EPS
UdG Escola Politècnica Superior

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny i anàlisi d'un xassís tubular per a la competició Formula Student.

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Josep Cuffí Sot

Director/tutor: Narcís Gascons Clarió
Departament: Enginyeria mecànica i la construcció industrial
Àrea: Enginyeria mecànica

Convocatòria (mes/any): Juny de 2016

ÍNDEX

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ **4**
1.1 Antecedents 4
1.2 Objecte del projecte 6
1.3 Abast 7
1.4 Especificacions 7
2. DESCRIPCIÓ DEL MONOPLAÇA **8**
2.1 Monoplaça 8
2.2 Xassís 8
2.2.1 Ergonomia 10
2.2.2 Suspensió i trapezis 11
2.2.3 Sistema motriu 12
3. DESCRIPCIÓ DETALLADA DEL XASSÍS **14**
3.1 Arcs de seguretat 14
3.1.1 Arc principal de seguretat 14
3.1.2 Arc frontal de seguretat 15
3.2 Barres impacte lateral 15
3.3 Front Bulkhead 16
3.4 Diàmetre i espessors de cada barra 17
3.5 Comprovacions de resistència 18
4. PROCÉS DE FABRICACIÓ **21**
4.1 Bancada 21
4.2 Tall dels tubs 21
4.3 Doblegat de tubs 21
4.4 Encaixos 22
4.5 Soldadura 23
5. RESUM DEL PRESSUPOST **24**
6. CONCLUSIONS **25**
7. RELACIÓ DE DOCUMENTS **26**
8. BIBLIOGRAFIA **27**

ANNEX A DISSENY DEL XASSÍS 30
A.1 Introducció 30
A.2 Recerca d'informació 30
A.3 Xassís tubular 32
A.4 Xassís monocasc 33
A.5 Restriccions de disseny imposades per la normativa SAE 34
A.6 Restriccions amb relació a altres components del monoplaça 42
A.7 Evolució del disseny 43

ANNEX B CÀLCULS ESTÀTICS 49
B.1 Introducció 49
B.2 Càlcul del centre de masses 49
B.2.1 Elements considerats pel càlcul del centre de masses del 49
B.2.2 Centre de masses del conjunt 51
B.3 Simulacions amb el programa Ansys 52
B.3.1 Introducció 52
B.3.2 Càlcul estàtic impacte frontal 54
B.3.3 Càlcul estàtic impacte lateral 56
B.3.4 Càlcul estàtic impacte arc frontal en cas de bolcada 58
B.3.5 Càlcul estàtic impacte arc principal en cas de bolcada 60

ANNEX C CÀLCULS A FATIGA FORÇA LATERAL DEGUT AL PAS 63
C.1 Introducció 63
C.2 Càlcul de tensions en el punt més desfavorable 64
C.3 Càlcul del coeficient de seguretat 67
C.4 Conclusions 69

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

La competició Formula Student també coneguda com a Formula SAE (FSAE) va ser creada l'any 1979, és una competició en la qual els participants són estudiants universitaris d'arreu del món que promouen l'excel·lència en el món de l'enginyeria a través d'una competició, en aquesta posen a prova els monoplaces dissenyats i fabricats per ells mateixos.

L'equip UdG Racing Team està format per un "team leader" que coordina les tasques a realitzar en el projecte, com també per estudiants de diferents disciplines, com enginyeria mecànica, enginyeria en tecnologies industrials, enginyeria electrònica i administració en finances. Tots ells s'han de coordinar conjuntament realitzant reunions setmanals per a discutir o debatre els diferents temes que van sorgint al llarg del procés de disseny del monoplaça, com per exemple, motor a utilitzar, disseny de carrosseria, tipus de suspensió, etc. L'equip està organitzat amb cinc departaments:

- El **departament d'electrònica** encarregat de la instrumentació, programació del motor, i tot el sistema elèctric, és a dir, el cablejat i les connexions.
- El **departament de dinàmica**, encarregats del sistema de suspensions, direcció, sistema de frenada i de les rodes.
- El **departament de xassís**, encarregats del disseny del xassís, sistemes de seguretat com els cinturons i reposacaps i finalment de l'ergonomia que procura una bona posició del pilot amb la posició del volant seient i pedals.
- El **departament motor**, encarregats de la posta a punt del motor amb la restricció de l'admissió, sistema d'escapament, i components de tracció com relació de transmissió, diferencial i paliers.
- El **departament d'administració** encarregat del finançament de l'equip, preparar documentació per patrocinar l'equip de cara a buscar empreses que els interessi col·laborar en el projecte, contactar amb empreses.

Un dels requisits principals per participar en la competició és que el xassís ha de ser un disseny completament nou respecte el de l'any anterior. L'equip té l'experiència d'un any de competició en el que aquest any s'ha intentat millorar alguns aspectes que l'any passat no es van tenir en compte, com podrien ser les grans dimensions dels arcs principals, la col·locació dels punts de suport dels trapezis en punts triangulats, parts que l'any passat obstaculitzaven components del motor, etc.

La competició consta de vàries entregues, on s'ha de presentar la documentació del pla d'empresa, la recerca de mercat en que es troba enfocada al monoplaça i les seves especificacions. D'aquesta forma els responsables s'encarreguen de veure la feina que s'ha de dur a terme i donen consells per a millorar-lo. Aquest document és revisat pels jutges i més endavant, durant la competició, valorat i qüestionat per aquests, adreçant-se de forma directe als membres de l'equip. Cada departament està encarregat de contestar les preguntes específiques que se li formulen.

Altrament, durant la competició les dues proves clau són les proves dinàmiques i proves estàtiques dividides en:

- **Proves estàtiques (325 punts)**:
    - Avaluació del disseny: És la prova més prestigiosa, ja que en aquesta s'avalua tant el disseny com la seva funcionalitat de cada component de vehicle des del punt de vista de l'enginyeria. (150 punts)
    - Presentació i vendes: Es tracta d'exposar davant d'uns jutges, experimentats en l'àmbit, un pla de mercat, venda i negoci del qual comportaria una fabricació en sèrie d'aquest monoplaça. (75 punts)
    - Anàlisis de costos: Aquesta prova exigeix l'entrega anticipada de l'informa en què s'exposa el valor de cada peça utilitzada per fabricar el monoplaça (100 punts)
- **Proves dinàmiques (675 punts)**:
    - Acceleració: Es mesura l'acceleració del prototip en una recta de 75 metres. (75 punts)
    - "Skid Pad": S'avalua la capacitat del vehicle per suportar acceleracions laterals en un circuit en forma de vuit (8). En aquesta proba es fixen sobretot en el sistema de suspensió. (50 punts)
    - "Autocross": La prova es realitza en un circuit curt, d'aproximadament 1 km de longitud. En aquesta es posa a prova el comportament dinàmic general del monoplaça, els resultats d'aquesta serviran per definir les posicions de sortida de la següent prova. (150 punts)
    - "Endurance": És la prova amb més pes de la competició, representa un 30% dels punts totals. Es realitzen 22 voltes en un circuit de 1 km de longitud en la qual s'ha de realitzar un canvi de pilot en la volta numero 11, si el monoplaça pateix qualsevol averia en mig de la carrera serà desqualificat. (300 punts)
    - Eficiència: En aquesta prova s'avalua la posta a punt del monoplaça perquè el consum sigui el mínim possible. (100 punts)

Els membres del jurat utilitzen aquest repartiment de punts de cada prova per valorar la feina de disseny i fabricació realitzada per cada equip, el guanyador de la competició es l'equip que aconsegueix sumar més punts.

1.2 Objecte del projecte

L'objecte d'aquest projecte és dissenyar i analitzar el xassís tipus tubular del monoplaça de l'equip UdG Racing Team per a la competició Formula Student considerant que es fabricarà amb un acer S355 per aconseguir una estructura rígida i segura per al pilot, en cas de patir un impacte. El disseny d'aquest ha de complir uns requisits exigits per la competició i uns altres que són especificacions tècniques de disseny requerides per les altres seccions de l'equip, exposades en el document Annex A.

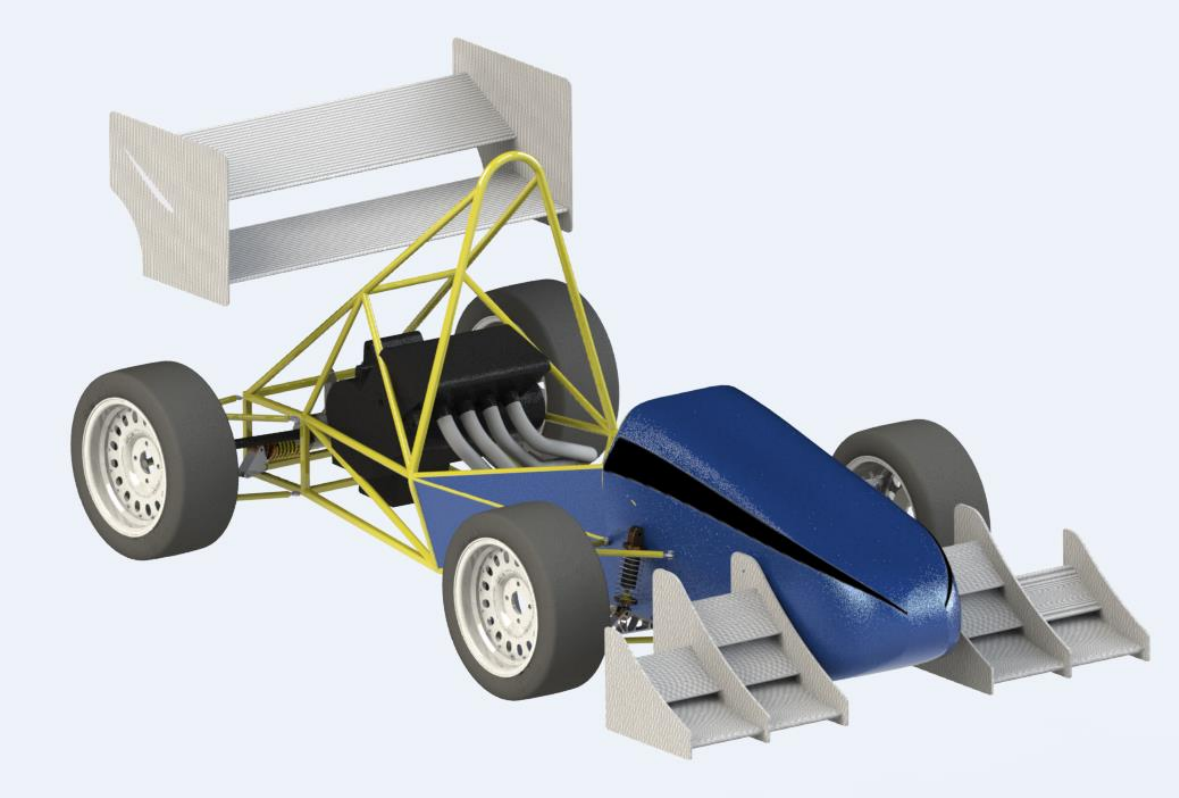


Figura 1. Vista general del monoplaça, render realitzat amb Solidworks

1.3 Abast

L'abast d'aquest projecte inclou recollir, ordenar i ponderar els requeriments necessaris per dur a terme el disseny del xassís tipus tubular del monoplaça. Això engloba el reglament proporcionat per la competició i les especificacions tècniques de disseny requerides per altres components del monoplaça.

El disseny final serà sotmès a uns càlculs mitjançant la tècnica d'elements finits amb el programa Ansys. Aquestes anàlisis estaran basats en tres proves de simulació estàtiques en què es simularan tres casos d'impactes: un impacte frontal, un impacte lateral i un impacte vertical en la part superior que simula un xoc en cas de bolcada. Els resultats es centraran en desplaçaments i tensions que hauran de complir unes deformacions específiques en la normativa i unes tensions en què no falli l'estructura, a partir d'aquí es contemplarà si les eleccions de dimensionament de barres i la seva distribució són correctes.

El projecte no inclourà el procés de fabricació de l'estructura encara que en tot moment s'ha tingut en consideració.

1.4 Especificacions

A continuació es nombren les especificacions que condicionen aquest projecte,

<u>Principals</u>

- El xassís ha de complir totes les especificacions nombrades al reglament proporcionat per la competició FSAE.
- El xassís ha de complir les condicions provinents de les altres seccions de l'equip.
- Ha de se capaç de suportar els esforços inercials de totes les masses quan es traça una corba.
- Ha de ser fabricat amb acer amb un límit elàstic mínim de 305 MPa.
- El xassís ha de ser tipus tubular.
- La distància mínima entre eixos serà de 1525 mm.

<u>Secundàries</u>

- Si ha de poder acoblar un motor d'una Yamaha Fazer de 600 cc.
- El pes màxim de l'estructura principal del xassís no pot superar els 70 kg.
- S'ha de fabricar una bancada per a la fabricació del xassís.
- El cost del xassís no pot superar els 3500 €.

2. DESCRIPCIÓ DEL MONOPLAÇA

2.1 Monoplaça

L'objectiu final d'aquest projecte és dissenyar un xassís per un monoplaça que estarà sotmès a unes proves estàtiques i unes dinàmiques.

Un monoplaça d'aquest tipus està format per moltes peces, unes que influeixen en el disseny de l'estructura i d'altres que no és necessari tenir en compte. A continuació es nombren i es fa un petit resum dels components que s'ha considerat que condicionen el procés de disseny del xassís.

2.2 Xassís

El xassís té dues funcions principals, una d'elles es unir tots els elements que formen un monoplaça i suportar els esforços que aquests generen, els més significatius son els que generen els components dinàmics, nombrats en els apartats 2.1.2 i 2.1.3. Per aquesta raó a l'hora de dissenyar el xassís, cal primer tenir definits els punts de suspensió, els punts dels trapezis i les dimensions que tindrà el motor.

L'altre funció molt important es assegurar la protecció del pilot en cas de patir un accident, aquesta s'aconsegueix complint les normes de seguretat imposades per la competició.

Després de tenir en compte les dues funcions principals, s'ha intentat preveure altres factors que faran millorar el comportament del nostre monoplaça a pista. Un disseny òptim de xassís, té en compte que la distribució de masses sigui el més simètrica i propera a terra possibles, per tal de guanyar estabilitat.

Tenint en compte aquests factors esmentats, a continuació es mostra el resultat del procés de disseny del nostre xassís, especificant en una taula les barres que el formen.

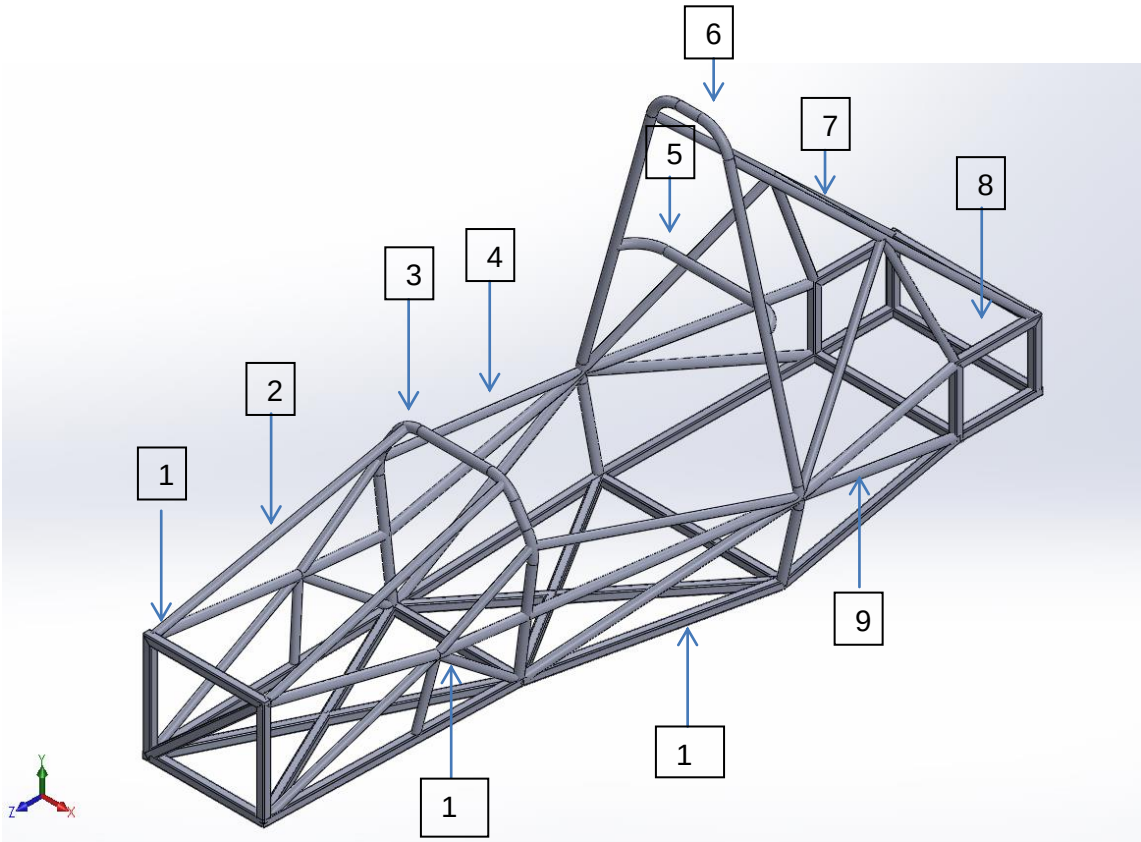


Figura 2. Imatge descriptiva de cada part del xassís

Taula 1. Numeració i parts del xassís vinculada a la imatge anterior

Número de barra	Descripció
1	Front bulkhead
2	Suports arc frontal
3	Arc frontal de seguretat
4	Barres d'impacte lateral
5	Barra per els suports dels cinturons
6	Arc principal de seguretat
7	Tirants arc principal de seguretat
8	Caixa posterior
9	Barres suport de l'arc principal
10	Terra
11	Punts triangulats per la suspensió

2.2.1 Ergonomia

El pilot és una de les parts més condicionants del vehicle, per això s'ha realitzat un model dibuixat amb el programa de dibuix Solidworks del que seria el cos d'una persona, la competició imposa que el monoplaça l'ha de poder conduir qualsevol membre de l'equip i per això s'ha dimensionat de tal manera que el 95% dels membres de l'equip el puguin pilotar.

La finalitat d'aquest disseny és aconseguir la major comoditat per la persona que el condueix, considerant també que ha de tenir una bona visibilitat.

El disseny ens ha servit per dimensionar tant la cabina de pilotatge com l'alçada dels arcs de seguretat, que han de complir unes distàncies imposades per la normativa, que es troben en l'annex A.

Contemplant que el pilot és la massa del conjunt que té més pes, s'ha intentat que la seva posició fos el més propera possible a terra.

