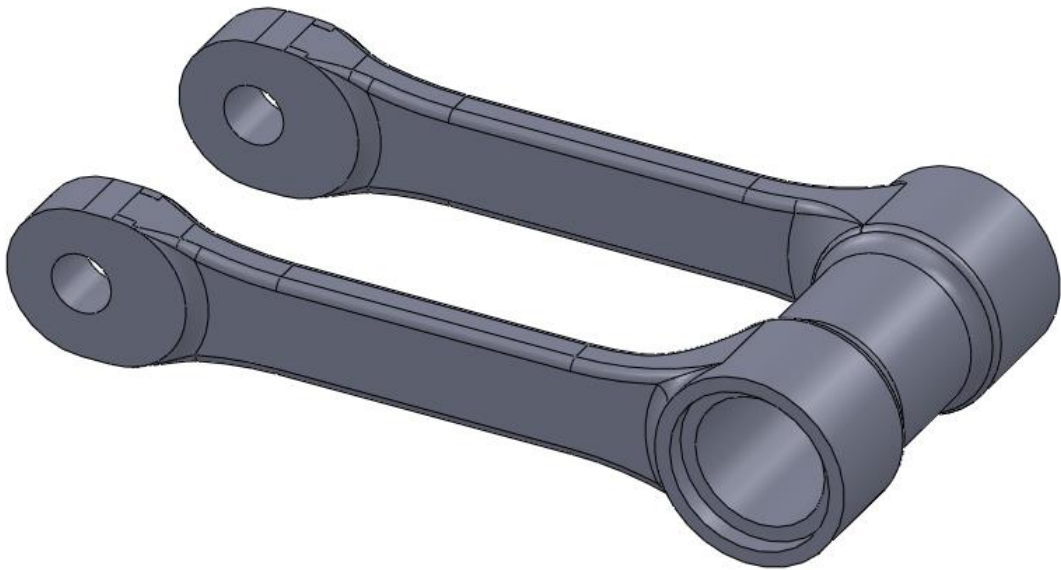


Figura 4.1.1. Bieletes modelades amb SolidWorks.

Les bieletes són d'alumini AA7075-T6. Aquest alumini també denominat ISO $AlZn5.5MgCu$ té les següents propietats:

- Densitat $2,81 \text{ g/cm}^3$
- Mòdul de Young 71.700 MPa
- Coeficient de Poisson $0,33$

Aquestes bieletes, quan estan muntades en el conjunt queden unides per un cantó amb el balancí i per l'altre amb el xassís. El cantó del balancí, és a dir, el cantó on hi ha els dos forats de 12mm, hi passa el passador del balancí. Aquest passador té contacte directe amb les bieletes, no hi ha rodaments. En canvi, pel cantó del xassís, en el forat de 26mm hi ha dos rodaments que suporten el casquet. Aquests dos rodaments, segons l'especejament que ofereix el fabricant de la moto, són dos rodaments d'agulles F-2016 (equivalent al rodament SKF HK2016) i van muntats a pressió.

4.2. Preparació per a l’estudi amb elements finits

Un cop modelades les bieletes amb el SolidWorks s’importaran en format ACIS en el programa d’elements finits *Ansys*. Una vegada oberta la peça a l’*Ansys* s’ha d’assignar el material a la peça, concretament alumini, el qual se li hauran d’indicar les propietats exactes de l’alumini *AA7075-T6*, com la densitat, el mòdul de Young i el coeficient de Poisson.

Seguidament s’haurà de mallar la peça. Per defecte el programa malla amb tetraedres, per tant, s’haurà de canviar el mallat a hexaedres (*Figura 4.2.1*) perquè els resultats són més precisos, ja que els tetraedres mallen amb 4 nodes i els hexaedres amb 8.

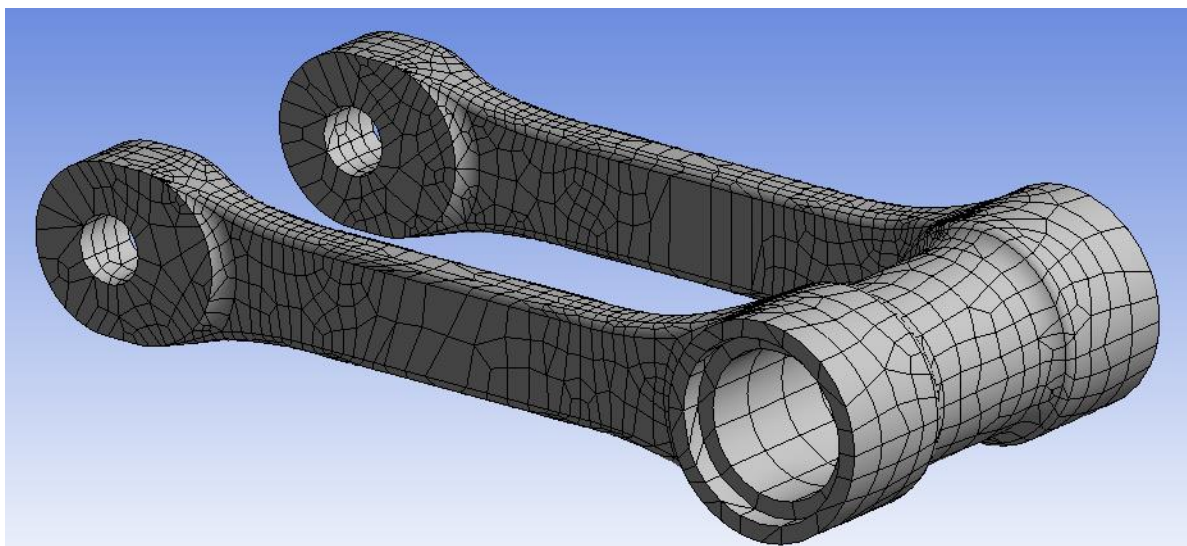


Figura 4.2.1. Bieletes mallades amb hexaedres.

Abans de passar a les condicions de contorn, s’ha de dir que pels forats petits hi va un passador i quan les bieletes estan treballant a tracció el passador no es recolza per tota la circumferència transmetent la força, sinó que només ho fa per una zona petita d’un cert angle i de manera gradual (*Figura 4.2.2*). El mateix passa amb els dos rodaments que hi ha en el forat gros de les bieletes. Per aquest motiu, abans d’exportar les bieletes del *SolidWorks* se li han fet unes particions a 90° tant en els forats del passador com en el forat on van els rodaments (*Figura 4.2.3*) per tal d’intentar simular la zona d’aplicació de càrrega. Els 90° és un valor aproximat ja que no se sap quin és el valor exacte de contacte del passador ni dels rodaments.

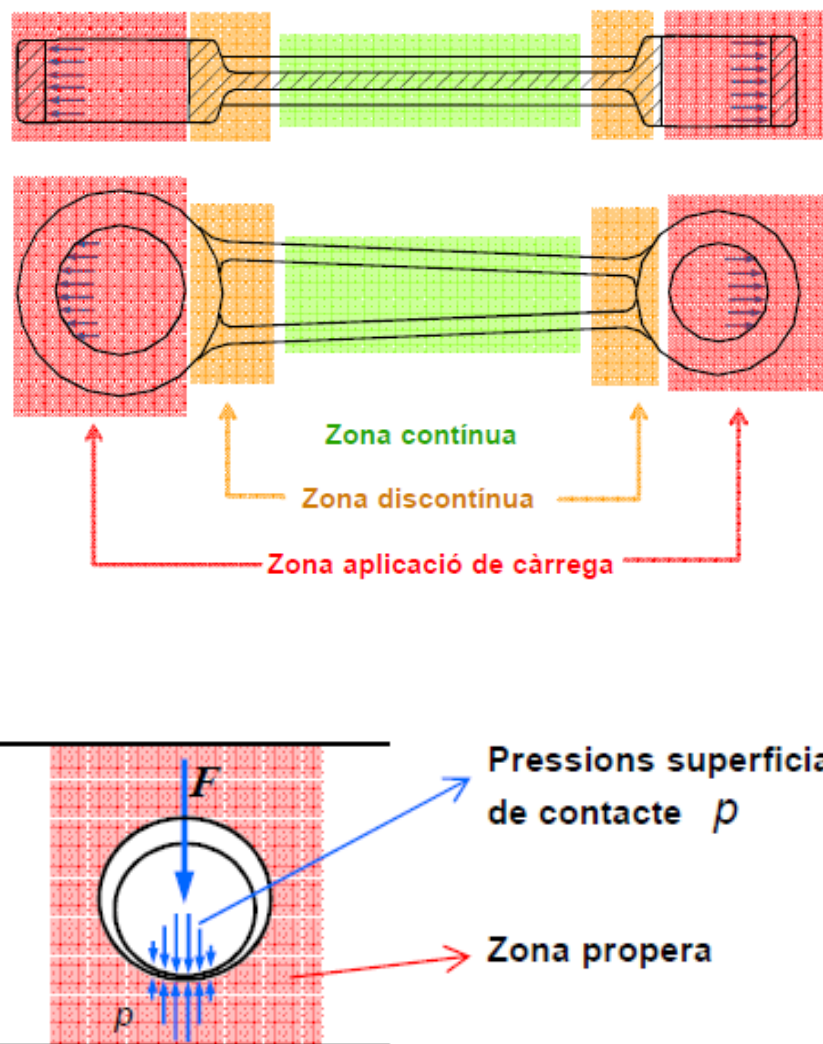


Figura 4.2.2. La força s'aplica en un cert angle i de manera gradual, ja que el passador no està en contacte amb tota la circumferència.

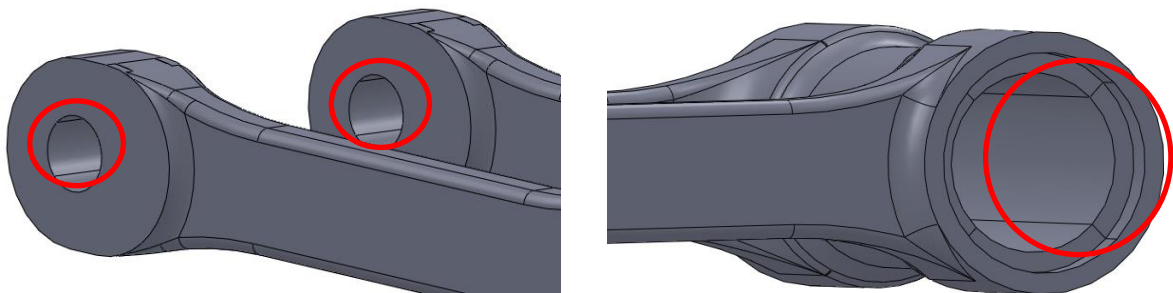


Figura 4.2.3. Partició de les superfícies de 90° en el forats del passador i en el forat dels rodaments.

Amb la malla generada ja es pot passar a les condicions de contorn de la peça. Com s’ha estudiat, les bieletes treballen a tracció i estan sotmeses a una força d’uns 30.000N. Aquesta força s’aplicarà en el cantó del passador, però com que les bieletes tenen forma de U, els 30.000N es dividiran entre 2. Per tant, s’aplicarà una força de 15.000N a cada forat, concretament a la zona marcada de 90° com es veu en la *Figura 4.2.4*.

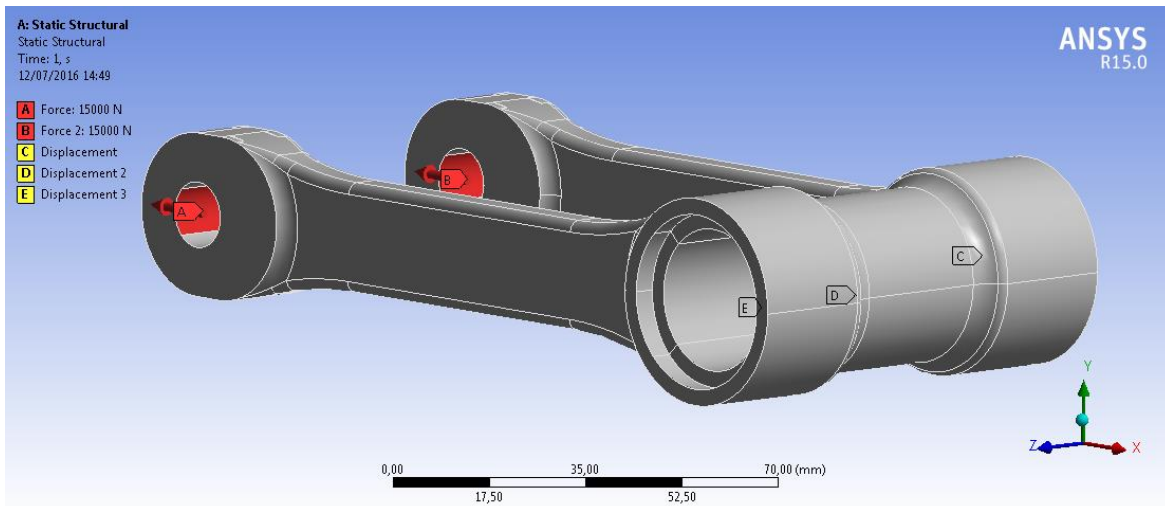


Figura 4.2.4. Força de 15.000N aplicada a cada superfície de 90° dels dos forats.

En el cantó dels rodaments s’hauran d’aplicar les restriccions (*Figura 4.2.5*). Com que les bieletes treballen a tracció, la superfície marcada a 90° se li limitarà el moviment en l’eix x, és a dir, en la direcció de la força. Al mig d’aquesta superfície s’ha marcat una línia en la direcció z i se li ha limitat el moviment en direcció y. Per últim per tal de que la peça no es mogui es limita el moviment en z marcant un punt.

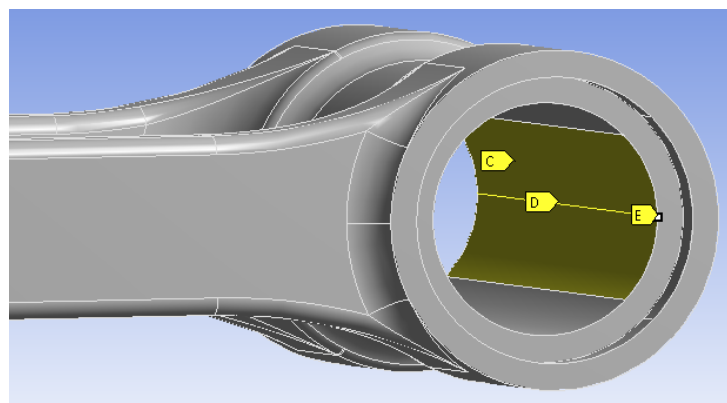


Figura 4.2.5. Restriccions aplicades: superfície C limitada en x, línia D limitada en y i el punt E limitat en z.

Una vegada preparada la peça ja es pot posar el *Solve* perquè calculi les tensions de Von Mises de la peça (Figura 4.2.6) i la deformació que pateix (Figura 4.2.7).

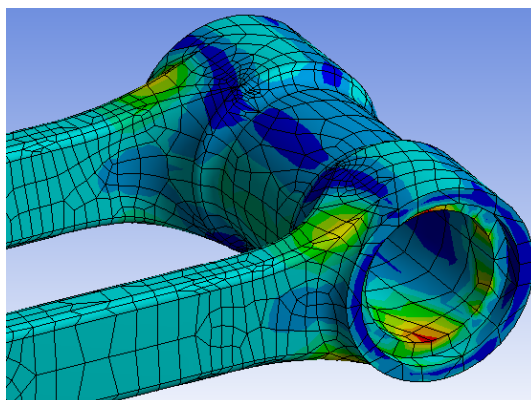
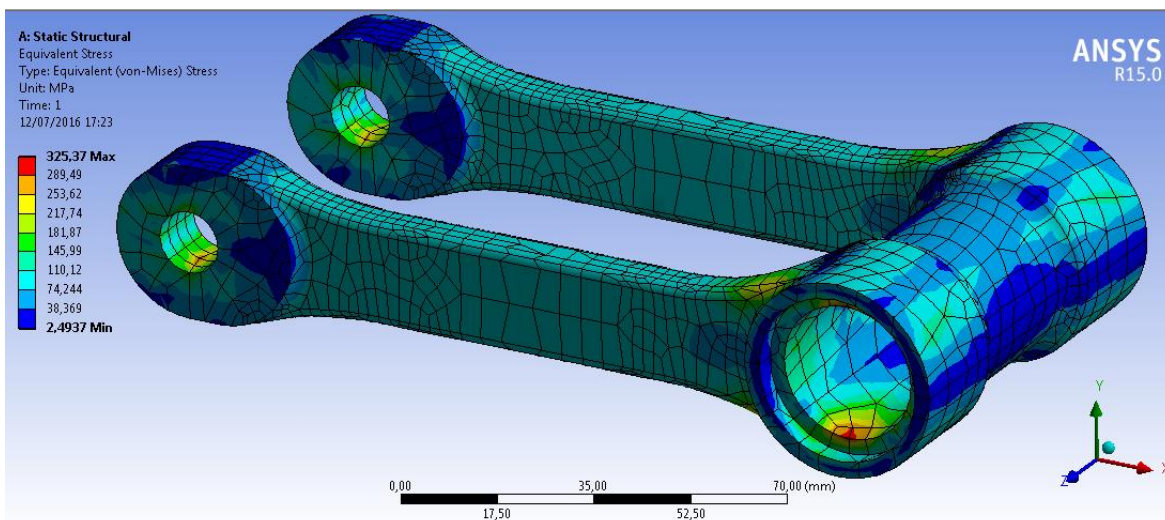


Figura 4.2.6. Tensions de Von Mises.

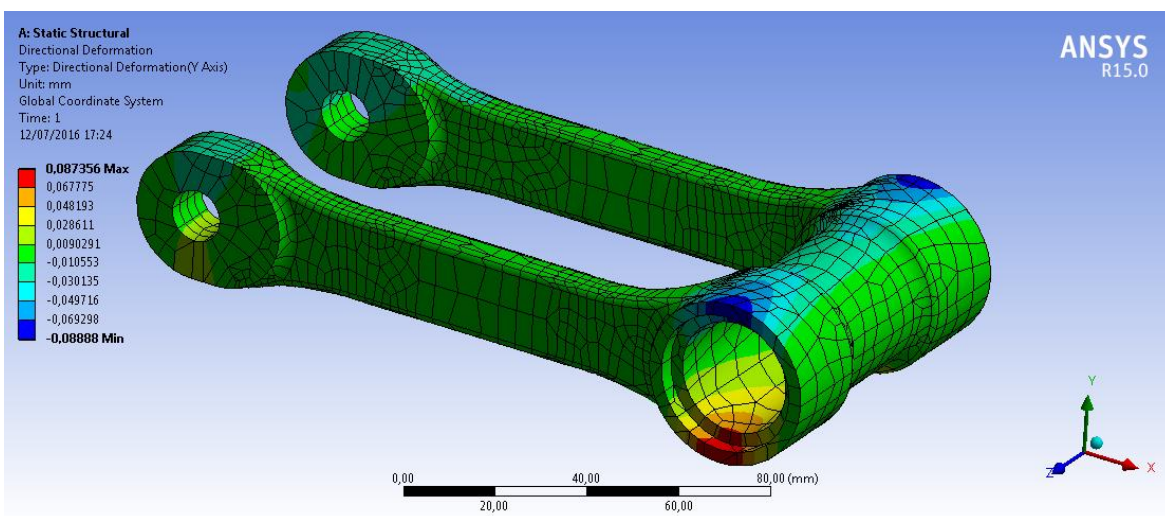


Figura 4.2.7. Deformació en l'eix y.

Amb les tensions de Von Mises calculades es veu com el màxim es troba en la zona on van col·locats els rodaments just als extrems de la peça a la part superior i inferior de la posició del rodament. El resultat és lògic perquè la paret és prima i al treballar a tracció la peça tendeix a aixafar-se i, per tant, estira aquesta zona. Si a més a més es treu la deformada en l'eix y es pot veure aquest fet de que la peça s'aixafa. Pel cantó del passador les tensions també són altes en la part superior i inferior de la circumferència, de l'ordre de 40MPa menys, però al haver-hi més gruix de paret no és tant preocupant com el cantó dels rodaments i si es mira la deformada en y en aquest punt és baixa comparada amb el cantó dels rodaments també. La zona discontinua del cantó dels rodaments també surten tensions elevades a tenir en compte.

Tot i que la peça tingui els punts crítics en els llocs correctes, els resultats no són del tot bons, ja que en la zona del rodaments surten uns pics de tensió en els extrems de l'àrea que se li ha limitat el desplaçament. Això es deu a que en aquesta zona la càrrega no es reparteix de manera gradual com hauria de ser, sinó es que reparteix de manera uniforme. Si s'exagera la deformada es pot veure com hi ha un canvi sobtat en els extrems de l'àrea (Figura 4.2.8) perquè passa d'una càrrega alta a 0 de cop. En el cantó del passador on s'apliquen les forces, passa el mateix perquè la força s'aplica en l'àrea de 90° i, per tant, es reparteixen les forces uniformement, però no apareixen pics de tensions alts perquè el gruix de paret en aquest cas és gran.

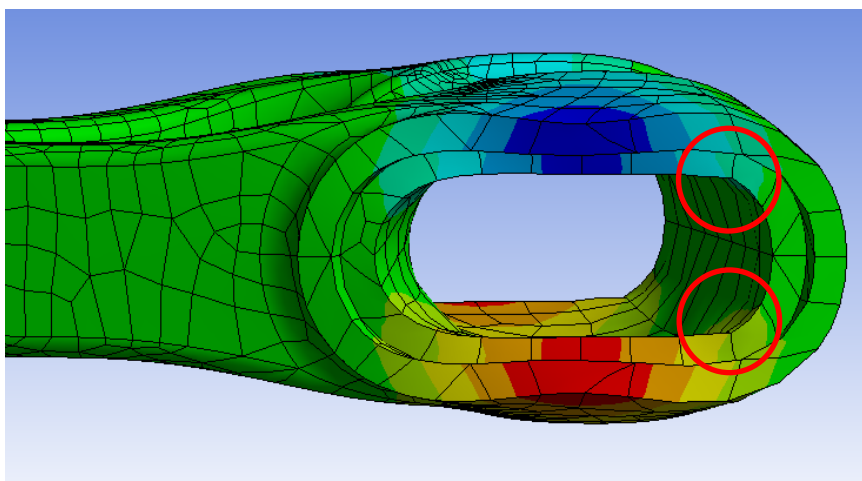


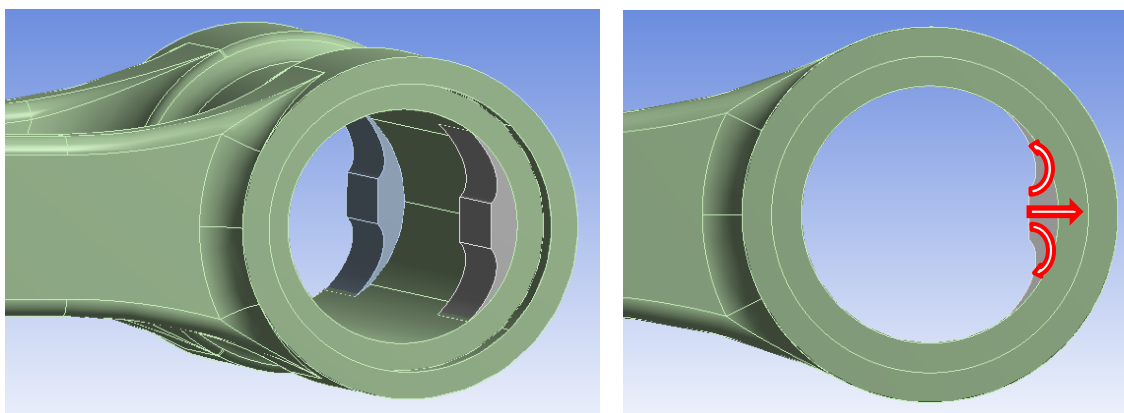
Figura 4.2.8. Deformada en y exagerada on es pot veure el canvi sobtat de l'àrea marcada prèviament de 90°.

4.3. Modelització afegint els rodaments

En el model inicial s’ha topat amb un problema en la zona dels rodaments, on la càrrega no s’ha repartit de manera gradual com s’esperava que passés fent les particions de 90°, per això s’haurà de buscar la manera de simular el comportament del rodament per tal de que s’apliqui de forma gradual.

Es proposen quatre models per tal de simular el comportament del rodament. En els tres primers models consisteix en afegir unes peces de l’amplada del rodament i col·locades en el lloc d’aquests. Les peces afegides són d’un material més tou, concretament acer amb un mòdul 20.000MPa, és a dir, 10 vegades inferior al seu i inferior al de l’alumini. Donant la forma adequada a aquestes peces i amb el material tou es vol que les forces es reparteixin de manera gradual des del mig cap als extrems, amb el màxim al mig.

El primer model (*Figura 4.3.1*) se li afegeixen unes peces amb forma de lluna amb una part rectangular que sobresurt el mig. Aquesta forma pretén repartir les tensions de manera que al centre hi hagi les tensions més elevades i de manera gradual disminueixin fins a les puntes. En les condicions de contorn varien les restriccions de l’eix x, passant de l’àrea de 90° als rectangles centrals de les peces afegides.



