

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Disseny, anàlisi i fabricació d'un xassís de Formula Student

**Document:** Memòria i annexos

**Alumne:** Eloy Catalan Casas

**Tutor:** Jordi Renart Canalias

**Departament:** Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

**Àrea:** Mecànica de medis continus i teoria de les estructures

**Convocatòria (mes/any):** 09/2021

# Índex

1. Introducció	3
1.1 Antecedents	3
1.2 Objecte del projecte	3
1.3 Requeriments	3
1.4 Abast del projecte	4
2. Geometria del disseny del xassís	5
2.1 Posicions i condicions inicials	5
2.1.1 Posició dels eixos anterior i posterior i conjunt de suspensions	5
2.1.2 Posició del pilot	6
2.1.3 Posició del motor i el diferencial	6
2.2 El xassís definitiu i les seves parts	7
2.2.1 Arcs principals i barra de cinturons	8
2.2.2 Pla frontal	10
2.2.3 Base	10
2.2.4 Vèrtexs dels trapezis i de les suspensions	10
2.2.5 Estructura lateral d'impacte (SIS)	11
2.2.6 Caixa del diferencial i motor	11
2.2.7. Tirants i suports frontals i posteriors	12
2.3. Material i dimensions	12
2.3.1. Propietats del material	12
2.3.2. Dimensions	13
3. Anàlisi del xassís	14
3.1. Casos d'impacte	14
3.2 Rigidesa torsional	17

4. Bancada de fabricació del xassís	19
4.1. Parts	19
5. Resum del pressupost	21
6. Conclusions	22
7. Relació de documents	23
8. Bibliografia	24
ANNEX A. Adaptació del xassís a la normativa	25
A.1 Xassís	26
A2. Cabina del pilot – Cockpit	31
ANNEX B. Inicis i disseny alternatiu	36
ANNEX C. Càlculs amb elements finits	40
C1. Càlculs dels casos d'impacte	41
C1.1 Impacte sobre l'arc principal	42
C1.2 Impacte sobre l'arc frontal	44
C1.3 Impacte a l'estructura lateral d'impacte	45
C1.4 Xoc frontal (a)	47
C1.5 Xoc frontal (b)	48
C1.6 Barra de cinturons	49
C2. Rigidesa torsional	51
C3. Conclusions	55

## 1. Introducció

### 1.1 Antecedents

La Formula Student és una competició interuniversitària on l'objectiu és que un grup d'estudiants formi un equip a mode d'empresa i aquest dissenyi i fabriqui un monoplaça apte per a la competició. L'equip es divideix en diferents departaments o seccions que s'encarregaran de dissenyar i fabricar les diferents parts. En aquest cas, es demana al departament de xassís el disseny i fabricació de la estructura primària d'un Formula Student.



Imatge 1 - Exemple d'un Formula Student.

[Formula-student.nl](http://Formula-student.nl)



Imatge 2 - Exemple de xassís tubular.

<https://fsae.eng.wayne.edu>

### 1.2 Objecte del projecte

L'objectiu d'aquest projecte es dissenyar un xassís tubular d'acer, analitzar que compleixi les normatives i indicar el procés de fabricació d'aquest per a la competició de la Formula Student respectant la normativa vigent d'aquesta mateixa competició.

### 1.3 Requeriments

El xassís haurà de complir el següents requeriments:

- Complir amb les especificacions tècniques de disseny de la normativa de la FSAE i FSG de 2021.
- El xassís haurà de ser de tipus tubular.
- El material utilitzat serà un acer que iguali o superi les especificacions que es demana a la normativa.
- La distància entre eixos serà de 1600mm, superior al mínim exigít.

- El xassís ha de complir amb el requeriments estructurals d'acord amb la normativa de la FSAE del 2012.

Altres requeriments:

- El disseny del xassís s'adapti a la posició del pilot escollida.
- Adaptar el xassís al sistema de suspensions.
- Es vol que el xassís pesi menys de 60kg.

#### **1.4 Abast del projecte**

El projecte abastarà des de el disseny de la geometria del xassís, incloent un anàlisi amb elements finits, fins a el procés de fabricació d'aquest. Es tindran en compte els elements clau que envolten el xassís, però no d'una manera acurada, ja que no es compta amb els suport de la resta de departaments que formen l'equip.

## 2. Geometria del disseny del xassís

### 2.1 Posicions i condicions inicials

El xassís es la estructura principal del monoplaça. En el nostre cas s'ha decidit fer un xassís tubular d'acer S355JR.

Primerament s'ha decidit quins son els elements clau que limiten la geometria del xassís i seguidament quina es la posició d'aquests elements que anomenem a continuació:

1r - Posició dels eixos anterior i posterior i conjunt de suspensions

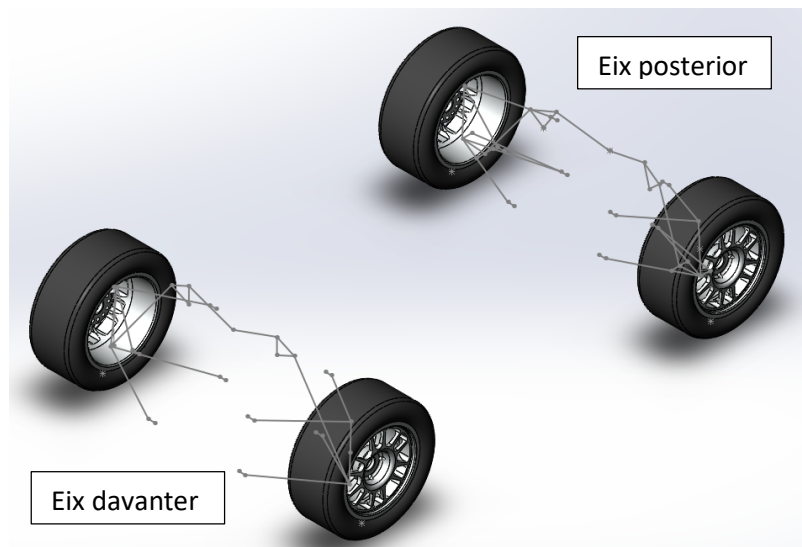
2n - Posició del pilot

3r – Posició del motor i del diferencial.

#### 2.1.1 Posició dels eixos anterior i posterior i conjunt de suspensions

En primer lloc la normativa demana que la distancia mínima entre eixos sigui d'uns 1525mm, partint d'aquesta premissa, hem decidit que la nostra distancia es situï el mes proper a aquest 1525 mm, concretament 1600 mm.

En quant a les suspensions, s'ha fet un disseny esbós que consta d'una suspensió amb sistema "push-rod" tant a l'eix anterior com a l'eix posterior. A continuació podem veure el disseny escollit.

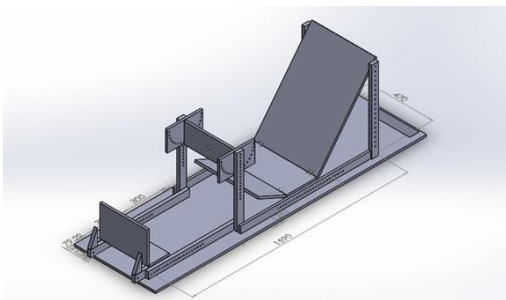


*Imatge 3 - Posicionament dels eixos, sistema de suspensions i trapezis.*

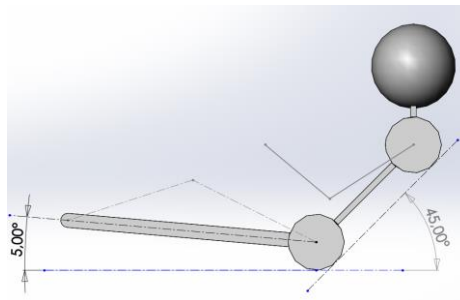
### 2.1.2 Posició del pilot

La posició del pilot es important ja que d'aquesta dependrà l'alçada dels arcs i les dimensions de la cabina del pilot. A més la normativa especifica un model/patró de pilot estil "dummy", aquest model col·locat i posicionat dintre del vehicle ha de complir les normatives especificades a l'ANNEX A. Es a dir, no es pot posar el pilot en qualsevol posició.

Per determinar la posició del pilot, es sol utilitzar un "mockchassis" o fals xassís. Aquest element permet ajustar la inclinació de la esquena del pilot, la posició dintre de la obertura de la cabina del pilot i la pedalera. Per tant amb l'ajuda d'aquest element s'ha decidit la següent posició del pilot.



Imatge 4 - "Mockchassis" o fals xassís.



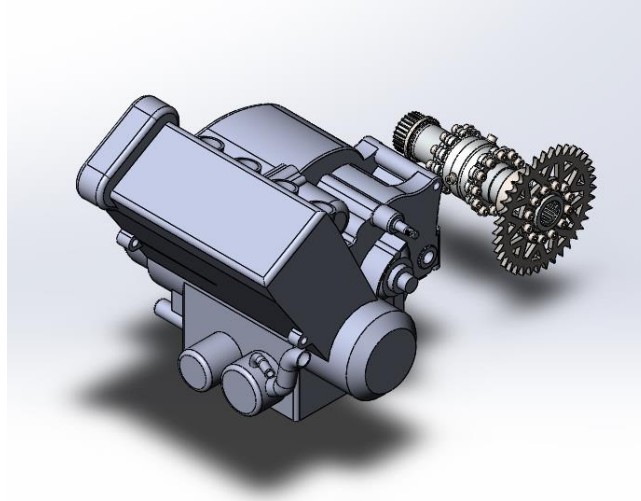
Imatge 5 – Posició del pilot escollida.

### 2.1.3 Posició del motor i del diferencial

Un altre dels elements clau es el motor, l'objectiu en aquest cas es trobar una posició el mes centrada possible, es a dir el mes proper possible al pilot i la mes baixa possible per obtenir un centre de gravetat baix. S'ha utilitzat com a model el motor d'una Yamaha RR6 de l'any 2008.

El diferencial es l'element que es situa a la cua del monoplaça i que transmet el moviment del motor a les rodes mitjançant els paliers.

Aquest dos casos es poden col·locar i anar corregint la posició alhora que es dissenya el xassís.



*Imatge 6 – Motor Yamaha RR6 i diferencial drexler.*

## 2.2 Xassís definitiu i les seves parts

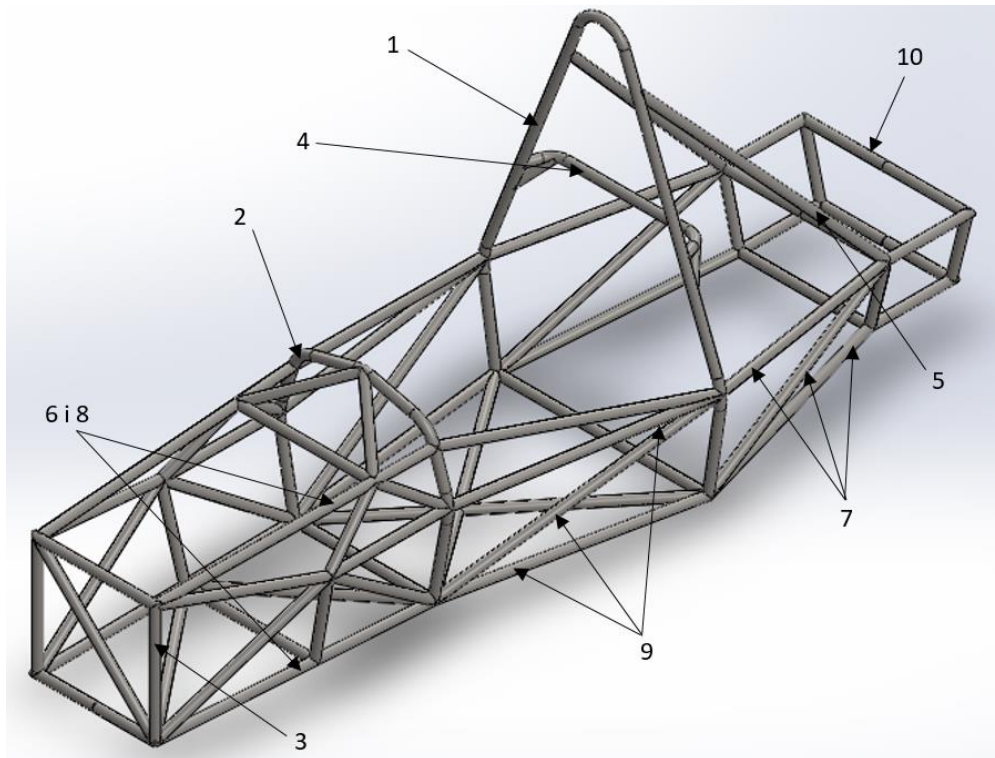
L'estructura principal del monoplaça està composta per diferents parts essencials que també estan delimitades per la normativa, en general es dona molta llibertat alhora de dissenyar-la, poden tenir moltes variacions tant en dimensions com en formes sempre i quan es tinguin en compte els elements que hi ha voltant i compleixi la normativa.

Les parts que componen el xassís són les següents:

- L'arc principal (1)
- L'arc frontal (2)
- Pla frontal (3)
- Barra de cinturons (4)
- Tirants de l'arc principal (5)
- Suports del pla frontal (6)
- Suports de reforç de l'arc principal (7)
- Tirants de l'arc frontal (8)
- Estructura lateral d'impacte (9)
- Caixa del diferencial (10)

Tenint en compte aquestes parts i col·locació dels elements clau esmentats en els anteriors subapartats, el xassís definitiu és el següent:



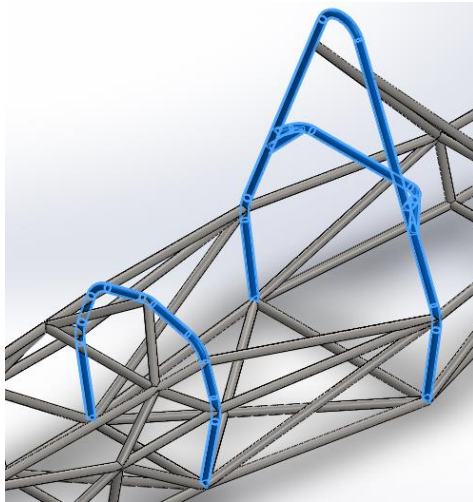


*Imatge 7 - Disseny del xassís definitiu i les seves parts*

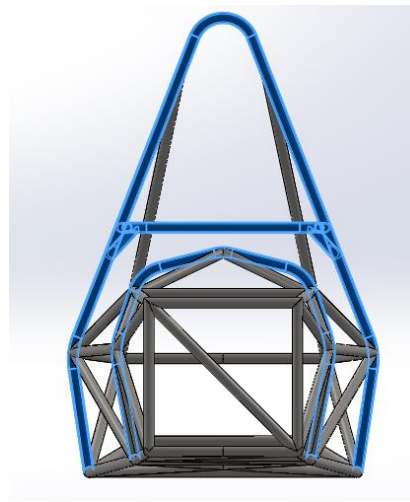
La massa del xassís resultant es de 39,74 Kg tenint en compte el material utilitzat i les dimensions totals son: 2420x1112,5x725 mm.