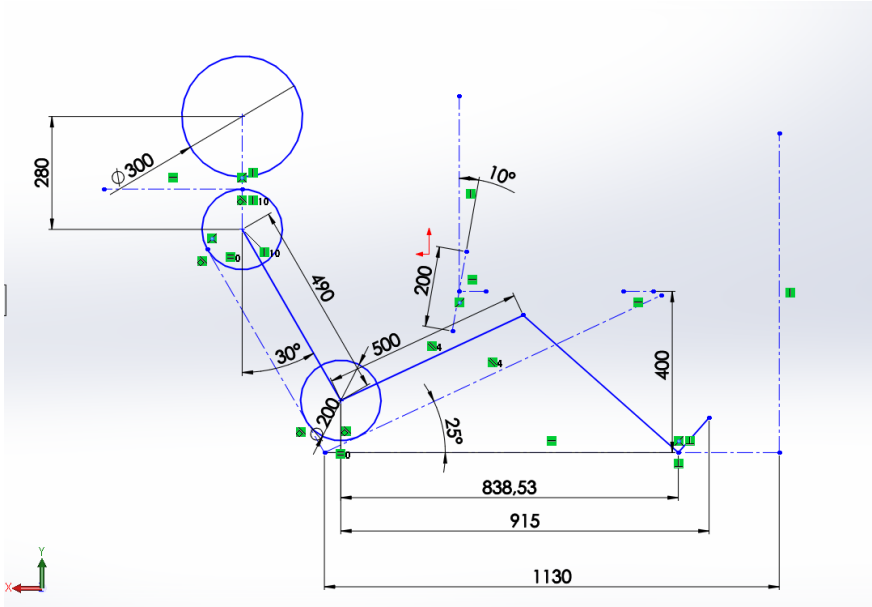


Figura 3. Dibuix per representar l'ergonomia del pilot, realitzat amb Solidworks

2.2.2 Suspensió i trapezis

Els components dinàmics són unes de les parts que transmeten més esforços al xassís, ja que contraresta la força centrífuga de cada massa que compon el vehicle en el moment que traça una corba a través de la fricció de les rodes amb el terra. En els punts on aniran subjectats els trapezis és necessari realitzar una bona triangulació, es a dir els punts han d'estar situats en els nodes on s'uneixen més d'una barra, no poden estar al mig.
A l'annex C s'ha fet un anàlisis a fatiga en la qual s'intenta analitzar els efectes que generen aquests esforços, per si un d'aquests quatre puts és un punt crític.

- **Part frontal**

Per realitzar la part frontal és necessari conèixer els quatre punts d'anclatge indicats en la següent imatge, per poder realitzar el disseny de l'estructura. En la part frontal els punts no es troben en el mateix pla, cosa que farà més complicada la distribució de les barres suport que van del front bulkhead a l'arc frontal de seguretat.

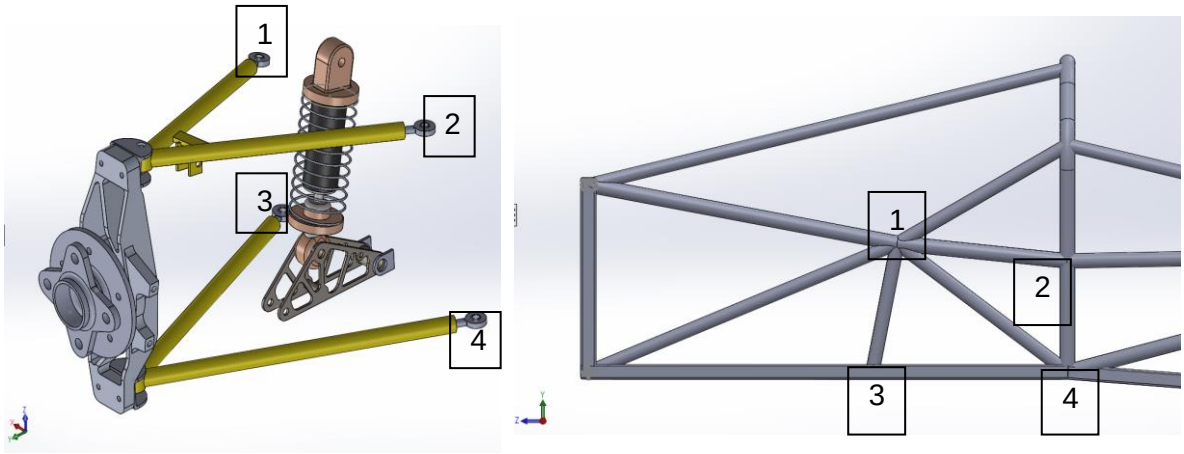


Figura 4. Part frontal del xassís i els seus punts d'unió amb els trapezis

- **Part de darrera**

Els punts de suport dels trapezis de darrera és més senzill de triangular, ja que els quatre punts es troben en el mateix pla. Per simplificar el procés de fabricació s'ha dissenyat una secció rectangular pensant també en què també és on es col·locarà el diferencial.

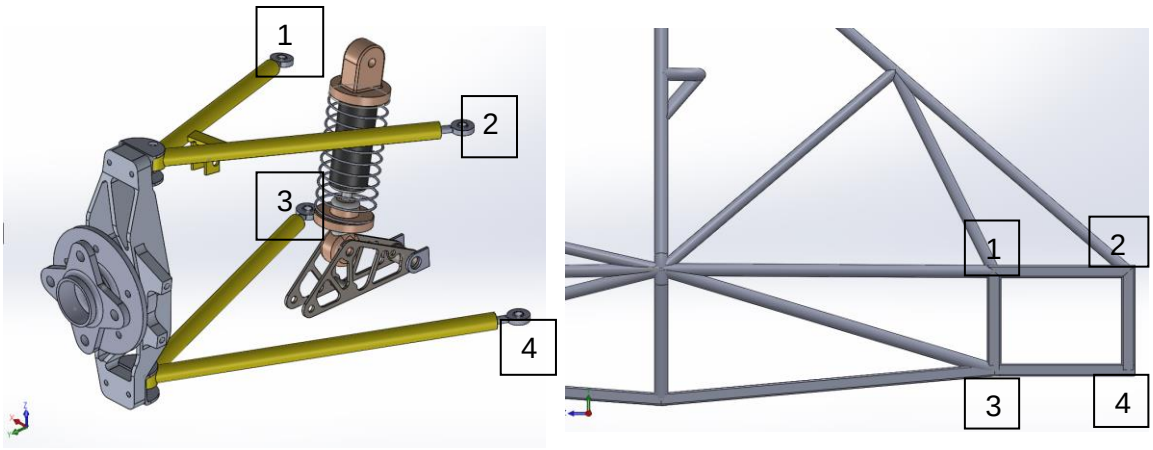


Figura 5. Part posterior del xassís i els seus punts d'unió amb els trapezis

2.2.3 Sistema motriu

El monoplaça dissenyat és un vehicle amb tracció a les dues rodes de darrera i consta de dues parts principals: el motor i el diferencial. La sortida de potència del motor es transmet a través de la cadena fins al diferencial i d'aquest a les rodes a través dels paliers. Aquesta transmissió d'energia comporta uns grans esforços que ha de suportar el xassís. Tot seguit es mostra com aniran subjectats el motor i el diferencial.

- **Motor**

El motor a utilitzar per a la competició d'aquest any és un motor Yamaha de 4 temps de 600 centímetres cúbics que proporciona 98 cavalls de potència. És necessari conèixer la forma que té per assegurar que hi ha suficient espai dins l'estructura i per conèixer els punts de suport on anirà subjectat. En la imatge següent es mostres els 7 punts repartits entre l'arc principal de seguretat i la caixa posterior de xassís on aniran els suports.

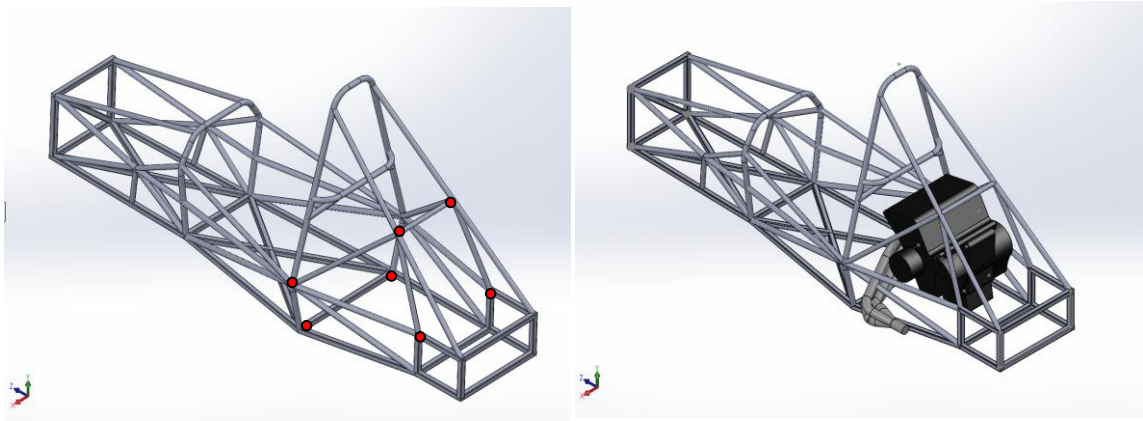


Figura 6. Imatge del xassís i els punts de unió amb el motor

- **Diferencial**

El diferencial és la part que transmet la potència proporciona pel motor a les rodes, és molt important assegurar que les distàncies de cada roda respecte del xassís siguin les mateixes pels dos costats.

Del diferencial cal conèixer les seves dimensions i els punts on anirà subjectat, en la imatge següent es mostren els punts on se situaran els 4 punts de suport.

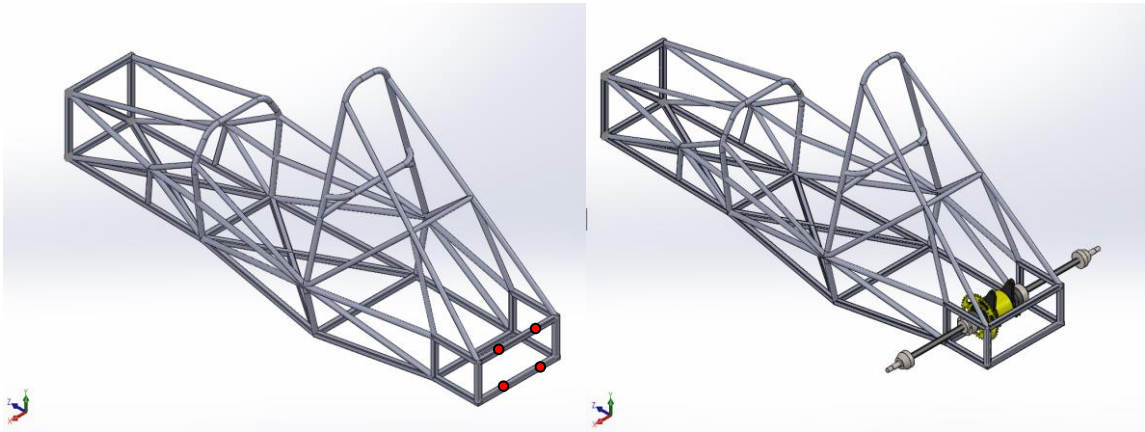


Figura 7. Imatge del xassís i els punts de unió amb el diferencial

3. DESCRIPCIÓ DETALLADA DEL XASSÍS

3.1 Arcs de seguretat

Les barres més importants de l'estructura són els dos arcs de seguretat, un frontal i un principal. Entre els dos arcs i les barres de protecció lateral formen el que seria la cabina del pilot. Les seccions d'aquestes barres són les que tenen més espessor i han de ser formades per un tub continu que se li dóna forma amb el procés de plegat, és dir no poden ser un conjunt de barres soldades.

La funció principal dels arcs principals és garantir la seguretat del pilot en cas de patir un impacte en qualsevol direcció.

3.1.1 Arc principal de seguretat

L'arc principal es troba al pla situat a l'esquena del pilot, que separa el pilot del motor. La part superior d'aquest és el punt més alt de l'estructura, ja que està pensat perquè en cas d'impacte i el monoplaça bolqués, cap part del cos del pilot entrés en contacte amb el terra. L'arc està subjectat per dos tirants que van des de la part més alta de l'arc fins a la caixa posterior on és situa el diferencial.

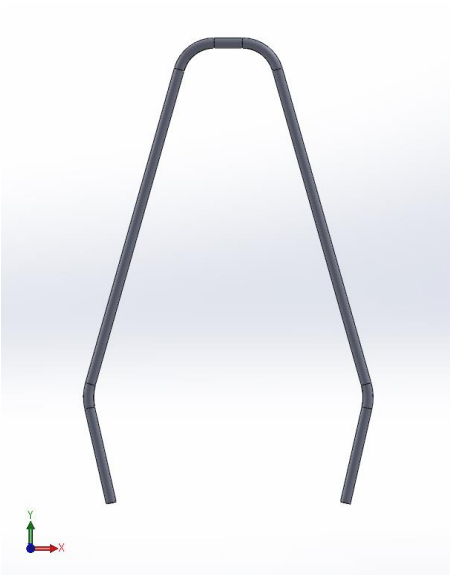


Figura 8. Arc principal de seguretat

3.1.2 Arc frontal de seguretat

L'arc frontal es troba en el pla situat sobre les cames del pilot. Ha de tenir una alçada mínima perquè la línia que formen la tangent del dos arcs estigui a 5 cm del casc del pilot. Esta suportat per les barres que van fins al front bulkhead.

Figura 9. Arc frontal de seguretat

3.2 Barres impacte lateral

Les barres d'impacte lateral, com el mateix nom indica, són les barres que protegeixen el pilot d'un hipotètic impacte lateral. Per normativa hi ha d'haver un mínim de 3 barres però per qüestions de disseny la nostra geometria requeria d'una quarta barra per fer més rígida la secció de l'arc frontal.

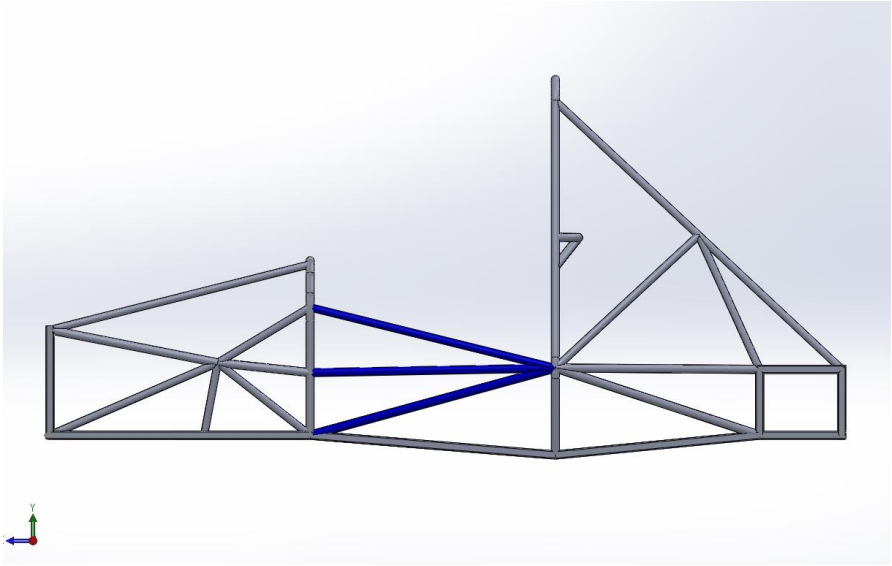


Figura 10. Barres de protecció d'impacte lateral

3.3 Front Bulkhead

És la part frontal del xassís, la seva forma no està definida per normativa però la majoria d'equips ho dissenyen amb una forma quadrada o rectangular, ja que en el front bulhead hi va subjectat un atenuador d'impactes que absorbiria energia en cas de patir un impacte frontal.

Per tant la principal funció és protegir els peus del pilot. El front bulkhead va unit amb l'arc frontal de seguretat a través de les barres suport on l'entremig d'aquestes ha d'haver-hi l'adequada triangulació pels trapezis de les rodes.

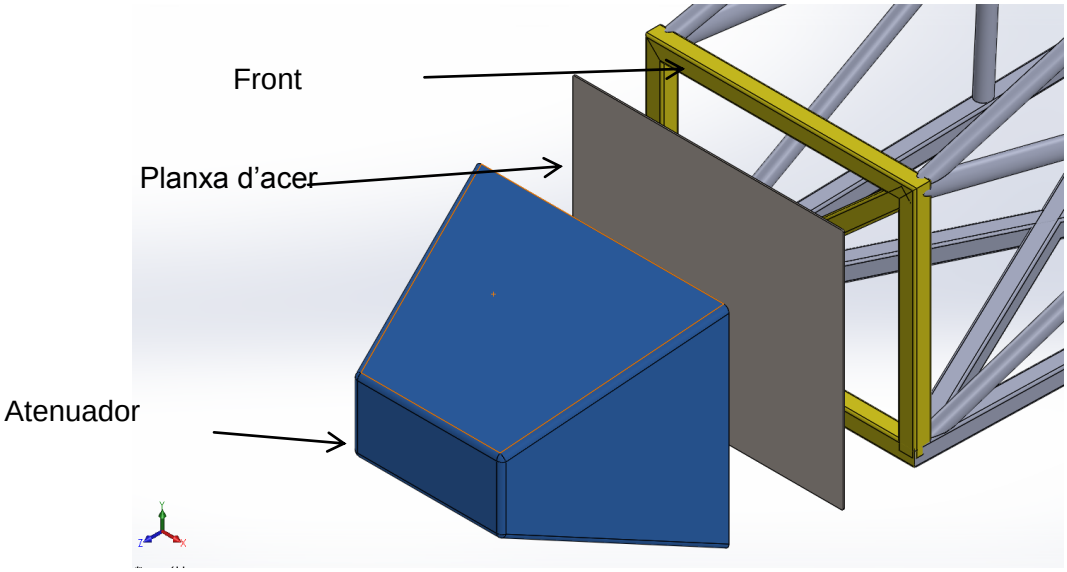


Figura 11. Front bulkhead i elements de protecció d'impactes frontals

3.4 Diàmetre i espessors de cada barra

En aquest apartat es defineixen les dimensions dels diàmetres i espessors de cada barra que forma el xassís.

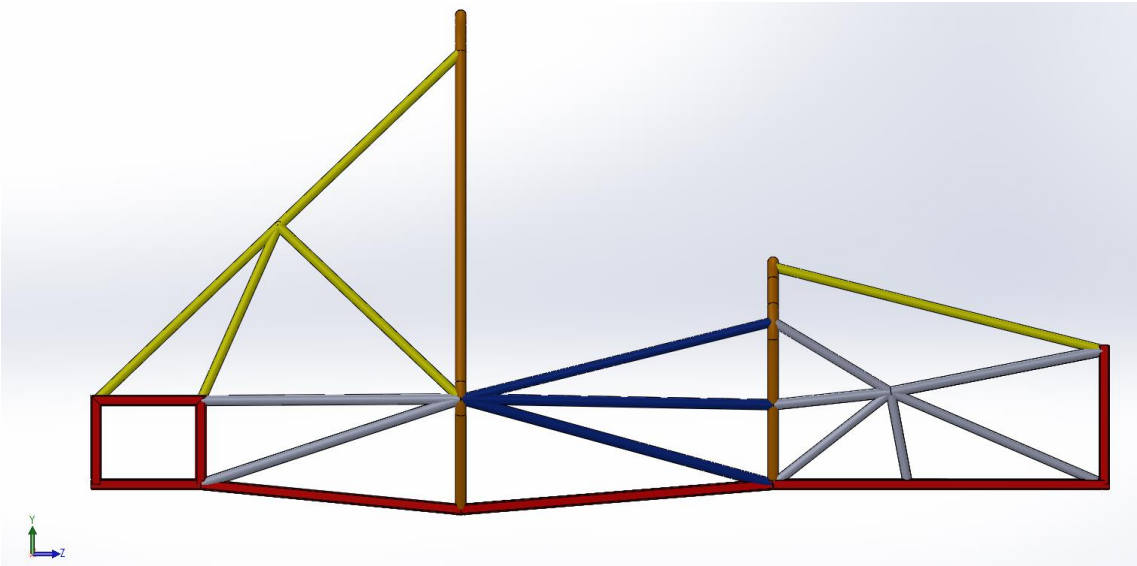


Figura 12. Colors per identificar dimensions de totes les barres del xassís

Taula 2. Especificacions de les seccions de cada barra

Color	Part del xassís	Tipus de secció	Diàmetre i espessor (mm)
	Front Bulkhead, terra i caixa	Quadrada	25 x 25 x 1,5
	Arc principals de seguretat	Circular	25 x 2,5
	Barres protecció impacte lateral	Circular	25 x 2
	Barres tirants dels arcs principals	Circular	25 x 1,5
	Barres suport davanters i posteriors	Circular	25 x 1,5

3.5 Comprovacions de resistència

En el procés d'anàlisis s'han simulat tres casos d'impacte en què el valor i la direcció de les forces aplicades a l'estructura vénen definides per la normativa de la competició.