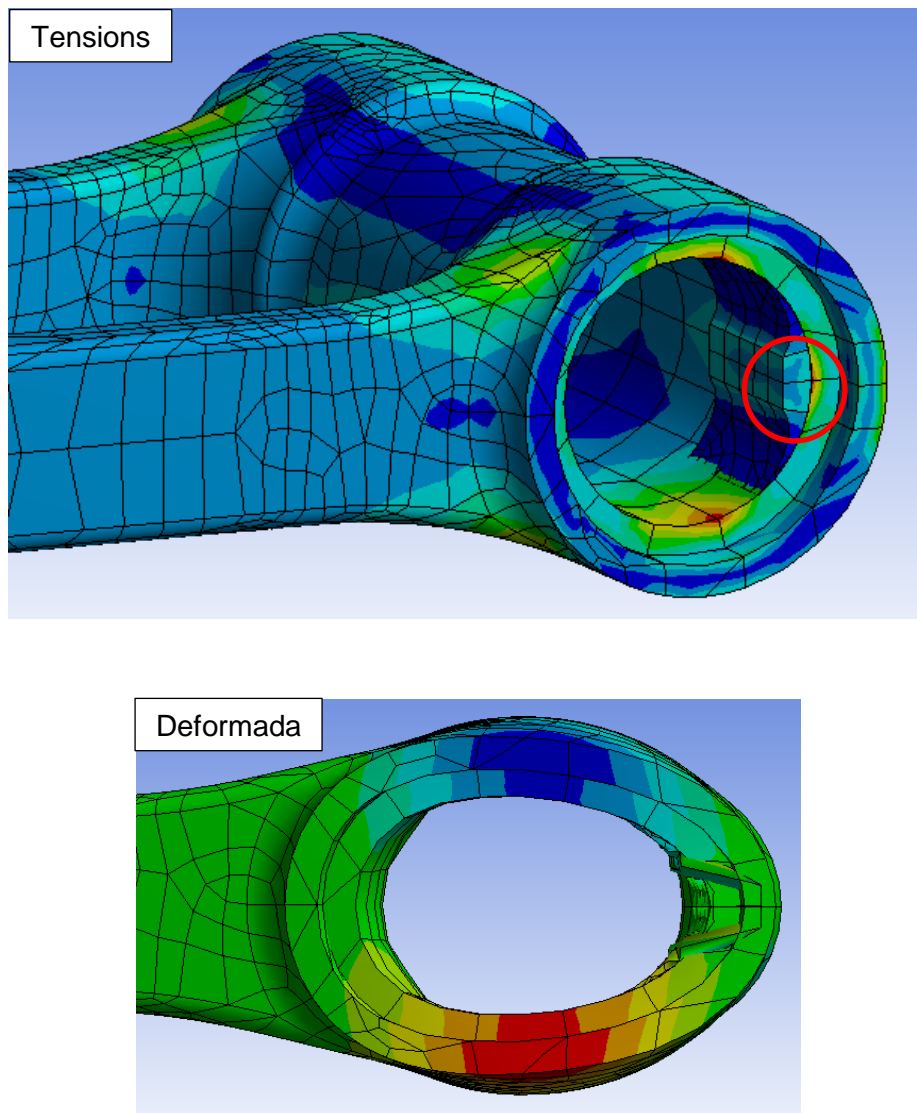


Figura 4.3.1. Model 1.

Com es pot veure en el primer model apareix una tensió molt elevada a les bieletes a la zona encerclada amb vermell, això es deu a que les forces han quedat concentrades just al mig com es pot veure en la deformada. Les tensions en les peces afegides varien, però són baixes com es buscava. En el segon model (*Figura 4.3.2*) s’afegirà més material a la part del mig per intentar repartir millor les forces, és a dir, que les forces no siguin tant directes a la part del mig.

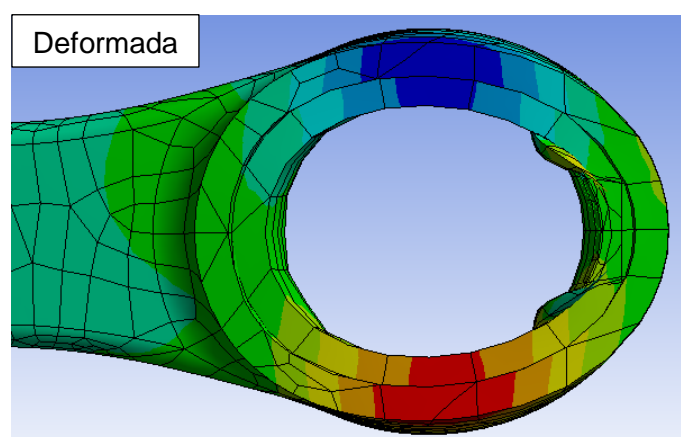
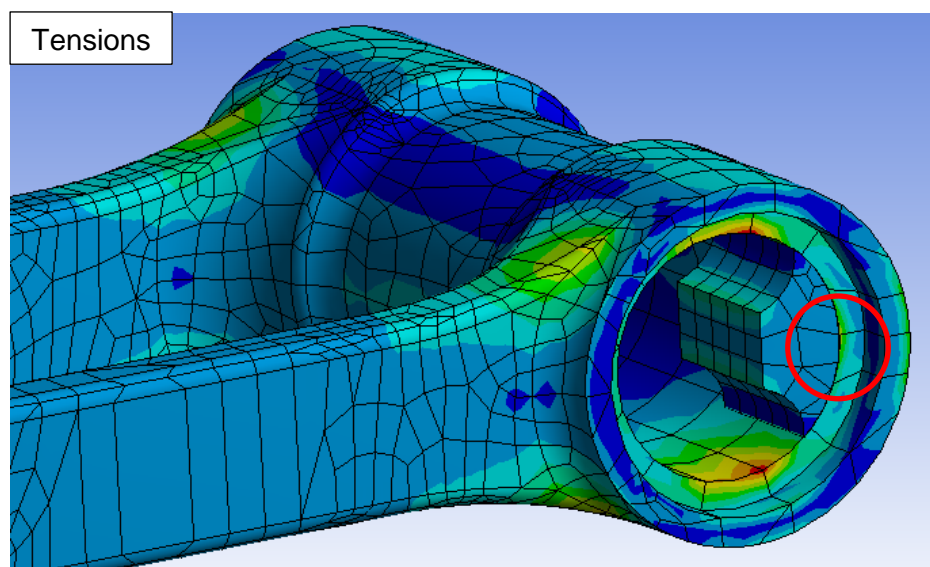
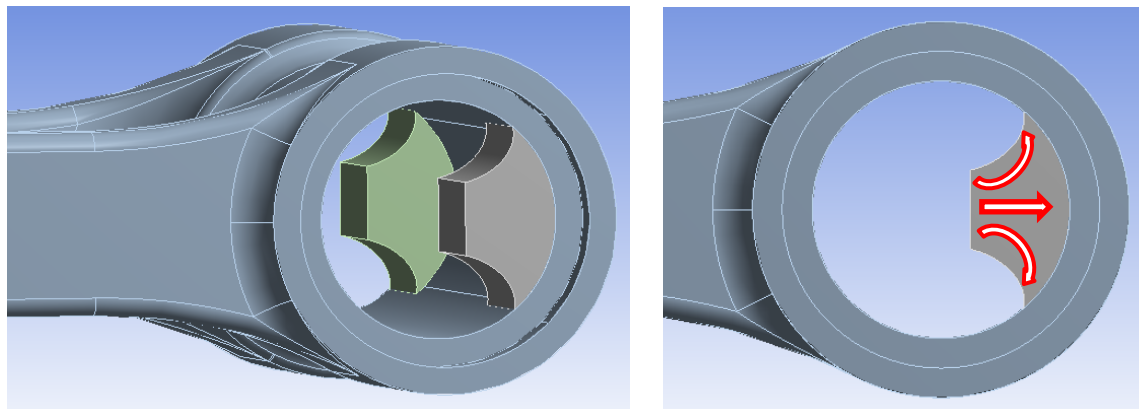
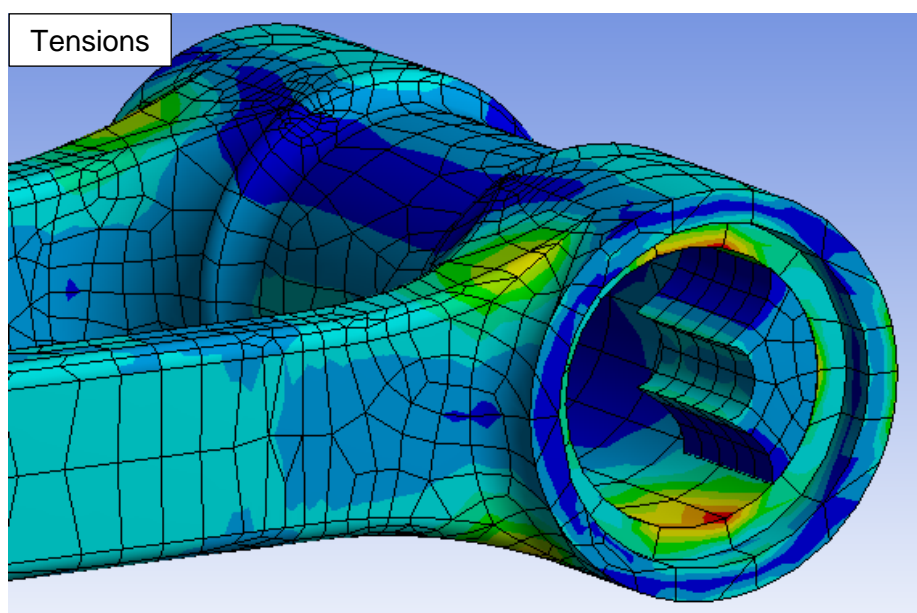
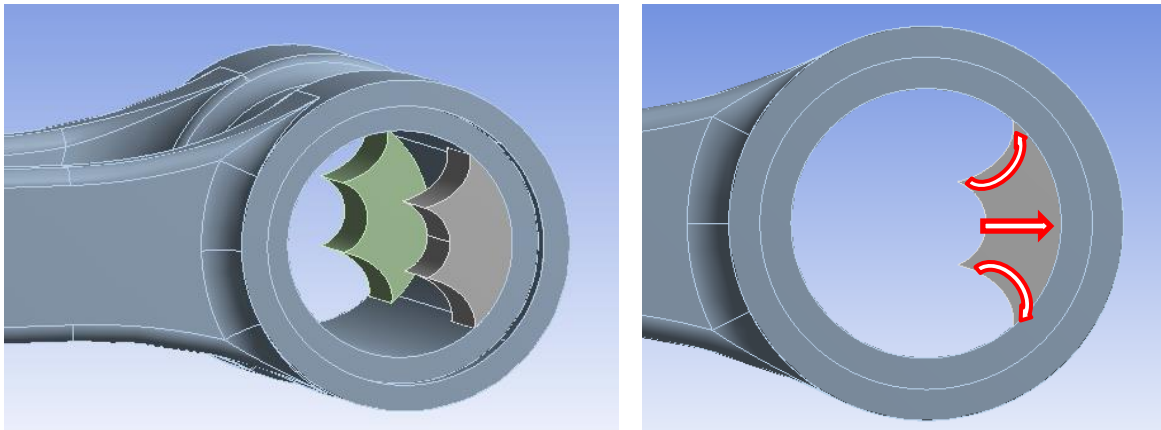


Figura 4.3.2. Model 2.

En aquest segon model ha desaparegut el pic que hi havia a les bieletes a la zona encerclada amb vermell. En la deformada també es veu que no queden tant concentrades les forces en aquest punt. Les tensions a les peces afegides són baixes i més uniformes. En el tercer model (*Figura 4.3.2*), per tal disminuir la variació de tensions a les peces afegides en els vèrtexs de la zona rectangular es treu material del mig de la peces en forma de semicircumferència i així fer que les tensions vagin més pel mig. Tot i voler equilibrar les tensions de les peces afegides es mantenen formes que busquen repartir les forces de manera gradual. En les condicions de contorn varien les restriccions de l'eix x, on es limiten l'àrea de les semicircumferències centrals.



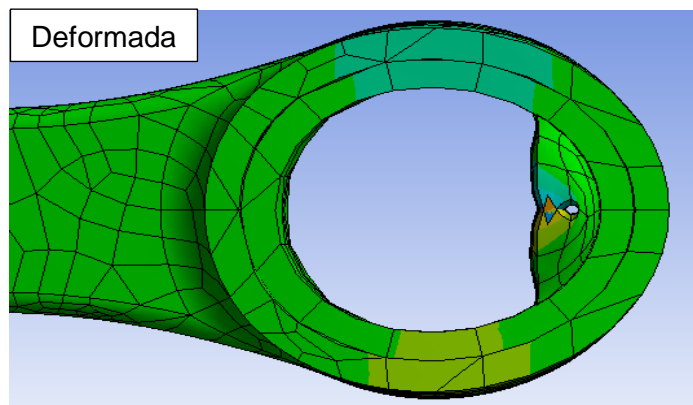


Figura 4.3.3. Model 3.

En aquest tercer model les tensions milloren, tot i que a les punxes continuen una mica altes. Les tensions a les peces afegides són baixes i bastant uniformes però poden millorar sent més uniformes. Les tensions a les bieletes i la deformada no varien pràcticament, les tensions augmenten una mica a la zona del mig però és lògic, ja que s’ha rebaixat material de la part del mig de les peces afegides.

Es pot veure que tot i les tensions de les peces afegides i la deformada de les bieletes no són del tot perfectes, són models que funcionen bé per repartir millor les tensions. Després de moltes proves amb diferents mides, curvatures, de les peces afegides s’opta per intentar simular el rodament amb una representació de les agulles del rodament (Veure Annex B.1.1). Se sap que els rodaments són equivalents als *SKF HK2016* (Figura 4.3.4). Aquest rodament té 22 agulles. Sense contar l’agulla de l’extrem superior i l’extrem inferior queden 10 agulles per semicircumferència. Es representaran les 10 agulles amb 4 prismes rectangulars repartits uniformement (Figura 4.3.4). Aquests prismes són de secció quadrada i cada costat és de la mida del diàmetre de l’agulla i tenen la mateixa llargada que les agulles. Si les agulles tenen un diàmetre de 2mm i una llargada de 16mm, els prismes són de 2x2x16mm. En els prismes se’ls hi assigna un mòdul de Young per simular el comportament del material de les agulles del rodament. Aquest mòdul de Young es calcula igualant la deformació que pateix l’agulla, calculada a partir de la tensió de Hertz en funció de la força que s’aplica al rodament, amb la deformació que pateix el prisma, calculada a partir de la fórmula de la deformada del material en funció de la força que s’aplica al rodament.

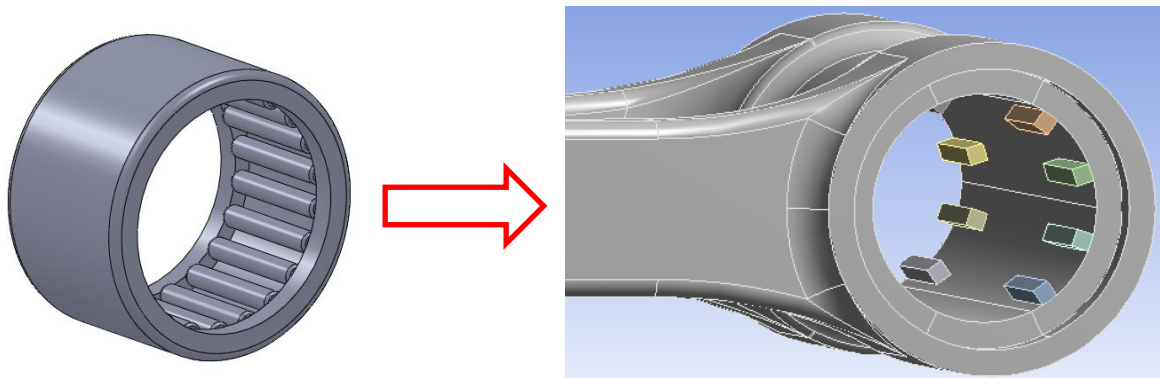


Figura 4.3.4. El rodament SKF HK2016 es representa amb un model amb 4 prismes rectangulars que representen les agulles del rodament.

En les condicions de contorn varien les restriccions de l'eix x, en aquest cas es crearan coordenades locals per cada prisma rectangular de manera que l'eix x quedi de forma radial en la circumferència (Figura 4.3.5). Una vegada creades les coordenades locals per cada prisma es limitarà l'àrea rectangular perpendicular al radi (Figura 4.3.5) i se li limitarà el moviment en la coordenada local x.

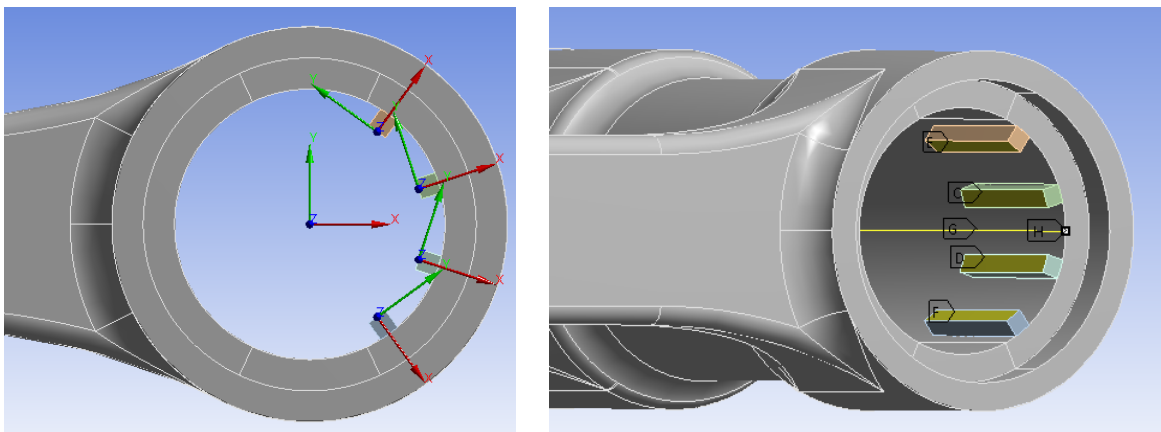


Figura 4.3.5. Cada prisma es limitarà l'àrea rectangular perpendicular al radi i se li limitarà el moviment en la coordenada local x.

La solució obtinguda (*Figura 4.3.6*) és la que s’ha buscat, les tensions en les “agulles” són uniformes i, per tant, les forces es reparteixen a través de les agulles com passa en els rodaments a la realitat i es transmeten a la peça de manera gradual com es veu en la deformada. La deformada obtinguda comparada amb l’obtinguda amb els primers models ha millorat molt, és molt gradual i no és tant acusada com la dels altres models on quedava molt deformada de la part del mig, ja que quedaven les forces concentrades en aquells punts.

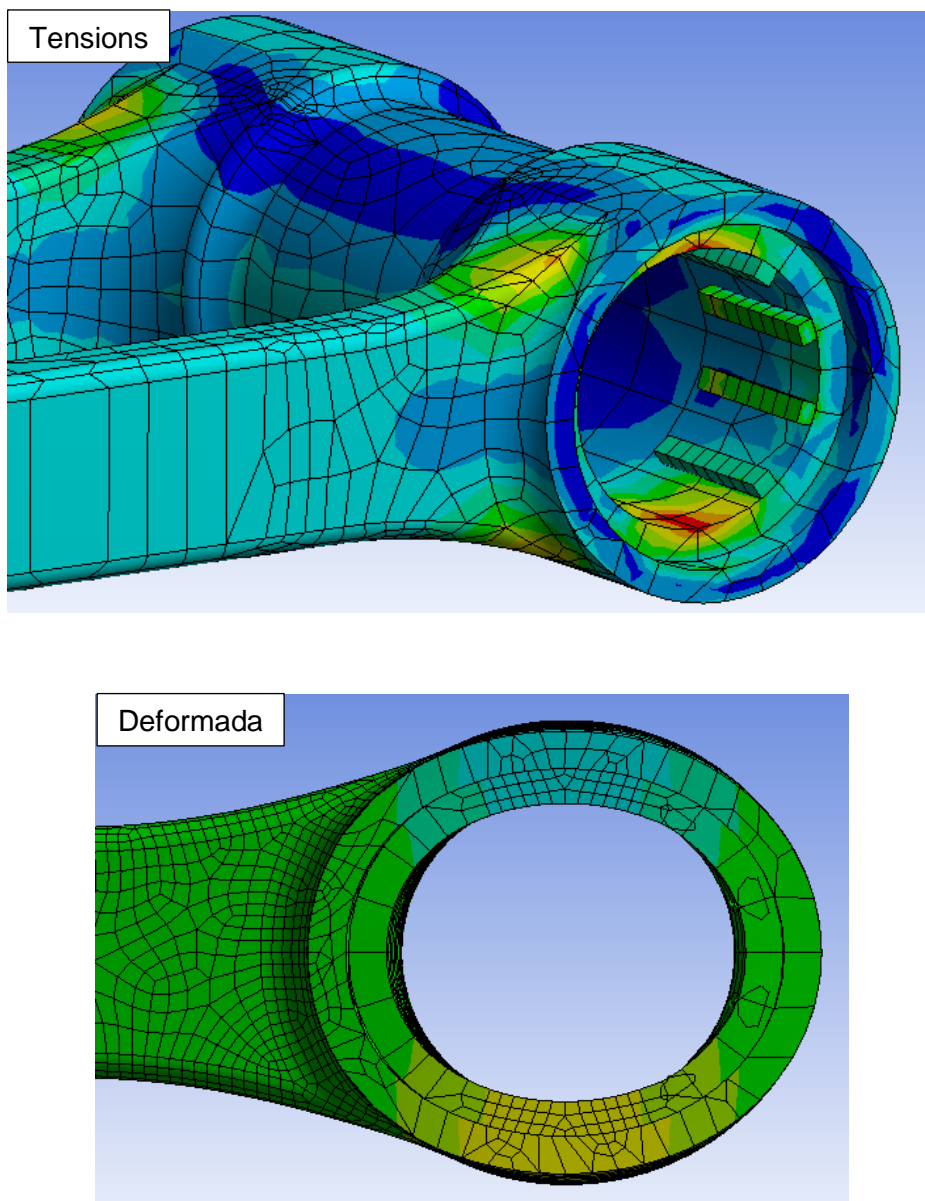


Figura 4.3.6. Resultat model “agulles”.

4.4. Tensions en les bieletes

Amb el problema dels rodaments solucionat, faltaria solucionar el problema amb els forats del passador els quals també les forces es reparteixen uniformement. S’han fet probes similars als rodaments afegint peces per intentar simular la repartició gradual de les forces, però els resultat han sigut dolents (Veure Annex B.1.2). A més, és molt difícil de saber quins són els graus en què el passador està en contacte amb les bieletes, ja que a també se li ha de sumar que el passador té un desgast i la zona de contacte disminueix, és per això que s’ha optat per deixar la superfície d’aplicació de 90°. El resultat de les tensions obtingudes en les bieletes es pot veure a continuació en la *Figura 4.4.1*.

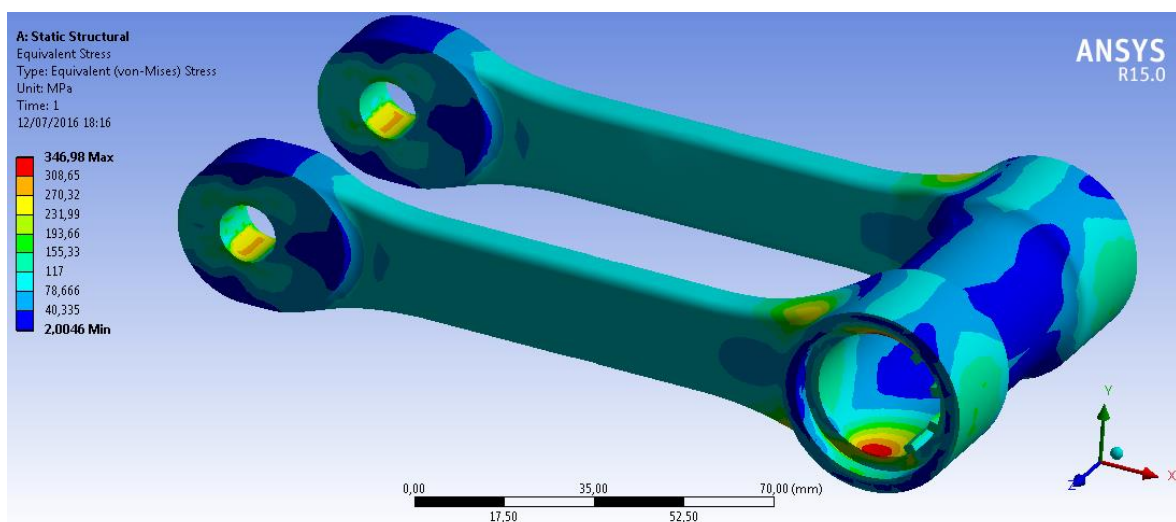


Figura 4.4.1. Resultat de les tensions de Von Mises obtingudes en les bieletes.

Una vegada obtinguts els resultats s’ha mallat la peça amb mallat fi de 1mm les zones amb les tensions més altes per tenir més precisió (*Figura 4.4.2*).