### **2.2.1 Arcs principals i barra de cinturons**

L'arc principal i l'arc frontal son els dos elements que tenen la funció d'evitar que, en cas de bolcada, el cap del pilot no pugui tocar el terra. L'arc principal a més delimita el la part mes enrederida de la cabina del pilot. L'arc principal tindrà un disseny senzill, només tindrà tres radis, semblant a una forma triangular. L'arc frontal tindrà forma d'heptàgon, el radi superior permetrà que l'arc principal no hagi de ser tant alt.

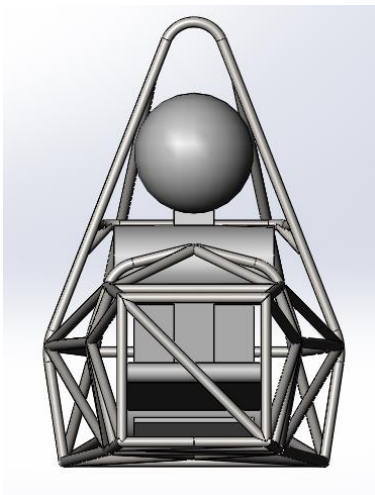


*Imatge 8 - Vista isomètrica dels arcs.*

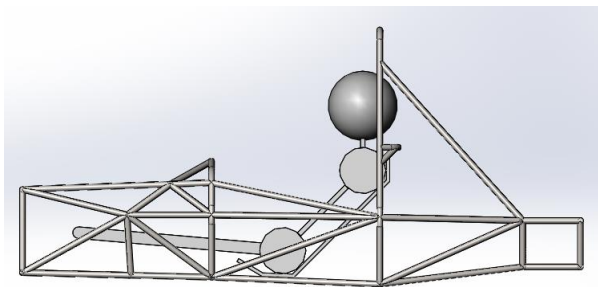


*Imatge 9 - Vista frontal dels arcs.*

Junt amb l'arc principal hi va la barra de cinturons, la seva posició depèn de la posició del pilot ja que aquest ha d'estar a l'altura dels espatlles dintre d'un marge que imposa la normativa. Nosaltres hem decidit fer la barra del cinturó a l'altura de les espatlles de manera que el cinturó estarà a 0<sup>º</sup>. A més, segon la posició del pilot que hem escollit, aquest quedaria una mica enrederit respecte l'arc principal, per tant la barra de cinturons està doblegada per permetre aquesta posició en concret.



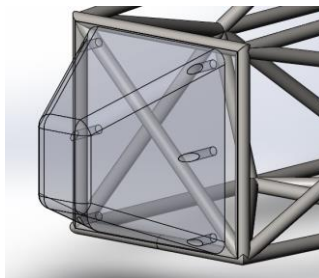
*Imatge 10 – Vista frontal de la posició del pilot.*



*Imatge 11 – Vista lateral de la posició del pilot.*

### 2.2.2 Pla frontal

El pla frontal sol ser de forma rectangular o quadrada, es el pla on va l'atenuador d'impactes (IA) i la planxa anti intrusió (AIP). Segons el tipus d'atenuador d'impactes el pla frontal pot tenir diverses dimensions però sempre més gran que l'atenuador d'impacte (IA). D'altra banda, segons normativa, en certs casos s'ha d'incorporar una barra diagonal com hi es en el nostre disseny.



Imatge 12 - Pla frontal del xassís incloent IA (Impact Atenuator) i AIP(Anti Intrusion Plate).

### 2.2.3 Base

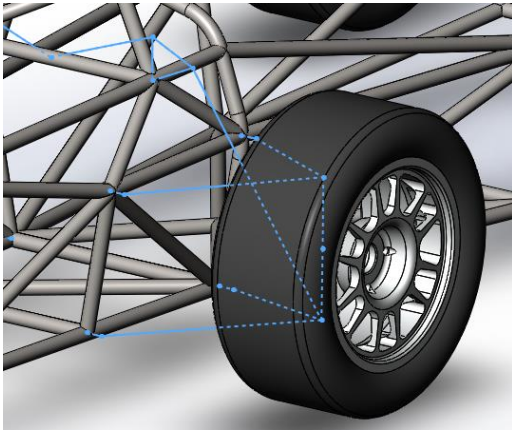
La base o la part inferior del xassís està limitada per la distància entre els arcs però té certa llibertat alhora de jugar amb les altures. Podria ser una base que fos totalment plana però al tenir el moviment de capcineig en acceleració o frenada es recomanable que els dos extrems quedin aixecats com es en el nostre cas. D'altra banda per millorar la rigidesa del xassís hem incorporat diagonal en els plans de la base per millorar la rigidesa del xassís.



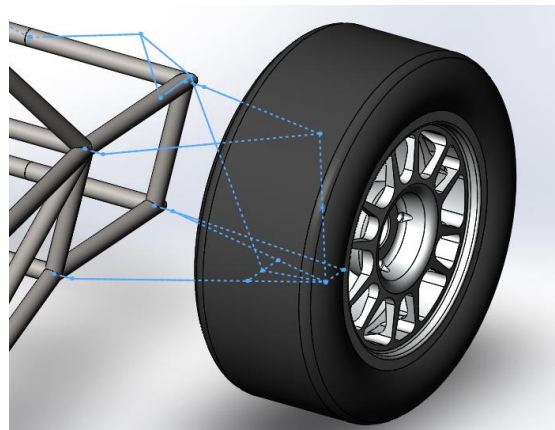
Imatge 13 - Forma de la base del xassís.

### 2.2.4 Vèrtexs dels trapezoides i de les suspensions

El disseny de les suspensions i la posició de les rodes determinen on han d'estar els vèrtexs o punts d'unió dels trapezoides en el xassís. D'aquesta manera els punts d'unió entre trapezoides i xassís i els suports dels rockers i l'amortidor s'indiquen a les imatges 14 i 15.



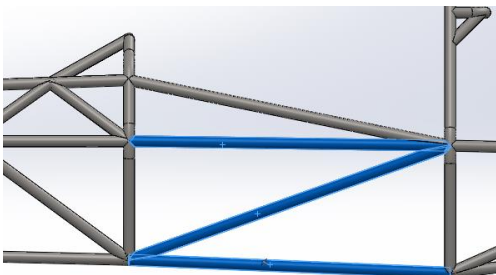
Imatge 14 Posició dels vèrtexs del sistema de suspensió davantera sobre el xassís.



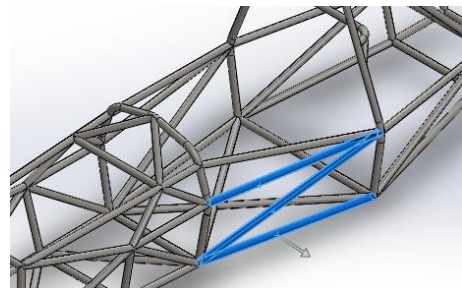
Imatge 15 - Posició dels vèrtexs del sistema de suspensió posterior sobre el xassís.

### 2.2.5 Estructura lateral d'impacte (SIS)

L'estructura lateral d'impacte es situa en el lateral de la cabina, la seva funció és, com ve diu el nom, protegir la cabina del pilot d'impactes laterals. El disseny està bastant acotat en altura i en numero de barres i per tant els dissenys solen ser bastant semblants.



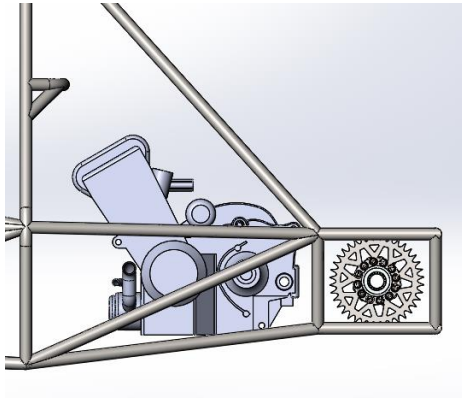
Imatge 16 – Vista lateral de l'Estrura lateral d'impacte (SIS).



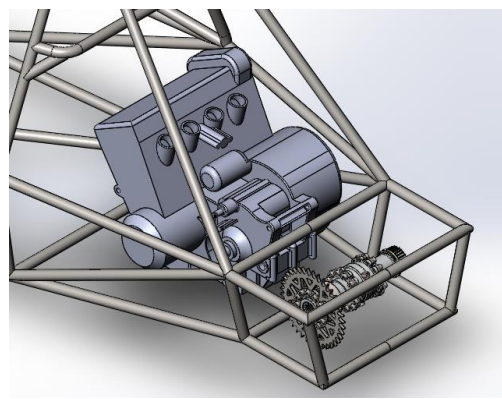
Imatge 17 – Vista isomètrica del SIS.

### 2.2.6 Caixa del diferencial i motor

La caixa del diferencial en primers dissenys sol ser bastant simple ja que no es sol complicar gaire el disseny de trapezis i suspensions. En altres casos o en equips que ja porten mes anys d'experiència no incorporen aquest element i es substituït per un subxassís que agafa el diferencial i els trapezis es situen en una posició mes avançada.



Imatge 18 – Col·locació del motor i del diferencial.

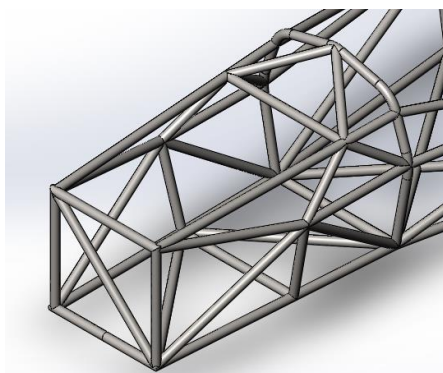


Imatge 19 – Vista isomètrica posició del motor i del diferencial.

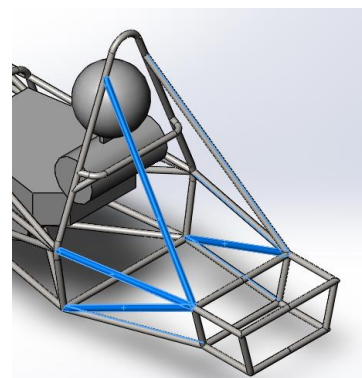
### 2.2.7 Tirants i suports frontals i posteriors

El tubs que uneixen el pla frontal amb l'arc frontal han de ser completament rectes i els laterals han d'estar triangulats tenint en compte que els vèrtex dels trapezis ja tenen una posició fixada.

Per acabar, els tirants que subjecten la part posterior de l'arc principal uns 147mm per sota de la part superior i tenen una inclinació de  $42^\circ$ .



Imatge 20. Isomètric del frontal del xassís.



Imatge 21 – Tirants i suports de l'arc principal.

## 2.3 Material i dimensions

### 2.3.1 Propietats del material

El Material utilitzat es un acer estructural S355JR. Aquest material compleix amb els requeriments mínims tant en la seva composició química, com en les propietats mecàniques.



Material	Mòdul de Young	Límit elàstic	Tensió última	Mòdul tangent
S355JR	210 GPa	355 MPa	510-630 MPa	1450 MPa
Composició química	% Carboni	% Manganés	% Altres elements	
	0.24	1.6	0.55 (Si) , 0.035 (P), 0.035 (S), 0.55 (Cu), 0.012 (N)	

La normativa i el SES indiquen també quines han de ser les dimensions mínimes en diàmetre i espessor. El document SES (Structural Equivalency Spreadsheet) proporcionat per les competicions ens ha ajudat a decidir quines són les dimensions que utilitzarem per al xassís. També hem tingut en compte la disponibilitat d'estoc en empreses properes a Girona i voltants.

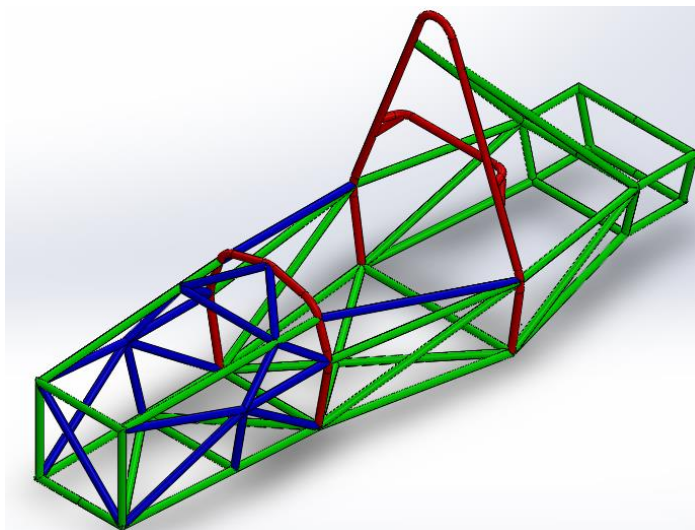
### 2.3.2 Dimensions

En la següent imatge s'indica quines són les dimensions dels tubs per colors:

Tubs de 25mm i 3mm de paret - VERMELL

Tubs de 25mm i 2mm de paret – VERD

Tubs de 25mm i 1.5mm de paret – BLAU



*Imatge 22 - Distribució de les dimensions del tubs del xassís.5*

### 3. Anàlisi del xassís

#### 3.1. Casos d'impacte

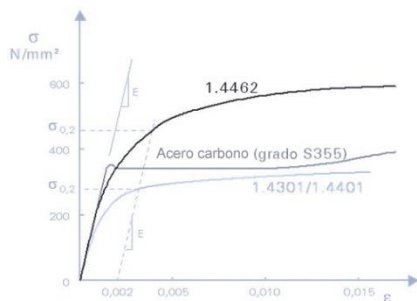
El xassís ha de ser resistent i segur en cas de rebre algun impacte, es per això que s'han dut a terme una sèrie de comprovacions per saber si el xassís dissenyat es segur. Per dur a terme aquestes comprovacions s'ha tingut en compte la normativa FSAE 2012, capítol AF-Alternative frame rules, apartat AF4, que imposa uns casos concrets amb les seves respectives condicions de contorn i càrregues aplicades. Els casos es duran a terme mitjançant el mètode d'elements finits, ja que normalment els equips no tenen els recursos per fer assajos reals. En el nostre cas utilitzarem el programa ANSYS Workbench.