Com a condició de superar aquestes proves, es limita que la deformació màxima en qualsevol direcció no pot superar els 25 mm.

També s'ha tingut en compte que el valor de les tensions no superes el límit elàstic de l'acer utilitzat.

- Direcció de càrregues:

- Longitudinal (X)
- Transverse (Y)
- Vertical (Z)

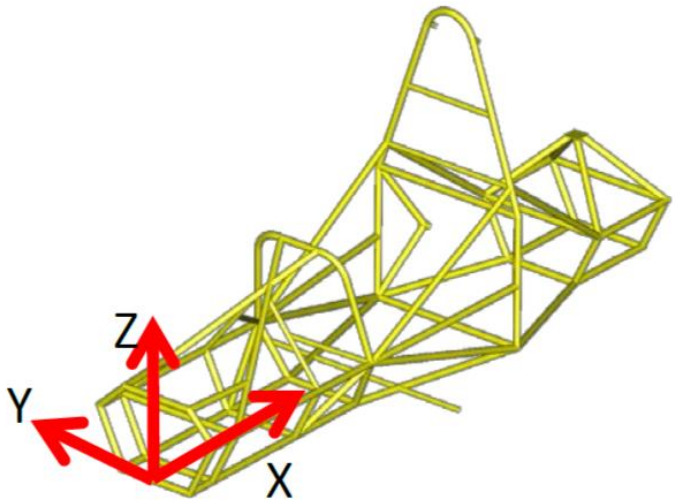


Figura 13. Eixos de coordenades per identificar la direcció de les forces

- Valor de les càrregues:

- **Taula 3.** Valor de la força aplicada en cada assaig

Assaig	Valor de la força eix X	Valor de la força eix Y	Valor de la força eix Z	Unitats
Impacte frontal	120000	10500	0	N
Impacte lateral	0	7000	0	N
Impacte arc principal	6000	5000	-9000	N
Impacte arc frontal	6000	5000	-9000	N

- Resum dels resultats obtinguts amb el programa Ansys Workbench, per més informació de com s'ha executat els càlculs consultar a l'Annex B.

Taula 4. Resultat de les tensions i deformacions de cada assaig

Assaig	Deformació màxima (mm)	Tensió màxima (MPa)	Tensió mínima (MPa)
Impacte frontal	14,2	383,4	-131,5
Impacte lateral	3,8	233,8	-13,9
Impacte arc frontal	7,9	266,5	-38,8
Impacte arc principal	5,8	300,9	-20,1

L'assaig d'impacte frontal ha sigut el que ha resultat ser el més desfavorable, ja que té les tensions i deformacions més grans. En la imatge següent es mostren els punts que pateixen la tensió més alta i la zona de l'estructura que ha deformat més.

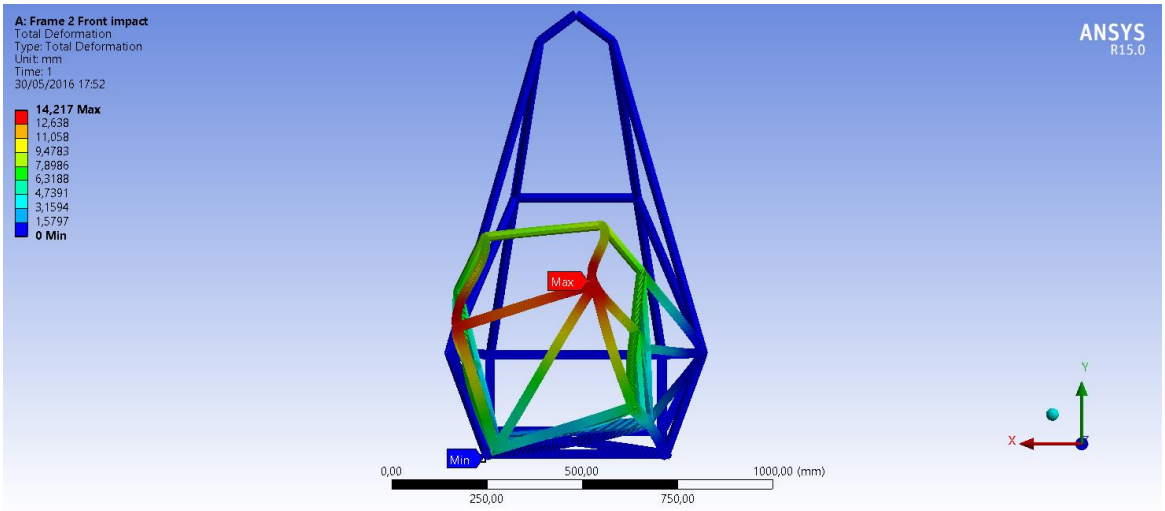


Figura 14. Representació de la deformació del xassís sotmès a l'impacte frontal

Deformació màxima= 14,217 mm en el punt senyalitzat a la imatge.

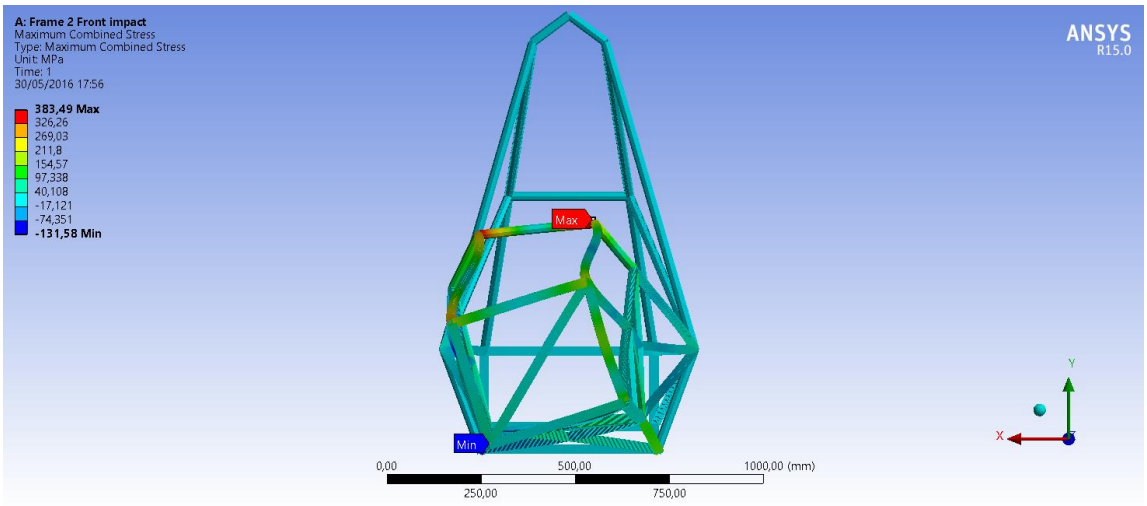


Figura 15. Representació de les tensions del xassís sotmès a l'impacte frontal

Tensió màxima= 383,49 MPa en el punt senyalitzat a la figura.

Tensió mínima= -131,58 MPa en el punt senyalitzat a la figura.

Les tensions resultants són inferiors al límit elàstic de l'acer utilitzat, amb un valor de 470 MPa, per tant l'estructura no plastifica elàsticament.

4. PROCÉS DE FABRICACIÓ

En el present capítol es parlarà de com s'ha de fabricar el xassís per tenir una idea aproximada de les màquines que es requereixen a l'hora de desenvolupar una estructura de les característiques exposades anteriorment.

4.1 Bancada

Per una correcta fabricació del xassís és necessari disposar o fabricar una bancada que ens serveixi de base per muntar i soldar el xassís a sobre.

L'objectiu d'aquesta és aconseguir que ens serveixi per generar uns eixos de coordenades i poder-hi representar els punts de coordenades dels punts d'unió del xassís dissenyats prèviament amb el programa de dibuix SolidWorks, amb l'objectiu que la fabricació respecta al disseny tingui el menor error possible. La bancada també en servirà per facilitar la utilització d'eines de treball com escaires per posicionar en angle recte els arcs de seguretat.

És necessari que sigui una bancada rígida, ja que quan se sumin els pesos de cada barra la bancada no deformi en cap eix. I a la vegada que tingui suficient gruixuda perquè quan es soldin peces pel muntatge no deformi a causa de l'alta temperatura de la soldadura.

4.2 Tall dels tubs

Un cop feta la bancada el pas següent és tallar els tubs a mida, en aquest procés es necessita disposar d'una serra de disc.

Per plànol s'extreuen les dimensions de cada tub i es deixant una distància de marge per l'error que es pugui cometre a l'hora de fer els encaixos. És molt important que després de tallar els tubs es marquin per poder identificar en quina posició anirà cada barra.

4.3 Doblegat de tubs

Els dos arcs principals han de ser barres contínues, amb un diàmetre i espessor que especificats per normativa, és a dir que no pot estar format per unions soldades. Per tant és necessari donar forma als tubs amb els radis de curvatura dissenyats. Dir també que els radis mínims de curvatura han de ser tres vegades el diàmetre exterior del tub.

Per dur a terme aquest procés és necessari disposar d'una corbadora amb la matriu necessària per corbar un tub d'acer de diàmetre exterior de 25 mm.

Una de les tècniques que s'utilitza per fer el plegat i que la secció circular no es deformi és emplenar de sorra el tub i tapar els extrems, d'aquesta manera s'aconsegueix fer el tub més compacte.
El procés es realitza a temperatura ambient.

4.4 Encaixos

Un cop s'han tallat totes les barres a la mida corresponent, deixant un marge de seguretat i es coneix en quina posició va cada una, es realitzen els encaixos.
En tots els punts d'unió interfereixen dos o més barres en un el mateix punt, per tal d'aconseguir un bon encaix és necessari disposar d'una màquina que pugui realitzar aquest procés.
Per realitzar aquest procés existeixen diversos mètodes, que es comentaran a continuació.

- El **tall per làser** és el resultat estimula un material mitjançant descàrregues elèctriques o llums incidents en espais tancats.

  Utilitzar aquest procés te l'avantatge que els talls són molt nets, no és necessari el control manual, ja que es programa amb control numèric i la velocitat de tall és molt més alta que qualsevol altre procés.
  Però com a desavantatge s'ha de dir que té un cost molt més elevat i que és més difícil de controlar les toleràncies petites.
- L'altre procés és el de **mecanització**, aquest consisteix en arrencar material.

  Hi ha la possibilitat de fer-ho amb una fresa, amb l'eina adequada per realitzar les mides dels encaixos que necessitem fer o l'altre possibilitat és per abrasió en què un rodet del mateix diàmetre del tub fa moure una cinta abrasiva.
  Les avantatges d'aquests dos mètodes és que són més econòmics de fabricar i pots ajustar els talls manualment.
  Com a desavantatge s'ha de dir que és un procés molt més lent, ja que s'ha de controlar tot el procés manualment.

Figura 16. Mecanitzat dels encaixos dels tubs per fer les unions, on interfereixen 3 barres

4.5 Soldadura

L'últim procés per acabar la fabricació del xassís és la unió de totes les barres, aquestes s'uneixen amb el procés de soldadura, que consisteix a unir les barres fent una aportació de material.

Per realitzar aquest procés és necessari que la persona encarregada a realitzar les soldadures tingui experiència i coneixements de com manipular la màquina, ja que qualsevol defecte en la soldadura pot generar greus conseqüències en el moment de provar del monoplaça. Alguns dels defectes a tenir en compte són:

- Els forats, es poden formar degut a que el gas queda atrapat en forma de bombolla en mig del cordó. Poden ser generats pel sobreescalfament o per una pressió del gas inapropiada.
- Falta de penetració en el cordó, el cordó i les peces a soldar no queden ben unides.
- Esquerdes, és un tipus de discontinuïtat en la qual el cordó s'ha fracturat a causa de un sobreescalfament, càrrega inapropiada o simplement que la unió de les peces és molt pobre.

Existeixen dos tipus de soldadores per realitzar aquest procés la soldadura MIG i la TIG, la diferència entre una i altre és que en la MIG l'aportació del material és automàtica.

5. RESUM DEL PRESSUPOST

Taula 4. Resum del pressupost, material i procés de fabricació

TAULA RESUM PRESSUPOST PARCIAL	
Descripció	**Import**
1. Material	195,1 €
2. Tall dels tubs	192,9 €
3. Plegat dels dos arcs de seguretat	257,1 €
4. Encaixos de les unions	1.577,8 €
5. Soldar l'estructura	1.511,5 €
TOTAL	**3.734,4 €**

S'adjunta una taula que resumeix els costos associats al projecte i al seu desenvolupament, és a dir, material i procés de fabricació. El cost total estimat en el present pressupost és de 3.734,4 €. Per conèixer en més detall el pressupost, consultar el document Pressupost.

6. CONCLUSIONS

Del xassís desenvolupat al llarg d'aquest projecte, pel que fa al procés de disseny podem dir s'han complert les especificacions imposades per la normativa, així verificant distàncies i altres comprovacions amb el programa de dibuix SòlidWorks.

Pel que fa al procés d'anàlisis es pot afirmar que el xassís dissenyat és una estructura resistent que protegirà el pilot de qualsevol impacte, ja que ha superat les especificacions de seguretat imposades per la normativa de deformacions màximes inferiors a 25 mm, obtenint unes deformacions de 14 mm en l'assaig més desfavorable.

Respecta a l'assaig a fatiga s'ha comprovat que la vida útil del xassís és vida infinita, per tant es pot assegurar que si durant el procés de fabricació no es comet cap error, el xassís aguantarà totes les proves de la competició.

Una de les especificacions que possiblement no es compleix, és el pressupost en que es va posar una quantitat màxima de 3.500 € per gastar en la fabricació del xassís i per els càlculs estimats que s'han fet en el document Pressupost, ens pot resultar lleugerament més car de l'esperat.

7. RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document Nº1: Memòria i annexos

ANNEX A; Procés de disseny

ANNEX B; Càlculs estàtics

ANNEX C; Càlcul a fatiga

Document Nº2: Plànols

Document Nº3: Plec de condicions

Document Nº4: Estat d'amidaments

Document Nº5: Pressupost

8. BIBLIOGRAFIA

-Normativa de la competició en l'edició 2016: **http://www.formulastudent.es/** (12 de gener del 2016).

-Imatges de dissenys d'altres anys https://www.google.es/search?q=formula+student&biw=953&bih=1047&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjKkYCQ36LNAhXFtBoKHRU9DysQ_AUIBigB&dpr=0.9 (18 de gener del 2016).

-Informació complementària de la competició: http://students.sae.org/cds/formulaseries/ (20 de gener del 2016).

-Recerca d'informació i consells d'estudiants d'altres universitats: https://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=4412801 (03 de febrer del 2016).

-Tutorials del funcionament del programa Ansys Workbench http://myweb.ncku.edu.tw/~hhlee/Myweb_at_NCKU/ANSYS14.html (24 de febrer del 2016).

-Luís Ripoll, Apunts de l'assignatura Càlcul de Màquines del 3r curs d'enginyeria mecànica a la UdG per realitzar els càlculs a fatiga (28 de març del 2016).

ANNEXOS

ANNEX A. DISSENY DEL XASSÍS

ANNEX A DISSENY DEL XASSÍS

A.1 Introducció

Aquest apartat engloba la informació i el procés que s'ha seguit per definir la geometria del xassís. També es parlarà dels dos tipus de xassís, tubular i monocasc, que es poden trobar a la competició Formula Student.

Per poder realitzar el disseny definitiu primer s'ha fet una recerca d'informació per extreure'n idees dels dissenys d'anys anteriors. Amb aquesta informació, les restriccions imposades per la normativa de la competició i els requisits tècnics s'ha realitzat un procés evolutiu de disseny per arribar al disseny definitiu.

Els factors a tenir en compte al llarg de tot el procés de disseny han sigut el compliment d'especificacions, el cost de fabricació, la fiabilitat de l'estructura, l'ergonomia i l'estètica.

A.2 Recerca d'informació

El primer pas que es va fer abans de realitzar els primers dissenys va ser una recerca d'informació a internet, centrant-nos sobretot en el xassís tipus tubular, per fer una comparativa dels ja existents d'anys anteriors i poder-ne extreure informació que ens pogués ser útil més endavant.

Navegant per internet ens vam trobar que hi havia un ventall molt ampli de solucions, tant en diferents geometries, utilització de diferents materials, mecanitzar peces per utilitzar de subxassís, etc. Per això es va decidir concretar en aspecte que ens poguessin servir, sempre pensant en el nostre disseny, cosa que està condicionat pel pressupost de l'equip.

Tot seguit es mostra una taula que conté una imatge, la part concreta en la que ens hem fixat del xassís i un comentari valorant les comparatives.

Cal remarcar la importància d'aquest apartat, ja que dos d'aquests aspectes ens han servit per solucionar uns problemes en el procés de disseny del nostre xassís.

Taula A.1 Comparativa de diferents xassís

Imatges	Aspecte concret	Anotacions
	Donar uns angles d'inclinació als arcs principals de seguretat	El fet de tenir els arcs de seguretat amb una certa inclinació oposada fa que la cabina de conducció sigui més ample i així facilita l'estrada i sortida del pilot a la cabina de pilotatge. El procés de fabricació és més complex.
	Pla del terra continu o discontinu.	Les barres que formen el terra del monoplaça es poden trobar en el mateix pla o tenir discontinuïtat. Aquest factor pot ser la solució al problema que es pot trobar de la proximitat que es pot trobar la part frontal amb el terra a l'hora de frenar. En fer el pla discontinu els punts de suport de les rodes l'estructura queda, més elevada respecta del terra.
	Disseny de la part on va subjectat el diferencial	En les dues primeres imatges es pot veure que l'estructura on va subjectat el diferencial pot ser una geometria tant simple com una estructura rectangular o un conjunt de barres distribuïdes triangularment. En canvi en la tercera imatge aquesta estructura la substitueixen per uns suports mecanitzats. Lògicament aquesta opció té un cost econòmic més elevat.

A.3 Xassís tubular

Tal com el títol indica un xassís tubular està format un conjunt de tubs rodons i quadrats els quals s'uneixen per formar l'estructura. Aquestes unions han d'estar ben triangulades, és a dir, han de tenir continuïtat per poder aguantar les diferents càrregues d'ús que es generen quan el monoplaça està en moviment i les possibles càrregues accidentals que patiria si es produís un impacte.

Aquestes càrregues d'ús, poden ser verticals com els pesos o laterals com l'esforç que generen les masses, principalment la del pilot i motor, en el traçat d'una corba.

En el procés de fabricació d'aquest cas, el procés de soldadura és vital per garantir que els punts d'unió de cada tub resistiran les tensions que hi apareixen; els dos mètodes més utilitzats són la soldadura MIG i la TIG, en tots els casos és important conèixer les propietats del tub que estem fent servir per tal d'ajustar la soldadora el màxim possible i no fer forats quan soldem.

Al dissenyar una estructura d'aquest estil s'ha d'intentar trobar l'equilibri entre una estructura resistent però a la vegada que sigui lleugera i econòmica de fabricar.