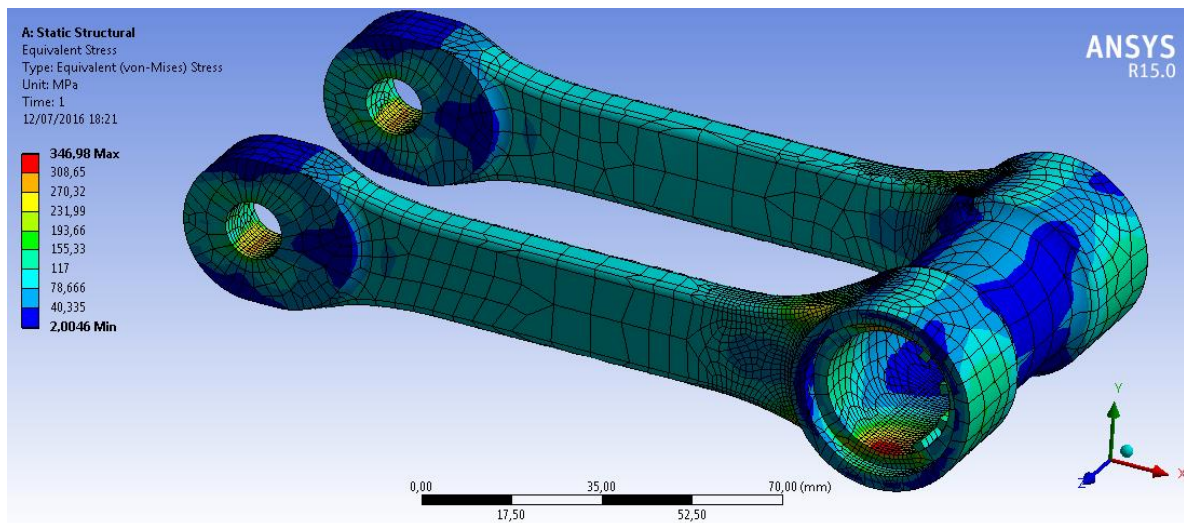


Figura 4.4.2. Mallat final on en les zones amb les tensions més altes s’ha aplicat un mallat de 1mm.

S’han extret els resultats novament on es poden veure les tensions en els punts més crítics amb més precisió. En la *Figura 4.4.3* es pot veure el punt més crític de la peça que correspon en el punt interior de la paret prima en els extrems superior i inferior on van col·locats els rodaments. Com ja s’ha comentat és la zona crítica, ja que la peça treballa a tracció i al ser la paret prima tendeix a aixafar-la. El valor de la tensió màxima és de 347,98MPa. La zona discontinua de la peça (segons esquema de la *Figura 4.2.2*) les tensions estan bastant allunyades de les màximes, són de l’ordre de 250MPa, però és una zona a tenir en compte. La zona on s’han col·locat els prismes rectangulars apareixen tensions, tot i que són baixes, ja que és la zona d’aplicació de la càrrega.

En el cantó del passador les tensions també són elevades, però no tant com el cantó dels rodaments, ja que la paret en aquesta zona és més ampla a part de que el forat és relativament més petit. Les tensions màximes en aquesta zona són de l’ordre de 275MPa. En la *Figura 4.4.4* es pot veure les tensions en aquesta zona i també es pot veure la zona d’aplicació de la càrrega tot i aplicar la càrrega uniforme no hi ha pics ni tensions considerables com passava en la zona dels rodaments.

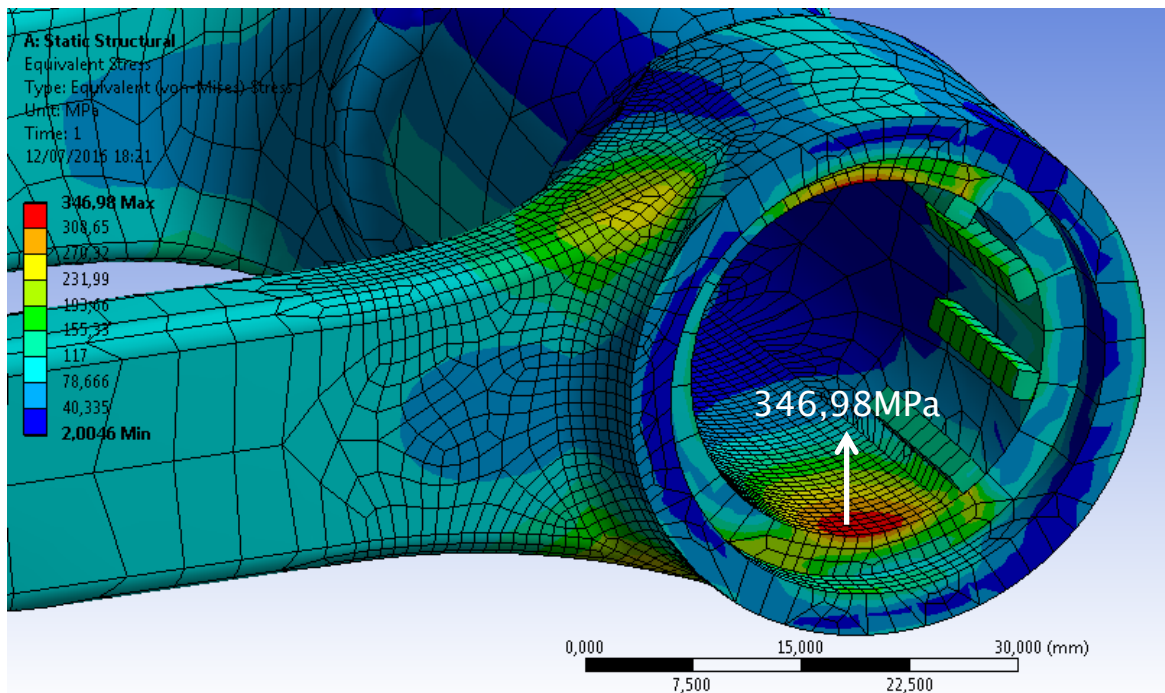


Figura 4.4.3. Tensions en la zona on van col·locats els rodaments on es pot veure la tensió màxima de 346,98MPa.

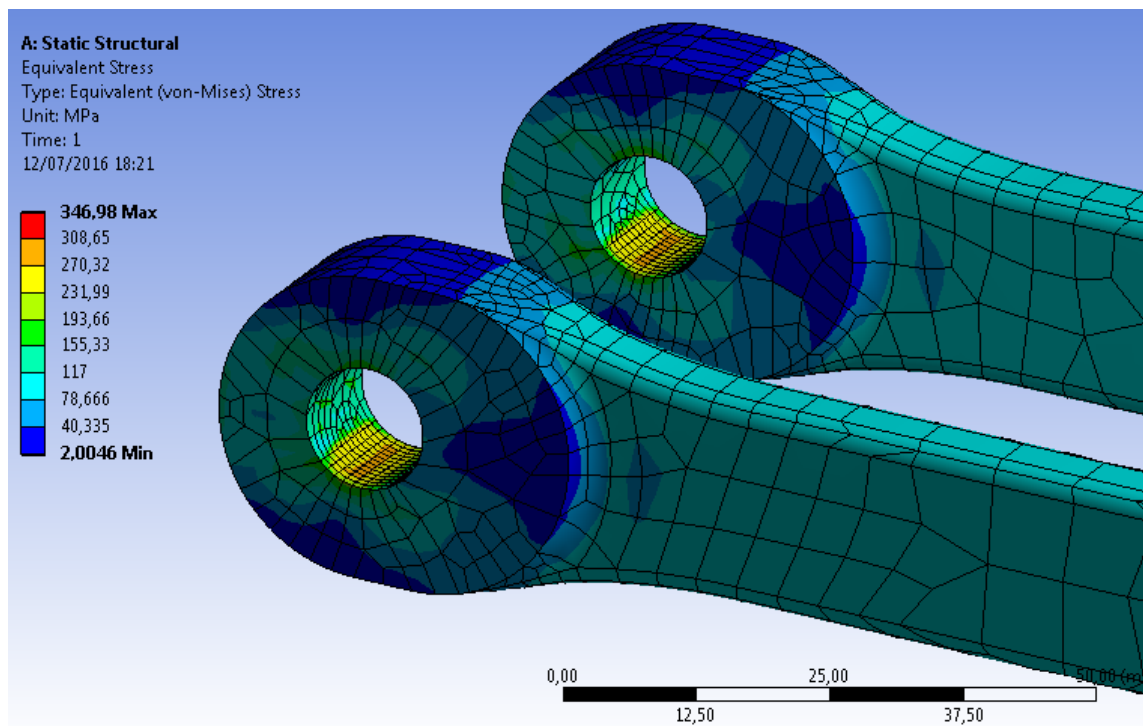


Figura 4.4.4. Tensions en la zona on va col·locat al passador.

4.5. Millores en les bieletes

Un cop trobades les zones amb les tensions més altes es proposen millores per reduir les tensions altes. També es busca disminuir el pes d’aquestes noves bieletes. No es proposen millores en quant a materials ni tampoc millores que afectin al funcionament del sistema, es mantenen les mides necessàries per no afectar al funcionament ni al muntatge de les peces com serien la distància entre centres, rebaix pels retens, amplada de les peces i diàmetre dels forats.

S’han fet una sèrie de propostes que es descriuran a continuació, on es pot veure el seu estat de tensions una vegada aplicades les mateixes condicions de contorn que en les bieletes originals. En cada cas també es calcularà el pes i s’avaluaran els resultats. Abans però, en la *Figura 4.5.1* es mostra de nou el resultat obtingut en les bieletes originals. Aquestes bieletes tenen un pes de 258,79g.

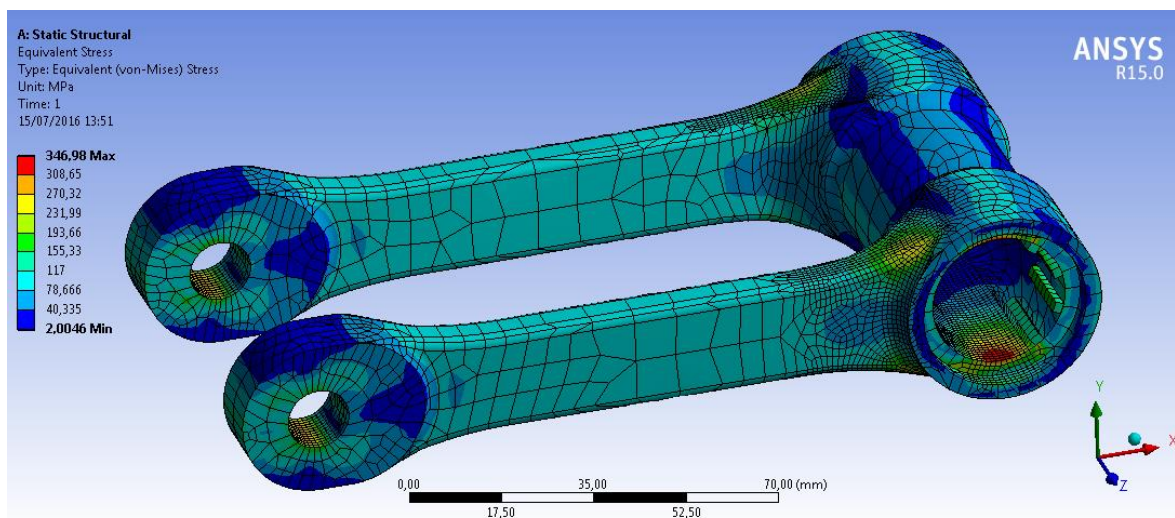


Figura 4.5.1 Bieletes originals.

Abans de fer modificacions per reduir les tensions en les zones crítiques, en la primera proposta es treu material del cantó del passador, ja que sembla sobrar part del augment de gruix que hi ha. L’extracció de material suposa que la peça fa que passi a pesar 252,12g.

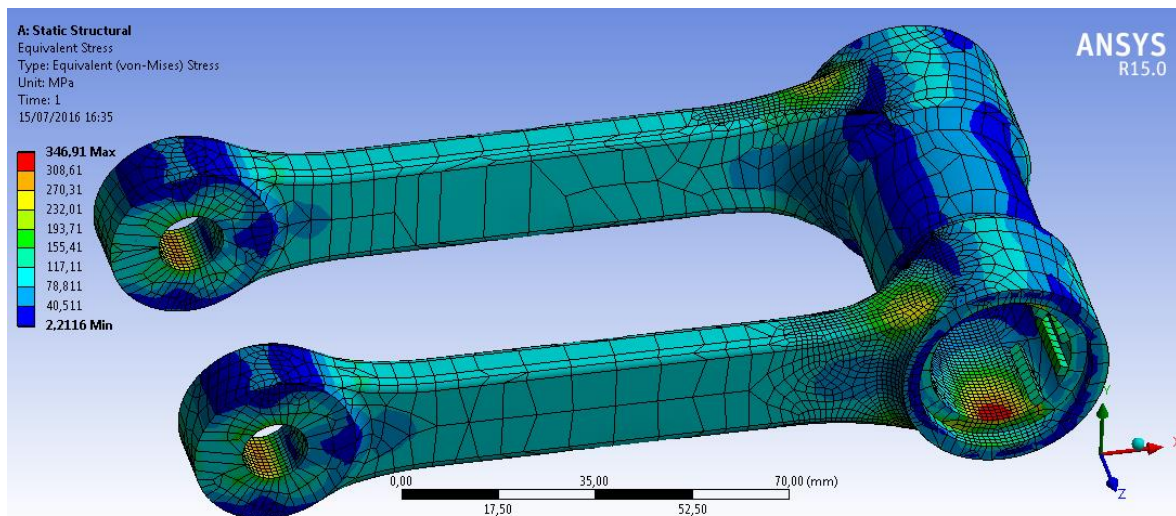


Figura 4.5.2. Proposta 1.

Com es pot veure en la Figura 4.5.2 les tensions no han variat pràcticament, per tant, es comprova que la zona del passador es pot prescindir de l'excés de material.

En la segona proposta (Figura 4.5.3) ja es busca disminuir les tensions màximes en la zona dels rodaments, per això s'augmenta el gruix de la paret 2mm. El fet d'augmentar el gruix s'està augmentant el pes de 252,12g a 283,25g, però les tensions en aquesta zona disminueixen de l'ordre d'uns 100MPa, per tant, és una millora més que considerable.

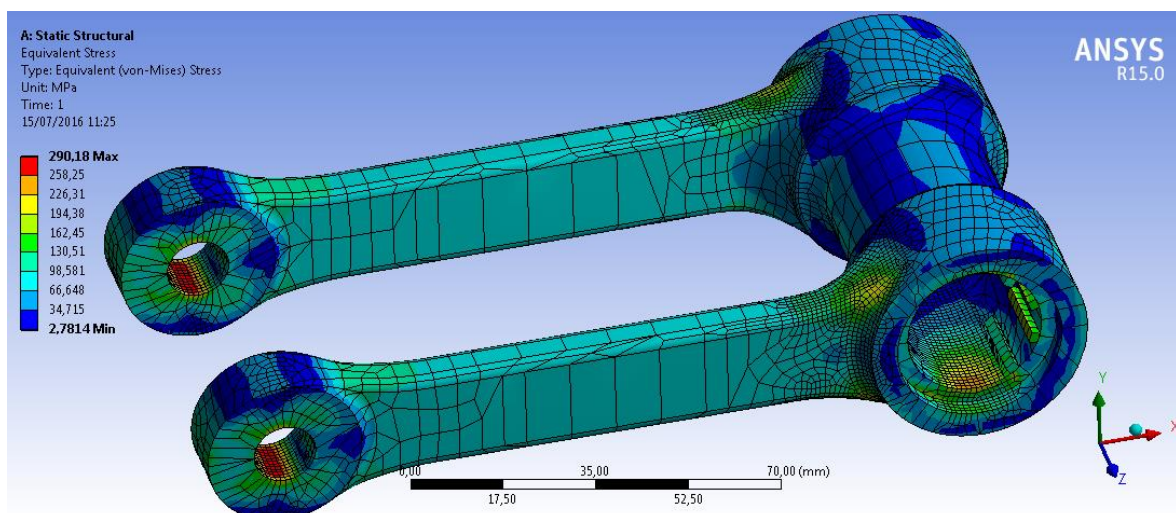


Figura 4.5.3. Proposta 2.

Un cop vist com milloren les tensions augmentant el gruix de la paret es podria fer infinites probes amb diferents gruixos.

Com s’ha vist també aquest augment del gruix comporta augmentar el pes de la peça, per això en la tercera proposta (*Figura 4.5.4*) es rebaixa el pes fent forats, reduint el pes de 283,25g a 271,25g. Aquest forats es pot veure que no afecten a les zones més desfavorables, però sí que augmenten les tensions a les zones dels forats tot i que no són gaire altes. En els extrems superiors i inferiors dels forats les tensions augmenten i en les zones del mig disminueixen, ja que els forats s’aixafen al treballar a tracció les bieletes.

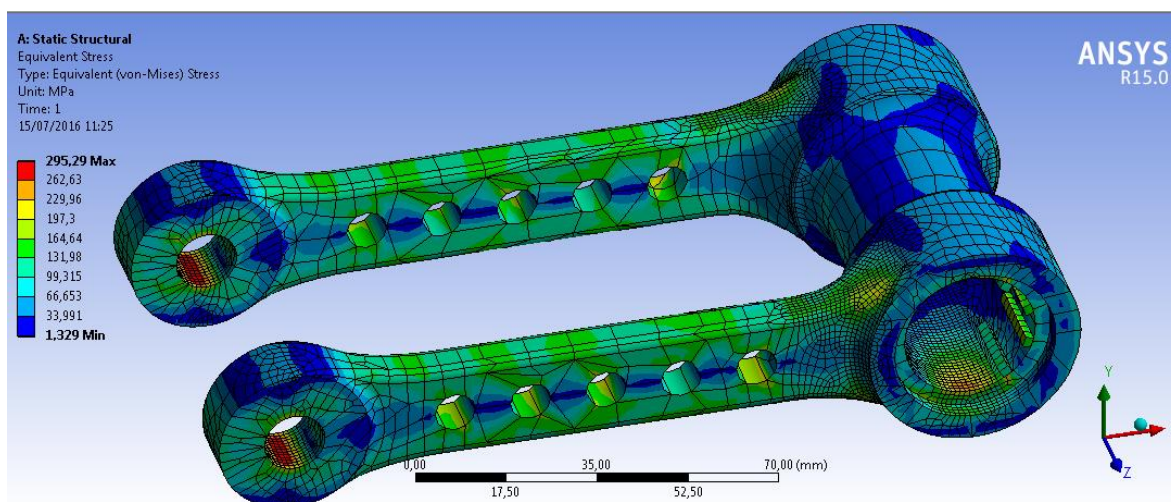


Figura 4.5.4. Proposta 3.

En la quarta proposta (*Figura 4.5.5*) es volen disminuir les tensions en les zones discontinues de les peces per això es redueix al màxim els radis de curvatura. Això comporta un augment de pes de 283,25g a 352,6g.

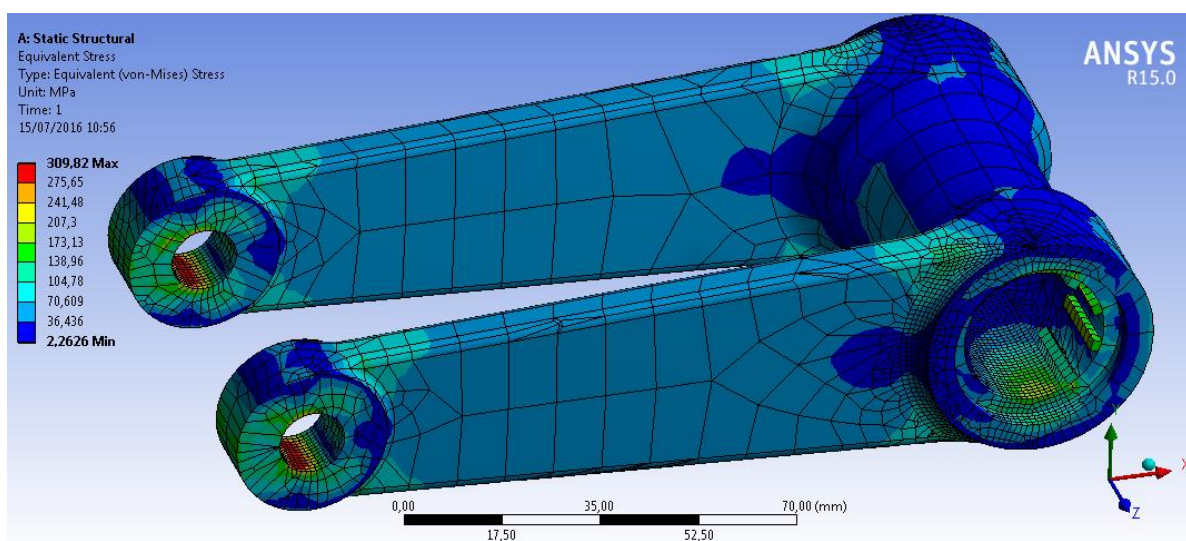


Figura 4.5.5. Proposta 4.

Les tensions disminueixen de l’ordre d’uns 100 MPa en la zona discontinua del cantó dels rodaments. Les tensions també disminueixen uns 40 MPa en la zona dels rodaments on hi havia el màxim en les bieletes originals. En la cinquena proposta (*Figura 4.5.6*) es treu material de la zona continua de les bieletes disminuint el pes de les bieletes de 352,6g a 308,43g.

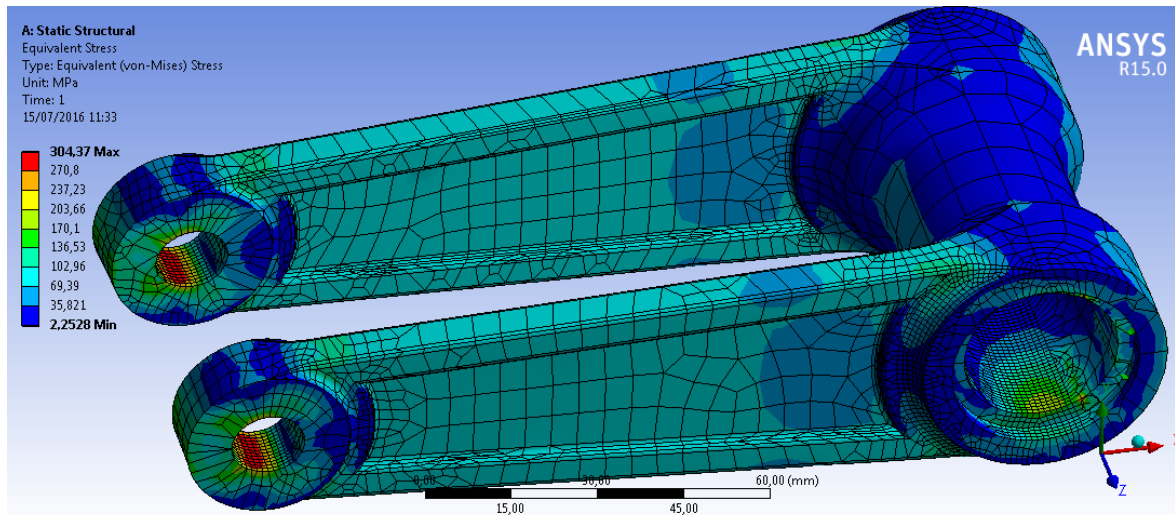


Figura 4.5.6. Proposta 5.

Les zones amb les tensions més altes no varien pràcticament. Per això en la sisena proposta (*Figura 4.5.7*) es continua traient material, en aquest cas se li fan forats rodons en les bieletes anteriors disminuint el pes fins a 290,58g.

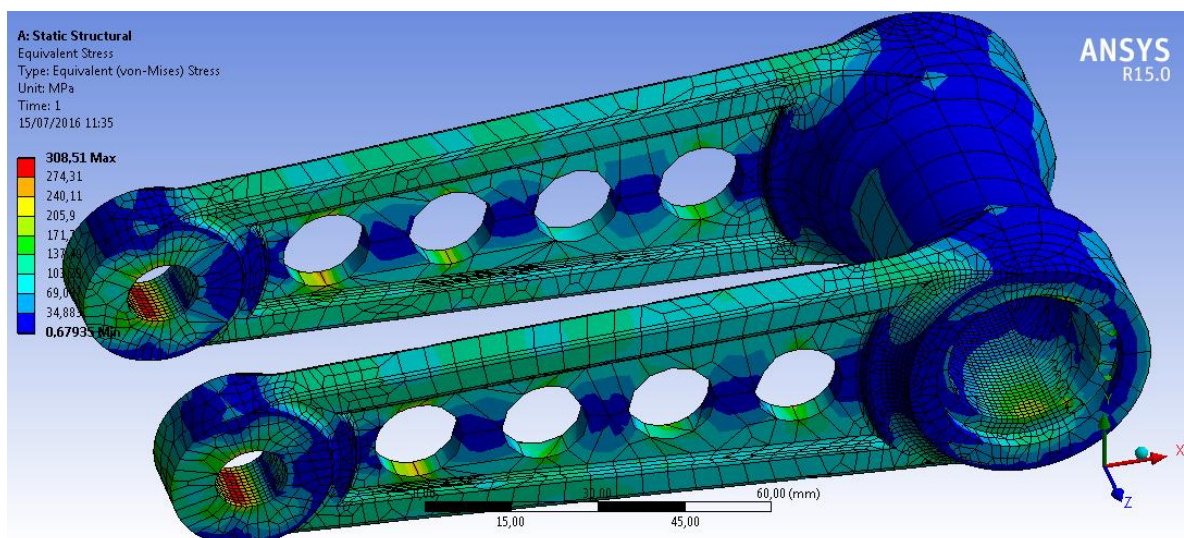


Figura 4.5.7. Proposta 6.

Les tensions tampoc es varien pràcticament, només varien en la zona on s'han fet els forats. En els extrems superiors i inferiors dels forats les tensions augmenten i en les zones del mig disminueixen, pel fet de que els forats s'aixafen.

En la setena proposta (*Figura 4.5.8*) s'acaba de treure tot el material de la zona rebaixada rebaixant el pes fins a 286,92g. Cal dir, que els resultats de les tensions en la zona continua de la peça són millors que amb més material i amb forats, i a més a més, són més lleugeres.