El material utilitzat es un acer estructural S355JR que té les següents propietats mecàniques:

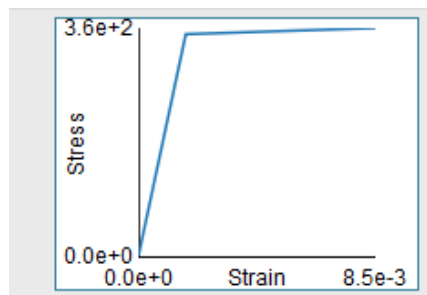
Material	Mòdul de Young	Límit elàstic	Tensió última	Mòdul tangent
S355 jr	210 GPa	355 MPa	510-630 MPa	1450 MPa

Taula 1 - Propietats mecàniques de l'acer S355JR

Segons la normativa, en els assajos que durem a terme es demana que no es superi una deflexió màxima de 25mm i que no hi hagi cap tipus de falla en l'estructura, es a dir, no podem superar la tensió última .



Imatge 23 - Corbes T-D, entre elles l'acer S355



Imatge 24 - Corba T-D aproximada de l'acer S355JR. ANSYS.

Per tant, el que farem serà un assaig elasto-plàstic que ens permetrà fer una simulació aproximada de la corba Tensió-Deformació del nostre material, ja que en alguns casos podríem superar el límits elàstic i entrar en la zona de deformació plàstica. El nostre objectiu és no sobrepassar la tensió última i no superar els 25mm de deflexió màxima. A continuació es detalla en la taula 2 quins son els casos assajats i els seus requeriments.

Cas	Aplicació	Càrregues	Condicions de contorn	
1. Arc principal	Punt més alt de l'arc principal.	$F_x = 6\text{kN}$ $F_y = 5\text{kN}$ $F_z = -9\text{kN}$	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació.	
2. Arc frontal	Punt més alt de l'arc frontal.	$F_x = 6\text{kN}$ $F_y = 5\text{kN}$ $F_z = -9\text{kN}$	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació.	
3. Estructura lateral d'impacte	Estructura lateral d'impacte	$F_x = 6\text{kN}$ $F_z = -9\text{kN}$	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació.	
4. Frontal (a)	Sobre els 4 vèrtexs del frontal.	$F_z = 150\text{ kN}$ dividit en els 4 punts de frontal del xassís	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació. I nodes de la barra de cinturons fixats..	



5. Frontal (b)	En el centre del frontal de la estructura.	Fx= 17.25kN Fz= -149kN	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació. I nodes de la barra de cinturons fixats.	
6. Barra de cinturons (FSG normativa barra de cinturons)		Fz= -7kN per unió	Nodes inferiors dels dos arcs fixats i sense rotació.	

Taula 2 - Requeriments dels per als assajos dels casos d'impacte.

A la taula 3 podem veure els resultats obtinguts. En cap cas es superen els 25mm de deflexió màxima, altrament tampoc es supera la tensió última per el que considerem que el xassís compleix amb la normativa.

Cas	Xassís definitiu	
	Deformació màxima	Tensió màxima
Arc principal	12,08 mm	490,9 MPa
Arc frontal	6,51 mm	493,5 MPa
Estructura lateral d'impacte	2,95 mm	260,7 MPa
Frontal (a)	6,25 mm	328,6 MPa
Frontal (b)	6,12 mm	367,8 MPa
Barra de cinturons	6,70 mm	361,3 MPa

Taula 3 - Resultats dels casos d'impacte en el xassís 2.

A l'Annex C es detallen les imatges de les simulacions i la comparació amb el xassís alternatiu.

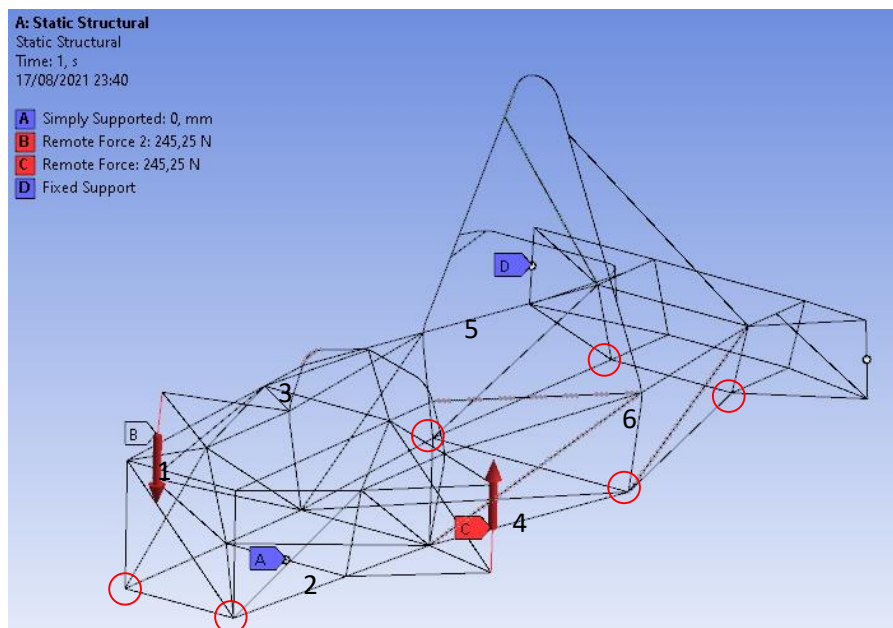
### 3.2. Rigidesa torsional

La rigidesa torsional en aquest tipus de monoplaces es important calcular-la i comprovar-la ja que, quant més rígid es la estructura, mes acurada i previsible serà la reacció dinàmica del vehicle.

L'objectiu de la simulació es provocar un parell de forces a l'eix davanter i fer que el xassís es retorci mentre l'eix posterior esta fixat nomes per les boixes. D'aquesta manera podem veure la diferencia d'altura entre els dos nodes que estem calculant, extreure'n l'angle i finalment obtenir el valor de la rigidesa a partir de la divisió del parell s'ha aplicat entre l'angle obtingut en aquella secció. Cal dir que les barres que simulen la suspensió son barres infinitament rígides.

Aquest càlculs s'han dut a terme en 5 passos, a cada pas s'ha anat afegint 5kg a cada banda de l'eix fins arribar als 25kg a l'últim pas, en total s'haurà ficat un parell total de 245 Nm.

Les condicions de contorn son les següents:



Imatge 25 - Condicions de contorn per a l'assaig de la rigidesa torsional.

A la taula 4 s'indiquen els resultats obtinguts per al càlcul de la rigidesa torsional del xassís 2.

<b>XASSIS 2</b>		
	<b>Rigidesa torsional [Nm/º]</b>	<b>Distancia en Z [mm]</b>
<b>Secció 1 (Node 1 i 2)</b>	1810,77	470,38
<b>Secció 2 (Node 3 i 4)</b>	2895,08	1550,00
<b>Secció 3 (Node 5 i 6)</b>	4713,18	2170,00
<b>Mitjana total Rigidesa</b>	<b>3139,67</b>	Nm/º
<b>Pes del xassís 2</b>	<b>39,74</b>	Kg

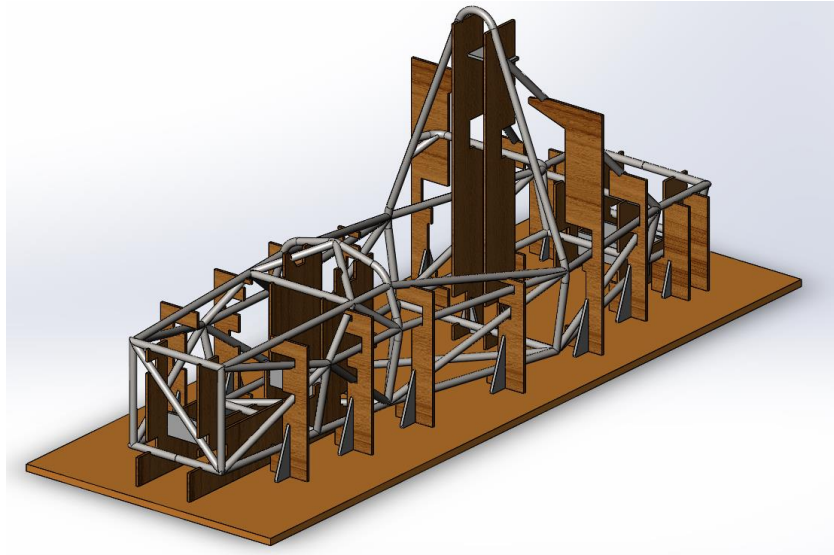
Taula 4 - Resultats de l'assaig de rigidesa torsional del xassís 2.

El càlcul de la rigidesa torsional també s'ha dut a terme en el xassís 3 per a fer la comparació amb el definitiu. Està documentat a l'Annex C.

#### 4. Bancada de fabricació del xassís

La bancada s'utilitza per a la fabricació del xassís, està format per un conjunt de peces que serveix per poder situar els tubs que formen el xassís tal i com l'hem dissenyat i seguidament fixar aquest tubs mitjançant soldadura MIG.

Depenent dels recursos, la bancada pot ser més o menys complexa. En el nostre cas ens hem decantat per una bancada de fusta d'un únic ús formada per costelles. Hi ha 2 tipus de costelles, les verticals i els transversals. Els tubs van recolzats sobre les costelles per aconseguir situar-los allà on volem. En la imatge 26 veiem el disseny final de la bancada de fabricació juntament amb el xassís 2. Aquesta seria la posició que tindria el xassís sobre la bancada a punt per al procés de soldadura.

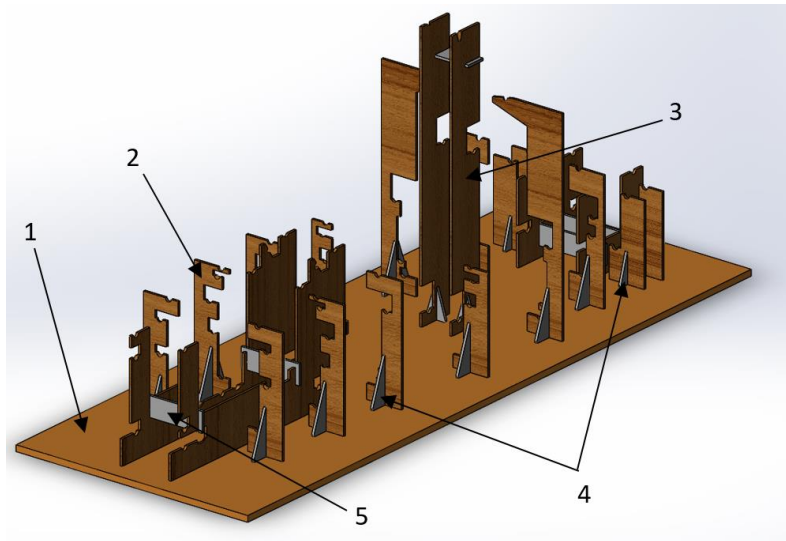


*Imatge 26 - Bancada de fabricació del xassís juntament amb el xassís.*

##### 4.1 Parts

La bancada per a soldar el xassís està formada per diferents peces. En primer lloc tenim la base (1), una lamina que permet encaixar les costelles en el seu lloc corresponent. Seguidament tenim les costelles verticals (2) que són les planxes que suporten els tubs laterals del xassís i les costelles transversals (3) que suporten les estructures centrals. Les costelles tenen unes entalles rectangulars que serveixen per encaixar-les sobre la base. Per mantenir les costelles verticals i transversals s'utilitzen triangles de suport (4) que van encaixats a les costelles. Per acabar tenim

les costelles "horitzontals" (5) que serveixen per mantenir la rectitud, com els triangles, de les costelles transversals. En la imatge 27 s'indiquen les parts de la bancada de fabricació.



*Imatge 27 - Parts de la bancada de fabricació del xassís.*

## **5. Resum del pressupost**

El cost total del pressupost serà de 3665,25€.

## **6. Conclusions**

En aquest projecte s'ha dissenyat un xassís tubular d'acer per a la competició de Formula Student.

S'ha dissenyat el xassís seguint la normativa marcada per la FSAE i FSG complint també amb els requeriments estructurals imposats el SES. Sobre el xassís dissenyat s'ha aplicat una sèrie d'assajos d'impacte en diferents punts per comprovar que no tenen cap falla estructural, ni sobrepassen la deformació límit imposada. El resultats obtinguts en aquest assajos asseguren la integritat. D'altra banda també s'ha determinat el valor de la rigidesa torsional amb el qual hem obtinguts una bona dada. Sobre el disseny de la bancada podem dir que compleix amb l'objectiu per el qual ha sigut dissenyada.

Malgrat que s'hagin complert els requeriments en totes les parts esmentades anteriorment, sí podem dir que, de cara a futurs dissenys, es poden millorar aspectes relacionats amb la geometria i disseny del xassís i amb el disseny i funcionalitat de la bancada. S'ha de tenir en compte que any rere any, el xassís ha de tenir certes millores i/o diferències respecte els seus antecessors per tant es normal la inclusió de canvis en futurs dissenys.