Respecte a l'estructura monocasc que s'explicarà a continuació té les avantatges i els inconvenients següents:

- **Avantatges:**

-Les estructures presenten una major resistència a les diferents càrregues aplicades.

-La construcció i reparació en cas d'impacte és relativament senzilla.

-Es poden utilitzar acers alternatius i altre tipus de metall com l'alumini en algunes parts del xassís.

-És més econòmic que l'estructura monocasc

- **Desavantatges:**

-Per aconseguir més rigidesa comporta augmentar el pes del xassís.

-El factor de l'augment de pes perjudica greument a la velocitat punta que pot arribar el vehicle.

A.4 Xassís monocasc

Els equips que disposen d'un alt pressupost i compten amb anys d'experiència en la competició opten per construir una estructura monocasc. Aquesta utilitza la fibra de carboni, ja que té la propietat de ser molt més lleugera que l'acer.

El conjunt de l'estructura monocasc està format per dues parts: la part frontal que va des de l'arc principal de seguretat fins al morro, fabricada de fibra de carboni i la part que va de l'arc de seguretat fins a la part posterior és de tipus tubular, principalment per poder-hi subjectar el motor, el diferencial i la suspensió posterior.

El procés per fabricar la part frontal de fibra de carboni és més complex perquè requereix maquinària especialitzada i alts coneixements per obtenir bons resultats. La part posterior és com l'explicada en l'apartat anterior.

Com en el xassís tubular també té els seus avantatges i desavantatges:

- **Avantatges:**

-El gran avantatge d'utilitzar aquest procés és la baixa densitat del material i per efecte la reducció de pes respecte a una estructura tubular.

-Té una alta resistència inclús en diferents condicions ambientals.

- **Desavantatges:**

-El cost de producció és molt elevat.

-Es requereix coneixements i maquinaria especialitzades.

A.5 Restriccions de disseny imposades per la normativa SAE

Com en totes les competicions, en la Formula Student SAE existeix un reglament que és necessari complir per poder participar en les proves.

Aquestes restriccions serveixen per delimitat principalment, les distancies, les geometries i els materials per garantir seguretat i fiabilitat a l'hora de conduir un monoplaça tipus formula.

Per assegurar que es compleixen aquestes especificacions, el dia de la competició, uns jutges experimentats examinen el monoplaça i determinen si s'han complert les especificacions nomenades a continuació.

- **Especificacions generals del cotxe**

-El vehicle ha de ser de tipus cabina oberta i un cos estil fórmula, de 4 rodes.

-La distància mínima entre eixos serà de 1525 mm (distància mesurada des del centre de contacte de la roda davantera amb el terra fins al centre de contacte de la roda posterior amb el terra, amb les rodes davanteres rectes).

-La distància entre les rodes del mateix eix més petita no ha de ser en cap cas inferior al 75% de la distància més gran.

-La distància entre la part inferior de xassís i el terra ha de ser prou gran per no contactar en cap moment amb la pista o amb els pianos a l'hora de traçar un revolt. Per això s'ha de tenir en compte que el diàmetre mínim de la llanta serà de 203,2 mm (sense comptar el neumàtic).

-L'estructura del vehicle ha d'incloure dos arcs antibolcada, un front bulkhead davanter amb un sistema d'atenuador d'impactes i estructura d'impactes laterals.

- **Material i gruixos de protecció requerits**

-Els arcs antibolcada han de ser d'un únic tub continu sense talls ni soldadures.

-L'estructura principal del cotxe ha d'estar construïda amb acer baix en carboni o un aliatge, en tubs (mínim 0,1% de carboni), amb les dimensions especificades a continuació:

Taula A.2 Seccions de cada barra imposades per normativa

ITEM or APPLICATION	OUTSIDE DIMENSION X WALL THICKNESS
Main & Front Hoops, Shoulder Harness Mounting Bar	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.095 inch (2.4 mm) or Round 25.0 mm x 2.50 mm metric
Side Impact Structure, Front Bulkhead, Roll Hoop Bracing, Driver's Restraint Harness Attachment (except as noted above) EV: Accumulator Protection Structure	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.065 inch (1.65 mm) or Round 25.0 mm x 1.75 mm metric or Round 25.4 mm x 1.60 mm metric or Square 1.00 inch x 1.00 inch x 0.047 inch or Square 25.0 mm x 25.0 mm x 1.20 mm metric
Front Bulkhead Support, Main Hoop Bracing Supports EV: Tractive System Components	Round 1.0 inch (25.4 mm) x 0.047 inch (1.20 mm) or Round 25.0 mm x 1.5 mm metric or Round 26.0 mm x 1.2 mm metric

-L'ús d'un aliatge d'un acer, no permet disminuir el gruix de l'espessor del tub respecte al de l'acer dolç, especificat a la taula anterior.

-Si es reemplaçar els perfils rodons per perfils quadrats han de ser de la mateixa mida especificada en la taula.

-A excepció dels orificis per la inspecció, els forats perforats a qualsevol tub requereix la presentació d'un SES.

-Les propietats de l'acer de referència utilitzat pels càlculs que es presenten en el SES no poden ser inferiors a:
(càlculs de resistència):

Mòdul de Young, E= 200 GPa
Límit elàstic, Sy= 305 MPa
Tensió de ruptura, Su= 365 MPa

-Quan es requereix un reforç dels tubs com per exemple, en interseccions, forats pels cargols, etc. El tub ha de conservar la força de laminació en fred.

-L'ús de l'alumini i el titani per la fabricació dels arcs principals està prohibit.

-Si un equip decideix utilitzar tubs o materials alternatius, ha de presentar un full de càlcul d'equivalència estructural.

- **Documentació Estructural**

-Tots els equips han de presentar un full de càlcul EQUIVALÈNCIA ESTRUCTURAL (SES) o un formulari de certificacions REQUISITS ESTRUCTURALS (SCRF) amb la normativa alternativa.

-Es permet l'ús de materials o dimensions de tubs alternatius als especificats a la taula on s'especifica materials i gruixos de construcció, amb la condició que passi una revisió tècnica per assegurar que les característiques són iguals o superiors a les de la taula.

-L'aprovació de materials o dimensions de tubs diferents els aprovarà un inspector tècnic amb els seus coneixements d'enginyeria.

-S'ha de fabricar tal com s'ha dissenyat en el SES, tant materials com processos.

- **Posició del pilot**

-El 95% dels membres de l'equip hauran de complir dins la cabina:

-Amb el seien ajustat el més endarrerit possible i els pedals el més avançat possible, la distància del centre de l'esfera de diàmetre 200 mm, que representa la cintura del pilot, al pedal ha de ser de 915 mm.

-La distància del casc al reposacaps serà de 25,4 mm com a màxim.

- **Requisits generals per als arcs de seguretat**

-L'estructura de protecció del pilot consta entre altres parts de dos arcs de seguretat: un frontal, just anterior al volant de direcció i l'altre darrera el cap i l'esquena del pilot. La seva finalitat és protegir el cap del pilot del terra en cas de bolcada. Per assegurar aquesta protecció és necessari que hi hagi una distància de 50 mm entre la part superior del casc del pilot i la recta que uneix les tangents dels arcs principals de seguretat, tal com mostra la figura següent:

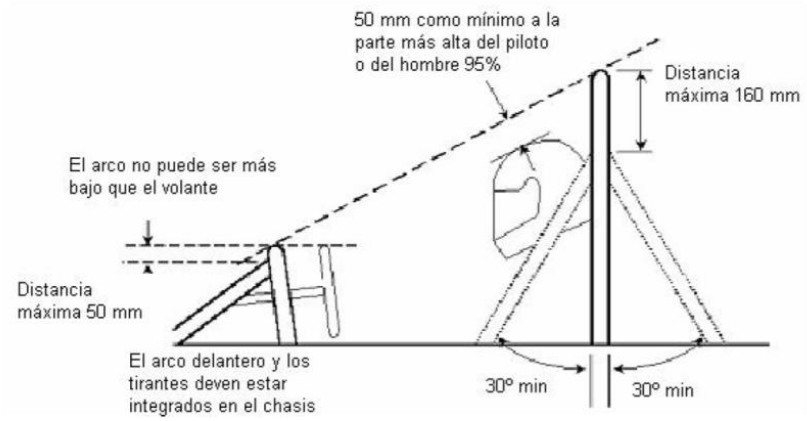


Figura A.1 Distàncies i angles dels arcs de seguretat imposats per normativa

-El cap i les mans del conductor no poden entrar en contacte amb el terra en cas de bolcada.

-El radi mínim de qualsevol corba mesurada des de la línia neutre del tub ha de ser com a mínim 3 vegades més gran que el diàmetre exterior del tub: 3 x 25= 75 mm (radi mínim)

- **Arc principal "main roll hoop"**

-L'arc principal ha d'estar construït d'una sola peça d'acer amb les característiques (diàmetre i gruix) especificats per la taula de l'apartat (materials i gruixos de protecció requerits).

-L'arc ha de prolongar-se des de la part més baixa d'un costat del xassís fins a la part més baixa de l'altre costat.

-Des d'una vista lateral del vehicle la inclinació de l'arc principal respecte la vertical no pot superar els 10° d'inclinació.

- **Arc frontal**

-L'arc frontal ha d'estar construït amb les mateixes característiques i dimensions que l'arc principal

-L'arc s'ha d'estendre des de la part més baixa d'un lateral del xassís fins a l'altre costat.

-En cap moment l'alçada del volat en qualsevol de la seva posició pot sobrepassar l'alçada de l'arc frontal.

-La distancia des de l'arc frontal fins al centre de la roda davantera, no pot ser més gran que 250 mm.

-Vist des d'una vista lateral l'arc frontal no pot superar una inclinació de 20° respecte a la vertical.

- **Tirants de l'arc principal**

-Han de tenir unes dimensions especificades en la taula de l'apartat (materials i gruixos de protecció requerits).

-L'arc principal ha d'estar reforçat per dos tirants, orientats cap endavant o cap enrere.

-La direcció dels tirants ha de correspondre a la inclinació de l'arc principal (en cas que existeixi aquesta inclinació)

-Els tirants han d'estar soldats a la part més alta possible de l'arc principal, en cap cas en un punt més baix de 160 mm des de la part superior de l'arc.

-L'angle entre l'arc i el tirant ha de ser mínim de 30º.

- **Tirants de l'arc frontal**

-Els tirants de l'arc frontal ha de ser de la mateixa secció que els de l'arc principal.

-Els tirants frontals han de protegir les cames del conductor, pel qual n'hi ha d'haver als dos laterals del xassís, i han d'arribar fins a l'estructura de protecció dels peus del pilot.

-Han de ser soldades el més proper de la part superior de l'arc possible, en cap cas més baix de 50 mm de la part superior de l'arc.

- **Pla frontal encarregat de protegir els peus del pilot (front bulkhead)**

-Per davant del pla frontal hi ha d'haver un atenuador d'impactes que absorbeixi l'energia en cas de rebre un xoc frontal.

-El pla frontal ha d'estar construït amb les característiques especificades en la taula de l'apartat (materials i gruixos de protecció requerits).

-Ha d'estar situats de manera que els peus del pilot (sense estar accionant els pedals) quedin protegits.

-Com a mínim ha de tenir tirants a la part més alta (no més baix de 50 mm) en direcció a l'arc frontal, així com a la part més baixa.

-Ha d'estar subjectat i triangulat punt a punt i com a mínim amb una diagonal per costat.

- **Protecció d'impactes laterals**

-La protecció lateral està formada almenys per tres barres situades a cada costat del conductor amb les següents condicions,

-El membre estructural d'impacte lateral superior ha de connectar l'arc frontal amb l'arc principal.

-La barra inferior de la protecció lateral, ha d'unir la base de l'arc frontal amb la base de l'arc principal.

-Els punts d'unió entre les barres han d'estar triangulades.

-S'haurà de posar una diagonal que completi la protecció, aquesta uneix el membre estructural superior i l'inferior com es mostra a la figura següent.

-Considerant el pes del pilot d'uns 77 kg amb el pilot en la posició de conducció, tots els membres de protecció d'impacte lateral han d'estar entre uns 300 i 350 mm respecte al terra.

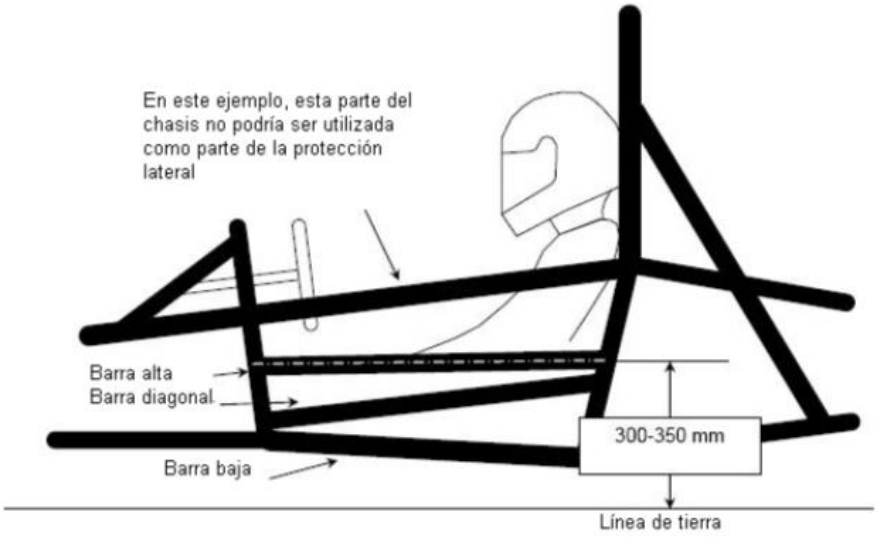


Figura A.2 Distància entre la barra superior de protecció d'impactes laterals i el terra

- **Cabina del pilot**

-Per tal d'assegurar que l'obertura d'accés a la cabina té les mides adequades, es farà la proba amb una plantilla amb les dimensions especificades al dibuix següent. Es realitzarà la prova posicionant la plantilla verticalment i horitzontalment fins que passi per sota de la barra superior de l'estructura lateral d'impactes.

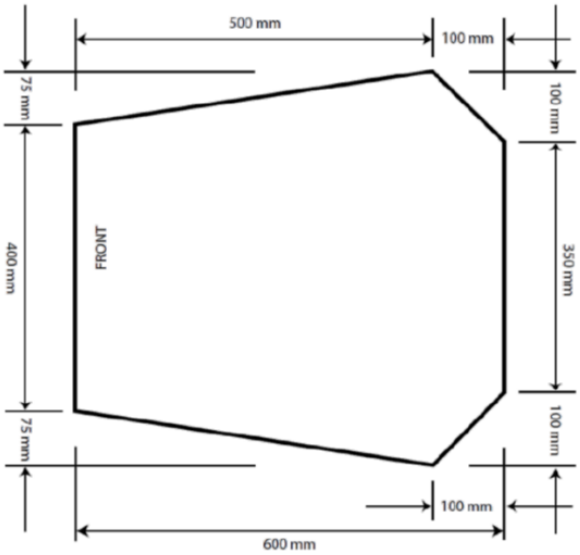


Figura A.3 Dimensions mínimes de la cabina de pilotatge

- **Secció interna de la cabina del pilot**

-Secció transversal vertical lliure, permet que la plantilla de la següent figura passi horitzontalment a través de la cabina del pilot des del pedal (quan no està accionat) fins a 100 mm enredera, (si els pedals són ajustables, es posen en la posició més avançada).

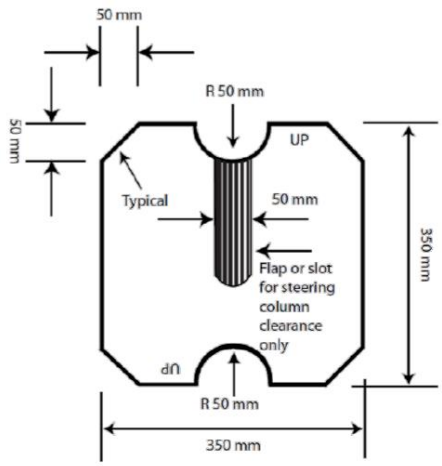


Figura A.4 Dimensions de la secció interna mínima en la cabina del pilot

A.6 Restriccions amb relació a altres components del monoplaça

A part de les restriccions imposades pel reglament de la competició que hem vist en l'apartat anterior, en el procés de disseny és molt important tenir en consideració
els dissenys de la resta de components del monoplaça que realitzen els companys de l'equip.
Al llarg del procés de disseny del xassís s'han fet reunions setmanals de l'equip per parlar dels punts que es citaran a continuació.
És molt important la coordinació de l'equip i que la feina que realitza cada membre avanci per igual en cada secció, ja que si no és així en el moment de fabricació i muntatge poden sorgir els problemes.

S'ha agrupat un conjunt d'aspectes que afecten en el disseny del xassís classificat per seccions:

-Secció de dinàmica:

- Sistema de suspensió que està previst utilitzar.
- Punts geomètrics (anteriors i posteriors del monoplaça), tant dels trapezis com els de suspensions.
- Pes suspensions.
- Dimensions del volant.
- Punt del suport del rodament del volant.
- Dimensions de la cremallera i sistema de subjecció d'aquesta.

-Secció de motor:

- Motor utilitzat aquest any.
- Punts de suport del motor.
- Dimensions del motor (orientatiu, per assegurar que no hi ha cap problema a l'hora de l'assemblatge).
- Inclinació en la seva posició de funcionament.
- Pes del motor.
- Diferencial utilitzat aquest any.
- Punts de suport del diferencial.
- Dimensions del diferencial per definir les dimensions de la caixa posterior del xassís
- Pes del diferencial.

A.7 Evolució del disseny

En aquest document es resumeix el procés que s'ha seguit per arribar a la geometria definitiva, també es comentaran els canvis que s'han fet en cada disseny i el perquè s'han hagut de fer.

Primer de tot es van realitzar dos dissenys orientatius utilitzant mides del xassís de l'any anterior per tenir un punt de partida.

- **Primers dissenys de partida**

Els dos dissenys que es mostren a continuació van servir per tenir un punt de partida del nostre xassís. Els dos tenen les mateixes dimensions però amb dues diferències principals.

La primera és que la part de darrere on va situat el diferencial, el disseny de la figura A.5 porta una geometria rectangular i el disseny de la figura A.6 no. Es van fer aquestes dues opcions, ja que és un dels punts que vam concretar en la recerca d'informació realitzada al principi d'aquest document (Taula A.1).

L'altra diferència és en la geometria de l'arc de seguretat frontal, el de la figura A.5, és acabat en pla i el de la figura A.6, en punta. Aquesta diferència es va fer pensant que la distància que es guanyava fent-lo acabar en punta es podia restar a l'alçada de l'arc principal i així que quedes més baix, factor interessant pel tema de l'aerodinàmica.