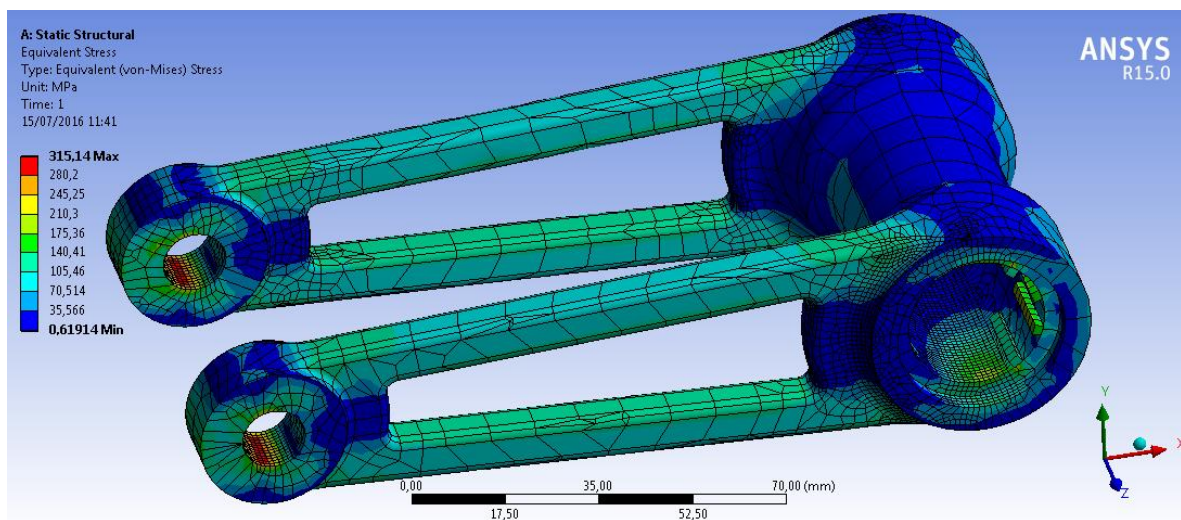


Figura 4.5.8. Proposta 7.

Cal afegir que en la zona del passador per reduir les tensions es podria anar fent el gruix de la paret més gran fins a trobar unes tensions desitjades. També cal dir, que en cap dels casos on s'ha millorat les tensions i després s'ha rebaixat el pes, aquest en cap cas ha set inferior que el de les originals. Això dóna a veure el fet que són unes peces ja estudiades i que ja estan bastant al límit en quan tensions i pes.

Si es donés per bones les tensions en què estan sotmeses les bieletes originals llavors la primera proposta es podria donar com a bona per disminuir el pes de les original, així com les dos següents propostes (*Figura 4.5.9* i *Figura 4.5.10*).

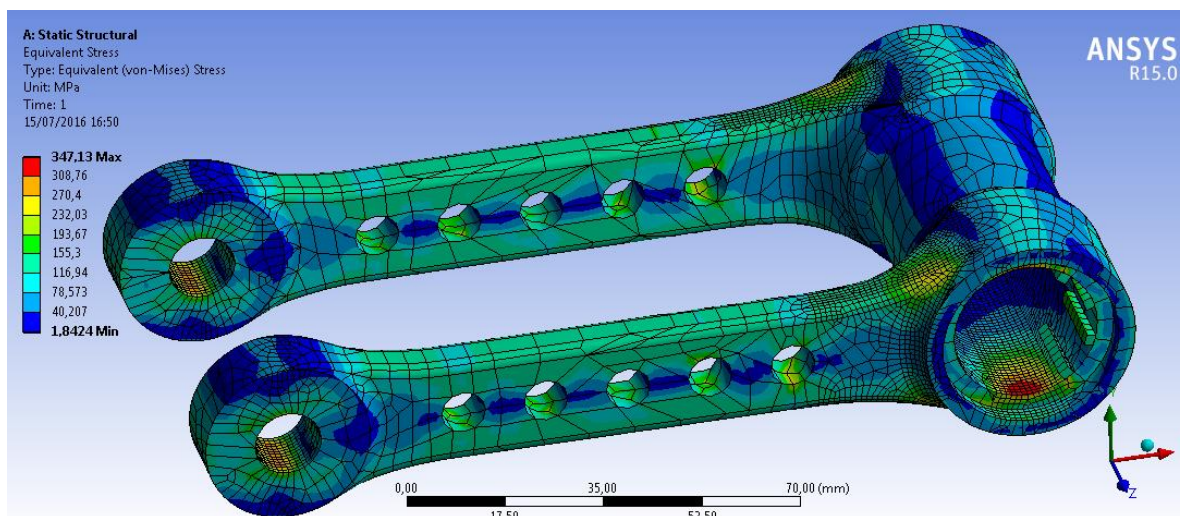


Figura 4.5.9. Proposta 8.

En la *Figura 4.5.9* es pot veure la primera proposta amb forats. Aquest fan disminuir el pes les bieletes de 252,12g a 240,11g. També es pot veure que les tensions gairebé no varien en les zones crítiques i que augmenten en la zona dels forats. En els extrems superiors i inferiors dels forats les tensions augmenten i en les zones del mig disminueixen.

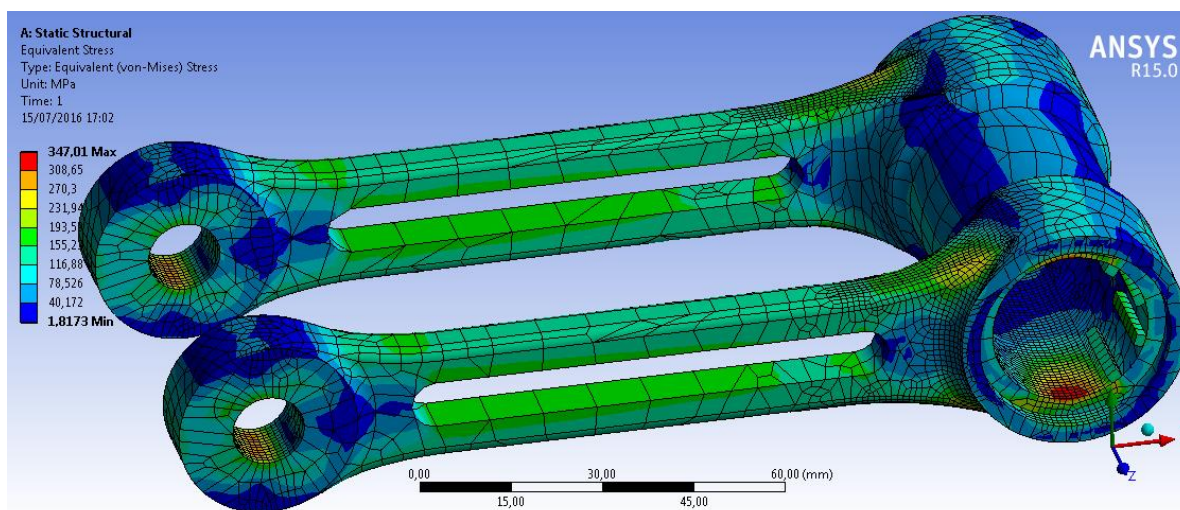


Figura 4.5.10. Proposta 9.

En la *Figura 4.5.10* es treu material de la zona contínua reduint encara més el pes de les bieletes fins a 222,2g. Les tensions no varien pràcticament en les zones crítiques. En la zona contínua les tensions augmenten però són de l'ordre de la meitat de les màximes.

5. DETERMINACIÓ DE LES TENSIONS EN EL BALANCÍ

5.1. El balancí

Per determinar a quines tensions està sotmès el balancí primer de tot s’ha de generar un model d’aquest balancí (*Figura 5.1.1*) a escala real amb el *SolidWorks* (Veure Annex C) per tal de poder-lo entrar al programa d’elements finits i trobar les tensions.

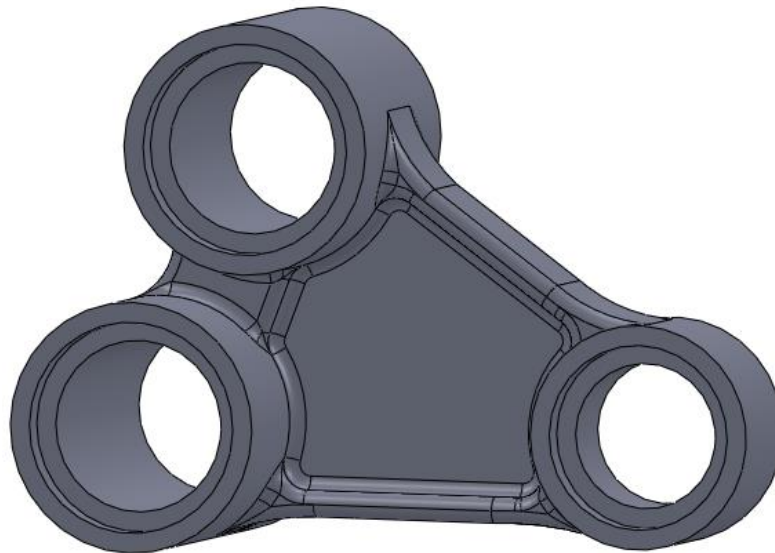


Figura 5.1.1. Balancí modelat amb SolidWorks.

El balancí és d’alumini AA6082-T6. Aquest alumini també denominat *ISO AlSi1MgMn* té les següents propietats:

- Densitat $2,70 \text{ g/cm}^3$
- Mòdul de Young 70.000 MPa
- Coeficient de Poisson $0,33$

El balancí quan està muntat en el conjunt queda unit per tres cantons: per les bieletes, pel basculant i per l’amortidor. Tant el forat superior (mirant la *Figura 5.1.1*), corresponent a la unió amb basculant, com el forat que té just a tocar que correspon a la unió amb les bieletes, tenen el mateix diàmetre, 26mm. A cada forat hi van dos rodaments que suporten un casquet. Els rodaments són d’agulles iguals que els utilitzats en les bieletes (*F-2016*, equivalent al rodament *SKF HK2016*) i van muntats a pressió també. Pel què fa el tercer forat, correspon a la unió amb l’amortidor té un diàmetre 20mm i només hi va un rodament. Aquest rodament suporta el passador i segons el fabricant de la moto és un rodament d’agulles *7E-HVS16x22x12* (equivalent al rodament *SKF HK1612*) i va muntat a pressió.

5.2. Preparació per a l’estudi amb elements finits

El balancí modelat amb *SolidWorks* s’importa a l’*Ansys* igual que les bieletes. Una vegada a l’*Ansys* s’ha d’assignar el material, concretament alumini, el qual se li hauran d’indicar les propietats exactes de l’alumini *AA6082-T6*, com la densitat, el mòdul de Young i el coeficient de Poison.

Seguidament s’haurà de mallar la peça amb hexaedres. Es mallarà tot el balancí amb elements de 2mm, ja que és una peça complexa (*Figura 5.2.1*). Posteriorment ja es mallarà amb elements més petits per tenir més precisió a les zones que faci falta.

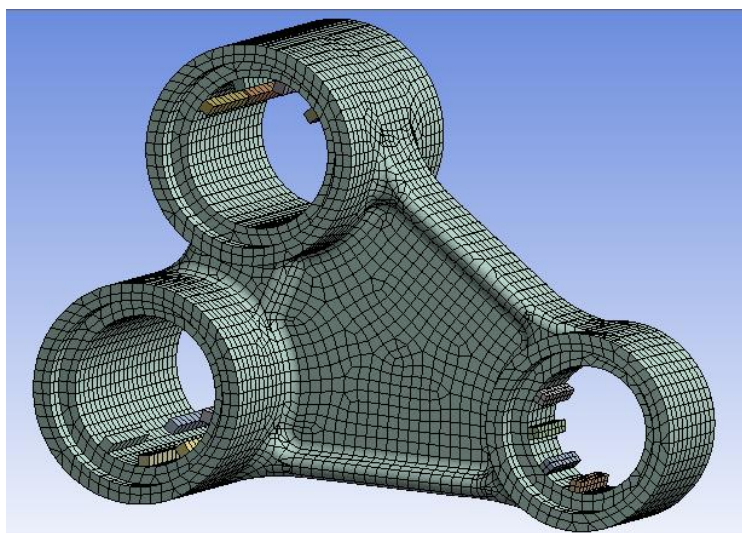


Figura 5.2.1. Balancí mallat amb hexaedres de 2mm.

El balancí importat, com es pot veure a la *Figura 5.2.1*, tindrà el mateix sistema fet servir en les bieletes per simular els rodaments, és a dir, a la posició de cada rodament hi haurà 4 prismes rectangulars de l’amplada del rodament i de secció quadrada on cada costat tindrà la mida del diàmetre de cada agulla. Aquests prismes estan orientats en la direcció i sentit de la força de la unió que correspongui (*Figura 5.2.2*) i se’ls hi assigna un mòdul de Young calculat de la mateixa manera que s’ha fet amb les bieletes (Veure Annex B.2.1). Aquest 4 prismes representen les agulles dels rodaments (*Figura 5.2.3*), en el cas del rodament *SKF HK2016* representen 10 agulles i tindran unes mides de 2x2x16mm i en el cas del rodament *SKF HK1612* que és el que va a la unió del balancí amb l’amortidor representaran 8 agulles i tindran unes mides de 2x2x12mm.

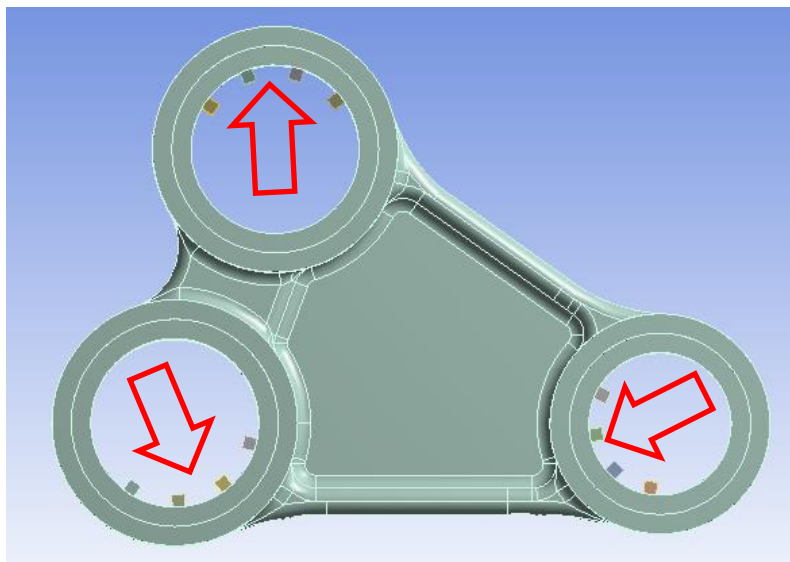


Figura 5.2.2. Prismes orientats en la direcció i sentit de la força.

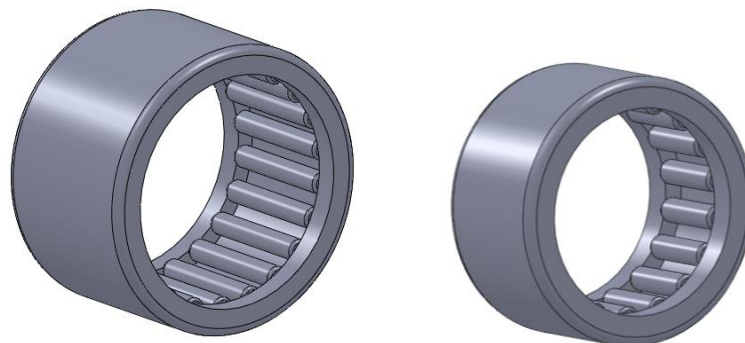


Figura 5.2.3. Rodament SKF HK2016 i rodament SKF1612 respectivament.

Un cop es té el balancí mallat es passarà a les condicions de contorn. Com que hi ha tres punts de força en el balancí s'haurà de triar dos punts on aplicar les forces i un tercer on aplicar-hi les restriccions. S'escull aplicar la força a la unió amb les bieletes i a la unió amb l'amortidor i aplicar les restriccions en la unió amb el basculant (Veure Annex B.2.1). En la unió amb les bieletes es dividiran els 31.054,77N entre 2 perquè hi ha dos rodaments, per tant, s'aplicarà 15.527,385N a cada rodament. La força en el rodament no es repartirà per igual en cada prisma, sinó que els prismes dels extrems se'ls hi aplicarà menys força que els del mig per tal de representar el repartiment gradual de les forces (*Figura 5.2.4*). En la unió amb l'amortidor s'aplicarà una força de 10.596,13N repartits entre els prismes rectangulars com en la unió amb les bieletes com es veu en la *Figura 5.2.4*. En la unió amb el basculant s'aplicaran restriccions com les bieletes. Es crearan coordenades locals per cada prisma rectangular de manera que l'eix x quedi de forma radial en la circumferència. Una vegada creades les coordenades locals per cada prisma es limitarà l'àrea rectangular perpendicular al radi (*Figura 5.2.5*) i se li limitarà el moviment en la coordenada local x. També es limitarà la superfície vertical en x i un punt en z (*Figura 5.2.6*).

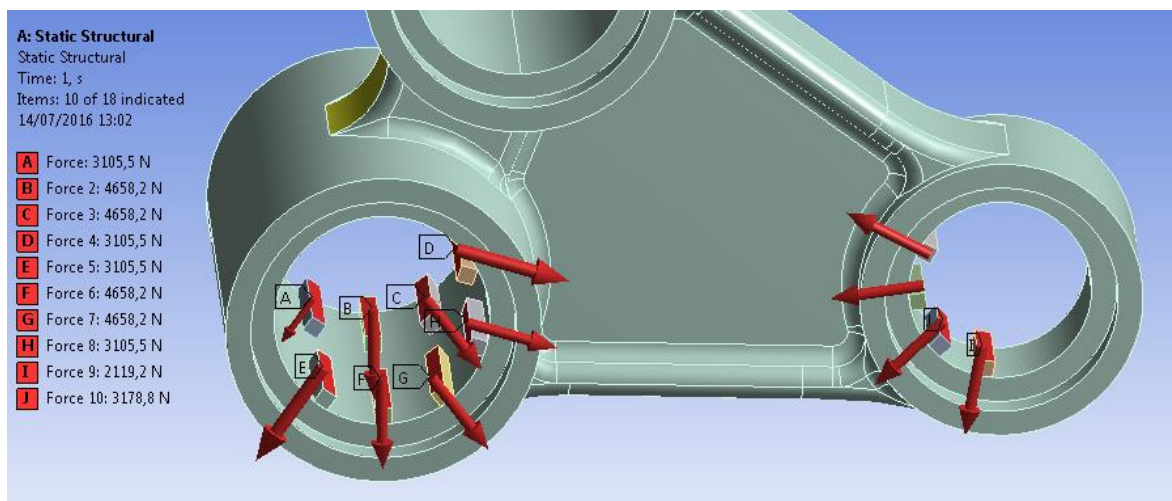


Figura 5.2.4. Forces en els rodaments de la unió amb les bieletes i forces en el rodament de la unió amb l'amortidor. Les forces es reparteixen de manera gradual en els prismes.

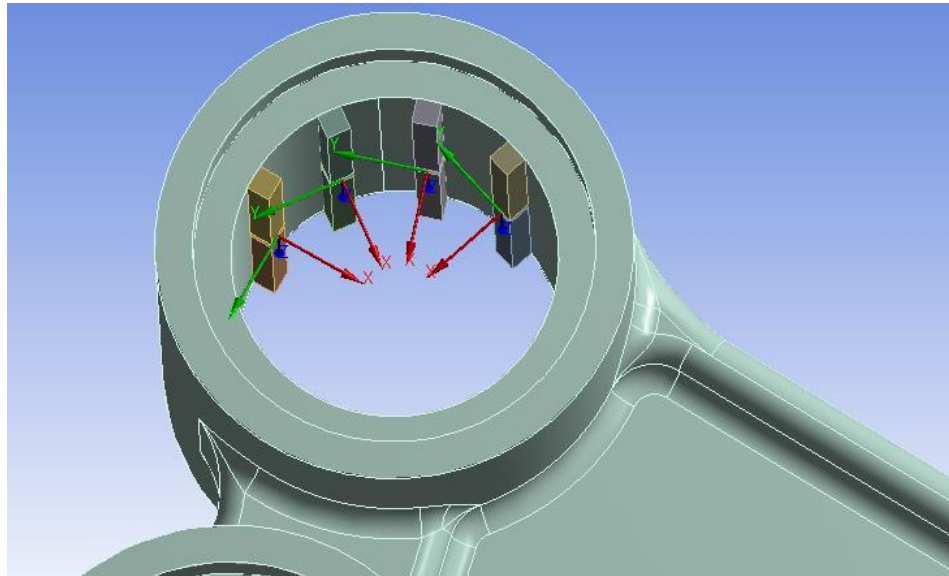


Figura 5.2.5. En la unió amb el basculant s'aplicaren les restriccions. Cada prisma es limitarà l'àrea rectangular perpendicular al radi i se li limitarà el moviment en la coordenada local x.

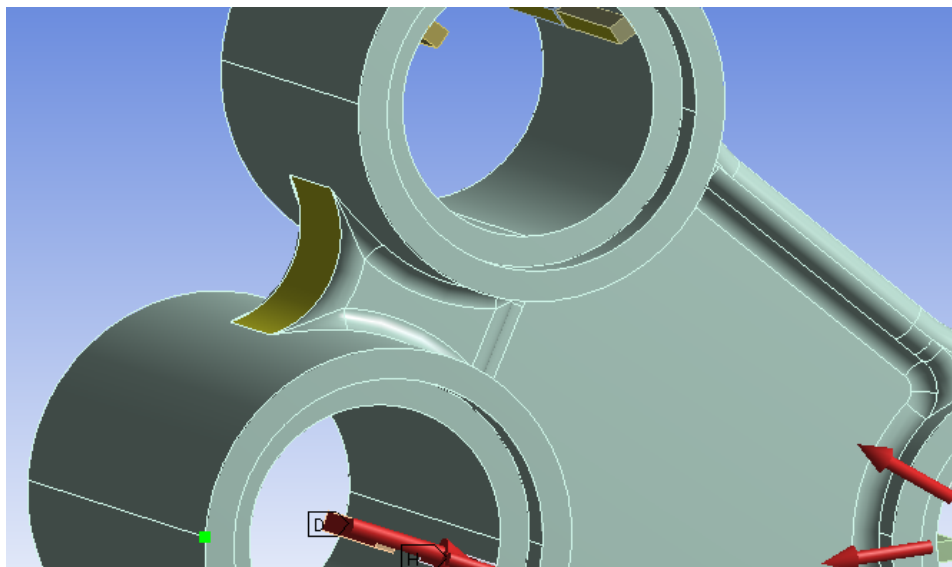


Figura 5.2.6. Es limitarà la superfície vertical marcada en groc en la direcció x i un punt marcat en verd en la direcció z.

5.3. Tensions en el balancí

Una vegada preparat el balancí ja es pot posar el *Solve* perquè calculi les tensions de Von Mises de la peça (Figura 5.3.1).

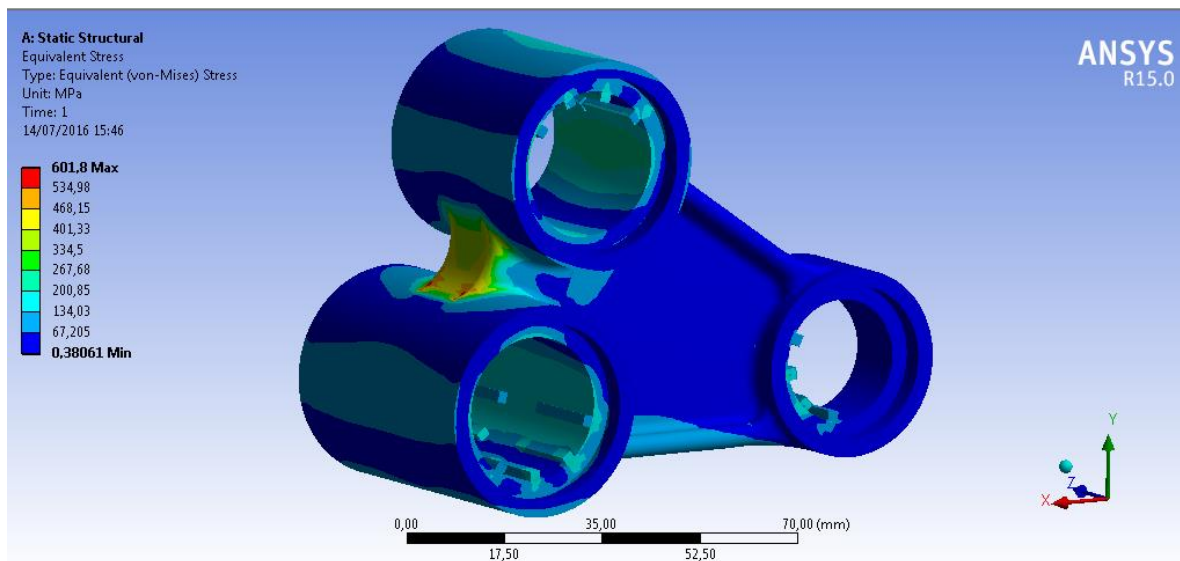


Figura 5.3.1. Resultat de les tensions de Von Mises obtingudes en el balancí.

Amb les tensions calculades, es veu com zona amb les tensions més altes és la curvatura entre el forat per on es colla el balancí amb el basculant i el forat on es colla el balancí amb les bieletes. És lògic que sigui una zona que pateix ja que el radi de curvatura és relativament petit i el gruix de la paret és petit comparada amb l’amplada dels forats de les unions.

La zona dels rodaments on s’ha aplicat el mateix mètode que en les bieletes ha funcionat bé i en les unions del balancí amb les bieletes i el basculant on s’ha aplicat la força gradual també s’ha comportat com s’esperava aplicant la força de manera gradual i que els prismes rectangular les tensions sortissin uniformes.