## **7. Relació de documents**

DOCUMENT 1. Memòria i annexos

ANNEX A. Adaptació del xassís a la normativa

ANNEX B. Inici i disseny alternatiu

ANNEX C. Càlculs amb elements finits

DOCUMENT 2. Plànols

DOCUMENT 3. Plec de condicions

DOCUMENT 4. Estat d'amidaments

DOCUMENT 5. Pressupost

DOCUMENT 6. Resum



## 8. Bibliografia

- [1] *Analysis of torsional stiffness of the frame of a Formula Student vehicle*. Recollit de Longdom: <https://www.longdom.org/open-access/analysis-of-torsional-stiffness-of-the-frame-of-a-formula-student-vehicle-31847.html>, 10 de juny de 2021.
- [2] *Chassis design space frame 2009*. Obtenido de Slideplayer: <https://slideplayer.com/slide/1313343/>, 11 d'abril de 2021.
- [3] MARTIN REDONDO, Roberto. *Diseño y simulación de un chasis tubular para un vehículo tipo formula. Trabajo fin de grado. Ingeniería en Tecnologías Industriales. Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. Consulta del Mòdul tangent*. 9 de maig de 2021.
- [4] *Imatges de xassís de Formula Student*. Recollit de Google: [https://www.google.com/search?q=formula+student+space+frame+chassis&tbm=isch&ved=2ahUKEwi56\\_3\\_sMryAhUGyRoKHXYJDj0Q2-cCegQIABAA&oq=formula+student+space+frame+chassis&gs\\_lcp=CgNpbWcQDFAAWABg\\_oSHA2gAcAB4AIABAlgBAJIBAJgBAKoBC2d3cy13aXotaW1n&scient=img&ei=F0](https://www.google.com/search?q=formula+student+space+frame+chassis&tbm=isch&ved=2ahUKEwi56_3_sMryAhUGyRoKHXYJDj0Q2-cCegQIABAA&oq=formula+student+space+frame+chassis&gs_lcp=CgNpbWcQDFAAWABg_oSHA2gAcAB4AIABAlgBAJIBAJgBAKoBC2d3cy13aXotaW1n&scient=img&ei=F0)
- [5] *Normativa FSG 2021*. Recollit de Formula Student Germany: <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>, 25 de març de 2021.
- [6] FSAE. *Normativa FSAE 2012*. Obtenido de Formula SAE : [https://www.fsaeonline.com/content/2012\\_FSAE\\_Rules\\_Version\\_90111K.pdf](https://www.fsaeonline.com/content/2012_FSAE_Rules_Version_90111K.pdf), 25 de març de 2021.
- [7] *Propietats de l'acer S355JR*. Obtenido de METINVEST: <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/s355jr>, 10 d'abril de 2021.
- [8] Clarke, P. *Space frame chassis. Pat's Column*. Recollit de Formula Student Germany: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-column-space-frame-chassis/> 30 de març de 2021.
- [9] *Tubs rodons*. Recollit de Mafesa: <http://mafesa.com/productes/tubs-rodons-1008>, 10 d'abril de 2021.

# **Annex A**

Adaptació del xassís a la  
normativa

## ANNEX A. Adaptació a la normativa de la Formula Student

La normativa de la Formula Student ve donada per dos organitzacions, FSAE i FSG. La normativa de la FSAE es la original i la FSG es la normativa que es sol adoptar a Europa. Son normatives complementaries que tenen molt poques diferències entre elles. Nosaltres hem dissenyat el xassís d'acord a la normativa de la FSG 2021, tret d'una petita excepció en la qual hem utilitzat una sèrie de consideracions de la normativa FSAE del 2012 que s'explicarà en el corresponent ANNEX C per a l'anàlisi amb elements finits.

Aquest annex està dividit en dos apartats, el primer dedicat al xassís com a estructura i el segon està dedicat a la cabina del pilot.

### A1. Xassís

En aquest apartat s'esmentaran els punts més importants de la normativa referents al xassís i a la vegada s'explicarà com s'han aplicat aquest punts en el disseny del xassís. Tots els punts que s'anomenen a continuació surten de la normativa Formula Student Germany 2021.

### T3 – Disseny general del xassís

#### T3.2 Requeriments mínims del material

T3.2.1 La taula 4 mostra els requeriments mínims per als membres de la estructura primària si està feta de tubs d'acer.

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	175 mm <sup>2</sup>	11 320 mm <sup>4</sup>
Side impact structure, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm <sup>2</sup>	8509 mm <sup>4</sup>
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm <sup>2</sup>	6695 mm <sup>4</sup>

Imatge 28 - Taula de dimensionament dels tubs, normativa FSG.

#### T3.2.2 - T3.2.4 – T3.2.5

Es demanen unes propietats químiques i mecàniques mínimes per al material escollit. Els tubs d'acer han estar compostat de acer al carboni amb un màxim contingut de 0.3% de carboni, 1.7%

de manganès i un 0.6% de qualsevol altre material. En quan a les propietats mecàniques es demana que tingui un mòdul de Young (E) igual o mes gran a 200 GPa, límit elàstic (Sy) igual o superior a 305 MPa i 365 MPa del límit últim (Su). Qualsevol tub per sota dels 1.2mm de paret o mínim de 6695 mm<sup>4</sup> de moment d'inèrcia, es consideraran com a no estructurals.

- En el nostre xassís s'ha escollit l'acer S355JR, les característiques d'aquest material es poden trobar a la l'apartat 2.3 de la Memòria. Les propietats superen amb escreix els mínims establerts i les dimensions del tubs per a cada part del xassís han sigut escollides mitjançant la normativa i el document SES i el material en estoc en empreses de proximitat.

El SES es un arxiu Excel que s'ha d'entregar abans de fer la competició per validar que el xassís que s'ha fabricat, estructuralment, es segur. En aquest document s'han d'omplir les diferents finestres amb les dimensions dels tubs (en cas que el xassís sigui tubular) que s'utilitzaran per a cada part del xassís. A més aquest document t'indica si el tub que has escollit per "x" part es equivalent amb la mínima especificada. D'aquest manera es pot jugar una mica alhora de escollir les mides per a cada part.

A la imatge 29 podem veure un exemple del dimensionament en el SES amb l'arc principal.

**Main Hoop Structural Equivalency - note, only steel may be used**

Material Property	Baseline	Your Tube
Material type	Steel	Steel
Tube shape	Round	Round
Material name /grade	Steel	Steel
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08

Tube OD, mm	25.4	25
Wall, mm	2.4	2

	Baseline	Your Tube	
OD, m	0.0254	0.025	
Wall, m	0.0024	0.002	
I, m <sup>4</sup>	1.1593E-08	9.62944E-09	
EI	2.32E+03	1.93E+03	83.1
Area, mm <sup>2</sup>	173.4	144.5	83.3
Yield tensile strength, N	5.29E+04	4.41E+04	83.3
UTS, N	6.33E+04	5.27E+04	83.3
Yield tensile strength, N as welded	3.12E+04	2.60E+04	83.3
UTS, N as welded	5.20E+04	4.34E+04	83.3
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	1.33E+03	1.12E+03	84.4
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.20E-02	1.44E-02	120.4
Energy absorbed up to UTS, J	7.98E+00	6.84E+00	85.7

**Main Hoop Structural Equivalency - note, only steel may be used**

Material Property	Baseline	Your Tube
Material type	Steel	Steel
Tube shape	Round	Round
Material name /grade	Steel	Steel
Youngs Modulus, E	2.00E+11	2.00E+11
Yield strength, Pa	3.05E+08	3.05E+08
UTS, Pa	3.65E+08	3.65E+08
Yield strength, welded, Pa	1.80E+08	1.80E+08
UTS welded, Pa	3.00E+08	3.00E+08

Tube OD, mm	25	25
Wall, mm	2.5	3

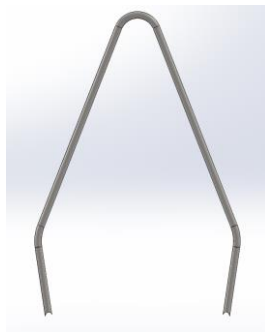
	Baseline	Your Tube	
OD, m	0.025	0.025	
Wall, m	0.0025	0.003	
I, m <sup>4</sup>	1.1322E-08	1.27793E-08	
EI	2.26E+03	2.56E+03	112.9
Area, mm <sup>2</sup>	176.7	207.3	117.3
Yield tensile strength, N	5.39E+04	6.32E+04	117.3
UTS, N	6.45E+04	7.57E+04	117.3
Yield tensile strength, N as welded	3.18E+04	3.73E+04	117.3
UTS, N as welded	5.30E+04	6.22E+04	117.3
Max load at mid span to give UTS for 1m long tube, N	1.32E+03	1.49E+03	112.9
Max deflection at baseline load for 1m long tube, m	1.22E-02	1.08E-02	88.6
Energy absorbed up to UTS, J	8.04E+00	9.08E+00	112.9

Imatge 29 - Exemple de dimensionament dels tubs amb el document SES. A l'esquerra una mida incorrecta, a la dreta una mida vàlida que es la mateixa per al nostre arc principal.

### T3.8 – Arc principal

Es demana que l'arc estigui construït d'una sola peça sense discontinuïtats. Des del punt d'unió mes alt amb la estructura lateral cap amunt, l'arc no pot estar inclinat mes de 10°. Des del punt d'unió mes alt amb la estructura lateral cap a baix, l'arc no pot estar inclinat mes de 10 cap endavant o cap enrere.

- L'arc principal està doblegat en 3 punts amb radis superiors a 3 cops el diàmetre del tub i no té cap inclinació, està a 0 graus respecte de la vertical.



*Imatge 30 - Disseny de l'arc principal.*

### T3.8 – Arc frontal

Es demana que l'arc estigui construït d'una sola peça sense discontinuïtats. No pot estar inclinat mes de 20° respecte de la vertical.

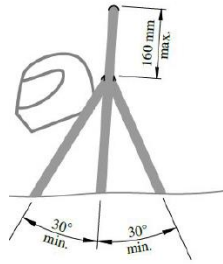
- L'arc frontal està doblegat per 5 punts, dos a cada banda i un en el seu punt superior. De la mateixa manera que amb l'arc frontal, està a 0 graus respecte de la vertical.



*Imatge 31 - Disseny de l'arc frontal.*

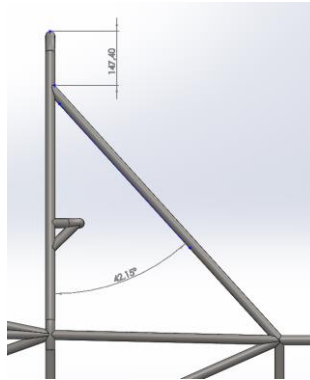
### T3.10 – Tirants de l'arc principal

L'arc principal ha d'estar suportat per la seva banda frontal o posterior per tirants a cada banda i banda. Els tirants no poden estar units a l'arc principal per sota de 160mm des del punt mes alt de l'arc principal i l'angle que formaran ha de ser igual o major a 30°. Els tirants han de ser rectes.



Imatge 32 - Inclinació màxima dels tirants de l'arc principal i distància màxima respecte del punt mes alt, normativa FSG.

- Els tirants tenen una inclinació aprox. de 42º i estan units a l'arc principal a 147mm per sota del punt mes alt de l'arc principal. Els tirants només estan en la banda posterior de l'arc principal.



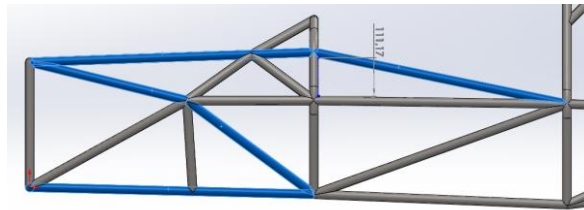
Imatge 33 - Disseny dels tirants dissenyats.

### T3.13 – Suports del pla frontal

El pla frontal ha d'estar connectat amb l'arc frontal per mínim 3 tubs a cada banda, un membre inferior, un superior i un diagonal per triangular. El membre superior ha d'estar unit amb el pla frontal no per sota de 50mm de la seva superfície superior i unit a l'arc principal com a màxim 50mm per sota del membre superior de la estructura lateral. Si la unió es superior a 100mm per sobre del membre superior de la estructura lateral, hi ha d'haver-hi una triangulació de node a node per transferir la carrega a l'arc principal. El membre inferior ha d'unir el nodes inferiors del pla frontal amb l'arc frontal. El membre de la diagonal ha de triangular els suport superior i inferior.

- S'ha dissenyat els dos membres superior i inferior, ambdós totalment rectes. Com que hi ha mes de 100mm (117mm) de diferencia d'altura entre el suport superior i membre superior de la estructura lateral, s'ha reforçat amb una diagonal mes que va per sobre

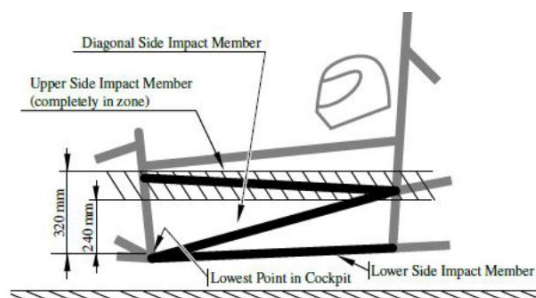
del membre superior de la estructural lateral. En a la diagonal està composta per mes d'una barra, totes triangulades per permetre i mantenir la posició dels vèrtexs dels trapezis.



Imatge 34 - Vista lateral de la part frontal del xassís.

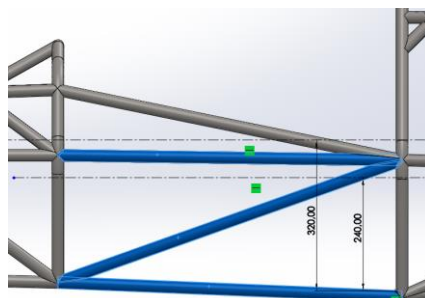
### T3.14 – Estructura Lateral d'Impacte (SIS)

Ha d'estar constituït per un mínim de 3 tubs a cada banda, un membre superior, un inferior i una diagonal que trianguli els dos membre anteriorment esmentats. El membre superior ha d'estar entre 240mm i 320mm respecte el punt mes baix del "cockpit". El membre inferior ha de connectar els dos nodes inferiors entre l'arc frontal i el principal. El membre diagonal ha de triangular els membre superior i inferior.



Imatge 35 – Limitacions del disseny del SIS, normativa FSG.

- El membre superior es troba dins d'aquest marge marcat per la normativa, els altres dos membres segueixen la descripció de l'article esmentat.

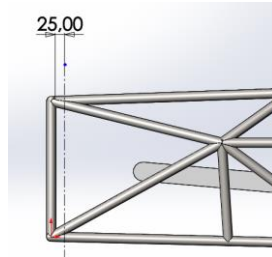


Imatge 36 - Disseny del SIS del xassís escollit.

### T3.20 – Objectes no destructibles

Tots els objectes no destructibles (per ex. Pedals , cilindres mestres, reserves d'oli hidràulic) han de estar per darrera del pla frontal i almenys 25mm darrere de la planxa anti intrusions en qualsevol moment.