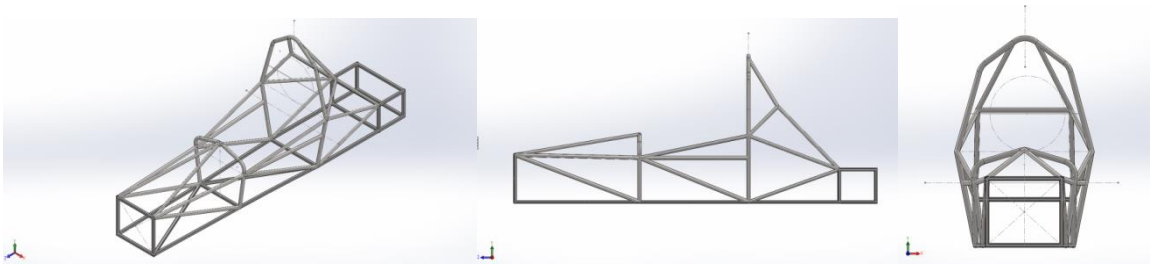


Figura A.5 Primer disseny que es va utilitzar de punt de partida

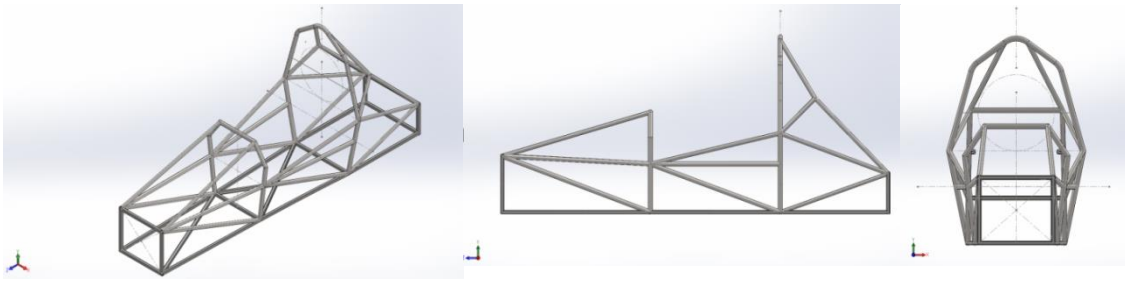


Figura A.6 Primer disseny que es va utilitzar de punt de partida

- **Segon disseny**

Dels dos dissenys fets anteriorment es va intentar fer-ne un altre que combinés. Com es poden veure en les imatges següents es va intentar integrar la caixa del diferencial en la geometria posterior del xassís.

A diferència de l'anterior es va procurar que totes les barres tinguessin continuïtat per tal de millorar la rigidesa de l'estructura en la part lateral.

Respecte a la part frontal es va introduir un arc de seguretat secundari per poder-hi triangular els punts de suport de la suspensió. La geometria de l'arc frontal es va modificar fent una combinació del les dues anteriors, que acabés en pla però que fos més punxeguda.

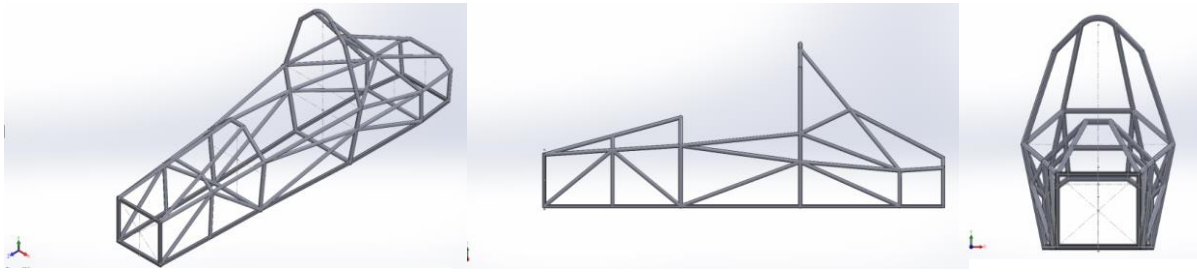


Figura A.7 Geometria del segon xassís dissenyat

- **Tercer disseny**

Els canvis realitzats en el tercer disseny respecte del segon es van fer perquè es va calcular el pes de la geometria del segon disseny i va sortir un valor massa pel fet que es van afegir moltes barres en la part posterior i en la part lateral perquè les barres tinguessin continuïtat.

El que es va fer en el tercer disseny va ser canviar la distribució de les barres laterals i les de la part de darrere però mantenint el mateix concepte. La solució va ser fer arribar els tirants de l'arc principal fins a la part de darrere i triangula la resta de barres a partir d'aquí.

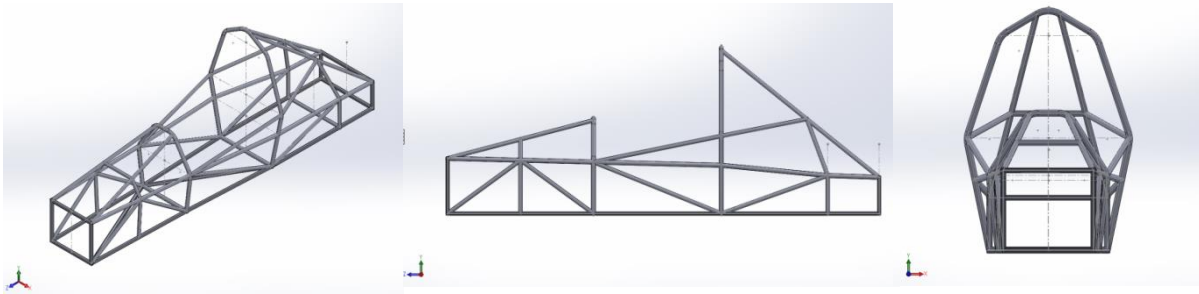


Figura A.8 Geometria del tercer xassís dissenyat

- **Quart disseny**

En el quart disseny es va realitzar un canvi en la forma de l'arc principal de seguretat, passant de 5 radis de curvatura a 3 radis, pensant en el procés de fabricació, ja que com més fàcil sigui de fabricar, més precís serà el resultat.
En aquest punt vam començar a treballar en els punts de suport del sistema de suspensió i ens vàrem trobar amb el problema que els punts de suport del trapezi necessitaven més alçada respecte del terra. Per solucionar aquest problema ens vam inspirar en un altre punt de la recerca d'informació d'internet realitzada anteriorment, i es fer el terra discontinu, realitzant un canvi de pla en la part més baixa és la de l'arc principal així els punts davanters i posteriors de trapezi quedaven més alts respecte s
del terra.
Un altre canvi significatiu respecte el disseny anterior va ser canviar la direcció de les barres d'impacte lateral, ja que es van analitzar les dues opcions amb el programa d'elements finits i van donar millor resultats les descrites en la imatge següent.

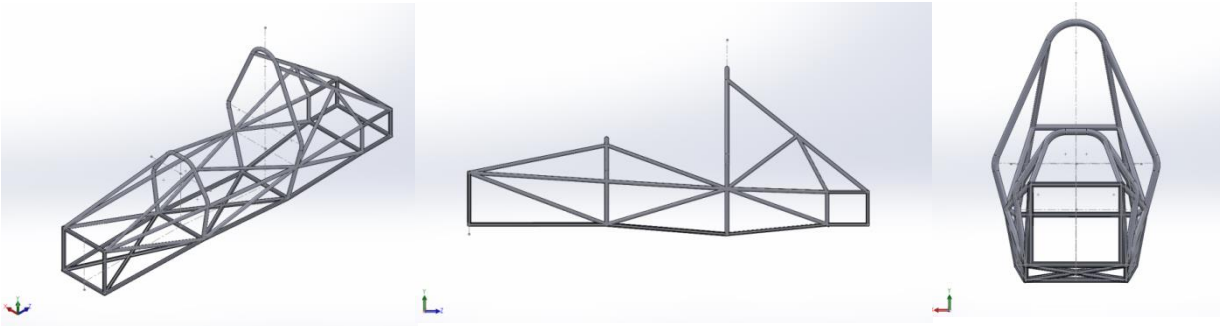


Figura A.9 Geometria del quart xassís dissenyat

- **Disseny definitiu**

Els canvis realitzats en el quart disseny ens porten al disseny definitiu, aquest a diferència de l'anterior disseny disposa dels punts de trapezi frontals triangulats, aquests punts estan definits en el document Memòria a l'apartat "2.1.2 Components dinàmics".
Una altra variació respecte del disseny anterior ha sigut la variació del l'arc principal de seguretat, la part superior s'ha variat la forma d'un mateix radi a dos radis perquè l'empresa quin ens farà el plegat dels tubs no disposen de les matrius dissenyades pel radi de curvatura específic del quart disseny. També s'ha canviat l'alçada dels radis laterals fent-los coincidir amb el punt on s'uneixen les barres d'impacte lateral. Aquest també disposa de la barra de cinturons.

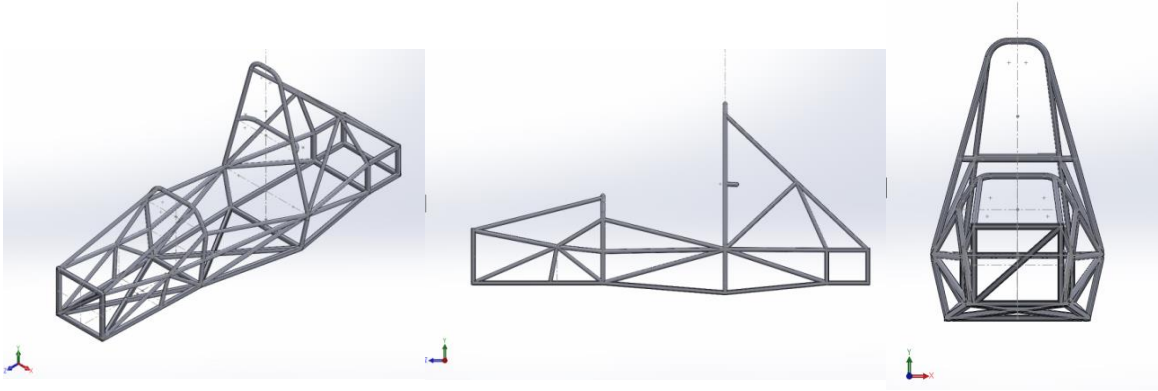


Figura A.10 Geometria del disseny definitiu

- **Muntatge**

Un cop definida la geometria definitiva es va realitzar un muntatge amb els components més importants a tenir en compte, tant per assegurar el compliment de normativa com per assegurar que parts importants com el motor o diferencial podien cabre sense interferir amb l'estructura.

Representacions per assegurar el compliment de la normativa:
-Plantilla que defineix les distàncies de la cabina de pilotatge.
-Plantilla que defineix l'espai dels peus del pilot.
-Ergonomia del pilot.
-Recta tangent entre els dos arcs de seguretat per assegurar la distància d'aquesta amb el casc del pilot.

Representacions per assegurar que hi càpiga el pilot dins l'estructura:
-Ergonomia del pilot.
-Motor.
-Diferencial.
-Atenuador d'impactes frontals.
-Volant de direcció.
-Seient del pilot.

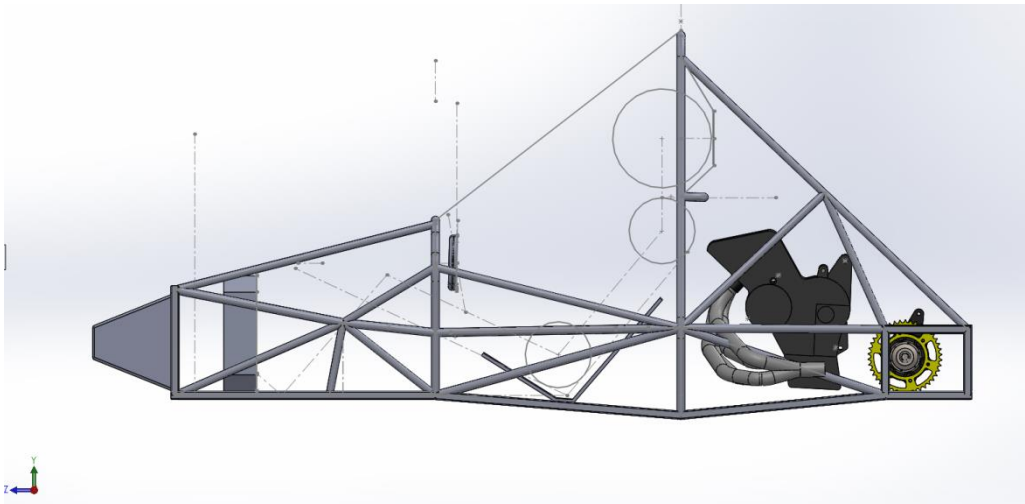


Figura A.11 Vista lateral del muntatge amb xassís definitiu

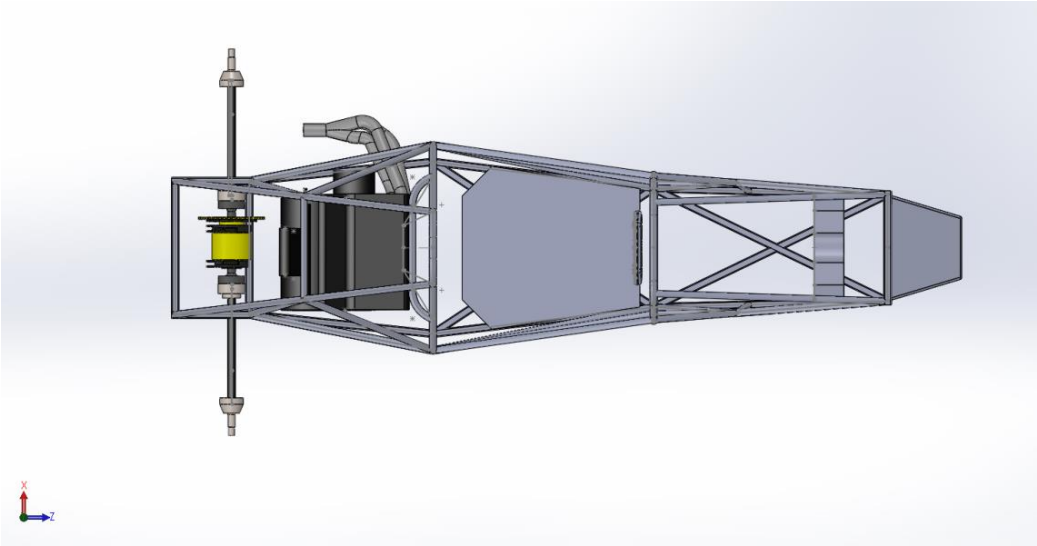


Figura A.11 Vista de la planta del muntatge amb el xassís definitiu

ANNEX B. CÀLCULS ESTÀTICS

ANNEX B CÀLCULS ESTÀTICS

B.1 Introducció

Un cop finalitzat el procés de disseny i ja tinguem la geometria definitiva, procedim al procés d'anàlisi. En aquest document es presenten primer de tot l'estudi del centre de gravetat del conjunt xassís, pilot i motor, que serà necessari per realitzar les simulacions que s'exposen a continuació. I posteriorment es presenten el quatre assaigs estàtics que s'han realitzat per simular diferents casos d'impactes.

B.2 Càlcul del centre de masses

A continuació es farà el càlcul dels centre de masses del pilot, del motor i del xassís amb el programa Solidworks, ens ha servit per identificar on es trobar aquest punt de cada massa.

B.2.1 Elements considerats pel càlcul del centre de masses del Monoplaça

- **Centre de masses del pilot**

El centre de gravetat del pilot és el més influent en l'estabilitat del monoplaça, ja que considerant que el pes mitjà dels pilots es troba entre 70 i 80 kg, és la massa més gran de totes les parts que formen el monoplaça. Per tant s'ha intentat trobar l'equilibri entre la inclinació de l'esquena del pilot i la comoditat d'aquest, per poder baixar el màxim possible el centre de gravetat, encara que aquest paràmetre ve condicionat per la forma del seient que s'utilitzi.

En les imatges següents es mostra el centre de gravetat del pilot en la posició de conducció.

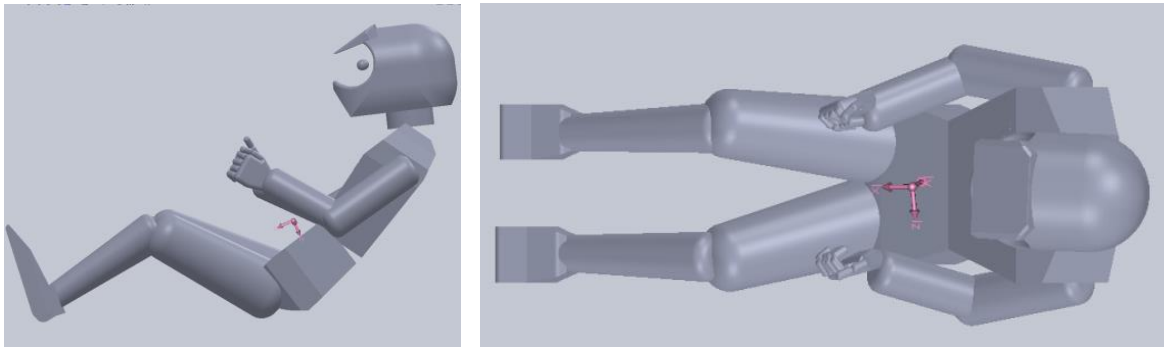


Figura B.1 Posició del centre de masses del pilot, vist en planta i de perfil

- **Centre de masses del xassís**

El centre de gravetat del xassís és la segona massa més important del conjunt monoplaça amb una massa de 45 kg. En la imatge següent es mostra la ubicació del centre de gravetat del xassís.

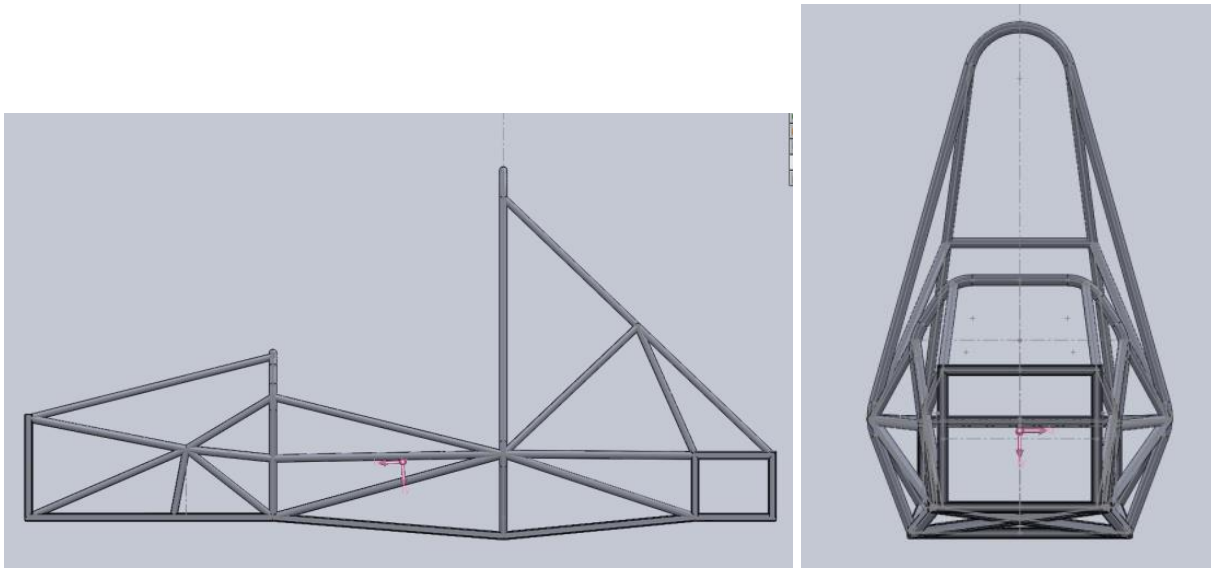


Figura B.2 Posició del centre de masses del xassís, vist en alçat i perfil

- **Centre de gravetat del motor**

El motor utilitzat és el d'una moto de carrer concretament de la Yamaha Fazer de 600cc de l'any 2004. Aquest té un pes de 40 Kg. En la imatge següent es mostra el centre de gravetat del motor.