Una vegada obtingudes les tensions no es decideix fer un mallat més fi, per tant, el mallat quedarà de 2mm en tota la peça (*Figura 5.3.2*). Això és degut que els punts marcats en la *Figura 5.3.3* com més fi és el mallat més alta és la tensió, tendeix a infinit. En la *Figura 5.3.3* també es pot veure el punt de la tensió màxima del balancí de 601,8MPa.

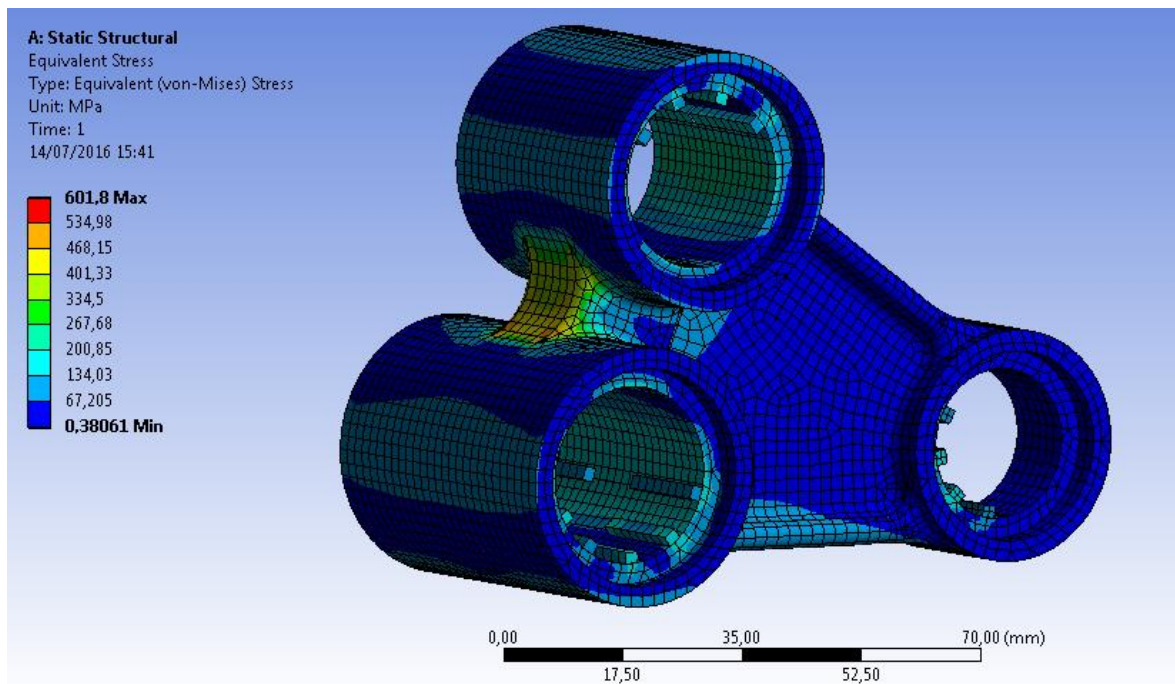


Figura 5.3.2. El mallat final serà de 2mm en tota la peça.

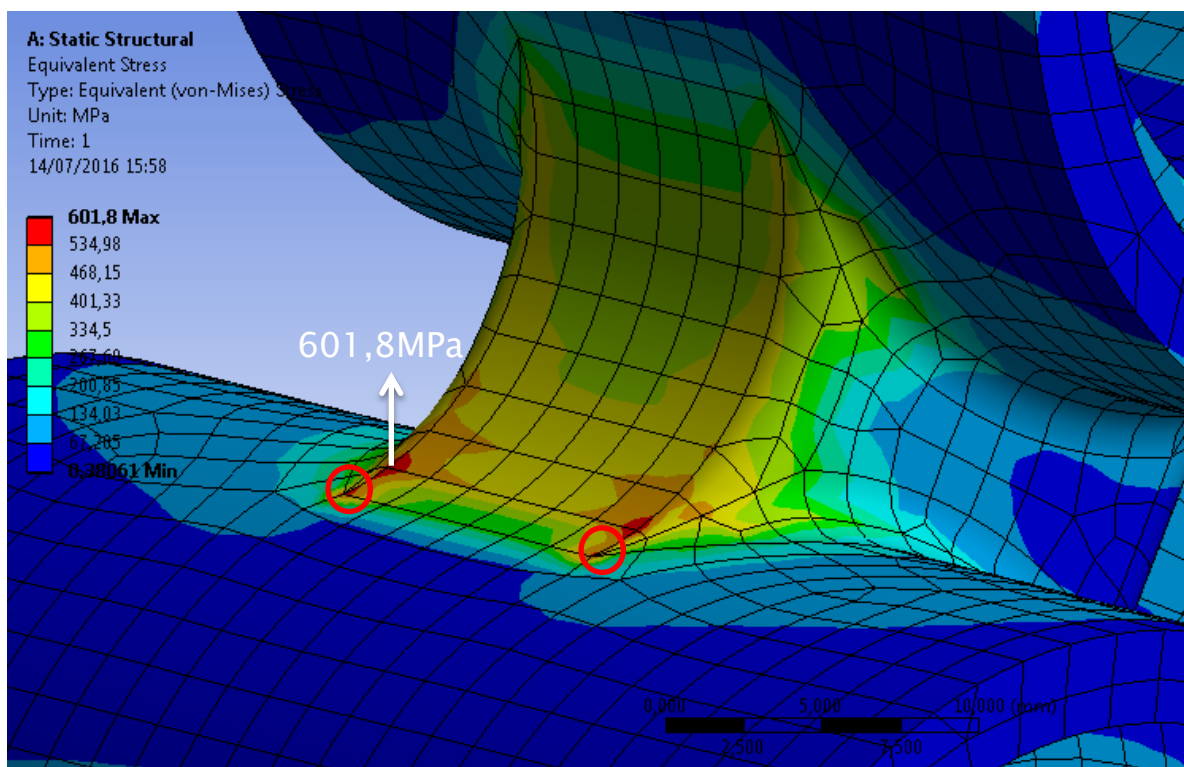


Figura 5.3.3. Tensions en la zona més crítica del balancí on es veu el punt amb la tensió màxima i el punts que amb el mallat més fi tendeix a infinit.

5.4. Millores en el balancí

Una vegada trobades les zones amb les tensions més crítiques es proposen millores per reduir les tensions més altes. També es busca disminuir el pes i, igual que en les bieletes, no es proposen millores en quant a materials ni tampoc millores que afectin al funcionament del sistema. Per això es mantenen les mides necessàries per no afectar al funcionament ni al muntatge de les peces com serien la distància entre centres, rebaix pels retens, amplada de les peces i diàmetre dels forats.

En les propostes fetes es pot veure el seu estat de tensions, però en cap s’ha millorat les tensions del balancí original sinó tot el contrari, han augmentat i en alguns casos per molt. A més, el pic de tensió és sempre als mateixos punts on l’apartat anterior com més fi era el mallat més grans eren les tensions, tendien a infinit. Per tant, es pot suposar que hi podria haver algun problema amb el programa de dibuix 3D a l’hora de fer arrodoniments, o bé, que el programa d’elements finits no llegeix el sòlid com tocaria, ja que les propostes per millorar les tensions són coherents i les tensions haurien de disminuir.

A continuació es mostren les propostes pretenien millorar les tensions i paral·lelament també intentar reduir el pes un cop aplicades les mateixes condicions de contorn que en el balancí original. En cada cas també es calcula el pes. Abans però, en la *Figura 5.4.1* es torna a mostrar el resultat obtingut en el balancí original que té un pes de 223,52g.

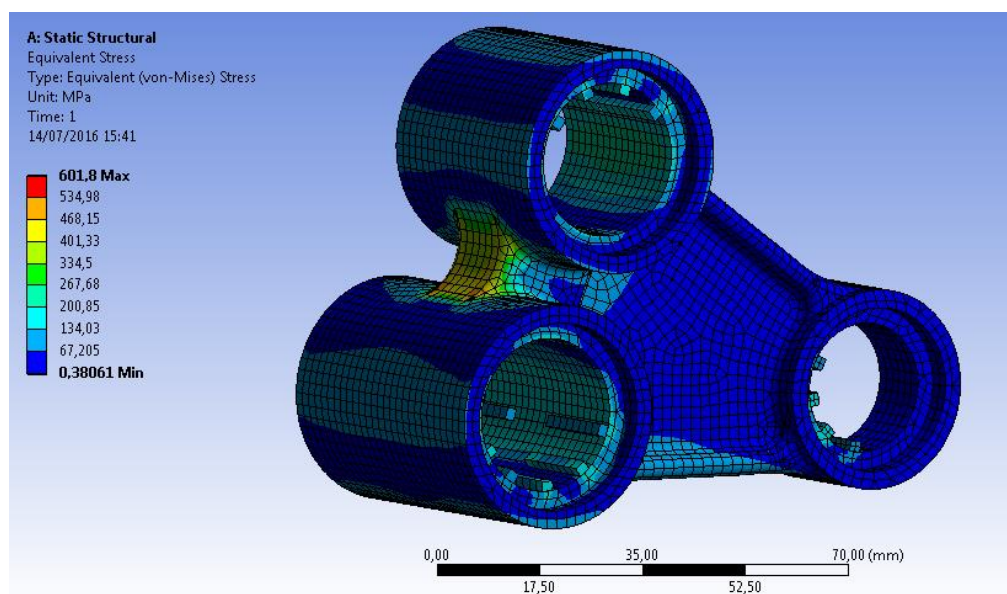


Figura 5.4.1 Balancí original.

En la primera proposta (*Figura 5.4.2*) es buscava disminuir les tensions màximes en la zona corba, per això es va augmentar el radi de curvatura de 20mm a 60mm. El fet d’augmentar el radi s’estava afegint material, augmentant el pes de 223,52,12g a 226,95g. Les tensions màximes obtingudes es disparaven en els punts encerclats en vermell fins a 954,38MPa.

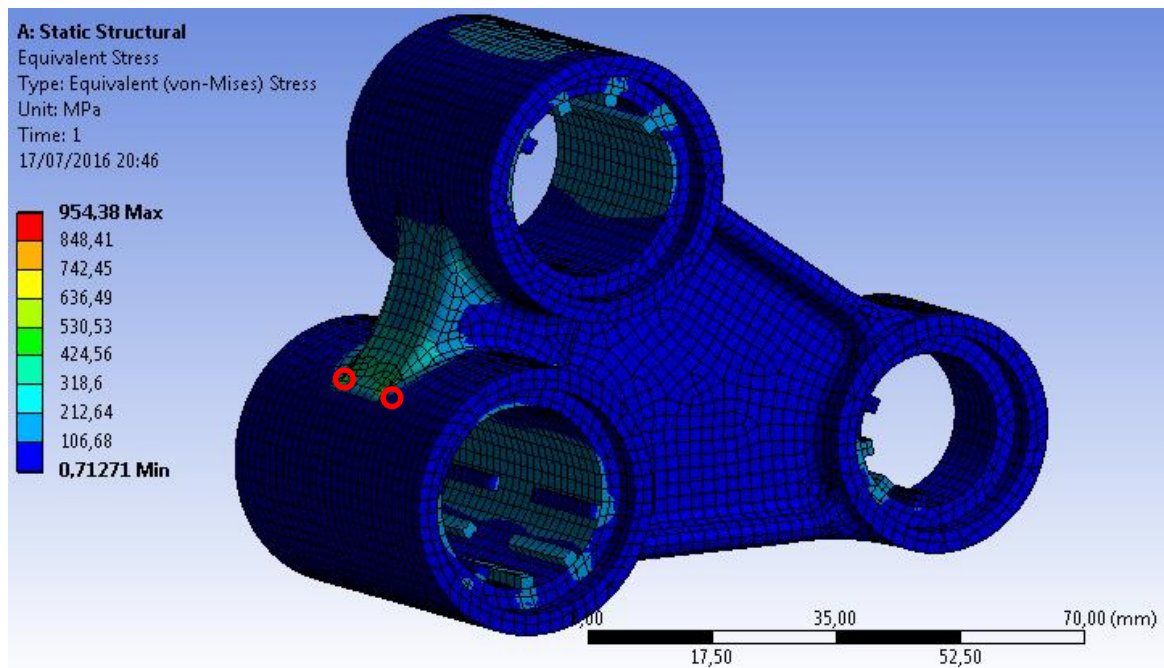


Figura 5.4.2. Proposta 1.

En la segona proposta (*Figura 5.4.3*) es buscava disminuir encara més les tensions incrementant el gruix de la paret corba 2mm per banda, d’aquesta manera el camí que recorrien les tensions no és tant estret entre la unió superior i la inferior. El pes augmentava fins a 229,73g, en canvi les tensions disminuïen respecte la primera proposta però continuaven sent molt més altes que les del balancí original, concretament 807,1MPa en el punt màxim.

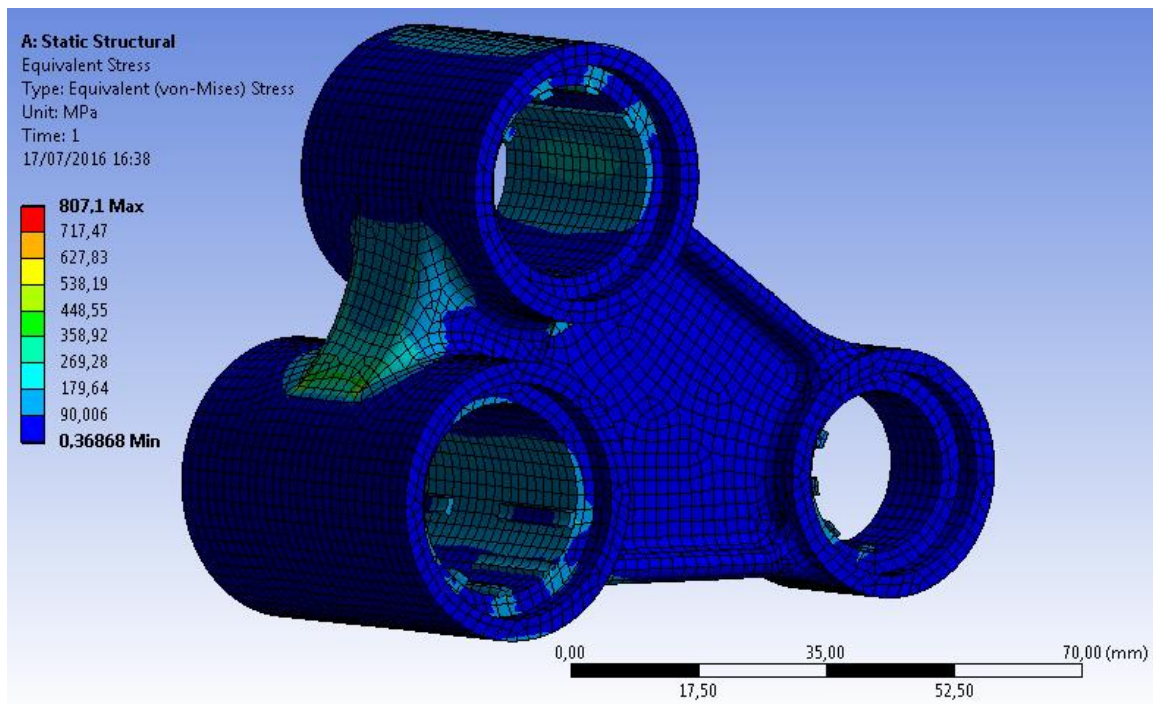


Figura 5.4.3. Proposta 2.

Per reduir el pes, en la tercera proposta (Figura 5.4.4) es va fer un forat en la zona mitja de les tres unions. El pes disminueix de 229,73g a 218,75g, estan ja per sota del pes del balancí original.

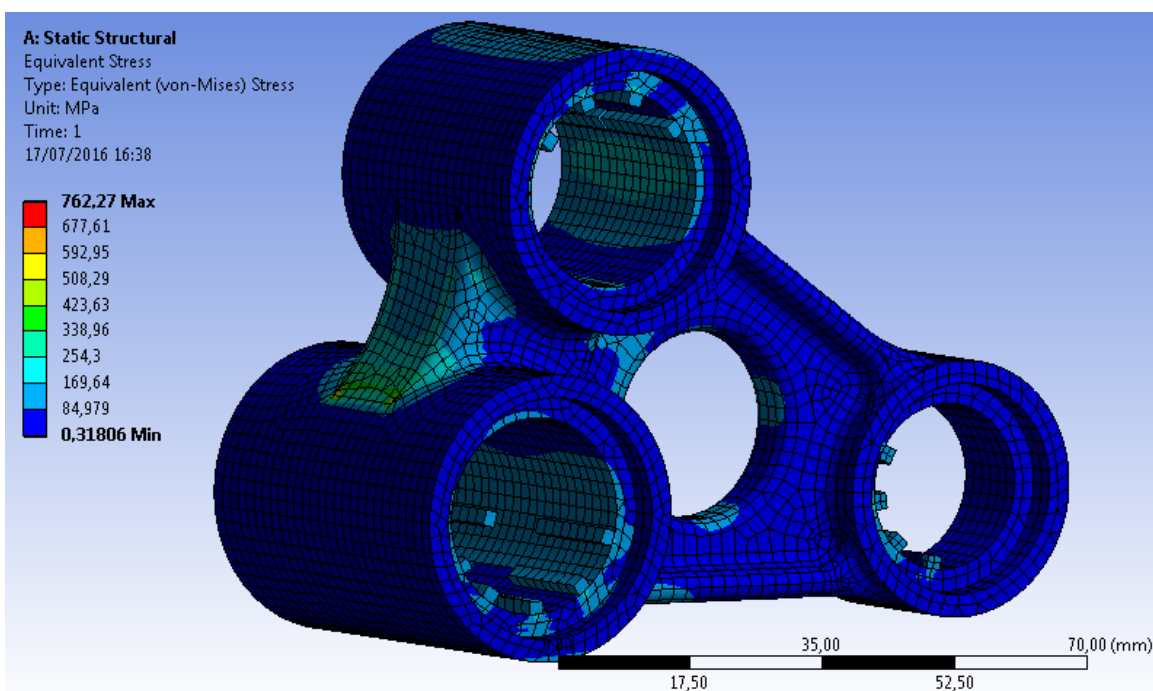


Figura 5.4.4. Proposta 3.

Les tensions màximes en aquest cas disminuïen fins a 762,27MPa, sent molt altes encara. Es va poder veure en la zona del forat augmentaven les tensions.

En la quarta proposta (*Figura 5.4.5*) es va treure el material rebaixat de la part del mig de les unions. El pes va baixar fins a 208,97g però les tensions augmenten considerablement en els radis interior. Per tant, s’haurien d’augmentar més els radis per disminuir aquestes tensions, acabant tenint una espècie de circumferència com en la tercera proposta i un pes semblant.

A diferència de les bieletes en aquest cas només hi havia una zona amb tensions altes, per tant, si els resultats haguessin sortit com tocaven segurament s’hauria aconseguit reduir les tensions i el pes respecte el balancí original. Tot i que la reducció de pes hauria estat molt baixa. Això dóna a veure que també és una peça estudiada i està bastant al límit en quan a tensions i pes.

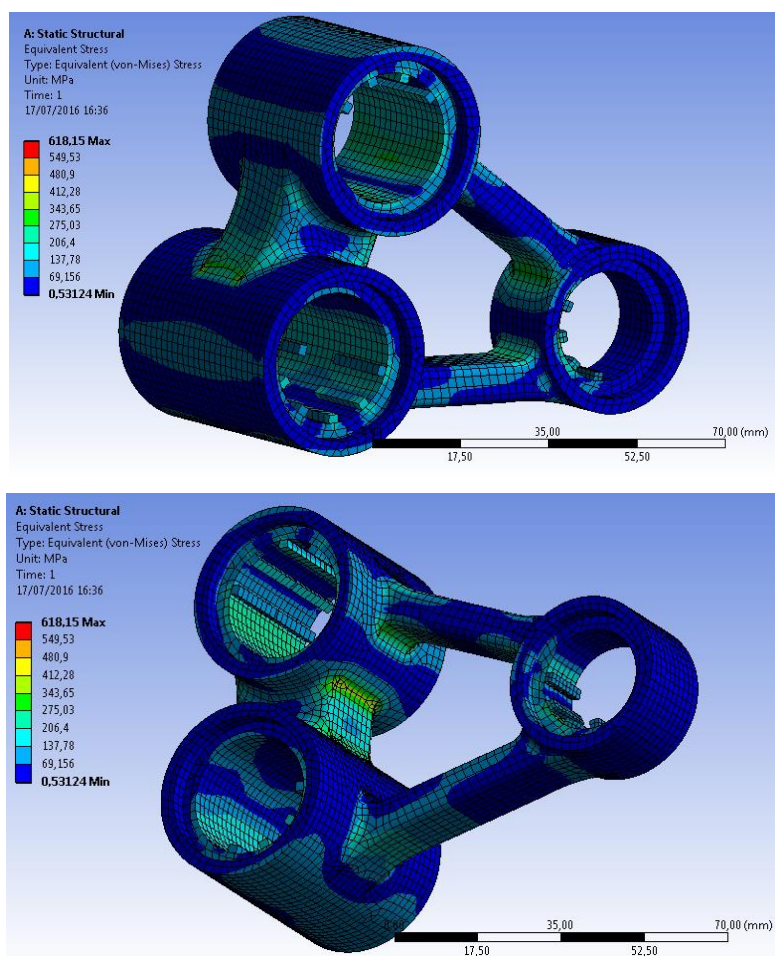


Figura 4.5.5. Proposta 4.

6. CONCLUSIONS

En aquest estudi s’ha arribat l’objectiu de determinar les tensions màximes en les bieletes i el balancí d’una moto de motocròs i proposar millores en aquestes peces.

Per tal d’assolir l’objectiu, s’ha simulat un salt de gran alçada amb un programa de dos dimensions i s’han extret les forces de les bieletes i el balancí en el moment que la moto cau al terra i l’amortidor arriba al seu límit de recorregut. La complexitat de simular un salt gran i que el model es comporti com a la realitat fa que s’hagin de fer algunes aproximacions en les constants de les suspensions i l’amortidor, així com simular el comportaments del pneumàtic amb un doble terra perquè resultats obtinguts siguin coherents.

Amb les forces trobades i mitjançant el programa d’elements finits s’han pogut extreure les tensions. Durant l’anàlisi amb els elements finits s’ha aconseguit arribar a una solució fiable per simular el comportament dels rodaments i així obtenir uns resultats de les tensions coherents en les peces analitzades. En canvi, amb el passador de les bieletes no s’ha acabat de trobar una solució del tot bona per representar el seu comportament.

Una vegada trobades les tensions i vistes les zones crítiques de les peces s’han proposat millores per reduir les tensions i el pes de les peces. En el cas de les bieletes s’ha aconseguit rebaixar les tensions de les peces, però per rebaixar les tensions cal afegir material i, per tant, el pes ha augmentat. Tot i treure posteriorment material és difícil baixar el pes de la peça respecte la peça original, a no ser que es donin per bones les tensions a què està sotmesa la peça original i després només es busqui reduir el pes.

En el cas del balancí s’han fet propostes, però en cap s’ha millorat les tensions del balancí original sinó tot el contrari, han augmentat i en alguns casos per molt. A més, el pic de tensió és sempre als mateixos punts i com més fi és el mallat més grans són les tensions, tendint a infinit. Per tant, es suposa que hi pot haver algun problema amb el programa de dibuix 3D o amb el programa d’elements finits, ja que les propostes són coherents.

A diferència de les bieletes, en el balancí només hi havia una zona amb tensions altes, per tant, si els resultats haguessin sortit com tocaven segurament s’hauria aconseguit reduir les tensions i el pes respecte el balancí original. Tot i que la reducció de pes hauria estat molt baixa. Per tant, es veu com reduir les tensions i el pes alhora es una tasca complicada en peces que ja han estat portades pràcticament al límit.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present estudi consta de les següents documents:

- **DOCUMENT 1. MEMÒRIA I ANNEXOS**
 - MEMÒRIA
 - ANNEXOS
 - A – Estudi dinàmic
 - B – Estudi per elements finits
 - C – Geometries
- **DOCUMENT 2. PRESSUPOST**

ANNEX A: ESTUDI DINÀMIC

ANNEX A: ESTUDI DINÀMIC

A.1. La moto

A.1.1. Model escollit

El model escollit és una moto de motocròs de 450cc 4T. Amb la foto lateral de la moto s’amplia amb l’*AutoCAD* a escala real gràcies a que es coneixen mesures que el fabricant facilita, com seria la distància entre eixos. En aquest model concret la distància entre eixos és de 1.494mm. Una vegada escalada la foto es treu l’esquema de la moto (*Figura A.1.1.1*).



Figura A.1.1.1. Model escollit.

Amb l’esquema tret (*Figura A.1.1.2*), posteriorment s’importa al programa de simulació *Working Model 2D* on se li haurà d’assignar propietats com el pes a cada part que conforma l’esquema. Tenint en compte quines parts de la moto real engloba cada part de la moto esquemàtica es calcula el pes de cada una d’aquestes parts i s’assigna (*Taula A.1.1*). Se sap que el pes total de la moto amb el dipòsit ple és de 112Kg.