- Hi ha marge per poder situar els elements esmentats a l'article a mes de 25 mm rere el pla frontal.



*Imatge 37 - Marge de 25mm per darrere del pla frontal.*

## A2. Cabina del pilot – Cockpit

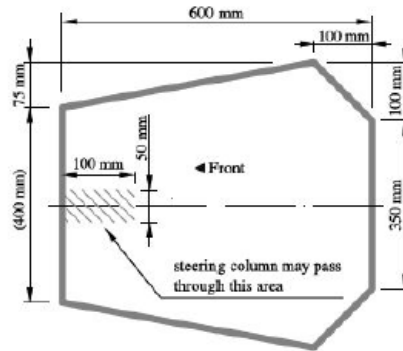
En aquest apartat s'esmenta la normativa referent a la cabina o allotjament del pilot, es mes conegut per cockpit. La normativa sobre el cockpit afecta directament al xassís ja que limita les dimensions de tot el que rodeja el cockpit, es a dir, els arcs, la llargada dels suport del pla frontal, etc.

### T4. Cockpit

#### T4.1 Obertura del cockpit

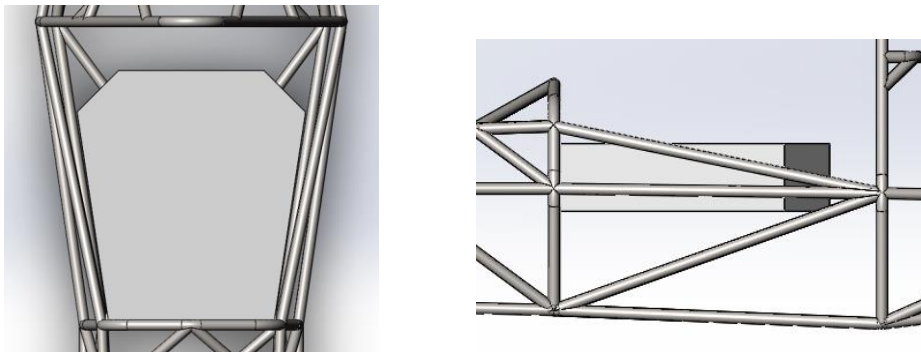
Les dimensions de la obertura del cockpit han de ser suficients com per que el patró utilitzat pugui passar verticalment en la obertura del cockpit per sota del membre superior de la estructura lateral. El patró ha de poder moure's endavant i endarrere.





Imatge 38 - Patró de l' "scuttinering" per a l'obertura del cockpit, normativa FSG.

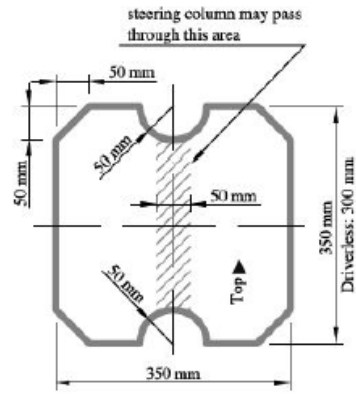
- Com veiem en les imatges, el patró entra perfectament per sota del membre superior de la estructura lateral d'impacte.



Imatge 39 - Vista de planta i lateral de la col·locació del patró de l'obertura del cockpit.

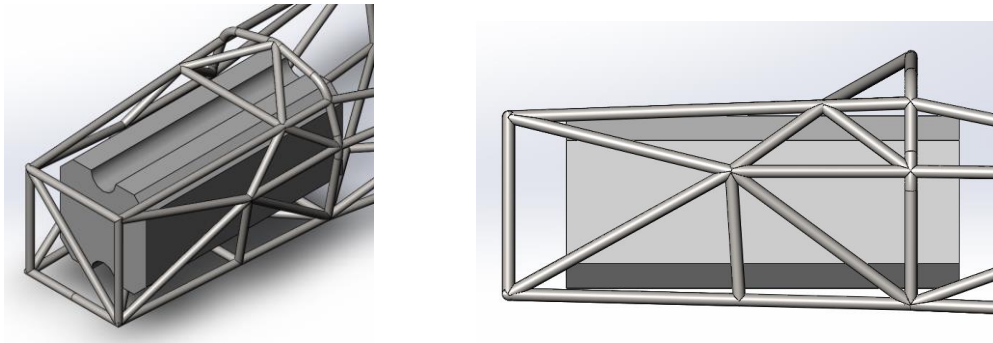
#### T4.2 Secció transversal del interior del cockpit

El cockpit ha de proveir d'un espai interior transversal lliure suficient per a que el patró passi des de l'obertura del cockpit fins a 100mm per darrera de la cara del pedal mes endarrerit en posició inoperant. El patró ha de poder-se moure amunt i avall. Les cames del pilot s'han de mantenir en el interior del cockpit, no poden sobresortir del xassís en cap moment en posició de pilotatge.



Imatge 40 - Patró de la secció interna del frontal del xassís, normativa FSG.

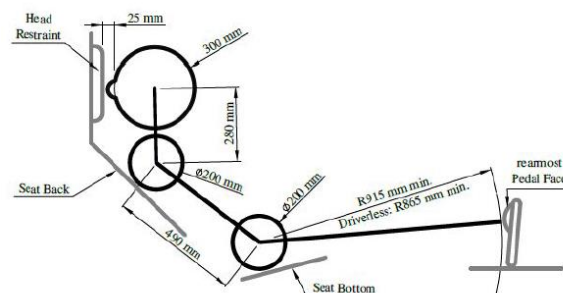
- Com es veuen en les imatges inferiors, el patró entra amb molta folgança fins als 100mm després del pedal i encara quedaria espai suficient.



Imatge 41 - Vista isomètrica i lateral de la col·locació del patró de la secció interna del frontal de xassís.

### T4.3 Percy

Es facilita el model d'un percentil 95, aquest ha d'estar assegut en posició normal de pilotatge amb agafat amb els cinturons de seguretat.

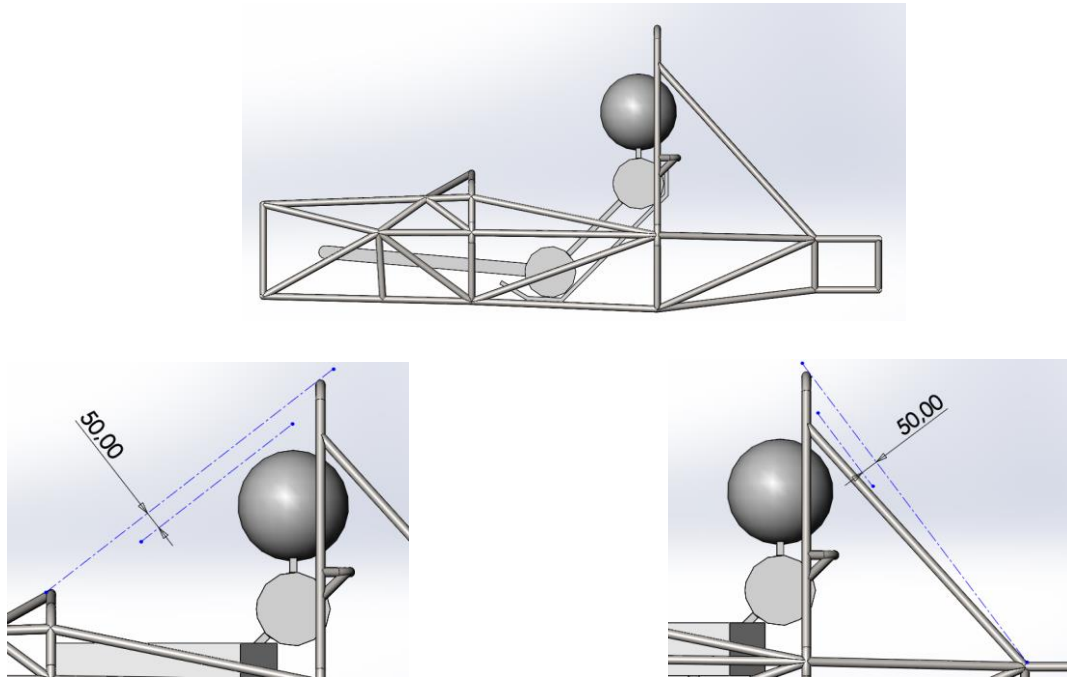


Imatge 42 - Model del percentil 95, normativa FSG.

El casc del pilot ha d'estar com a mínim a 50mm de distància de una línia recta dibuixada aniria des del punt més alt de l'arc principal fins al punt més alt de l'arc frontal. El casc del pilot ha

d'estar com a mínim a 50mm de distància de una línia recta dibuixada des del punt més alt de l'arc frontal fins al l'extrem baix del tirant de l'arc principal.

- La posició del model, o posició ideal del pilot, tindrà una inclinació de  $45^\circ$  respecte de la horitzontal i les cames d'aproximadament una inclinació de  $5^\circ$  respecte de la horitzontal. En ambdós casos, el casc no arriba al límit de 50mm, de fet hi ha marge per un pilot més alt.



Imatge 43 - Posició del model dintre del xassís. Distància de seguretat entre l'arc frontal i el principal. Distància de seguretat entre l'arc frontal i l'extrem inferior del tirant.

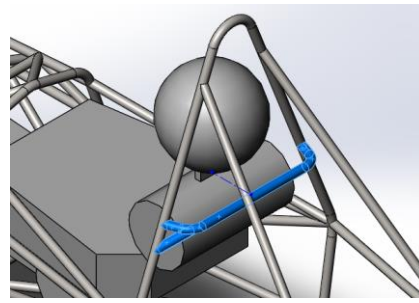
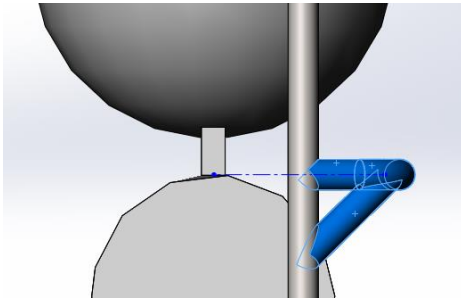
### T5.5 Sistema de restricció del pilot – Barra de cinturons

La barra de cinturons ha d'anar muntada darrera del pilot a la estructura que demana els requeriments de la estructura primària. Tot i això, no pot anar muntada als tirants de l'arc principal o a una estructura auxiliar sense un suport addicional que previngui de les càrregues transferides a l'arc principal. Si el cinturó està muntat sobre una tub que no es recte, les unions entre aquest tub i la estructura on està muntada ha d'estar reforçada per una triangulació per prevenir d'una rotació torsional de la barra de cinturons. Des del darrera des les espatlles del pilot cap al punt de muntatge dels cinturons, la barra ha d'estar entre els  $20^\circ$  per sota i  $10^\circ$  per sobre de la horitzontal.

- La barra de cinturons es situarà a  $0^\circ$  respecte de l'espatlla de model/pilot. La barra de cinturons serà una barra doblegada per els dos extrems que aniran units a l'arc principal i tindran un suport a cada banda per triangular el doblegament.

Disseny, anàlisi i fabricació d'un xassís de Formula Student

DOCUMENT 1. Memòria i annexos



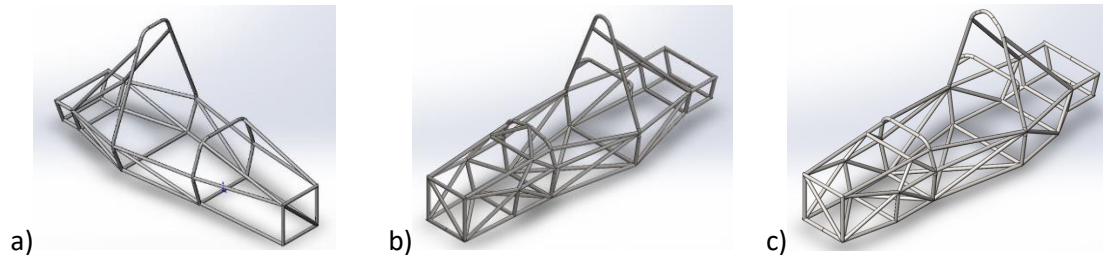
*Imatge 44 - Vista lateral i isomètrica de la barra de cinturons.*

# **Annex B**

## Inicis i disseny alternatiu

## ANNEX B. Inicis i disseny alternatiu

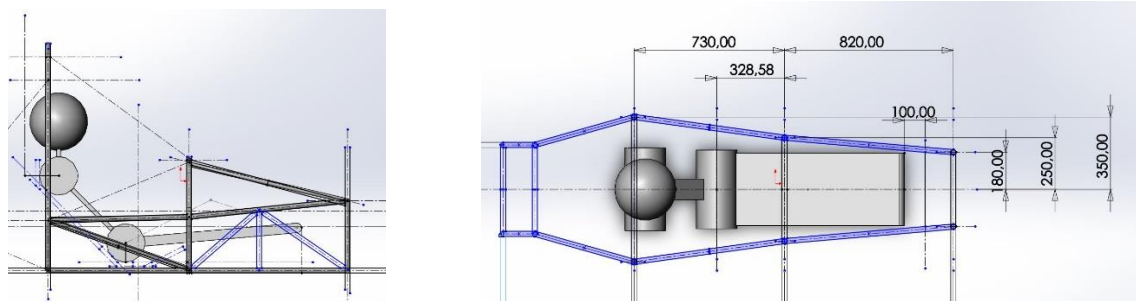
En aquest annex s'explica el procediment previ que s'ha seguit per a confeccionar el xassís, d'altra banda també s'esmenta el disseny del segon xassís que s'ha dissenyat per tal de poder comparar i trobar quin dels dos es millor. La nomenclatura que li hem donat als xassís dissenyats es la següent: el xassís 1 seria el xassís original, el xassís 2 el definitiu i el xassís alternatiu el xassís 3, es veuen indicats en la imatge 45.



Imatge 45 – a) Xassís 1 o original. b) Xassís 2. c) Xassís 3.

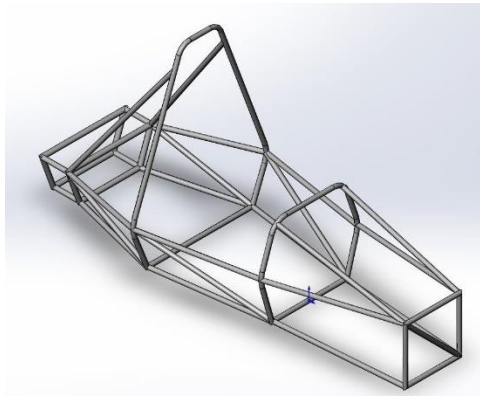
El xassís original ha servit com a punt de partida per després dissenyar els dos xassís alternatius dels quals un serà escollit com el definitiu.