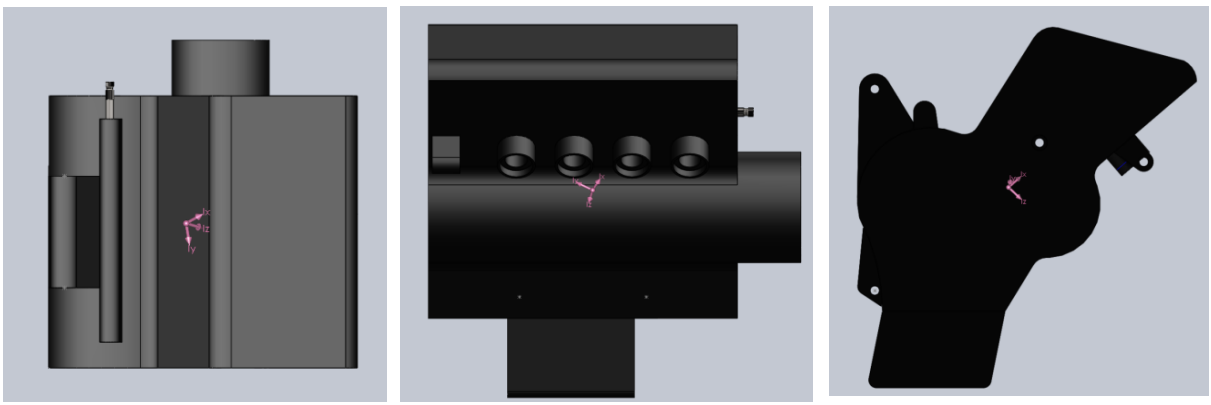


Figura B.3 Posició del centre de masses del motor

B.2.2 Centre de masses del conjunt

En la imatge següent es mostren els tres cossos que tenen més repercussió en el càlcul del centre de gravetat del conjunt monoplaça. La posició del centre de gravetat del conjunt ens servirà per determinar les condicions de contorn en els processos d'anàlisi, ja que considerem que el centre de gravetat es el punt on té més inèrcia i per tant mostra més resistència a patir desplaçaments.

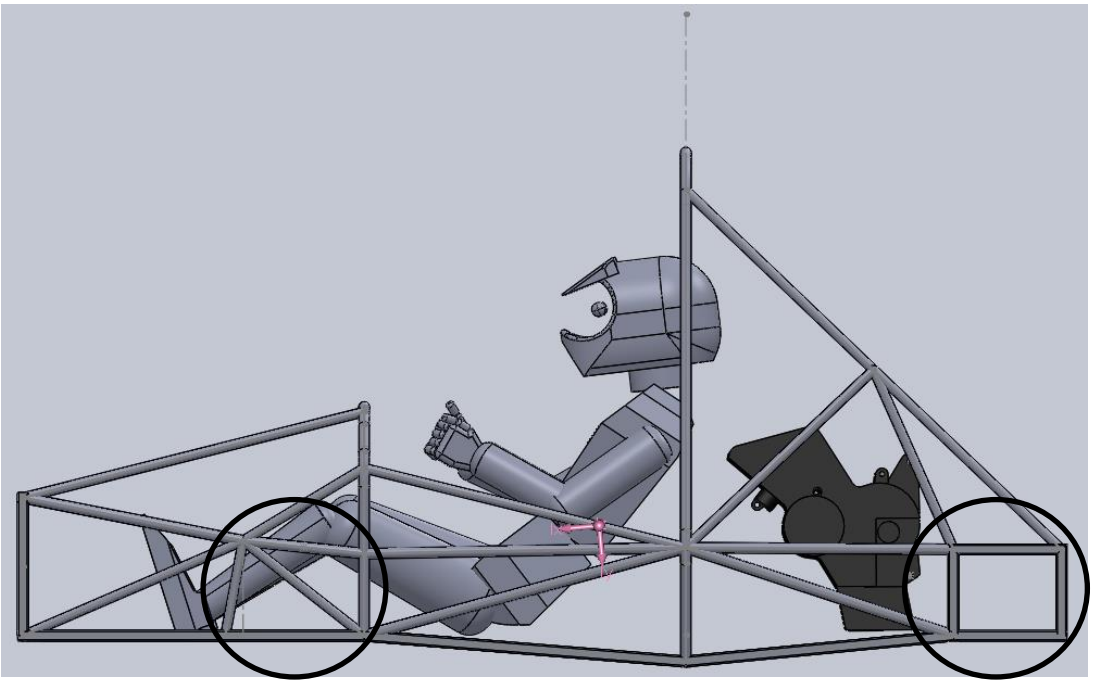


Figura B.4 Posició del centre de masses del conjunt

B.3 Simulacions amb el programa Ansys

B.3.1 Introducció

En aquest document s'exposa les anàlisis que s'han fet amb el programa Ansys Workbench per simular els 3 casos d'impacte que pot patir el monoplaça, tant per avaluar com treballa el nostre xassís com per verificar que compleix amb els requisits de seguretat imposats per la competició.

Concretament es fa referència a la geometria utilitzada, assignació de diàmetres i espessors, l'estat de càrregues, restriccions imposades i finalment la valoració dels resultats.

- **Geometria**

El disseny final del xassís, que es mostra a continuació, és el resultat d'un procés de disseny exposat en un altre document, en concret a l'Annex A, aquest serà el mateix que utilitzarem per fer totes les anàlisis.

Per definir la geometria dins el programa el primer que s'ha fet és entrar els punts d'unió de cada barra (especificats en el document Plànols) mitjançant punts de coordenades i posteriorment s'han unit aquests punts amb elements tipus "beam" per formar les barres, fins a un total de 60 barres. Finalment s'ha assignat una secció a cada barra definida pel diàmetre interior i el diàmetre exterior.

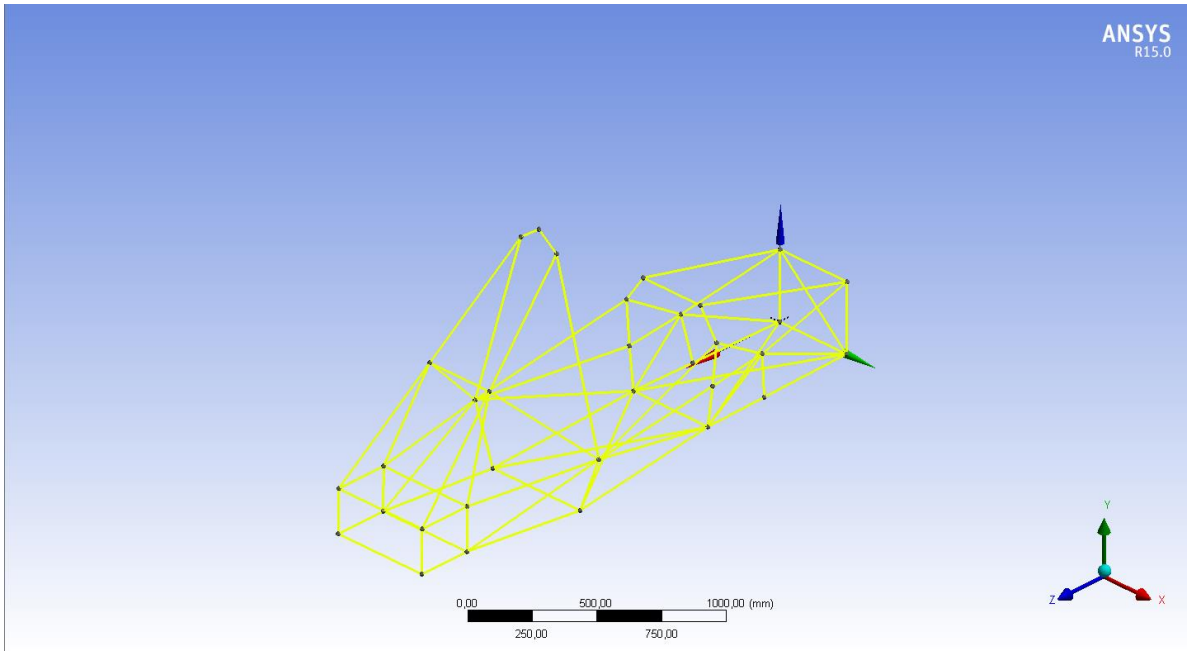


Figura B.5 Geometria representada en el programa Ansys

- **Mallat**

Un cop definida la geometria, es genera un mallat automàtic, en que es varia la mida dels elements amb una dimensió de 3mm. Vist l'exactitud dels resultats obtinguts, aquest serà el mallat que s'utilitzarà en totes les simulacions que es realitzen en aquest projecte.

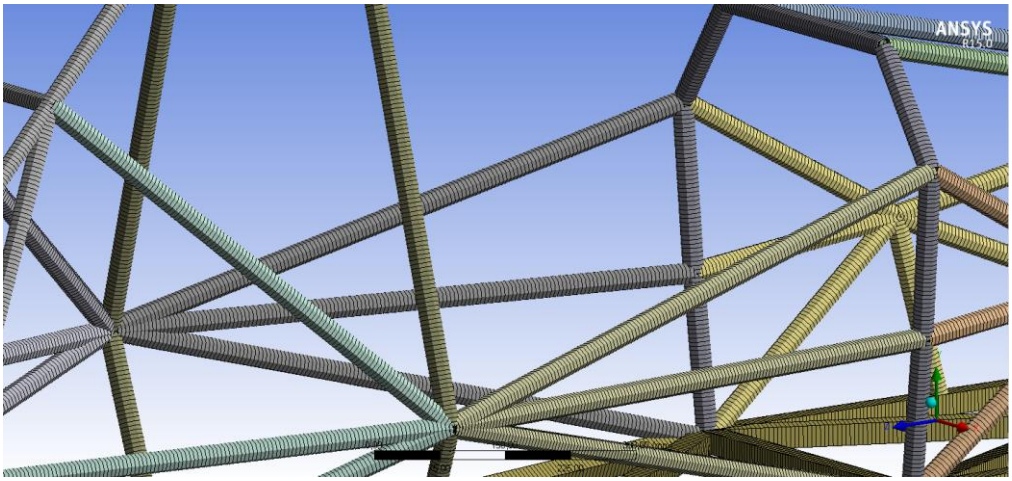


Figura B.6 Mallat de l'estructura

- **Condicions de contorn**

Les restriccions de moviment que s'ha utilitzat en tots els assajos estàtics són les mateixes, s'ha restringit el moviment en els tres eixos en quatre punts de l'arc principal, ja que són els quatre punts més propers al centre de gravetat del conjunt calculat en l'apartat "B.2.2 centre de gravetat del conjunt" i on el monoplaça tindrà més inèrcia en aplicar-hi una força.

- **Propietats de l'acer utilitzat**

Taula B.1 Propietats de l'acer imposades per normativa i les utilitzades per la fabricació del xassís

	Mòdul de Young (GPa)	**Límit elàstic (MPa)**	**Límit últim (MPa)**
Propietats de l'acer imposades per la competició	200	305	365
Propietats de l'acer seleccionat per el xassís	200	470	588-784

B.3.2 Càlcul estàtic impacte frontal

L'impacte frontal simula el cas més desfavorable en la que el pilot impacta frontalment contra un altre vehicle o un mur de protecció. És el cas més desfavorable dels tres assajos, ja que s'hi apliquen dues forces, una frontal i una lateral i una d'elles té el valor més gran de totes les simulacions.

S'ha de tenir en compte, que en el cas real hi ha l'atenuador d'impactes en el panell frontal que absorbiria part de l'energia de l'impacte.

- **Estat de càrregues**

Les càrregues emprades per al càlcul de les deformacions i les tensions per simular l'impacte frontal ve determinada per normativa, tant el valor com les direccions d'aquestes càrregues, especificades en la taula següent.

Taula B.2 Valor i direcció de les forces aplicades en l'impacte frontal

Carregues	Direcció	Valor	Unitat
Força frontal	X	0	N
	Y	0	N
	Z	120.000	N
Força lateral	X	10.500	N
	Y	0	N
	Z	0	N

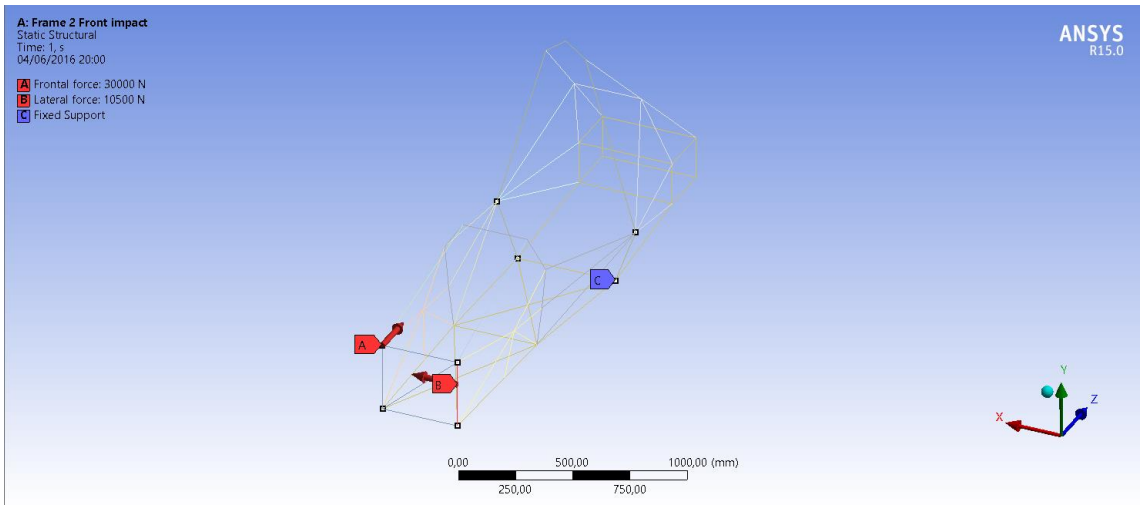


Figura B.7 Estat de càrregues i restriccions de moviment en l'impacte frontal

La força frontal de 120 KN s'ha dividit per 4 per aplicar-la puntualment en els 4 punts indicats a la imatge perquè transmeti la força al llarg de l'estructura.

- **Tensions**

El resultat de la simulació ens indica que la tensió màxima es troba en un punt de l'arc frontal de seguretat, amb un valor de **383,4 MPa**. Això ens indica que la tensió no arriba al límit elàstic de l'acer utilitzat per la fabricació del xassís i per tant el càlcul lineal que s'ha considerat és correcte.

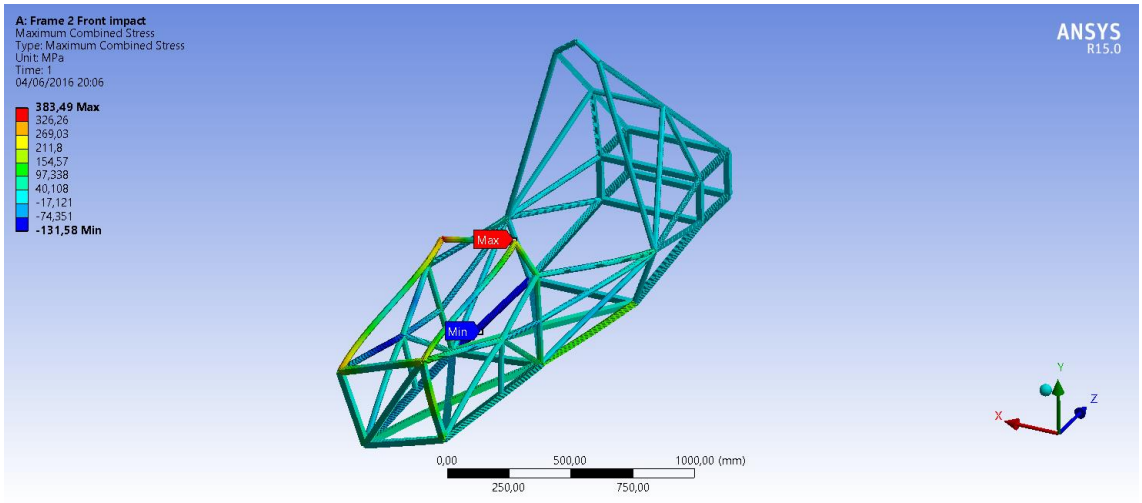


Figura B.8 Tensions màximes del xassís

- **Deformacions**

La deformació màxima en tota l'estructura és de **14,2 mm**, no superant el valor imposat per la normativa de 25 mm, per tant podem donar per superada la prova d'impacte frontal.

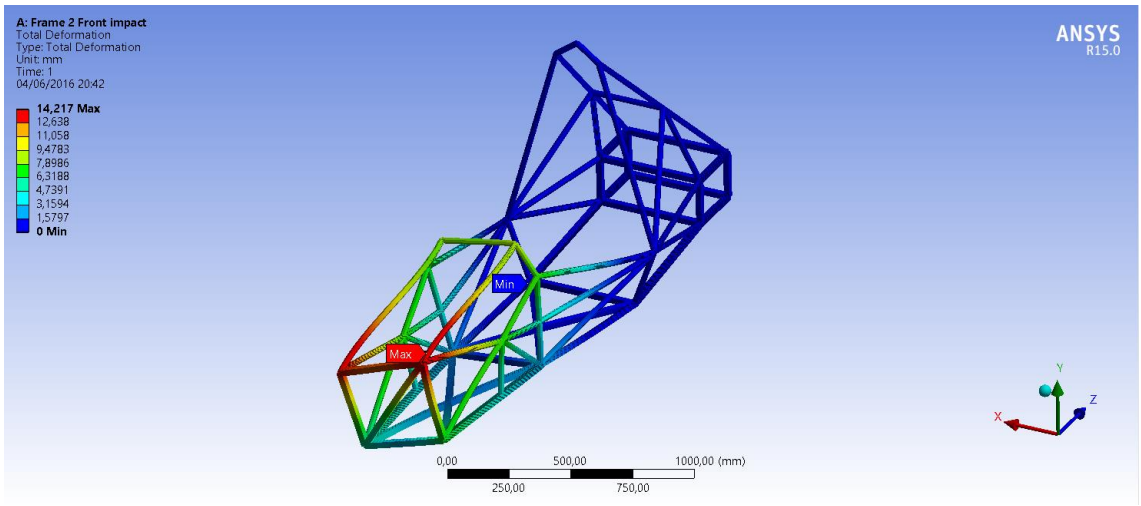


Figura B.9 Deformacions màximes del xassís

B.3.3 Càlcul estàtic impacte lateral

En aquest assaig se simula el cas en què un monoplaça impacta contra un altre lateralment.

- **Estat de càrregues**

Les càrregues emprades per al càlcul de les deformacions i les tensions per simular l'impacte lateral ve determinada per normativa, tant el valor com les direccions d'aquestes càrregues, especificades en la taula següent.