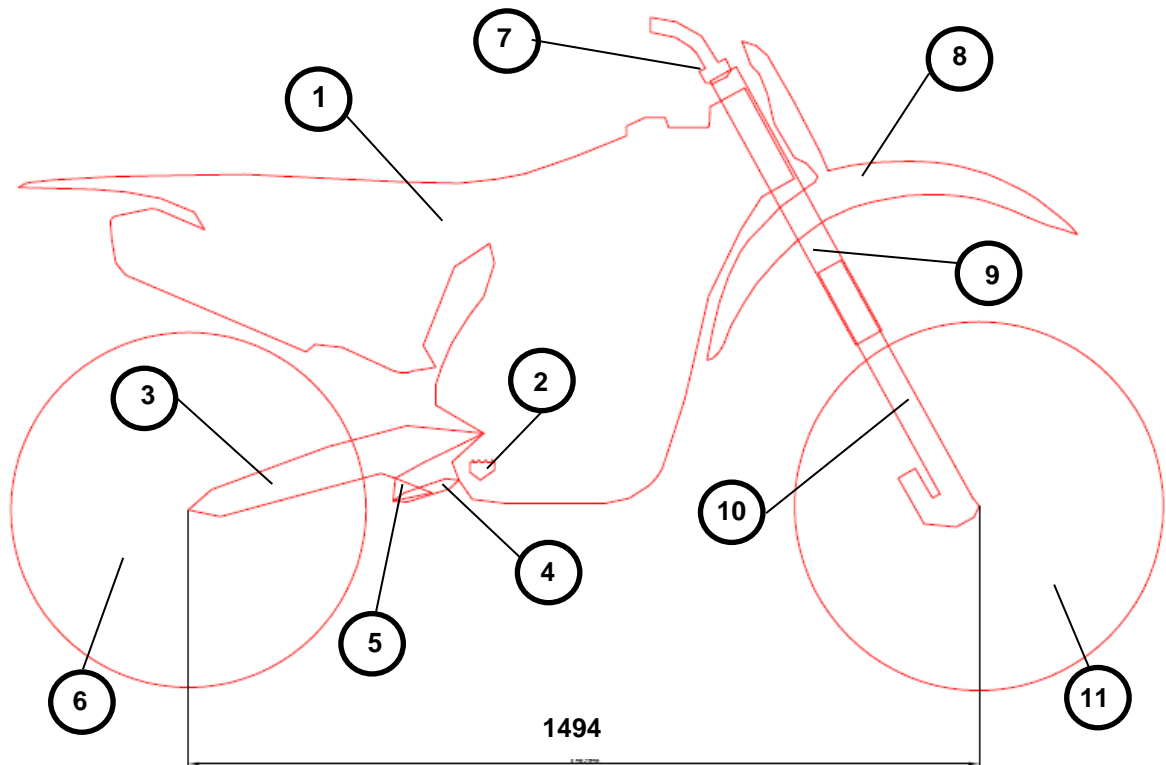


Figura A.1.1.2. Esquema on es pot veure que manté la distància entre eixos de 1.494mm que diu el fabricant. També es poden veure la nomenclatura de les diferents parts

| Nº | Part | Pes (Kg) |
|--------------|---------------------------|------------|
| 1 | Estructura | 71,5 |
| 2 | Estrep | 1 |
| 3 | Basculant | 4,5 |
| 4 | Bieletes | 0,5 |
| 5 | Balanci | 0,5 |
| 6 | Roda posterior | 11 |
| 7 | Manillar | 1,5 |
| 8 | Parafang davanter | 2 |
| 9 | Suspensió (Part superior) | 8 |
| 10 | Suspensió (Part inferior) | 3 |
| 11 | Roda davantera | 8,5 |
| TOTAL | | 112 |

Taula A.1.1. Pes assignat a cada part de l'esquema de la moto. El pes total és de 112Kg.

A.1.2. Suspensió davantera

La suspensió davantera en el món del motocròs ha evolucionat molt els últims 4 anys, ja que s’ha passat de les suspensions hidràuliques amb molla a les suspensions pneumàtiques. Tot i aquest canvi, el comportament és el mateix que el sistema hidràulic amb molla, ja que una de les barres de la suspensió hi ha aire i actua de molla i la segona barra amb va amb oli i actua d’esmorteïdor hidràulic (Figura A.1.2.1).

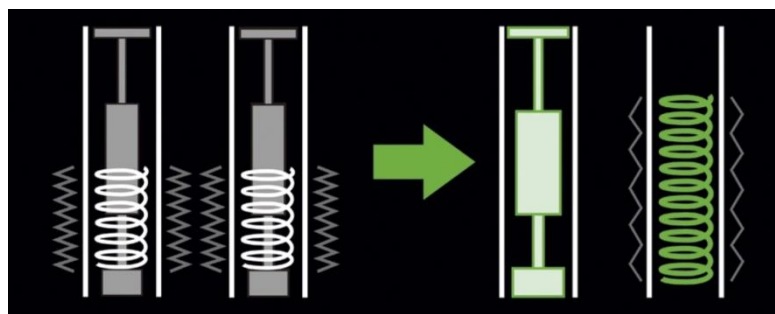


Figura A.1.2.1. Esquema on es pot veure el pas de la suspensió hidràulica amb molla a la nova suspensió amb funció separada, una barra actua d’hidràulic i l’altra de molla.

El comportament de tenir un primer tram més tou i un segon tram més dur era la causa d’utilitzar una molla de constant progressiva o una molla de pas doble. Aquest efecte (Figura A.1.2.2) amb les noves suspensions pneumàtiques s’obté configurant una de les cambres d’aire de la barra pneumàtica. També es pot buscar aquest comportament jugant amb el nivell d’oli, ja que més oli comporta menys espai per l’aire i, per tant, menys compressibilitat.

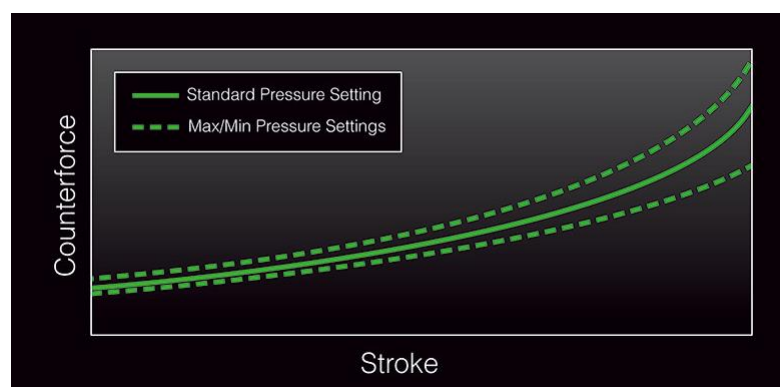


Figura A.1.2.2. Comportament progressiu de la suspensió gràcies a la regulació d’una de les cambres d’aire.

És per això que en la simulació s’ha optat per posar una doble molla amb esmorteïdor. Aquestes dos molles estan posades en sèrie i la constant de la molla superior és més gran que l’inferior per simular aquest comportament progressiu com si hi hagués una molla de constant doble (*Figura A.1.2.3*).

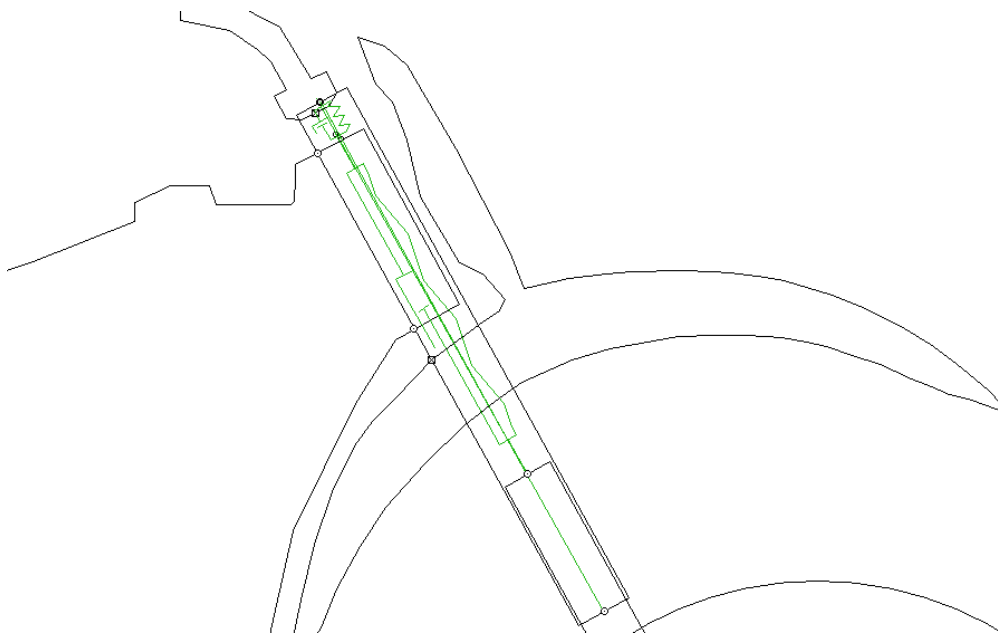


Figura A.1.2.3. Suspensió amb doble molla-esmorteïdor per tal de simular el comportament progressiu de la suspensió real.

A.1.3. Constants de la suspensió i l’amortidor

Les constants de les molles de la suspensió i l’amortidor es treuen del manual de la moto escollida. Per les constants dels esmorteïdors es fa un càlcul aproximat. La constant de les molles de la suspensió davantera és de 4.500N/m, però com que el programa de simulació és en dos dimensions es té en compte com si les molles estiguessin en paral·lel, per tant, la constant seria de 9.000N/m. La segona molla, col·locada a sobre per representar el comportament progressiu se li assigna una de constant de 12.000N/m. Pel que fa l’amortidor la molla té una constant de 56.000N/m, aquesta diferència tant gran entre la constant de la molla de la suspensió davantera amb la de l’amortidor es deu a que l’amortidor té un recorregut molt més curt comparat amb el de la suspensió.

Una vegada conegudes les constants de les molles faltaria calcular quines són les constants dels esmorteïdors. Se sap que la resposta de la vibració d’un cos degut a una excitació per una força externa pot adoptar diferents formes segons la relació C/C_0 com es veu a la *Figura A.1.3.1*.

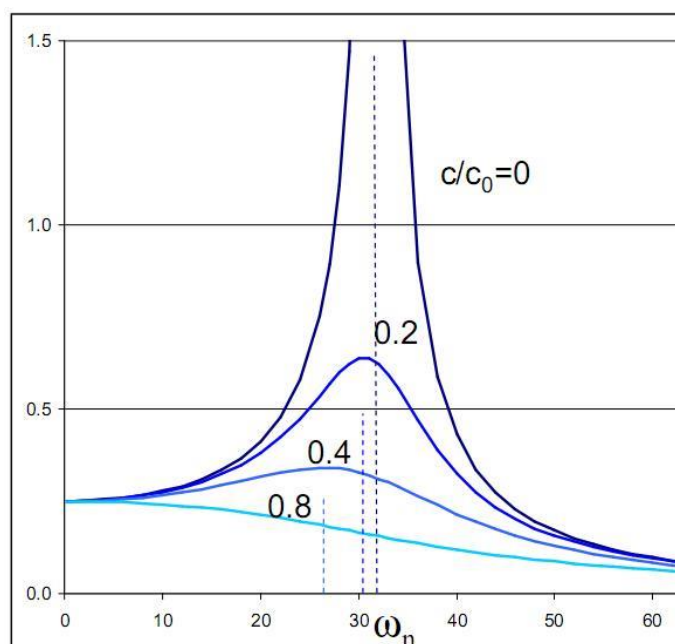


Figura A.1.3.1. Resultat d'una vibració forçada degut a una excitació com seria una força externa.

En el cas de $C/C_0=0$ el cos no té esmorteïment i en el cas de $C/C_0>0$ significa que té esmorteïment. Tant en la suspensió davantera com l'amortidor se suposa que la relació C/C_0 és pràcticament 1, és a dir, l'oscil·lació de les molles queda pràcticament atenuada.

En la *Figura A.1.3.2* la línia contínua, és a dir, la ona sinusoidal seria l'oscil·lació de la molla quan aquesta rep una excitació d'una força exterior, en el cas de la moto vindria a ser quan la moto toca a terra després d'un salt i tant la suspensió com l'amortidor es comprimeixen. La línia discontinua representa la corba de l'esmorteïment crític.

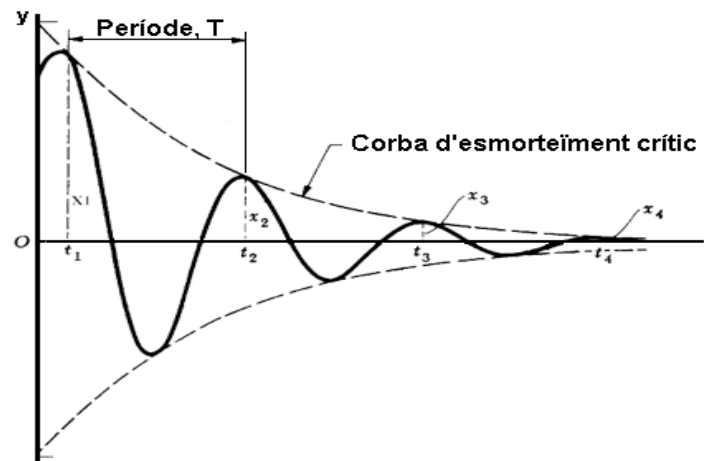


Figura A.1.3.2. La corba contínua representa la vibració de la molla generada per l'excitació d'una força exterior. La línia discontinua representa la corba d'esmoreïment crític.

A continuació es passa a calcular la constant d'esmoreïment corresponent en funció de la constant de la molla i a la massa que absorbeixen, sabent:

$$C_0 = \sqrt{4 \cdot k \cdot m} \quad (\text{Eq.1})$$

On:

- k (Constant de la molla)
- m (Massa del pilot i massa suspesa de la moto en proporció)

La massa suspesa és la massa que hi ha sobre la suspensions, inclou el motor, la major part de l'estructura, el dipòsit, el seient i el pilot, entre d'altres. En canvi, la massa no suspesa seria la massa que va amunt i avall amb la roda, inclou les rodes, els eixos, la suspensió davantera, les pines de freno i el basculant. Com s'ha dit per el càlcul de les constants d'esmoreïment, tant la massa suspesa com la massa del pilot són en proporció ja que no pertoca la mateixa quantitat de pes en l'amortidor que en les suspensió davantera perquè el pilot s'asseu sempre sobre l'eix de l'amortidor posterior després de la caiguda d'un salt. Per tant, s'estima que per l'amortidor pertocuen uns 100Kg i en la suspensió davantera uns 50Kg:

- 100Kg → 2/3 (Massa no suspesa +Massa del pilot)
- 50Kg → 1/3 (Massa no suspesa +Massa del pilot)

On: Massa no suspesa = 70Kg

Massa del pilot = 80Kg

Per tant:

➤ Suspensió davantera

- Molla tova:

$$C_0 = \sqrt{4 \cdot k \cdot m} = \sqrt{4 \cdot 12.000 \cdot 50} = 1.833N/m \quad (\text{Eq.2})$$

On: $k = 12.000N/m$
 $m = 50Kg$

- Molla dura:

$$C_0 = \sqrt{4 \cdot k \cdot m} = \sqrt{4 \cdot 9.000 \cdot 50} = 1.341N/m \quad (\text{Eq.3})$$

On: $k = 9.000N/m$
 $m = 50Kg$

➤ Amortidor posterior

$$C_0 = \sqrt{4 \cdot k \cdot m} = \sqrt{4 \cdot 56.000 \cdot 100} = 4.732N/m \quad (\text{Eq.4})$$

On: $k = 56.000N/m$
 $m = 100Kg$

Un cop trobat el valor de C_0 es passa a buscar el valor de C , prenent com a relació $C/C_0 = 0,9$:

➤ Suspensió davantera

- Molla tova:

$$C = 0,9 \cdot C_0 = 0,9 \cdot 1.833 = 1.650N/m = \mathbf{1,7N/mm} \quad (\text{Eq.5})$$

- Molla dura:

$$C = 0,9 \cdot C_0 = 0,9 \cdot 1.341 = 1.206N/m = \mathbf{1,2N/mm} \quad (\text{Eq.6})$$

➤ Amortidor posterior

$$C = 0,9 \cdot C_0 = 0,9 \cdot 4.732 = 4.258N/m = \mathbf{4,5N/mm} \quad (\text{Eq.7})$$

Els càlculs realitzats són aproximats, ja que no se sap ben bé quina és la relació C/C_0 , però com que se sap que és pròxima a la unitat, per això s’ha agafat un valor de 0,9. D’aquesta manera l’oscil·lació queda atenuada pràcticament com passa a la realitat, mai es veu un pilot anar rebotant després d’un salt.

Un cop entrats els valors de les constants al programa de simulació, aquestes constants funcionen bé, és a dir, el moviment de la moto s’assembla al moviment real en el moment de la caiguda d’un salt. D’aquesta manera es pot dir que els resultats que s’extreguin de la simulació són vàlids ja que s’han entrat valors de la moto reals i aquesta es comporta com toca.

A.2. El pilot

El pilot una vegada equipat i tot té una alçada de 1,90m i un pes de 80Kg. Cada una de les parts que conforme l’esquema del pilot (*Figura A.2.1*) se li assignarà el pes en funció de la proporció que li pertoca (*Taula A.2*).

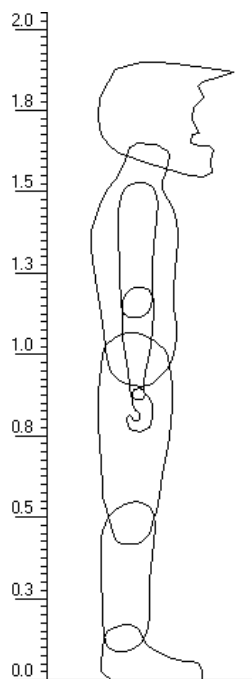


Figura A.2.1. Pilot.

| | % Pes total del cos | Pes (Kg) |
|---------------|----------------------------|-----------------|
| Cap | 8 | 6,4 |
| Tronc | 50 | 40 |
| Braç (x2) | 5,4 | 4,32 |
| Avantbraç(x2) | 3,2 | 2,56 |
| Mà(x2) | 1,4 | 1,12 |
| Cuixa(x2) | 20,2 | 16,16 |
| Cama(x2) | 8,8 | 7,04 |
| Peu (x2) | 3 | 2,4 |
| TOTAL | | 80 |

Taula A.2. Pes assignat a cada una de les parts del cos del pilot. El pes total és de 80Kg.

A.3. Resultats de la simulació

A.3.1. Moto-pilot

La moto i el pilot s'uniran pel peu i la mà. La mà s'unirà al manillar amb una unió mòbil i el peu amb l'estrep amb una unió mòbil també. D'aquesta manera es tindrà tot el cos articulat com si fos un mecanisme subjectat a la moto (*Figura A.3.1.1*). Però perquè el cos no es posi en postures no desitjades durant la simulació en les articulacions mòbils del cos s'hi posen les molles a torsió per limitar i absorbir el moviment tal i com fan les articulacions del cos.

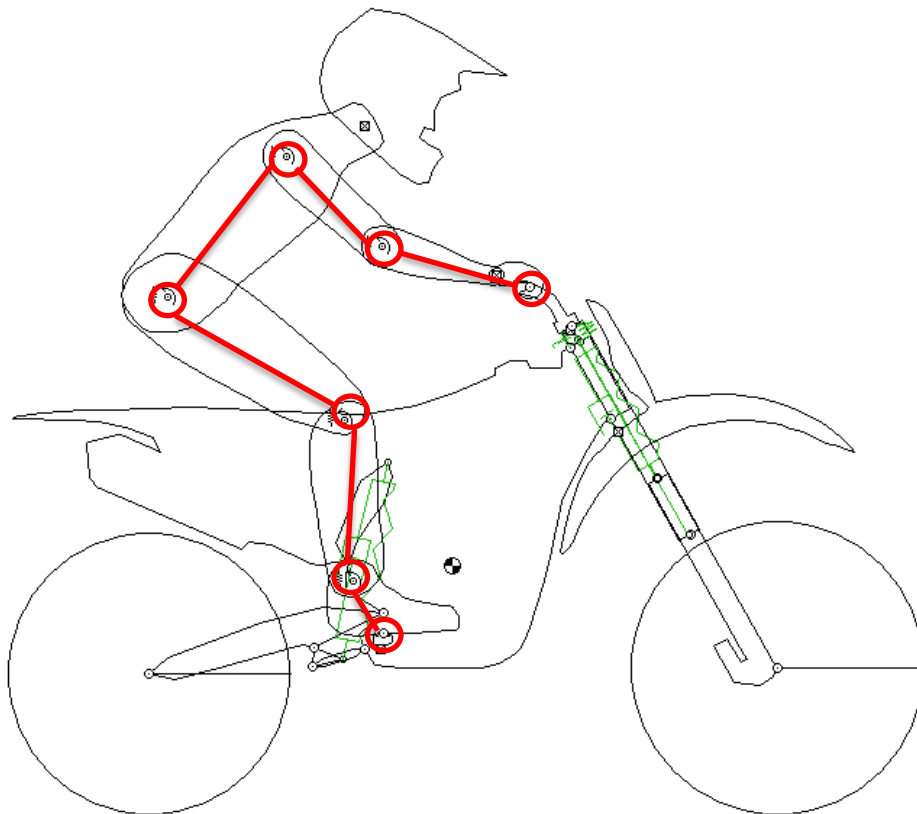


Figura A.3.1.1. Pilot sobre la moto amb postura de salt. El pilot és com un mecanisme articulat unit a la moto.

A.3.2. Doble terra

Les simulacions d'un salt des de 2m que s'han fet prèviament han donat un pic molt elevat a l'instant de tocar a terra com es veu a la *Figura A.3.2.1*. Això és la causa de que pel programa les rodes són rígides i no hi ha pneumàtic. Aquest problema s'ha solucionat amb un doble terra com es veu a la *Figura A.3.2.2*. Aquest doble terra està format per un terra fix i un altre de mòbil sense pes. Els dos terres estan units per un extrem amb una articulació mòbil i pel mig amb una molla que té la constant d'un pneumàtic. Per tal que el terra no oscil·li s'hi posa també un esmorteïdor al que se li ha de calcular la constant. D'aquesta forma es simula el comportament del pneumàtic i la gràfica resultant ja no té el pic inici sinó que el punt màxim es troba en el punt màxim de treball de les bieletes com es veu també a la *Figura A.3.2.1*.

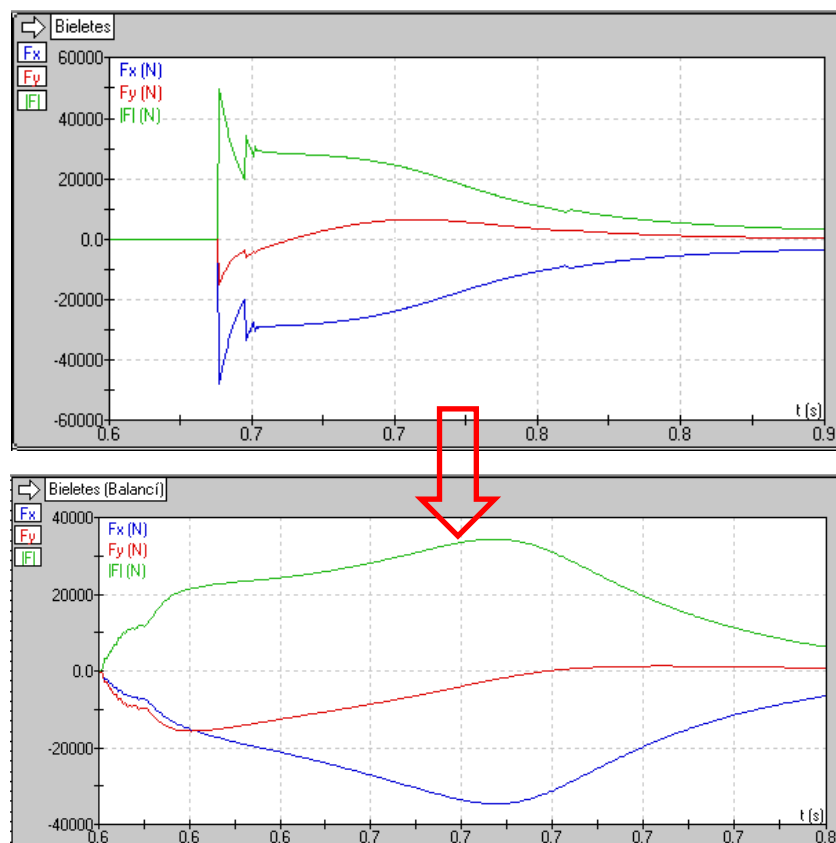


Figura A.3.2.1. La primer gràfic és amb terra normal on apareix el pic degut a la falta del pneumàtic i la segona gràfica és amb el doble terra que simula el pneumàtic. Com es pot veure en el segon gràfic desapareix el pic.

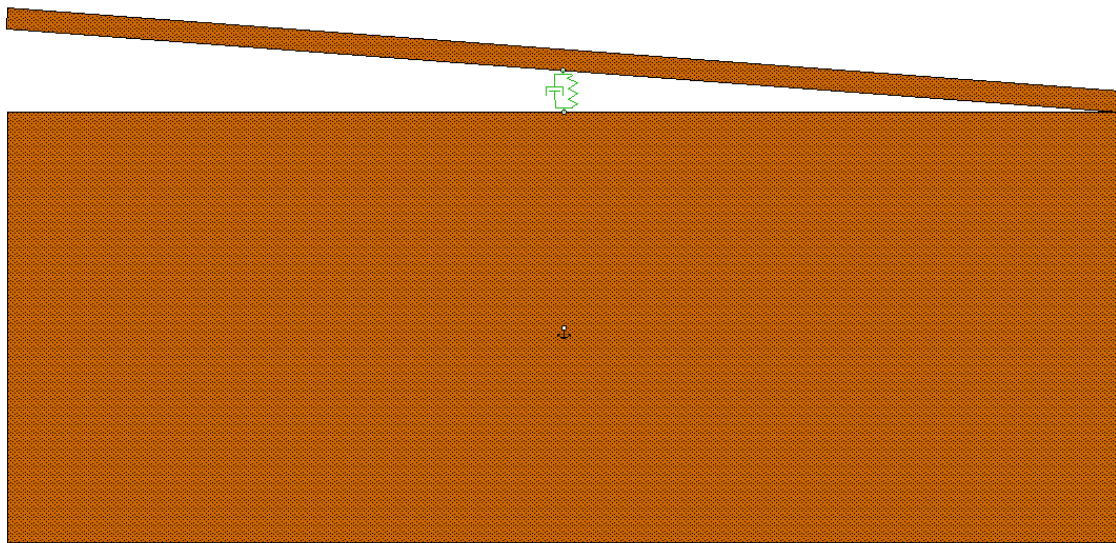


Figura A.3.2.2. Doble terra articulat per un cantó i amb una molla i esmorteïdor al mig.