Tot comença per trobar la posició del pilot que es desitja i partir d'aquí anar dissenyar les primeres barres que van al voltant del pilot. Primerament, la obertura del pilot o "cockpit" per trobar la distància entre els dos arcs, principal i frontal i l'amplada del cockpit.



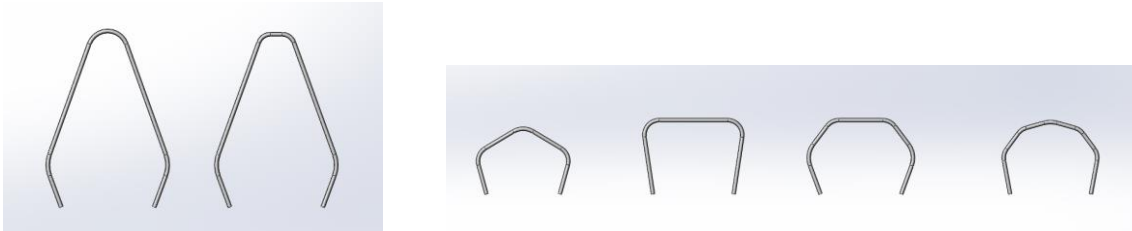
Imatge 46 - Esbós del disseny inicial. Vista lateral. Vista aèria.

Un cop tenim mes o menys les dimensions fem un primer esbós de xassís del que partirem per fer els dos dissenys.



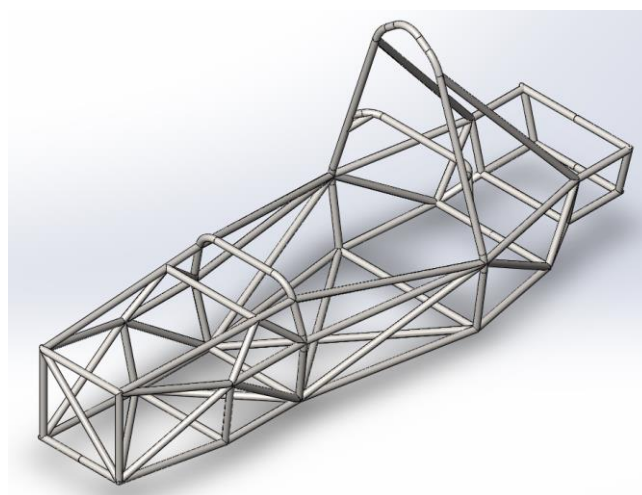
*Imatge 47 - Disseny inicial.*

Seguidament, un cop preses les dimensions, comencem a dissenyar els dos xassís en paral·lel tenint en compte la posició dels elements clau. Abans però hem decidit el disseny dels arcs per a cada xassís mitjançant l'observació dels xassís d'altres equips.



*Imatge 48 - Recull de tipologies d'arcs principals i frontals.*

Sobre el disseny alternatiu esmentarem les diferències amb el xassís definitiu:



*Imatge 49 - Disseny del xassís alternatiu, xassís 3.*

Les diferències més grans les tenim a l'arc frontal i l'arc principal i la base. L'arc frontal té un radi a cada banda a mitja altura i corona la part alta amb tres radis. L'arc frontal, a diferència del xassís definitiu no té el radi superior i a més tot l'arc frontal està inclinat cap endavant 5°.

L'altre element amb més diferència és la base, segueix la mateixa idea que en el xassís definitiu però introduint petits canvis. El tub que es troba entre els vèrtex inferior del trapezis davanters està a 0° respecte de la vertical i per darrera del l'arc principal tenim una primera inclinació molt suau per poder situar el motor en una posició més baixa i una segona inclinació triangulada per arribar a la altura de la caixa del diferencial.

També podem veure que no hi ha tub en una de les amplades de la caixa del diferencial, això es deu a que hi ha equips que per subjectar el diferencial utilitzen un subxassís. Un altre canvi en relació a les dimensions és que aquest xassís ha sigut escurçat en la seva part posterior per tal de fer més compacte tota la part de motor.

Per comprovar quins dels dos xassís era millor, s'ha tingut en compte el pes del xassís, el centre de gravetat i els assajos d'impacte i de torsional.



# **Annex C**

## **Càlcul per elements finits**

## **ANNEX C. Càlculs per elements finits**

En aquest apartat es detallaran els resultats dels càlculs realitzats en el dos xassís dissenyats, el xassís 2 i el xassís 3. El propòsit d'aquest anàlisi es comprovar quin del dos xassís pateix menys i per tant és més resistent en els casos que imposa la normativa que s'ha aplicat.

En primer lloc es detallen els càlculs o simulacions fetes dels casos d'impacte i en segon lloc s'ha realitzat l'assaig per trobar la rigidesa torsional de cada xassís.

### **C1. Càlculs dels casos d'impacte**

Els assajos dels casos d'impacte tenen com a objectiu verificar que el xassís que s'ha dissenyat compleix amb a normativa. La normativa que s'ha utilitzat correspon a la FSAE del 2012 on especifica quins son els casos, les condicions de contorn i les forces que s'han d'aplicar. En total son 6 casos.

Per reproduir el casos en els dos xassís s'ha utilitzat el programa ANSYS. Les simulacions s'ha dut de la següent manera:

- Mida dels elements del mallat: 5mm.
- Acer S355JR on:  $E=210$  GPa,  $S_y=355$ MPa,  $S_u=510$ MPa i Mòdul tangent =1417 MPa.
- Tipus d'assaig: elasto-plàstic.

El mòdul tangent es la dada que permet dibuixar la corba plàstica aproximada del material que estem utilitzant al nostre anàlisi.

A continuació s'exposen els resultats obtinguts per als dos xassís.

Per començar, ambdós xassís no excedeixen en cap cas els 25mm de deflexió màxima imposada per la normativa. D'altra banda en quant a tensions, cap dels xassís sobrepassaria la tensió última situada al voltant dels 510 MPa.

Fixant-nos en la comparativa, taula 5, en quatre dels sis casos assajats, les tensions son més baixes en el xassís 2 i de la mateixa manera, les deflexions també son mes reduïdes. En els casos de l'arc principal i arc frontal, les diferències son mínimes de com a molt 4 MPa en el cas de l'arc frontal. On trobem més diferència és en els casos frontals on podem veure una diferència aprox. de 40 MPa en el "a" i en la segona, cas "b" no hem pogut aconseguir reproduir la simulació del xassís 3, ja que al trigar tant en calcular no obteníem un resultat, malgrat això podem assegurar

que hi hauria una diferència entre els dos xassís semblant a la del cas "a". En els casos de l'estructura lateral i de la barra de cinturons obtenim una diferència aproximada de 10 MPa i 20MPa respectivament.

En el cas que alguns dels casos hagués superat la tensió última es podria considerar fer un canvi en les dimensions dels tubs on es supera aquest límit, per exemple augmentar el diàmetre en el arcs frontal i principal de  $\varnothing 25 \times 3 \text{mm}$  a  $\varnothing 26,9 \times 3 \text{mm}$ . El mateix es podria donar amb la resta del xassís.

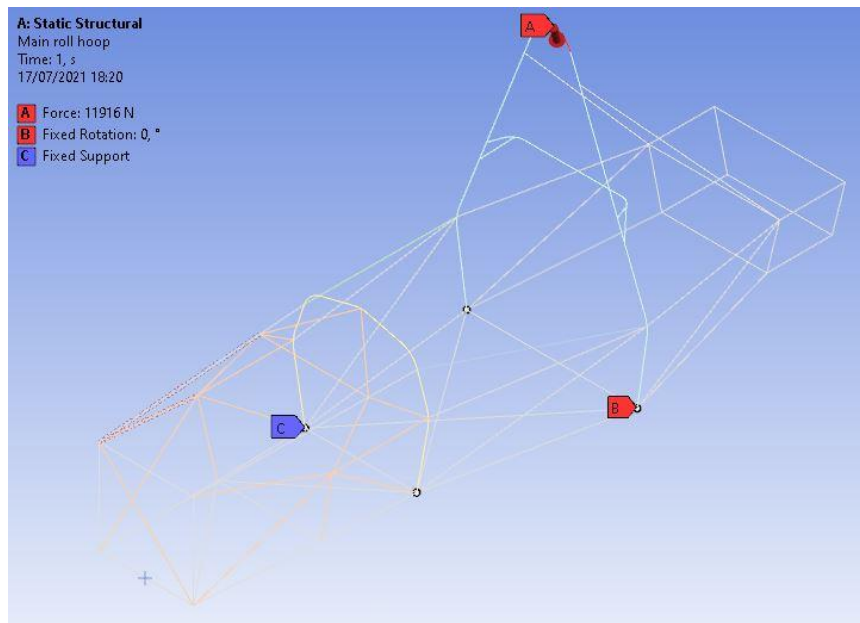
En la taula 5 s'exposen els resultats de la deflexió màxima i la tensió màxima en tots els casos assajats sobre xassís 2 i 3 respectivament .

Cas	Xassís 2		Xassís 3	
	Deflexió màx.	Tensió màx.	Deflexió màx.	Tensió màx.
1. Arc principal	12,08 mm	490,9 MPa	15,56 mm	494,3 MPa
2. Arc frontal	6,51 mm	493,5 MPa	7,81 mm	493,5 MPa
3. Estructura lateral d'impacte	2,95 mm	260,7 MPa	3,09 mm	251,9 MPa
4. Frontal (a)	6,25 mm	328,6 MPa	7,54 mm	367,8 MPa
5. Frontal (b)	6,12 mm	367,8 MPa	-	-
6. Barra de cinturons	6,70 mm	361,3 MPa	6,43 mm	342,6 MPa

Taula 5 - Resultats de l'anàlisi dels casos d'impacte.

### C1.1 Impacte sobre l'arc principal

Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal estan fixats en desplaçaments i en rotació. La càrrega aplicada es de  $F_x = 6 \text{kN}$ ,  $F_y = 5 \text{kN}$ ,  $F_z = -9 \text{kN}$  localitzada sobre la part superior de l'arc principal.



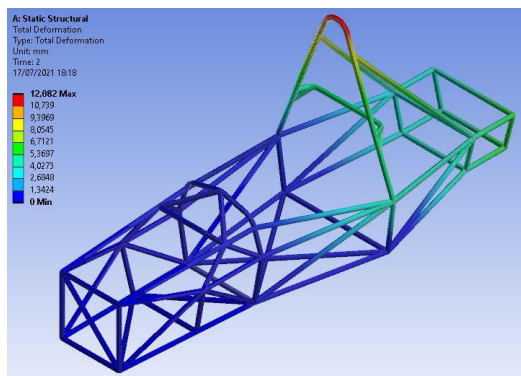
Imatge 50 - Condicions de contorn, impacte sobre l'arc principal.

Resultats:

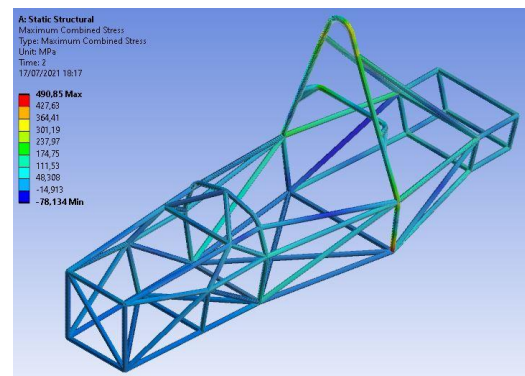
Xassís 2

Deformació màxima: 12.08 mm

Tensió màxima: 490.85 MPa



Imatge 51 - Cas1, deformació del xassís 2.

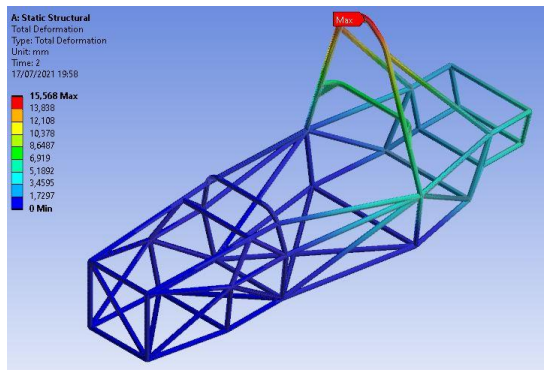


Imatge 52 - Cas1, tensió del xassís 2

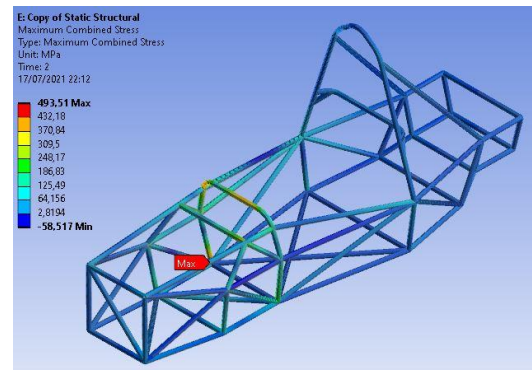
Xassís 3

Deformació màxima: 15.56 mm

Tensió màxima: 494.29 MPa



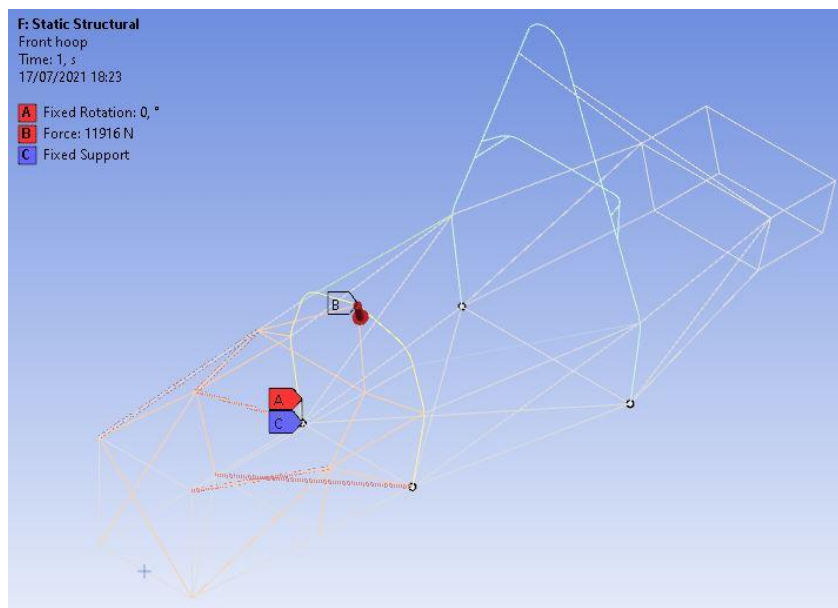
Imatge 53 - Cas1, deformació del xassís 3



Imatge 54 - Cas1, tensió del xassís 3.