Taula B.3 Valor i direcció de les forces aplicades en l'impacte lateral

Carregues	Direcció	Valor	Unitat
Força lateral	X	-7000	N
	Y	0	N
	Z	0	N

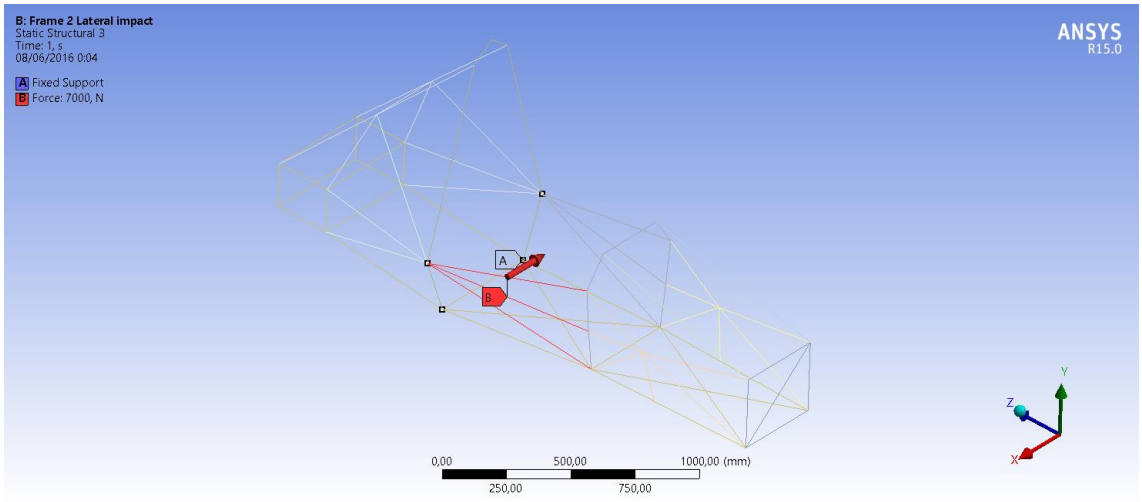


Figura B.10 Estat de càrregues i restriccions de moviment en l'impacte lateral

La càrrega s'ha aplicat en les tres barres que uneixen l'arc principal amb l'arc frontal de seguretat, dissenyades per protegir al pilot en un cas d'impacte lateral.

- **Tensions**

El resultat de la simulació ens indica que la tensió màxima es troba en el punt d'unió de les barres de protecció d'impacte lateral amb l'arc principal de seguretat, amb un valor de **233,8 MPa**. Això ens indica que la tensió no arriba al límit elàstic de l'acer utilitzat per la fabricació del xassís i per tant el càlcul lineal que s'ha considerat és correcte.

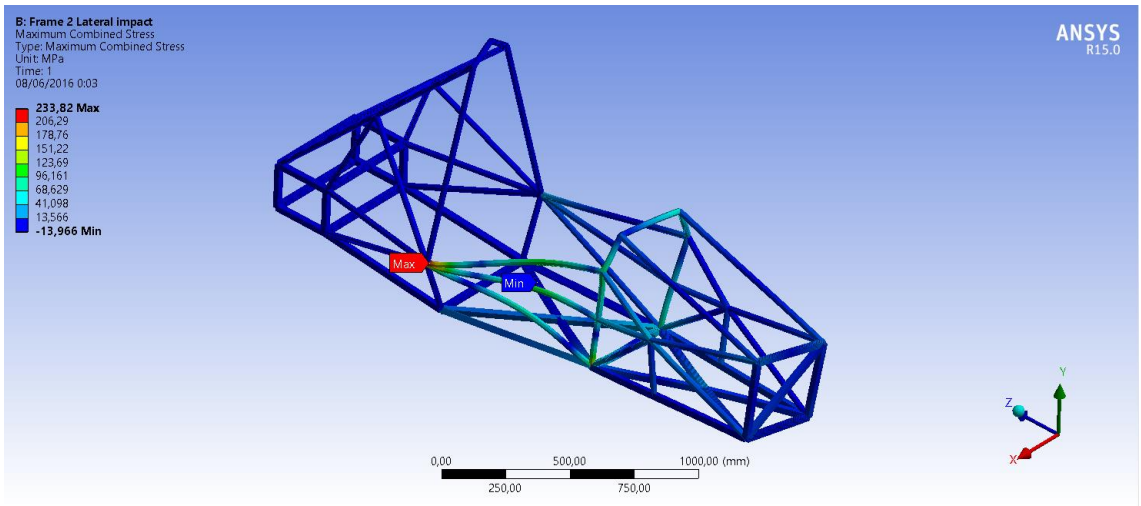


Figura B.11 Tensions màximes del xassís

- **Deformacions**

La deformació màxima en tota l'estructura és de **3,8 mm**, no superant el valor imposat per la normativa de 25 mm, per tant podem donar per superada la prova d'impacte lateral.

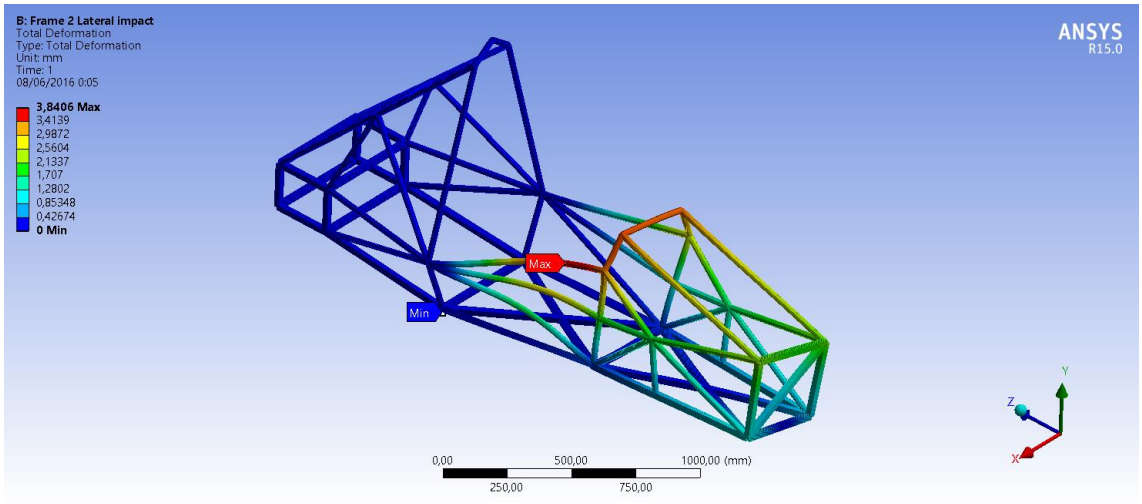


Figura B.12 Deformacions màximes del xassís

B.3.4 Càlcul estàtic impacte arc frontal en cas de bolcada

Aquest assaig simula el cas en què el monoplaça després de patir un accident bolca i els arcs principals impacten amb el terra. Aquest cas no és gaire comú que passi però s'ha d'assegurar que els arcs de seguretat aguanten les tensions generades per aquest impacte i que no es deformen tant com perquè el pilot entri en contacte amb el terra. Es recorda que la distància entre la línia tangent als dos arc de seguretat i el casc del pilot s'ha dissenyat per a què hi hagi una distància de 5 cm.

- **Estat de càrregues**

Les càrregues emprades per al càlcul de les deformacions i les tensions per simular l'impacte de bolcada ve determinada per normativa, tant el valor com les direccions d'aquestes càrregues, especificades en la taula següent

Taula B.4 Valor i direcció de les forces aplicades en l'arc frontal

Carregues	Direcció	Valor	Unitat
Força	X	6000	N
	Y	-9000	N
	Z	5000	N

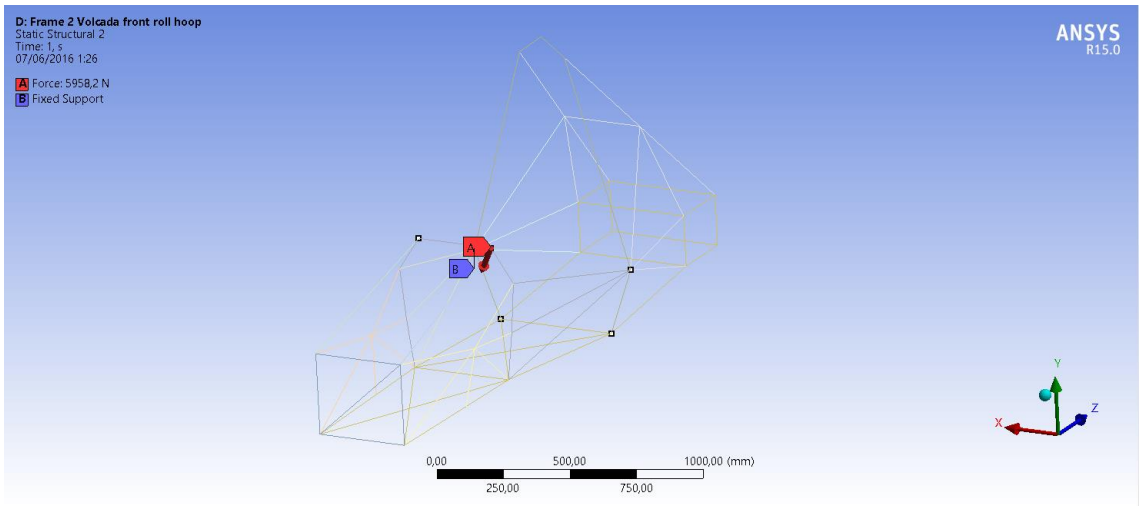


Figura B.13 Estat de càrregues i restriccions de moviment aplicades en l'arc frontal

- **Tensions**

El resultat de la simulació ens indica que la tensió màxima es troba en el punt d'unió entre l'arc frontal i la barra suport que uneix el front bulkhead amb l'arc frontal, coincidint també amb el punt d'aplicació de la força, amb un valor de **266,5 MPa**. Això ens indica que la tensió no arriba al límit elàstic de l'acer utilitzat per la fabricació del xassís i per tant el càlcul lineal que s'ha considerat és correcte.

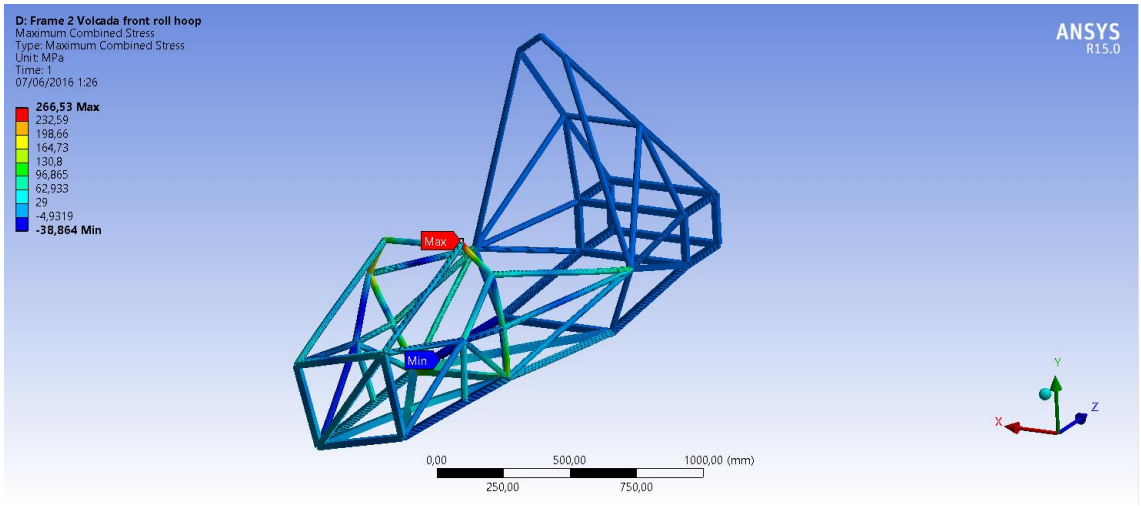


Figura B.14 Tensions màximes del xassís

- **Deformacions**

La deformació màxima en tota l'estructura és de **7,9 mm**, no superant el valor imposat per la normativa de 25 mm, per tant podem donar per superada la prova d'impacte lateral.

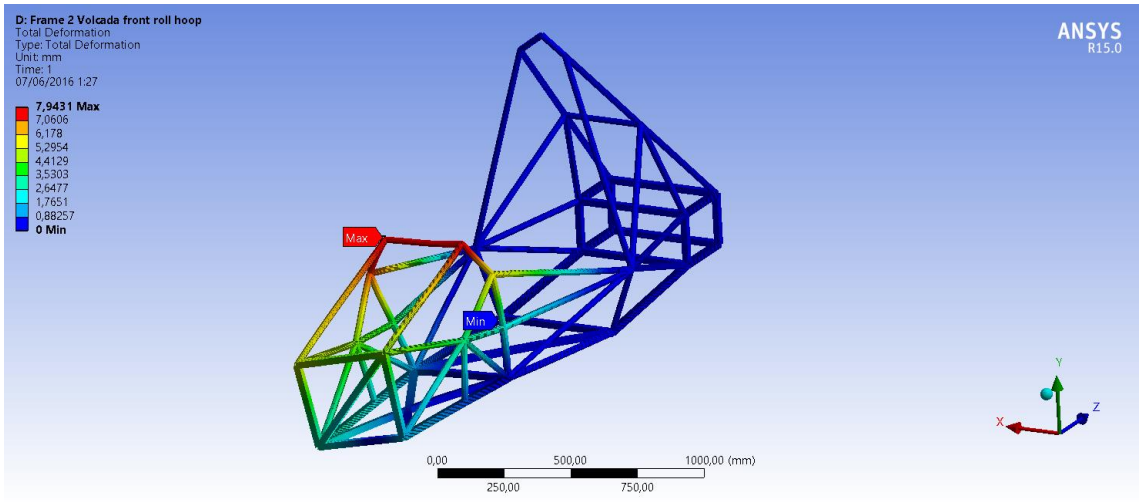


Figura B.15 Deformacions màximes del xassís

B.3.5 Càlcul estàtic impacte arc principal en cas de bolcada

Aquest assaig és el mateix que el del cas anterior però aplicat les forces en l'arc frontal, ja que s'ha considerat que en el cas més desfavorable de tots, en cas de bolcada, hi ha la possibilitat que el primer impacte el rebi un sol arc, per això s'ha fet una simulació per cada arc.

- **Estat de càrregues**

Les càrregues emprades pel càlcul de les deformacions i les tensions per simular l'impacte de bolcada ve determinada per normativa, tant el valor com les direccions d'aquestes càrregues, especificades en la taula següent.

Taula B.5 Valor i direcció de les forces aplicades en l'arc principal

Carregues	Direcció	Valor	Unitat
Força	X	6000	N
	Y	-9000	N
	Z	5000	N

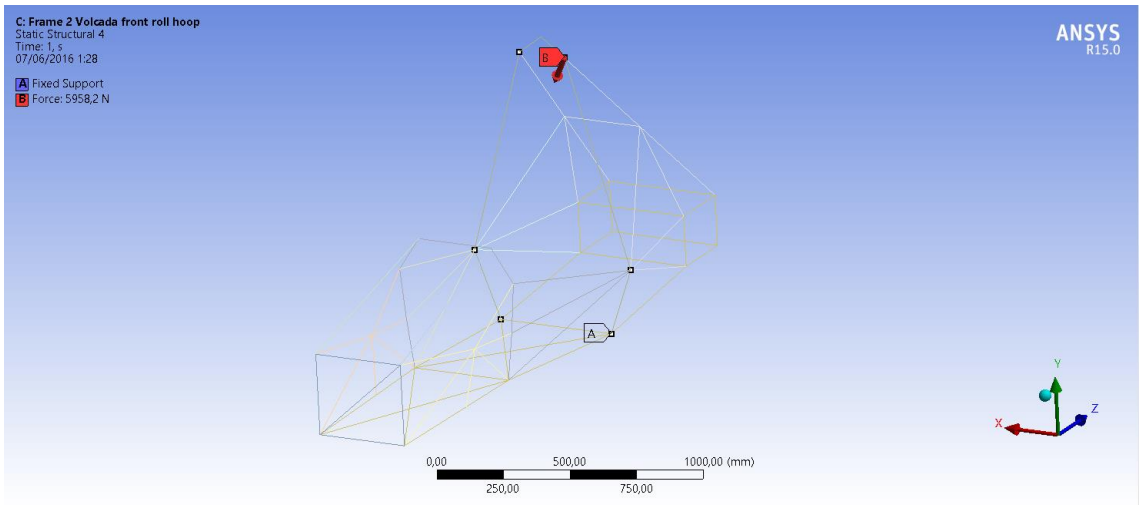


Figura B.16 Estat de càrregues i restriccions de moviment aplicades en l'arc principal

- **Tensions**

El resultat de la simulació ens indica que la tensió màxima es troba en el punt d'unió entre l'arc principal de seguretat i el tirant d'aquest, coincidint també en el punt d'aplicació de la força, amb un valor de **300,9 MPa**. Això ens indica que la tensió no arriba al límit elàstic de l'acer utilitzat per la fabricació del xassís i per tant el càlcul lineal que s'ha considerat és correcte.

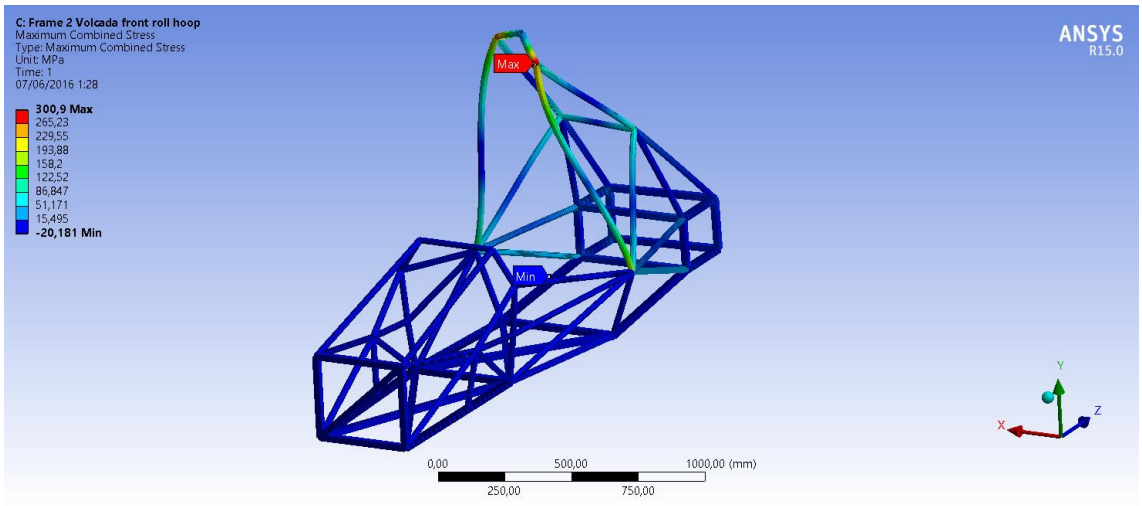


Figura B.17 Tensions màximes del xassís

- **Deformacions**

La deformació màxima en tota l'estructura és de **5,8 mm**, no superant el valor imposat per la normativa de 25 mm, per tant podem donar per superada la prova d'impacte en l'arc principal en cas de bolcada.