La constant de l’esmorteïdor es calcula igual com s’ha fet amb les suspensions de la moto i l’amortidor:

$$C_0 = \sqrt{4 \cdot k \cdot m} = \sqrt{4 \cdot 140.000 \cdot 70} = 6.260N/m \quad (\text{Eq.8})$$

$$C = 0,9 \cdot C_0 = 0,9 \cdot 6.260 = 5.634N/m = \mathbf{5,6N/mm} \quad (\text{Eq.9})$$

Cal afegir que el doble terra utilitzat només és vàlid per una roda, o bé, si es simula la caiguda de la moto amb inclinació cap endarrere on la roda de darrera és la primera a entrar en contacte amb el doble terra i l’amortidor arriba al seu màxim abans que la roda davantera toqui a terra. En cas contrari s’hauria d’afegir un altre doble terra per simular el pneumàtic de la roda davantera, però complica molt la simulació.

Una altra solució que no viable, seria fer un sol doble terra però llavors la moto hauria de caure completament plana, és a dir, les dues rodes alhora. Aquesta solució no és viable, ja que les dues rodes haurien de caure amb la mateixa força i això no passa, a part la molla i l’esmorteïdor s’haurien de configurar tenint en compte que el doble terra simula el pneumàtic de la roda davantera i la roda posterior.

A.3.3. Validació

Un cop el moviment del pilot i de la moto són els correctes, s’extreuen les gràfiques d’altres punts de la moto, a part dels punts de les bieletes i el balancí, per veure si els resultats són coherents. Si s’extreuen les gràfiques de l’eix de la roda (*Figura A.3.3.1*) i del punt de recolzament del peu (*Figura A.3.3.2*) les gràfiques tenen la mateixa forma, aquesta és una bona senyal perquè les forces es transmeten de la mateixa forma, tot i que amb valors molt inferiors. És el valor del peu el que fa veure que la simulació és bona, ja que el valor de la força és unes tres vegades el pes del cos en un instant de temps i el pilot ja ho pot aguantar.

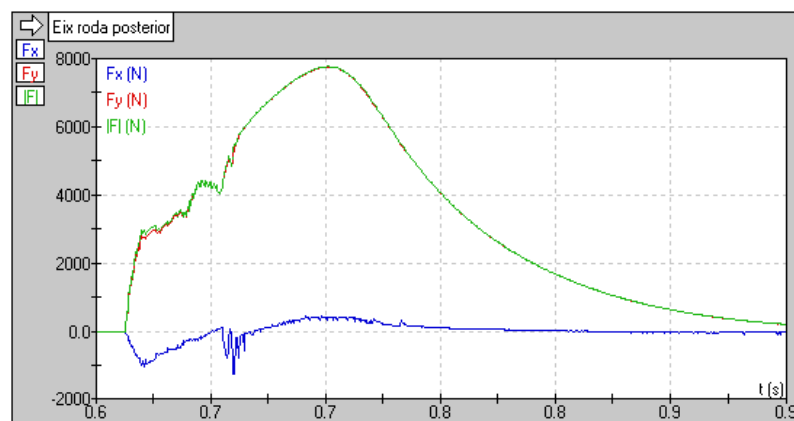


Figura A.3.3.1. Gràfica de la força en l'eix de la roda posterior.

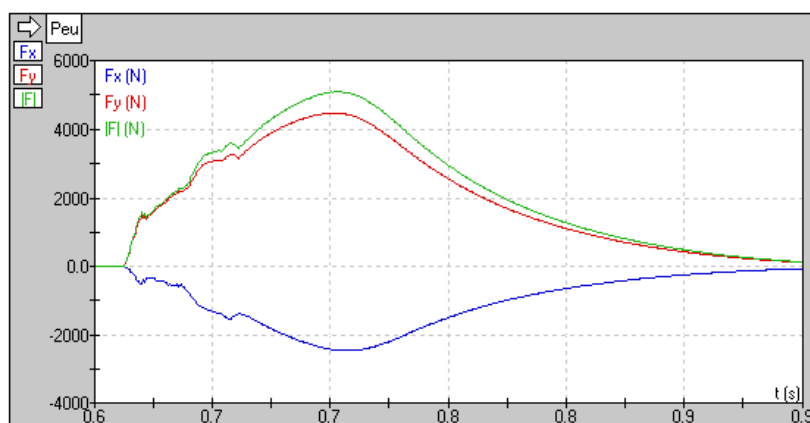


Figura A.3.3.2. Gràfica de la força en el punt de recolzament del peu.

A.3.4. Resultats en les bieletes

Les bieletes se sap que treballen a tracció (*Figura A.3.4.1*). En la gràfica de la unió de les bieletes amb el balancí (*Figura A.3.4.2*) ens dona valors de F_x i F_y , això és perquè el programa llegeix les forces en la posició que es troba la peça en aquell moment. En aquest cas les bieletes es troben inclinades és per això que hi ha component x i y. Si s'extreu la gràfica de la unió de les bieletes amb el xassís (*Figura A.3.4.2*), la força resultant és la mateixa l'únic que les F_x i F_y tenen signe oposat, per tant, es comprova que les bieletes treballen a tracció. En el punt màxim la força té un valor de 31.054,77N..

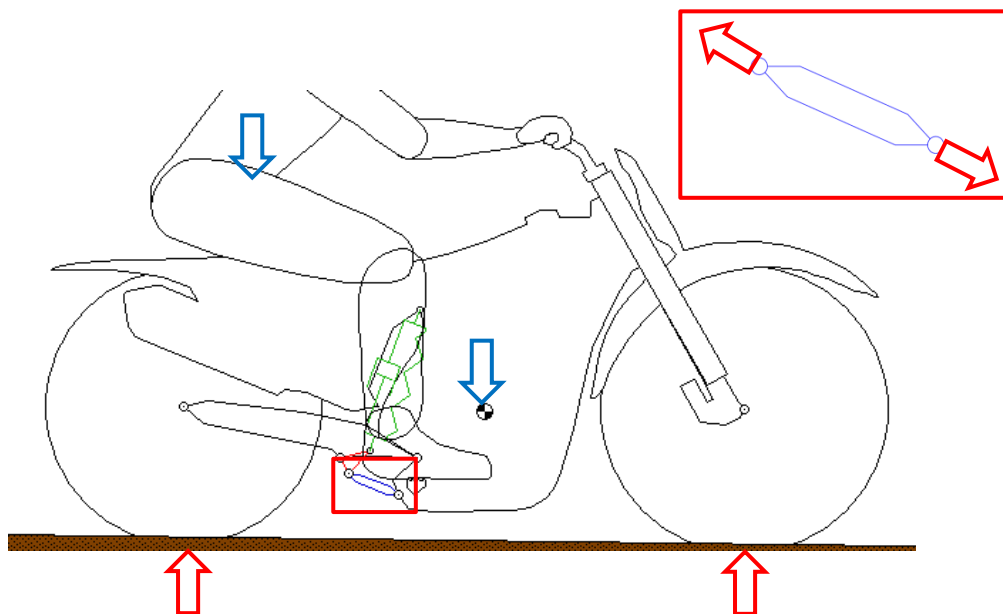


Figura A.3.4.1. Forces que apareixen a les bieletes.

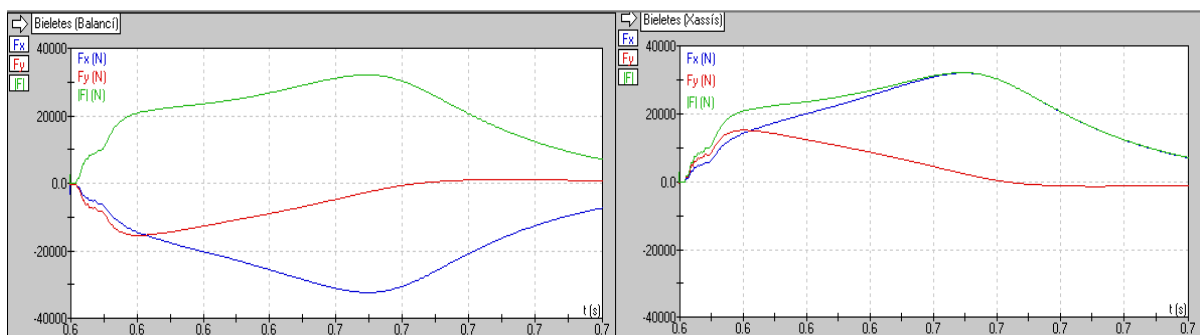


Figura A.3.4.2. Gràfica de la força en la unió de les bieletes amb el balancí i la gràfica de la unió de les bieletes amb el xassís. Es pot veure que la força resultant és la mateixa, l'únic que F_x i F_y tenen els signes oposats, corroborant així que les bieletes treballen a tracció.

A.3.5. Resultats en el balancí

Igual que les bieletes les forces que es llegeixen en el balancí són en la posició en què es troba en aquell moment (*Figura A.3.5.1*). Per calcular a quines forces està sotmès el balancí s'extreuen les gràfiques de la força de la unió de les bieletes (*Figura A.3.5.2*) i del basculant (*Figura A.3.5.3*). A continuació s'extreuen les taules de valors d'aquestes gràfiques.

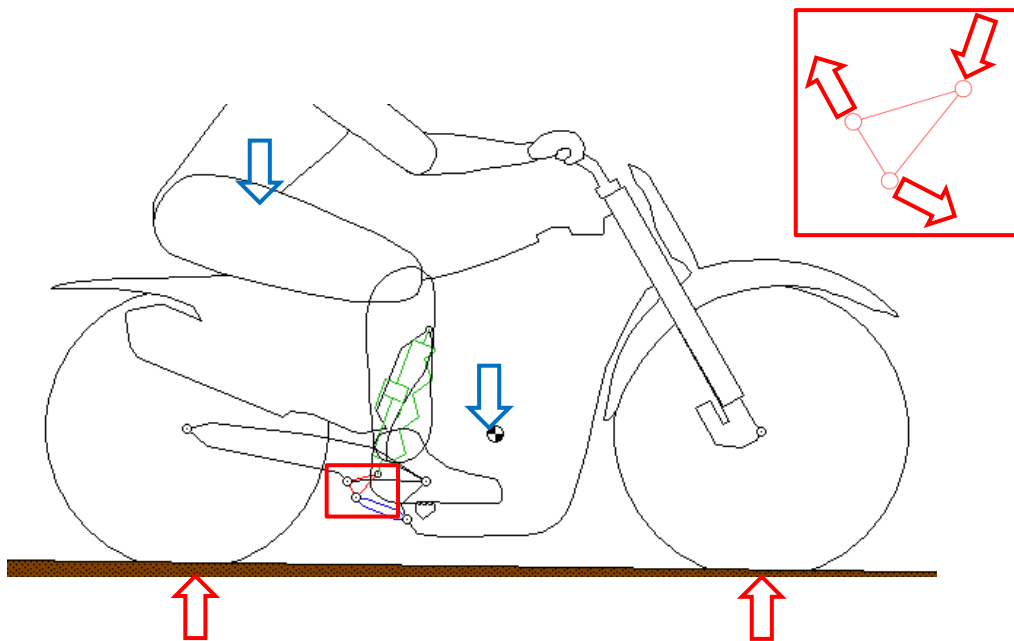


Figura A.3.5.1. Forces que apareixen al balancí.

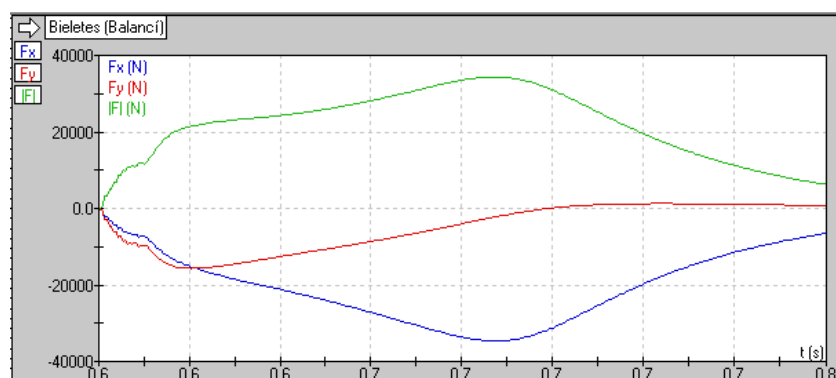


Figura A.3.5.2. Gràfica de la força en la unió de les bieletes amb el balancí.

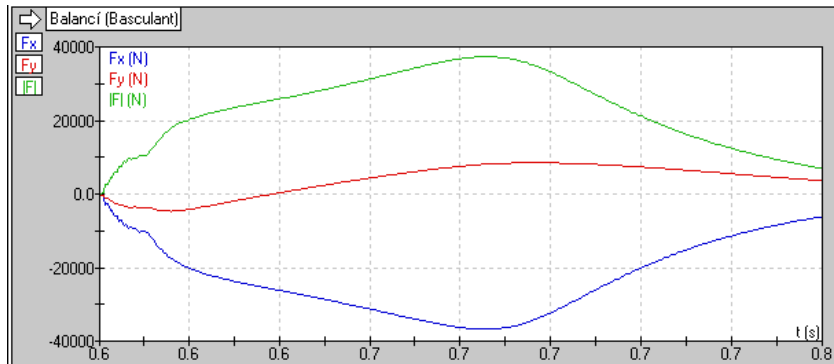
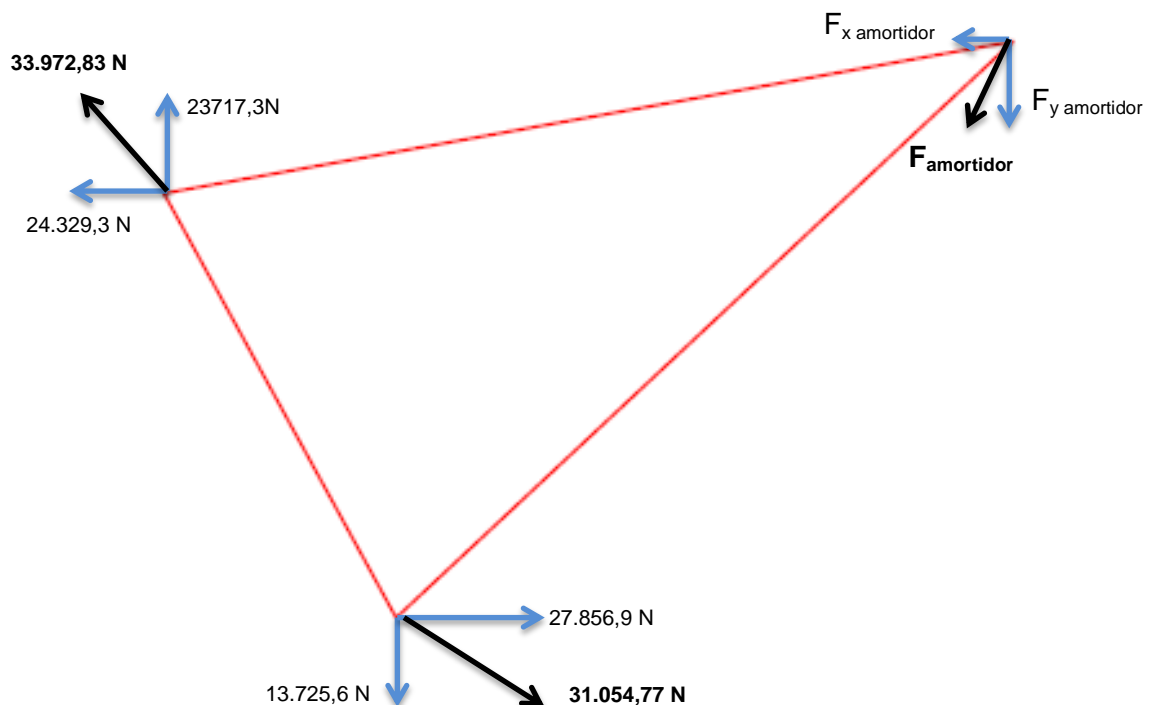


Figura A.3.5.3. Gràfica de la força en la unió del balancí amb el basculant.

Els valors extrets de les forces resultants tenen la seva inclinació pròpia dintre de la inclinació que ja té de per si el balancí. Per això a continuació es representa el balancí en la seva posició màxima amb totes les forces que apareixen, tant les components de les forces en els eixos x i y com les resultants. També es calcula el valor de les forces en la unió amb l'amortidor.



$$F_{x \text{ amortidor}} = 27.856,9 - 24.329,3 = 3.527,6N \quad (\text{Eq.10})$$

$$F_{x \text{ amortidor}} = 23.717,3 - 13725,6 = 9.991,7N \quad (\text{Eq.11})$$

$$F_{\text{amortidor}} = \sqrt{3.527,6^2 + 9.991,7^2} = 10.596,13N \quad (\text{Eq.12})$$

La força màxima en la unió amb les bieletes serà de 31.054,77N, la força màxima de la unió amb el basculant és de 33.972,83N i la força en la unió amb l’amortidor calculada és de 10.596,13N. Per trobar les tensions en el balancí amb l’Ansys s’han d’entrar les forces amb el balancí sense inclinar, per tant, s’han de mesurar els angles del balancí i les bieletes en la posició màxima per saber el què han girar les forces (*Figura A.3.5.4*).

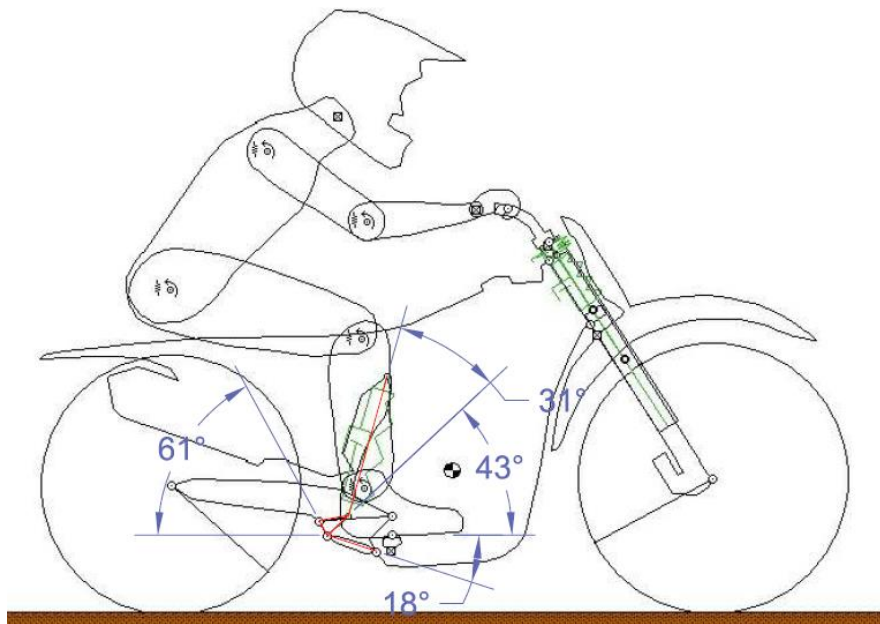


Figura A.3.5.4. Inclinió del balancí en la posició màxima quan l’amortidor arriba al final del seu recorregut.

ANNEX B: ESTUDI PER ELEMENTS FINITS

ANNEX B: ESTUDI PER ELEMENTS FINITS

B.1. Resultats de les bieletes

B.1.1. Càlculs per la simulació dels rodaments

Per simular el rodaments s’ha optat per una representació de les agulles del rodament. En el cas de les bieletes els rodaments són del model equivalent al *SKF HK2016*. Aquest rodament té 22 agulles. Sense contar l’agulla de l’extrem superior i l’extrem inferior queden 10 agulles per semicircumferència. Es representaran les 10 agulles amb 4 prismes rectangulars repartits uniformement (*Figura B.1.1.1*). Aquests prismes són de secció quadrada i cada costat és de la mida del diàmetre de l’agulla i tenen la mateixa llargada que les agulles. Si les agulles tenen un diàmetre de 2mm i una llargada de 16mm, els prismes seran de 2x2x16mm.

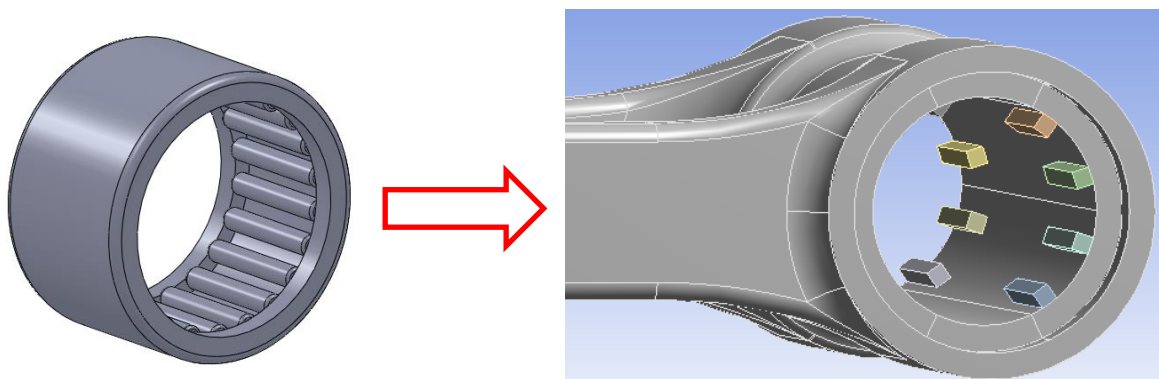
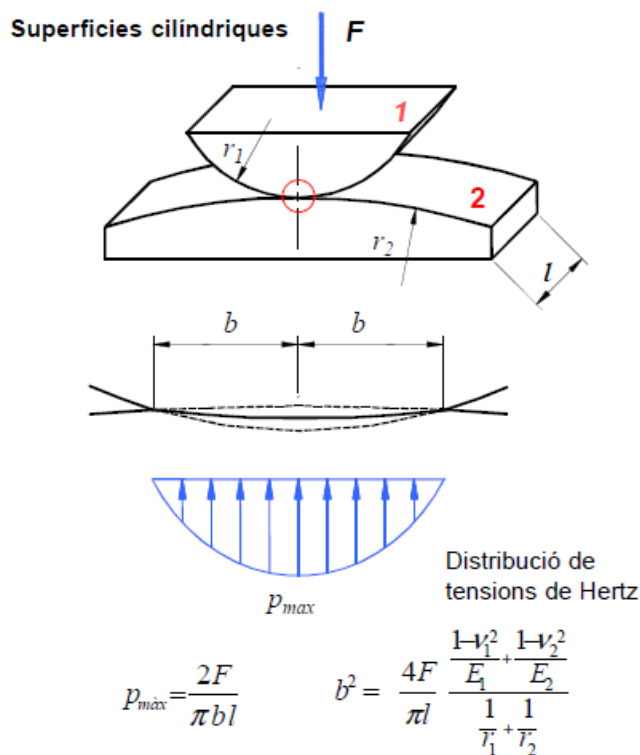


Figura B.1.1.1. El rodament SKF HK2016 es representa amb un model amb 4 prismes rectangulars que representen les agulles del rodament.

En els prismes se’ls hi assigna un mòdul de Young per simular el comportament del material de les agulles del rodament. Aquest mòdul de Young es calcula igualant la deformació que pateix l’agulla, calculada a partir de la tensió de Hertz en funció de la força que s’aplica al rodament, amb la deformació que pateix el prisma, calculada a partir de la fórmula de la deformada del material en funció de la força que s’aplica al rodament.