### C1.2 Impacte sobre l'arc frontal

Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal estan fixats en desplaçaments i en rotació. La càrrega aplicada es de  $F_x = 6\text{kN}$ ,  $F_y = 5\text{kN}$ ,  $F_z = -9\text{kN}$  localitzada sobre la part superior de l'arc frontal.

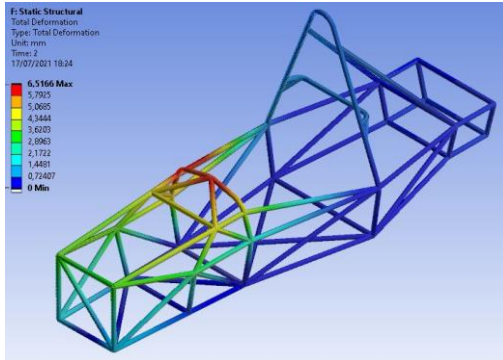


Imatge 55 - Condicions de contorn, cas d'impacte sobre l'arc frontal.

Resultats:

Xassís 2

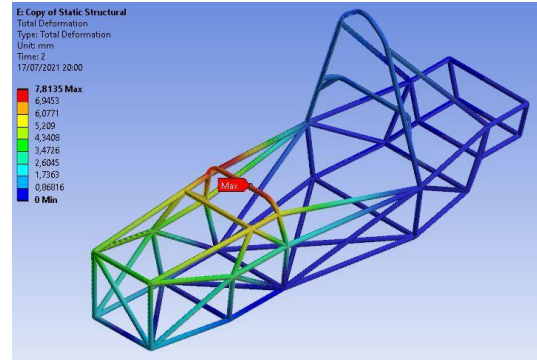
Deformació màxima: 6.51 mm



Imatge 56 - Cas2, deformació del xassís 2.

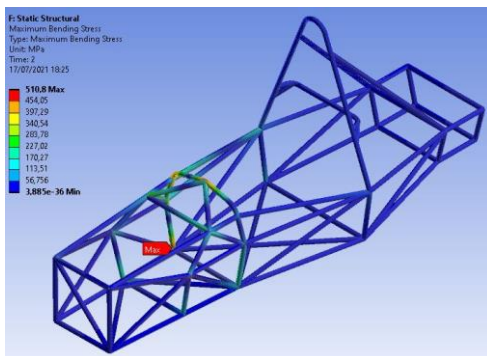
Xassís 3

Deformació màxima: 7.81 mm



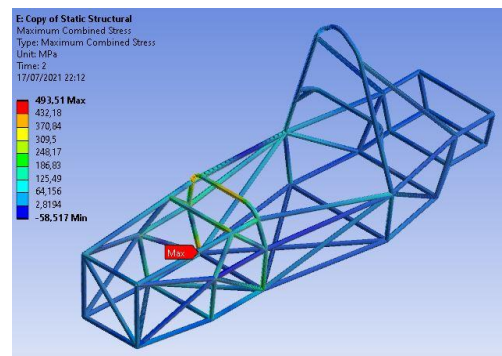
Imatge 58 - Cas2, deformació del xassís 3.

Tensió màxima: 493.47 MPa



Imatge 57 - Cas2, tensió del xassís 2.

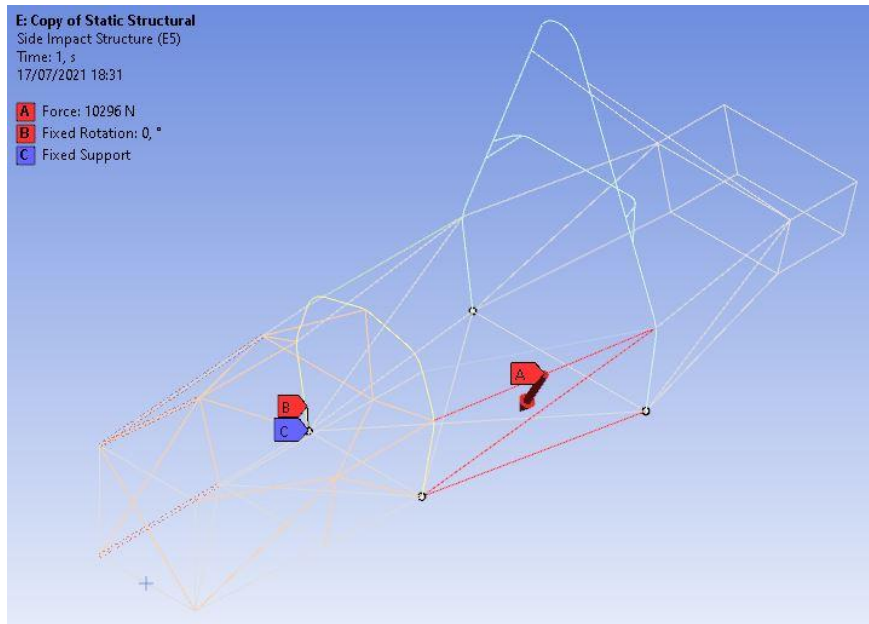
Tensió màxima: 493.51 MPa



Imatge 59 - Cas2, tensió del xassís 3.

C1.3 Impacte a l'estructura lateral d'impacte

Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal estan fixats en desplaçaments i en rotació. La càrrega aplicada és de  $F_y = 5\text{ kN}$  localitzada sobre els elements que componen l'estructura lateral.

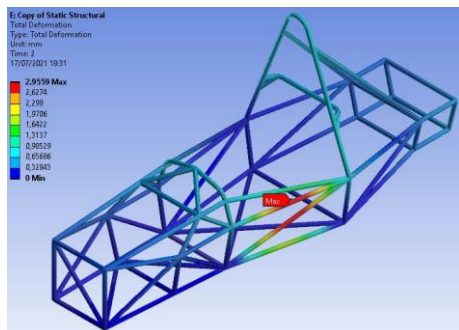


Imatge 60 - Cas3, Impacte sobre la estructura lateral d'impacte.

Resultats:

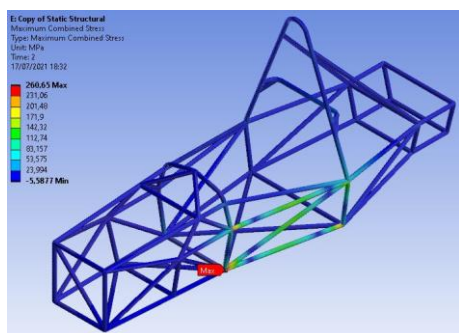
Xassís 2

Deformació màxima: 2.95 mm



Imatge 61 - Cas3, deformació del xassís 2.

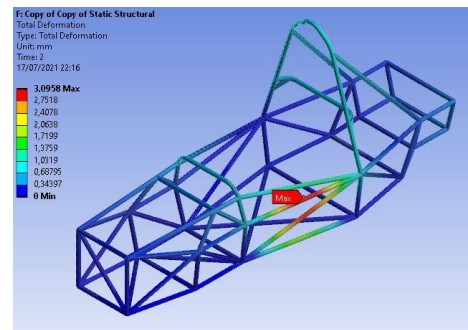
Tensió màxima: 260.65 MPa



Imatge 62 - Cas3, tensió del xassís 2.

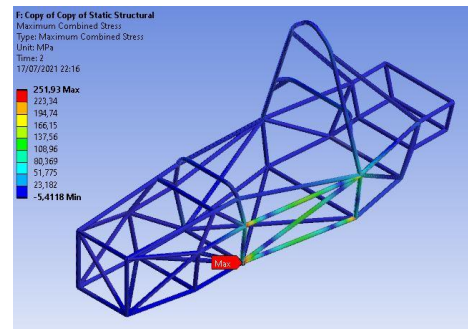
Xassís 3

Deformació màxima: 3.09 mm



Imatge 63 - Cas3, deformació del xassís 3.

Tensió màxima: 251.93 MPa

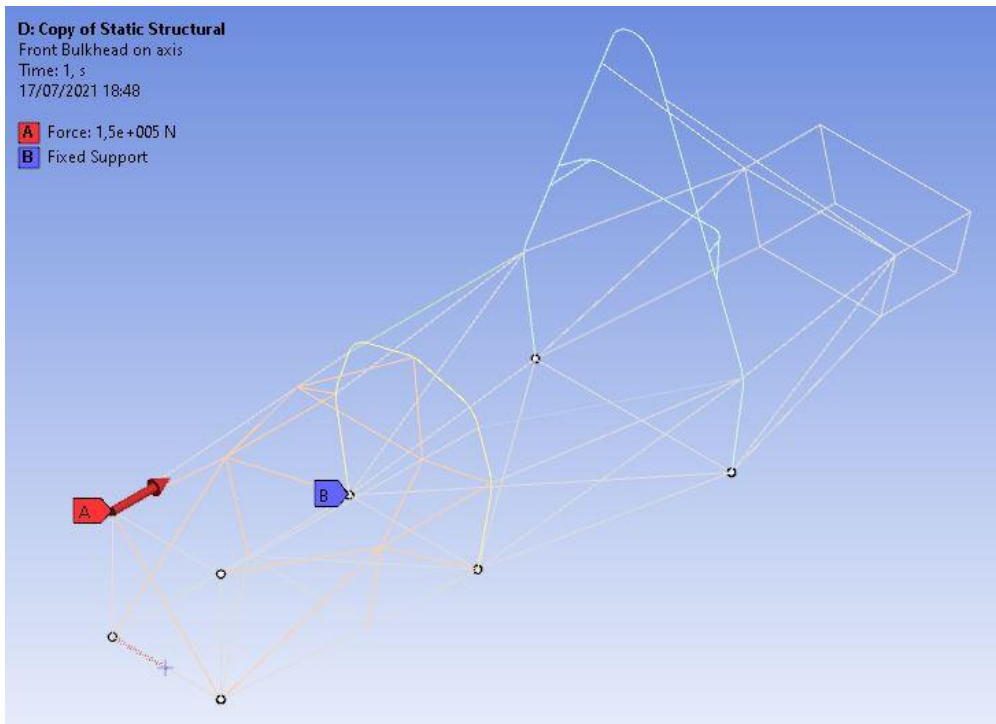


Imatge 64 - Cas3, tensió del xassís 3.



### C1.4 Xoc frontal (a)

Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal i els nodes d'unió estan fixats en desplaçaments i en rotació. La força aplicada es de  $F_x = 150 \text{ kN}$  localitzada sobre els 4 vèrtexs del pla frontal.



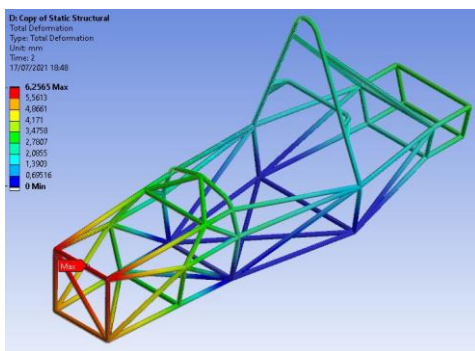
Imatge 65 – Condicions de contorn, cas de xoc frontal (a)

Resultats:

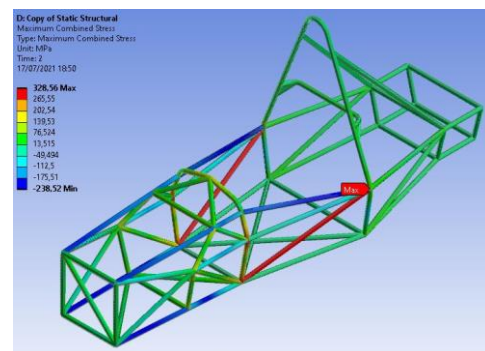
Xassís 2

Deformació màxima: 6.25 mm

Tensió màxima: 328.56 MPa



Imatge 66 - Cas 4, deformació del xassís 2..



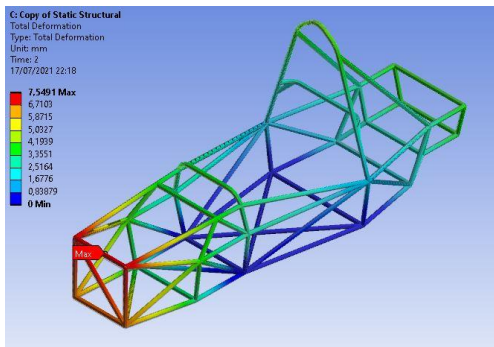
Imatge 67 - Cas 4, tensió del xassís 2.