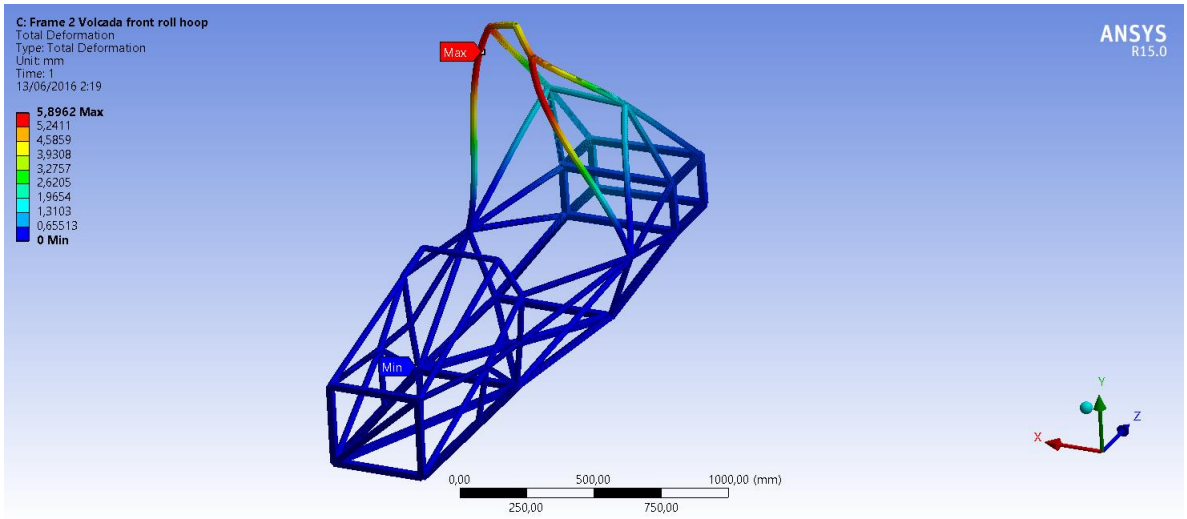


Figura B.18 Deformacions màximes del xassís

ANNEX C. CÀLCULS A FATIGA

ANNEX C CÀLCULS A FATIGA FORÇA LATERAL DEGUT AL PAS PER CORBA DEL MONOPLAÇA

C.1 Introducció

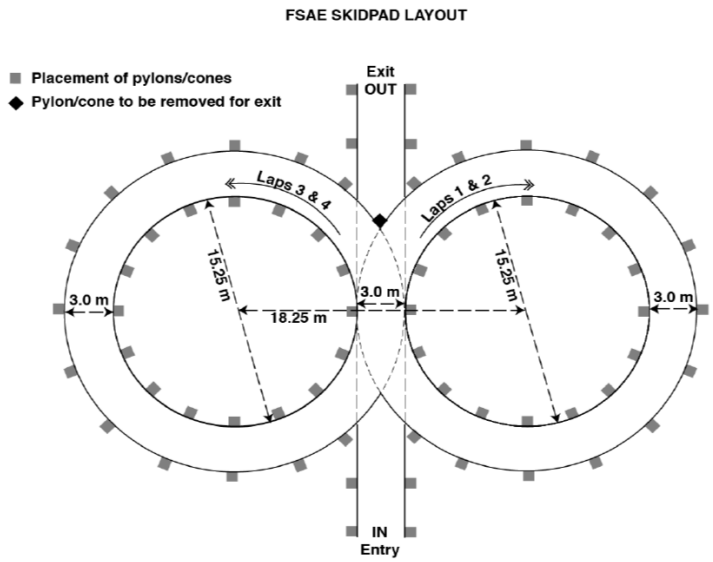
Per completar els càlculs realitzats en l'annex anterior, en aquest document es realitzarà un estudi a fatiga del nostre xassís. Agafarem les dimensions del circuit on es farà la prova "Skid Pad".

En aquest s'avalua la capacitat del vehicle per suportar acceleracions laterals en un circuit en forma de vuit, la prova consisteix a fer un nombre de voltes en el menor temps possible. S'ha escollit aquest circuit per avaluar el comportament del xassís, ja que és el traçat que té la corba amb el radi més petit en tota la competició i s'alterna constantment el sentit de gir (esquerres i dretes).

C.2 Càlcul de forces laterals

El circuit té el traçat que es mostra a continuació, considerant que el pilot apura el màxim la corba, el radi de curvatura serà de **r =7,625 m.**

Figura C.1 Dimensions del circuit per la prova "Skid Pad"



Considerant que la corba es traça a una velocitat de **v**= 40 k/h = **11,11 m/s**, i que el pes total del monoplaça més el pilot es de **m= 290 kg**, calculem l'acceleració centrípeta i la força lateral que es genera en aquest instant:

$$\boldsymbol{A_c} = \frac{v^2}{r} = \frac{11{,}11^2}{7{,}625} = \mathbf{16{,}191}\ \boldsymbol{m/s^2}$$

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{m_{p+m}} * \boldsymbol{A_c} = 290\ kg * 16{,}191\ m/s^2 = \mathbf{4695{,}39}\ \boldsymbol{N}$$

C.2 Càlcul de tensions en el punt més desfavorable

Un cop es coneix el valor de la força, es va adaptar el model que ja teníem de les proves estàtiques fetes anteriorment, per fer el càlcul a fatiga.

Per fer els càlculs es localitzarà el punt que tingui la tensió més alta i es farà l'assaig simulat que el monoplaça traça la corba en direcció a la dreta i després a l'esquerra.

-Corba en direcció a l'esquerra

Per definir les condicions de contorn es van introduir les coordenades dels punts de les quatre rodes i es van restringir els desplaçaments de la següent manera:

Taula C.1 Restriccions de moviment de cada roda quan la corba és en direcció a l'esquerra

	coordenades		
Punts de les rodes	**Eix X**	**Eix Y**	**Eix Z**
A	Lliure	0	Lliure
B	Lliure	0	Lliure
C	0	0	Lliure
D	0	0	0

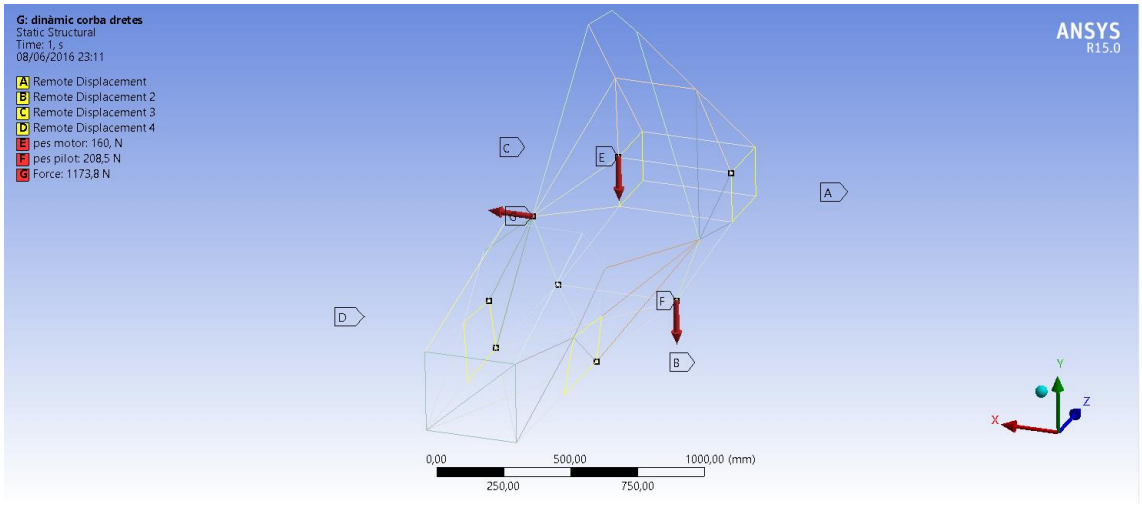


Figura C.2 Estat de càrregues i restriccions de moviment en l'assaig a fatiga

Les forces que s'han aplicat en la simulació és la força lateral en direcció oposada al sentit de la corba, calculada anteriorment, i dues forces verticals, el pes del pilot considerant una massa de 85 kg (**P_p= 834 N**) repartits en 4 punts en la cabina del pilot i el pes del motor

d'una massa de 65 kg (P_m**= 640 N**). Les forces verticals fan que es mantinguien les quatre rodes en contacte amb el terra.

- **Tensions**

Els resultats de la simulació ens indiquen que el punt més desfavorable es troba a la part inferior de l'arc principal de seguretat punt en què s'uneix amb la barra del terra, amb una tensió màxima quan es pren la corba cap a l'esquerra de **26,611 MPa.**

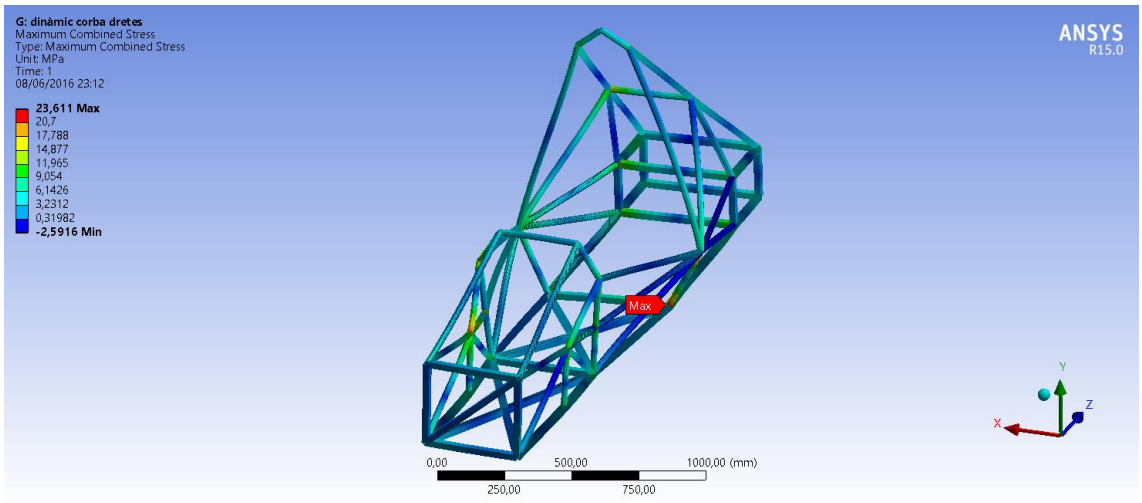


Figura C.3 Punt del xassís amb la tensió més alta quan la corba és en la direcció a l'esquerra

-Corba en direcció a la dreta

Per definir les condicions de contorn del traçat de corba cap al sentit oposat, es van restringir els desplaçaments de la següent manera:

Taula C.2 Restriccions de moviment de cada roda quan la corba és en direcció a dreta

	coordenades		
Punts de les rodes	**Eix X**	**Eix Y**	**Eix Z**
A	Lliure	0	Lliure
B	Lliure	0	Lliure
C	0	0	0
D	0	0	Lliure

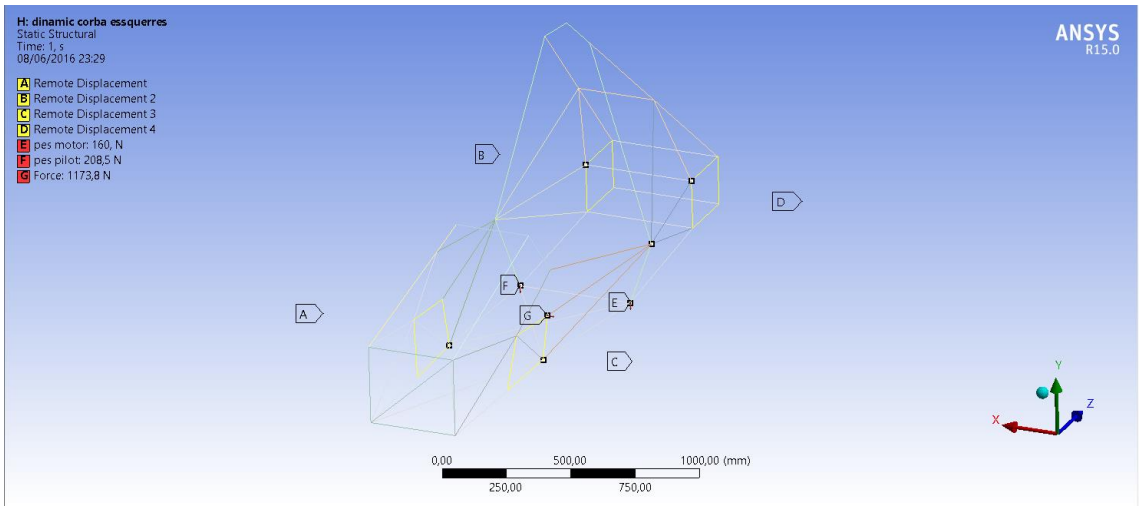


Figura C.4 Estat de càrregues i restriccions de moviment en l'assaig a fatiga

Les forces generades pels pesos del pilot i del motor quan es traça la corba en direcció a la dreta queden iguals que en la simulació anterior i la força lateral canvia de sentit, orientant-se en el sentit oposat del la corba.

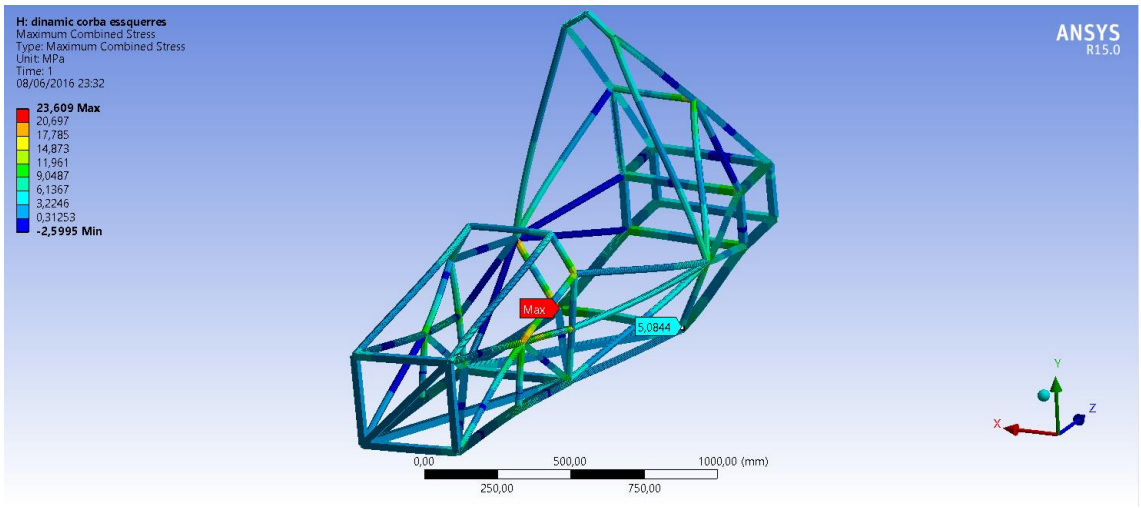


Figura C.5 Tensió del mateix punt quan la corba és en direcció a la dreta

El resultat de les tensions en el mateix punt analitzat anteriorment ens dóna un valor de tensions **de 5,1 MPa**

C.3 Càlcul del coeficient de seguretat

- **Material**

El material en què està fabricat el xassís, és d'acer al carboni i s'ha obtingut a partir d'un procés d'extrusió. Les seves propietats són: **Sy= 470 MPa / Sut= 588-784 MPa**

- **Càlcul resistència a la fatiga**

A continuació es fan els càlculs dels factors que modifiquen la resistència a fatiga d'una peça.

$$\mathrm{Se} = \mathrm{Se(pr)} \cdot \mathrm{ka} \cdot \mathrm{kb} \cdot \mathrm{kc} \cdot \mathrm{kd} \cdot \mathrm{ke}$$

$$\mathbf{Se(pr)} = 0{,}5 \cdot \mathrm{Sut} = 0{,}5 \cdot 686 = \mathbf{343\ MPa}$$

(Factor de superfície) $\mathrm{ka} = \mathrm{a} \cdot (\mathrm{sut})^{\mathrm{b}} \rightarrow \mathbf{ka} = 56{,}1 \cdot (686)^{-0{,}719} = \mathbf{0{,}512}$

(Factor de dimensions o probabilitat) $\mathrm{kb} = (\frac{\mathrm{d}}{7{,}62})^{-0.107} \rightarrow \mathbf{kb} = (\frac{25}{7{,}62})^{-0.107} = \mathbf{0{,}88}$

(Factor de càrrega i factor de temperatura) $\mathbf{kc} = \mathbf{kd} = \mathbf{1}$

No s'ha realitzat el càlcul del coeficient de concentració de tensions (Kf), ja que amb la simulació podem conèixer el valor de la tensió màxima i el la secció on es troba però no podem saber en quin punt dins la secció es troba.

$$\mathbf{Se} = \mathrm{Se(pr)} \cdot \mathrm{ka} \cdot \mathrm{kb} \cdot \mathrm{kc} \cdot \mathrm{kd} \cdot \mathrm{ke} = 343 \cdot 0{,}512 \cdot 0{,}88 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = \mathbf{154{,}66\ MPa}$$

Fluctuació de la tensió, amb els resultats extrets de la simulació anterior:

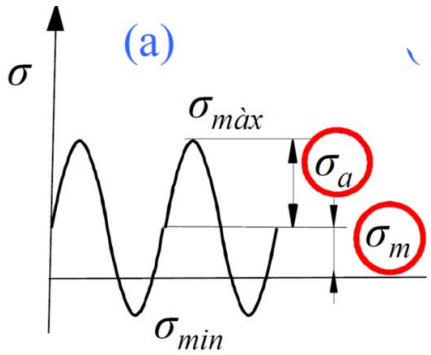


Figura C.6 Representació de la tensió mitjana i de la tensió alterna

$$\sigma_{mín} = 5{,}1 \text{ MPa} \;/\; \sigma_{màx} = 23{,}611 \text{ MPa}$$

$$\boldsymbol{\sigma_m} = \frac{\sigma_{màx} + \sigma_{mín}}{2} = \mathbf{14{,}35\ MPa}$$

$$\boldsymbol{\sigma_a} = \frac{\sigma_{màx} - \sigma_{mín}}{2} = \mathbf{9{,}25\ MPa}$$

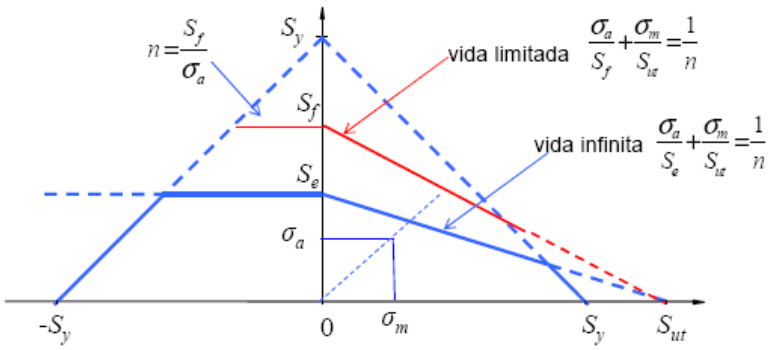


Figura C.7 Gràfic per determinar el coeficient de seguretat a fatiga

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \rightarrow \frac{1}{n_f} = \frac{9{,}25}{154{,}66} + \frac{14{,}35}{686} \rightarrow \boldsymbol{n_f} = \mathbf{12{,}3}$$

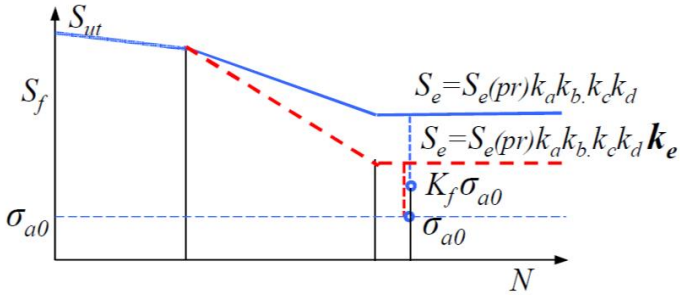


Figura C.8 Gràfic per determinar la vida útil del xassís

$$\boldsymbol{\sigma_a} = \mathbf{9{,}25\ MPa}$$

$$\mathbf{Se} = \mathbf{154{,}66\ MPa}$$

C.4 Conclusions

Amb els resultats obtinguts en aquest apartat podem assegurar que si no es produeix cap defecte en el procés de fabricació, el nostre xassís aguantarà els esforços sotmesos durant les proves dinàmiques de la competició, ja que el valor del coeficient de seguretat a fatiga és de l'ordre de 12 vegades superior al trencament, poden assegurar que el xassís tindrà **vida infinita.**