A partir de la fórmula de b^2 es trobarà b en funció de l' E_{eq} de l'agulla:

$$b = \sqrt{\frac{4F}{\pi l} \frac{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_1^2}{E_1}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15.000}{\pi \cdot 16} \frac{\frac{1-0,29^2}{E_{eq}} + \frac{1-0,29^2}{200.000}}{\frac{1}{1}}} = \sqrt{\frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.1})$$

On: $F = 15.000N$ (Força aplicada al rodament)

$$l = 16mm$$

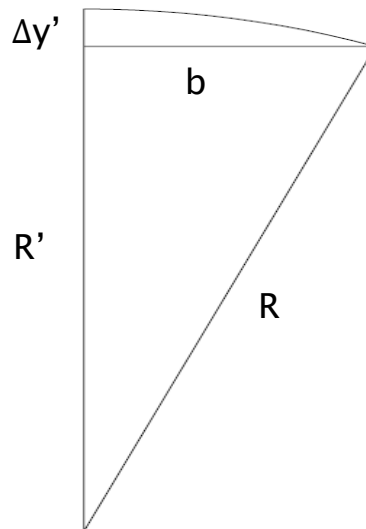
$E_1 = E_{eq}$ (Mòdul de Young de l'agulla del rodament)

$E_2 = 200.000MPa$ (Mòdul de Young de la carcassa del rodament)

$r_1 = 1mm$ (Radi de l'agulla)

$r_2 = \infty$ (Radi de la carcassa en el punt que es recolze l'agulla)

La deformació que pateix l'agulla és la següent:



$$R' = \sqrt{R^2 - b^2} = \sqrt{1 - \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\Delta y' = R - R' = 1 - \sqrt{1 - \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.3})$$

Com que la deformació és per els dos costats:

$$\Delta y = 2\Delta y' = 2 - 2\sqrt{1 - \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.4})$$

A continuació es calcula la deformació del prisma en funció de l'\$E_{eq}\$:

$$\Delta y = y \cdot \varepsilon = y \frac{\sigma}{E_{eq}} = y \frac{2,5F}{A \cdot E_{eq}} = 2 \frac{2,5 \cdot 15.000}{32E_{eq}} \quad (\text{Eq.5})$$

On:

$2,5F$ (És la força que suporta cada prisma, com que hi ha 10 agulles i 4 prismes es divideix 10 entre 4 i dona 2,5)

$$A = 16 \cdot 2 = 32mm^2 \text{ (Superfície d'aplicació de la força)}$$

Igualant les deformacions de les agulles i del prisma (Eq.4) i (Eq.5), es pot deduir la E_{eq} de l'agulla:

$$2 - 2 \sqrt{1 - \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3}} = 2 \frac{2,5 \cdot 15.000}{32E_{eq}} \quad (\text{Eq.6})$$

$$4 - 4 \left(1 - \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 6,47024 \cdot 10^{-3} \right) = \left(2 \frac{2,5 \cdot 15.000}{32E_{eq}} \right)^2 \quad (\text{Eq.7})$$

$$4 - 4 + 4 \cdot \frac{1.294,04905}{E_{eq}} + 4 \cdot 6,47024 \cdot 10^{-3} = \frac{5.493.164,063}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.8})$$

$$\frac{5.176,1962}{E_{eq}} + 0,02588 = \frac{5.493.164,063}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.9})$$

$$E_{eq} = 1.055 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.10})$$

Es troba doncs, que el mòdul de Young equivalent de les agulles del rodaments que van en les bieletes és de 1.055MPa. Aquest mòdul equivalent és el que s'aplicarà a cada prisma rectangular per simular el comportament de les agulles per una força de 15.000N.

B.1.2. Passador

El problema de simular el comportament que té el passador on les forces es reparteixen uniformement no s’ha solucionat. S’han fet probes similars a les dels rodaments afegint peces per intentar simular la repartició gradual de les forces, però els resultat han sigut dolents. Com es pot veure a la *Figura B.1.2.1* i la *Figura B.1.2.2* surten unes tensions molt altes i no uniforme en les zones de les peces afegides per repartir millor les forces, per tant, es veu com no treballen com s’espera, ja que les tensions haurien de ser baixes ja que només serveixen per repartir les forces i, a més a més, el material és més tou.

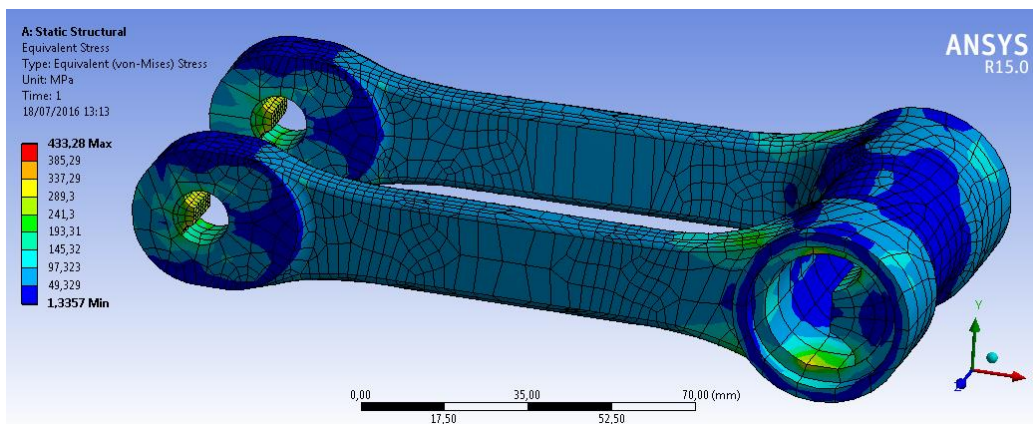


Figura B.1.2.1. Prova amb peces afegides a la zona del passador per simular el repartiment uniforme de les forces.

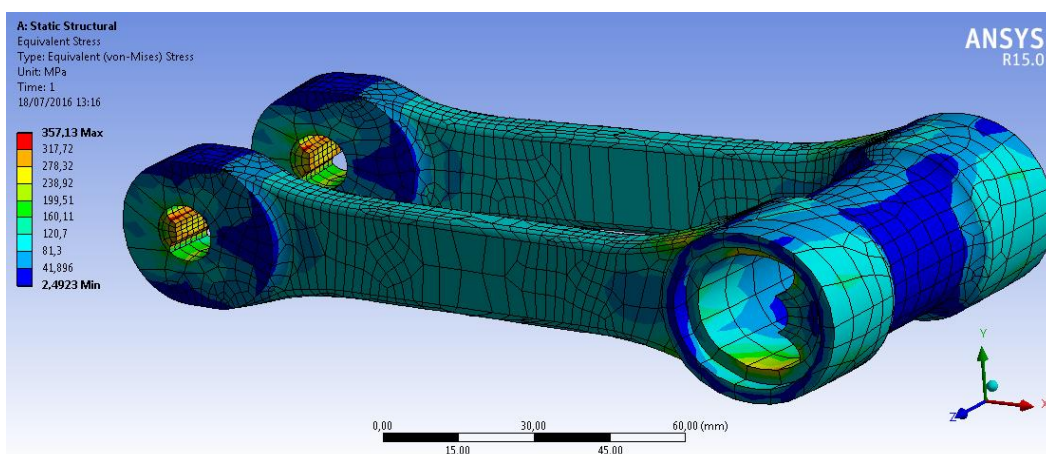


Figura B.1.2.2. Prova amb peces afegides a la zona del passador per simular el repartiment uniforme de les forces.

Després de fer diferents proves amb formes diferents s’ha optat per deixar la superfície d’aplicació de 90°. Aquesta zona d’aplicació tampoc és del tot correcta perquè és difícil saber quins són els graus en què el passador està en contacte amb les bieletes, ja que a també se li ha de sumar que el passador té un desgast i la zona de contacte disminueix. A part, les tensions no es reparteixen gradualment sinó uniformement.

B.2. Resultats del balançí

B.2.1. Càlcul per la simulació dels rodaments

El balançí té el mateix sistema fet servir en les bieletes per simular els rodaments, és a dir, a la posició de cada rodament hi haurà 4 prismes rectangulars. Aquests prismes són de secció quadrada i cada costat és de la mida del diàmetre de l’agulla i tenen la mateixa llargada que les agulles. Estan orientats en la direcció i sentit de la força de la unió que correspon i se’ls hi assigna un mòdul de Young calculat de la mateixa forma que l’apartat anterior. Aquest 4 prismes representen les agulles dels rodaments, en el cas del rodament *SKF HK2016* representen 10 agulles i tindran unes mides de 2x2x16mm i en el cas del rodament *SKF HK1612* que és el que va a la unió del balançí amb l’amortidor representaran 8 agulles i tindran unes mides de 2x2x12mm.

El mòdul de Young dels prismes de la unió del balançí amb les bieletes és el mateix que el calculat a l’apartat anterior. A continuació es calcula el mòdul de Young dels prismes de la unió del balançí amb el basculant.

A partir de la fórmula de b^2 es trobarà b en funció de l’ E_{eq} de l’agulla:

$$b = \sqrt{\frac{4F}{\pi l} \frac{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_1^2}{E_1}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{33.976,8}{2}}{\pi \cdot 16} \frac{\frac{1-0,29^2}{E_{eq}} + \frac{1-0,29^2}{200.000}}{\frac{1}{1}}} = \sqrt{\frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 7,3279 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.11})$$

On: $F = 16.988,4\text{N}$ ($33.976,8\text{N}/2$)(Força aplicada al rodament)

$$l = 16\text{mm}$$

$E_1 = E_{eq}$ (Mòdul de Young de l'agulla del rodament)

$E_2 = 200.000\text{MPa}$ (Mòdul de Young de la carcassa del rodament)

$r_1 = 1\text{mm}$ (Radi de l'agulla)

$r_2 = \infty$ (Radi de la carcassa en el punt que es recolze l'agulla)

La deformació que pateix l'agulla és la següent:

$$R' = \sqrt{R^2 - b^2} = \sqrt{1 - \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 7,3279 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.12})$$

$$\Delta y' = R - R' = 1 - \sqrt{1 - \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 7,3279 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.13})$$

Com que la deformació es per els dos costats:

$$\Delta y = 2\Delta y' = 2 - 2\sqrt{1 - \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 7,3279 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.14})$$

A continuació es calcula la deformació del prisma en funció de l' E_{eq} :

$$\Delta y = y \cdot \varepsilon = y \frac{\sigma}{E_{eq}} = y \frac{2,5F}{A \cdot E_{eq}} = 2 \frac{2,5 \frac{33.976,8}{2}}{32E_{eq}} \quad (\text{Eq.15})$$

On:

$2,5F$ (És la força que suporta cada prisma, com que hi ha 10 agulles i 4 prismes es divideix 10 entre 4 i dona 2,5)

$$A = 16 \cdot 2 = 32mm^2 \quad (\text{Superfície d'aplicació de la força})$$

Igualant les deformacions de les agulles i del prisma (Eq.14) i (Eq.15), es pot deduir la E_{eq} de l'agulla:

$$2 - 2 \sqrt{1 - \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 7,3279 \cdot 10^{-3}} = 22 \frac{2,5 \cdot \frac{33.976,8}{2}}{32E_{eq}} \quad (\text{Eq.16})$$

$$4 - 4 \left(1 - \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 4 \cdot 7,3279 \cdot 10^{-3} \right) = \left(2 \frac{2,5 \cdot \frac{33.976,8}{2}}{32E_{eq}} \right)^2 \quad (\text{Eq.17})$$

$$4 - 4 + 4 \cdot \frac{1.465,58819}{E_{eq}} + 4 \cdot 7,3279 \cdot 10^{-3} = \frac{7.046.038,441}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.18})$$

$$\frac{5.862,35276}{E_{eq}} + 0,02931 = \frac{7.046.038,441}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.19})$$

$$E_{eq} = 1.195 \text{ MPa} \quad (\text{Eq.20})$$

Es troba doncs, que el mòdul de Young equivalent de les agulles del rodaments que van en la unió del balancí amb el basculant és de 1.195MPa. Aquest mòdul equivalent és el que s'aplicarà a cada prisma rectangular per simular el comportament de les agulles per una força de 16.988,4N (33.976,8N/2).

Finalment es calcula el mòdul de Young dels prismes de la unió del balancí amb l'amortidor.

A partir de la fórmula de b^2 es trobarà b en funció de l' E_{eq} de l’agulla:

$$b = \sqrt{\frac{4F}{\pi l} \frac{\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10.596}{\pi \cdot 12} \frac{\frac{1-0,29^2}{E_{eq}} + \frac{1-0,29^2}{200.000}}{\frac{1}{1}}} = \sqrt{\frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.21})$$

On: $F = 10.596\text{N}$ (Força aplicada al rodament)

$$l = 12\text{mm}$$

$E_1 = E_{eq}$ (Mòdul de Young de l’agulla del rodament)

$E_2 = 200.000\text{MPa}$ (Mòdul de Young de la carcassa del rodament)

$r_1 = 1\text{mm}$ (Radi de l’agulla)

$r_2 = \infty$ (Radi de la carcassa en el punt que es recolze l’agulla)

La deformació que pateix l’agulla és la següent:

$$R' = \sqrt{R^2 - b^2} = \sqrt{1 - \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.22})$$

$$\Delta y' = R - R' = 1 - \sqrt{1 - \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.23})$$

Com que la deformació es per els dos costats:

$$\Delta y = 2\Delta y' = 2 - 2\sqrt{1 - \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3}} \quad (\text{Eq.24})$$

A continuació es calcula la deformació del prisma en funció de l' E_{eq} :

$$\Delta y = y \cdot \varepsilon = y \frac{\sigma}{E_{eq}} = y \frac{2F}{A \cdot E_{eq}} = 2 \frac{2 \cdot 10.596}{24 E_{eq}} \quad (\text{Eq.25})$$

On:

$2F$ (És la força que suporta cada prisma, com que hi ha 8 agulles i 4 prismes es divideix 8 entre 4 i dóna 2)

$$A = 12 \cdot 2 = 24 \text{mm}^2 \quad (\text{Superfície d'aplicació de la força})$$

Igualant les deformacions de les agulles i del prisma (Eq.24) i (Eq.25), es pot deduir la E_{eq} de l'agulla:

$$2 - 2 \sqrt{1 - \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3}} = 2 \frac{2 \cdot 10.596}{24 E_{eq}} \quad (\text{Eq.26})$$

$$4 - 4 \left(1 - \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 5,1486 \cdot 10^{-3} \right) = \left(2 \frac{2 \cdot 10.596}{24 E_{eq}} \right)^2 \quad (\text{Eq.27})$$

$$4 - 4 + 4 \cdot \frac{1029,7194}{E_{eq}} + 4 \cdot 5,1486 \cdot 10^{-3} = \frac{3.118.756}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.28})$$

$$\frac{4.118,8776}{E_{eq}} + 0,02059 = \frac{3.118.756}{E_{eq}^2} \quad (\text{Eq.29})$$

$$E_{eq} = 755 \text{MPa} \quad (\text{Eq.30})$$

Es troba doncs, que el mòdul de Young equivalent de les agulles del rodaments que van en la unió del balancí amb l’amortidor és de 755MPa. Aquest mòdul equivalent és el que s’aplicarà a cada prisma rectangular per simular el comportament de les agulles per una força de 10.596N.

Una vegada calculats els mòduls de Young, en aquest cas del balancí, també s’ha de calcular quines forces s’apliquen a cada prisma de la unió amb les bieletes i a la unió amb l’amortidor. En la unió amb les bieletes es dividiran els 31.054,77N entre 2 perquè hi ha dos rodaments, per tant, s’aplicarà 15.527,385N a cada rodament. La força en el rodament no es repartirà per igual en cada prisma, sinó que els prismes dels extrems se’ls hi aplicarà menys força que els del mig per tal de representar el repartiment gradual de les forces. En els prismes dels extrems s’aplicarà una proporció de 100/500 a cada prisma i en els interior de 150/500.

Prismes dels extrems:

$$\frac{10.596 \cdot 100}{500} = 2.119,2N \quad (\text{Eq.30})$$

Prismes interiors:

$$\frac{10.596 \cdot 150}{500} = 3.119,2N \quad (\text{Eq.31})$$

En la unió amb l’amortidor s’aplicarà una força de 10.596,13N repartits entre els prismes rectangulars com en la unió amb les bieletes (*Figura 5.2.4*).

Prismes dels extrems:

$$\frac{(31.054,8/2) \cdot 100}{500} = 3.105,5N \quad (\text{Eq.32})$$

Prismes interiors:

$$\frac{(31.054,8/2) \cdot 150}{500} = 4.658,2N \quad (\text{Eq.33})$$

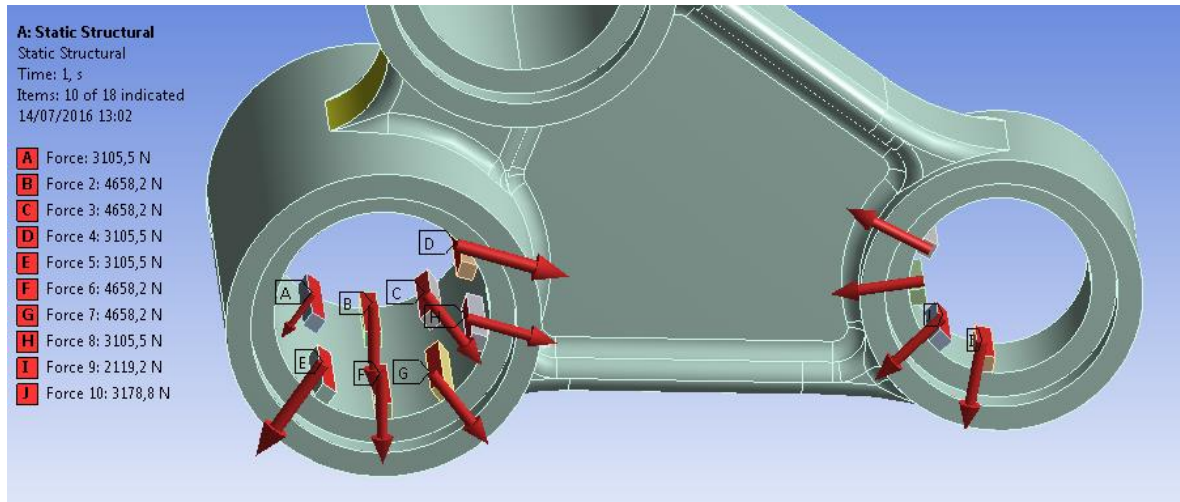
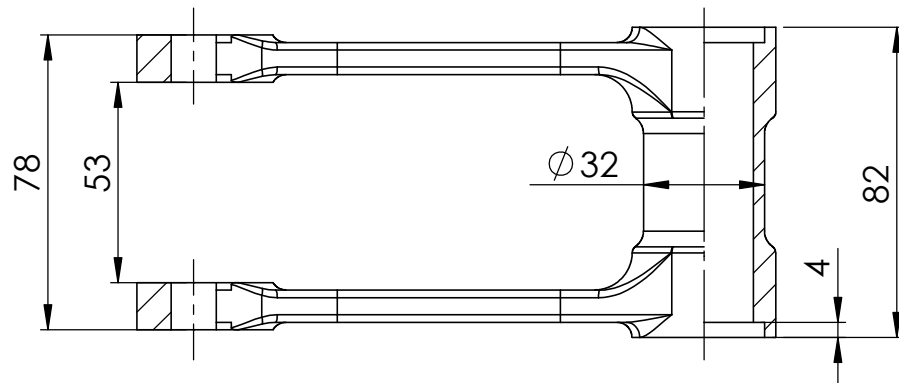
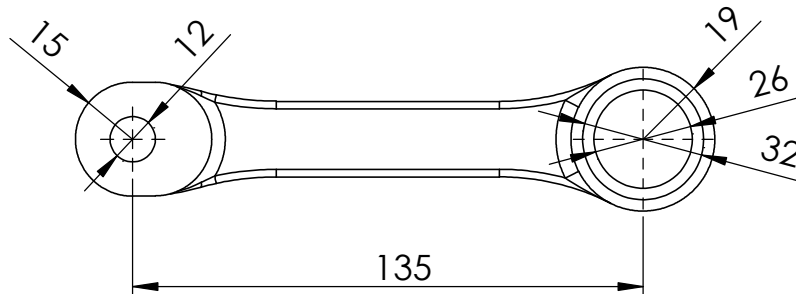
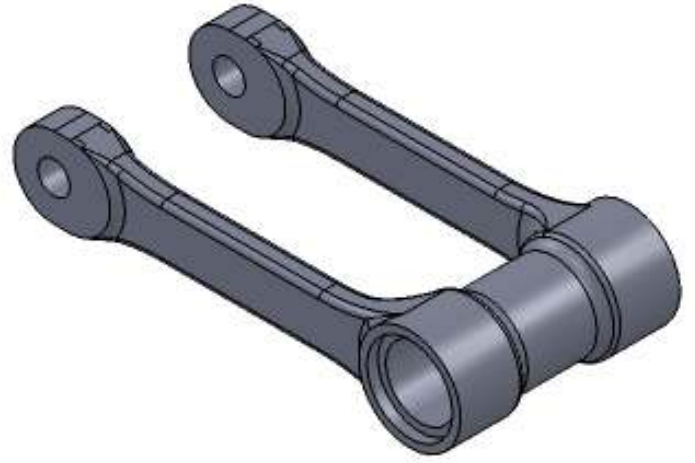

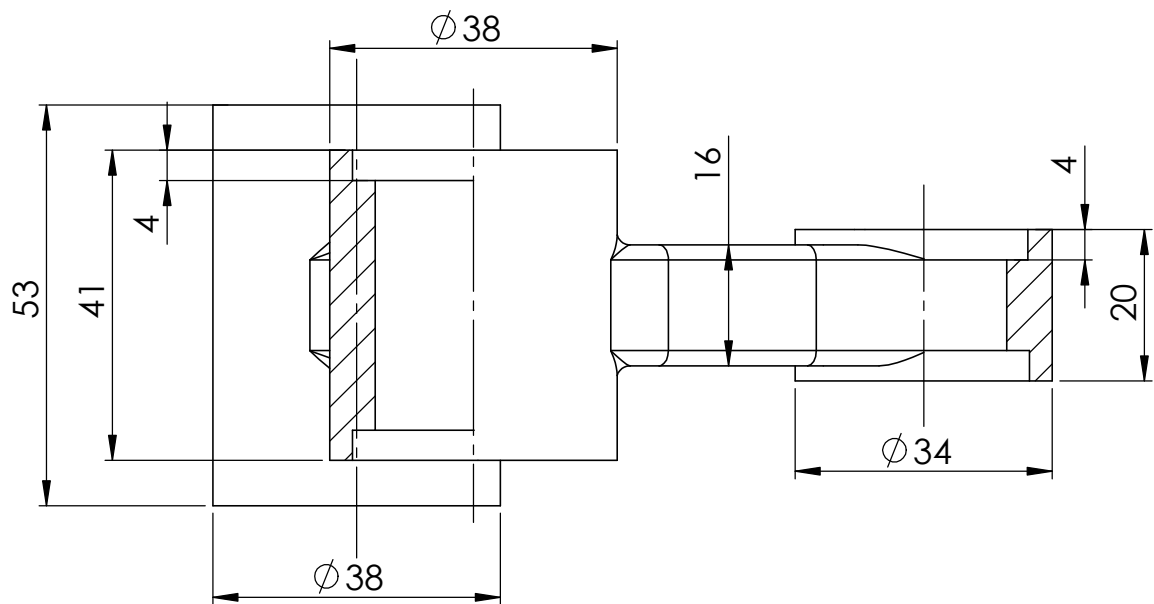
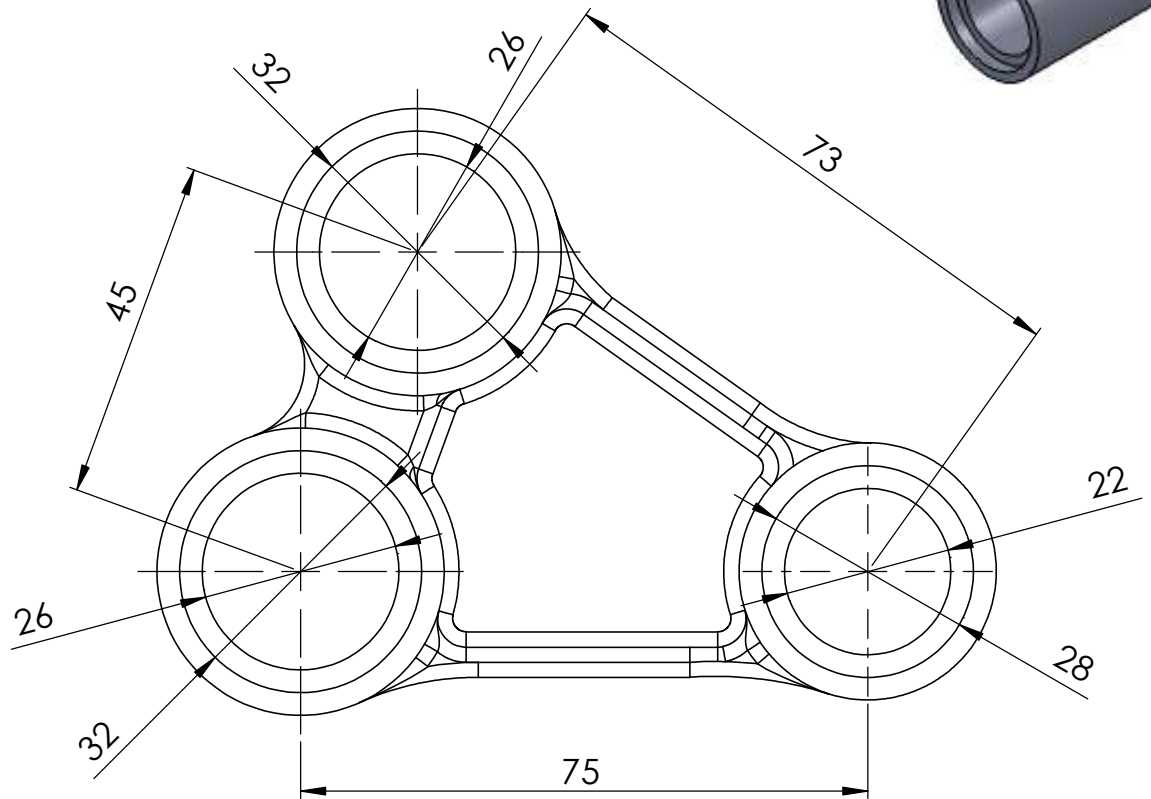



Figura B.2.1.1 Forces en els rodaments de la unió amb les bieletes i forces en el rodament de la unió amb l’amortidor.

ANNEX C: GEOMETRIES



| | | | | | |
|-----------------------|------------------|------------|---------------|-------------|---|
| TFG | <i>Dibuixat</i> | <i>Nom</i> | <i>Cognom</i> | <i>Data</i> |  |
| | <i>Comprovat</i> | Antoni | Riera | 02/09/16 | |
| Escala 1:2 | BIELETES | | | | Enginyeria Mecànica |



| TFG | Dibuixat | Nom | Cognom | Data |  |
|-----------------------------|----------------|--------|--------|----------|---|
| | Comprovat | Antoni | Riera | 02/09/16 | |
| Escala 1:1 | BALANCI | | | | Enginyeria Mecànica |