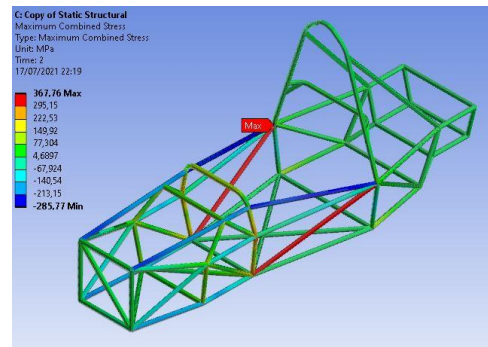
Xassís 3

Deformació màxima: 7.54 mm

Tensió màxima: 367.76 MPa



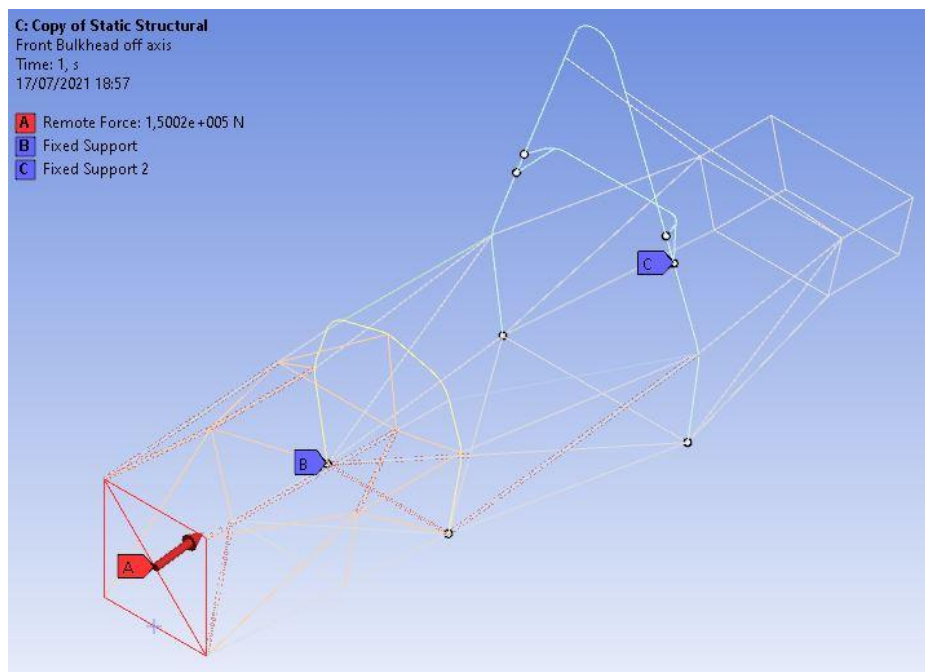
Imatge 68 - Cas 4, deformació del xassís 3.



Imatge 69 - Cas 4, tensió del xassís 3.

C1.5 Xoc frontal (b)

Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal i els nodes d'unió estan fixats en desplaçaments i en rotació. La força aplicada es de  $F_x = 149 \text{ kN}$  i  $F_y = 17,25 \text{ kN}$  localitzada sobre tot el pla frontal.



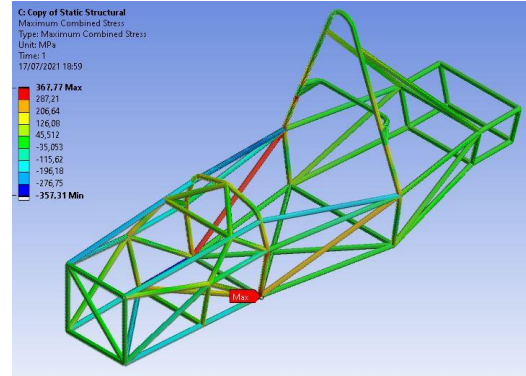
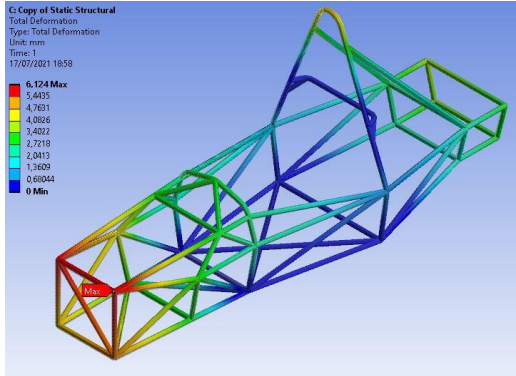
Imatge 70 - Condicions de contorn, cas de xoc frontal (b).

Resultats:

Xassís 2

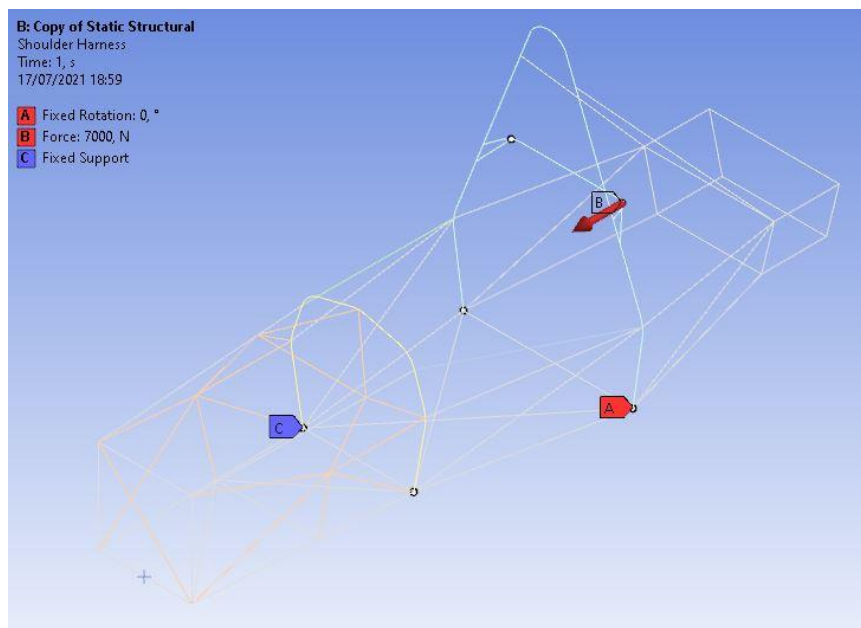
Deformació màxima: 6.12 mm

Tensió màxima: 367.77 MPa



### C1.6 Barra de cinturons

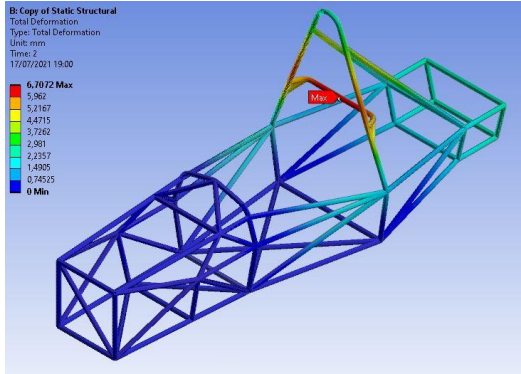
Els nodes inferiors de l'arc principal i l'arc frontal i els nodes d'unió estan fixats en desplaçaments i en rotació. La força aplicada es de  $F_x = -7$  kN localitzada sobre els punts d'unió de la barra de cinturons i els suports diagonals de cada banda.



Resultats:

Xassís 2

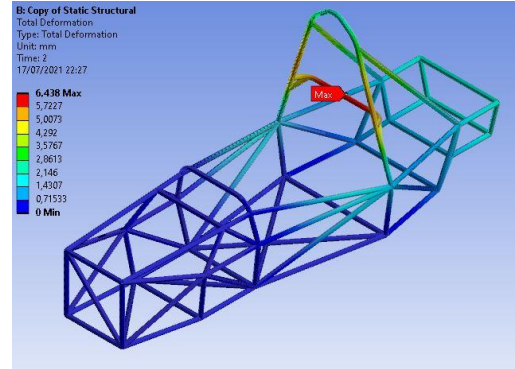
Deformació màxima: 6.70 mm



Imatge 74 - Cas 6, deformació del xassís 2.

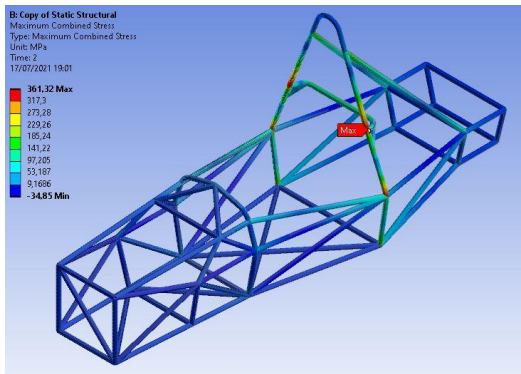
Xassís 3

Deformació màxima: 6.43 mm



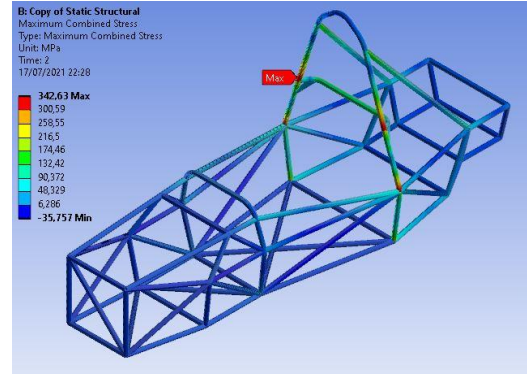
Imatge 76 - Cas6, deformació del xassís 3.

Tensió màxima: 361.32MPa



Imatge 75 - Cas 6, tensió del xassís 2.

Tensió màxima: 342.63 MPa

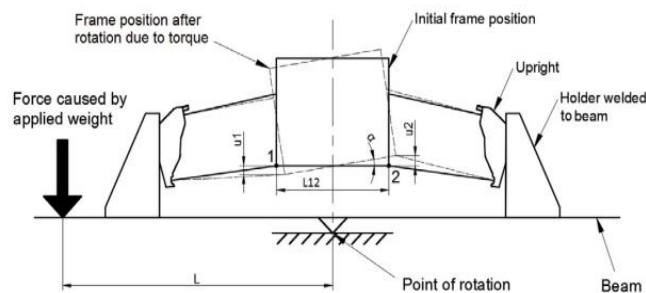


Imatge 77 - Cas 6, tensió del xassís 3.

## C2. Rigidesa torsional

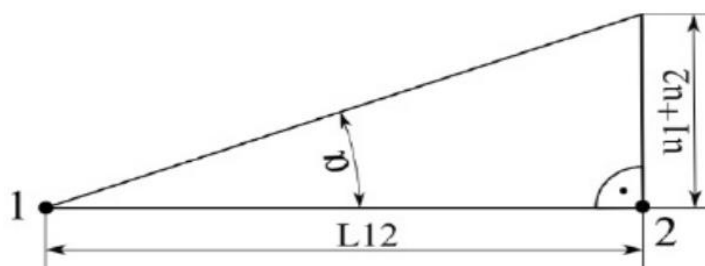
La rigidesa torsional, com hem vist a la memòria, ens serveix per comprovar com es comporta el xassís en corbes amb recolzament i com afecta aquest comportament al sistema de suspensions. L'assaig tracta de simular aquest comportament i comparar quin dels dos xassís obté una major rigidesa, per fer-ho hem seguit la següent metodologia.

Primerament l'assaig consisteix en bloquejar l'eix posterior del xassís, mentre a l'eix davanter se li aplica un parell de forces. El tub que uneix els vèrtex inferiors frontals dels trapezis té un recolzament simple, es a dir permet rotacions però no desplaçaments. El parell de forces esta separat en 5 passos, a cada pas s'hi apliquen 5kg mes a banda i banda fins arribar a 25kg a cada costat. En definitiva, el parell de forces final serà de 273 Nm. Aquestes son les condicions de contorn.



Imatge 78 - Exemple d'un altre mètode per calcular la rigidesa torsional.

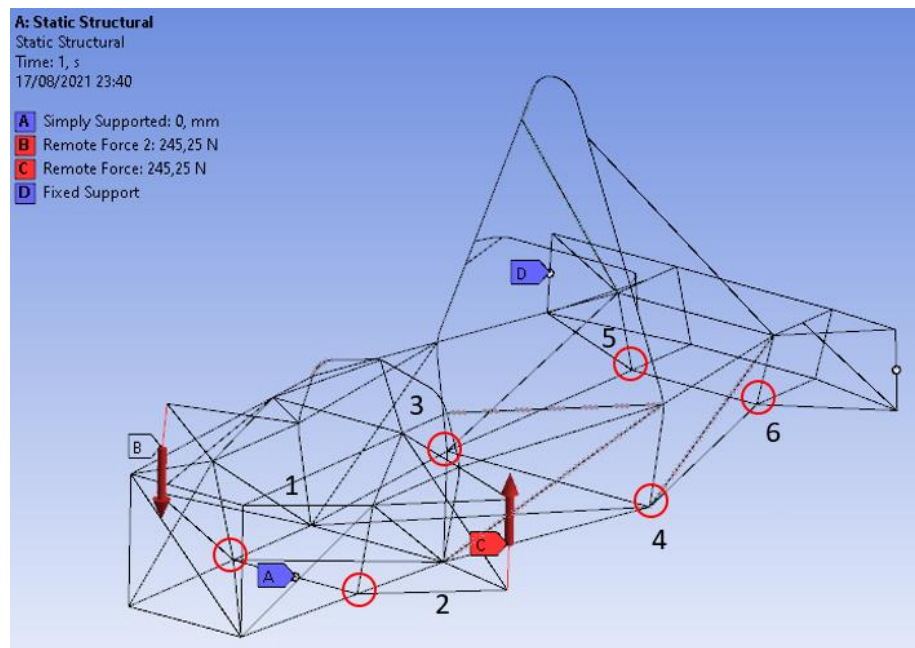
A mida que du a terme l'assaig, es mesura el desplaçament vertical en 6 nodes que estan dividits en 3 seccions, els vèrtex frontals inferiors dels trapezis de l'eix davanter, els extrems inferiors de l'arc principal i els vèrtex inferiors de la caixa del diferencial que uneix els extrems inferiors del trapezis de l'eix posterior.



Imatge 79 - Triangle equivalent per al càlcul de l'angle.

D'aquí s'obté l'angle que al final s'utilitzarà per calcular la rigidesa torsional  $Ct = T/\alpha$  [Nm/graus].

Les condicions de contorn de l'assaig son les detallades en la imatge 80:



Imatge 80 - Condicions de contorn de l'anàlisi de rigidesa torsional.

Com hem dit abans, l'assaig estarà format per 5 passos on per els dos xassís tenim els mateixos paràmetres en quant a la força aplicada.

	Step/Pas	1	2	3	4	5	Total
<b>Massa afegida</b>	m [Kg]=	5	5	5	5	5	25
<b>Força aplicada en el punt 1 (-)</b>	F1 [N] =	49,05	98,1	147,15	196,2	245,25	245,25
<b>Força aplicada en el punt 2 (+)</b>	F2 [N] =	49,05	98,1	147,15	196,2	245,25	245,25
<b>Distancia aplicació força</b>	L [m] =	0,558					
<b>Parell</b>	T [Nm] =	54,74	109,48	164,22	218,96	273,70	

Taula 6 - Dades prèvies per a l'assaig de rigidesa torsional.

Els càlculs realitzats en els xassís 2 s'indiquen a la taula 7:

<b>Secció 1</b>						
<b>Distancia entre nodes</b>	L12 [mm] =	397,29				
	Desplaçament u1 [mm]					
<b>Node 1</b>	=	-0,104	-0,208	-0,313	-0,417	-0,522
	Desplaçament u2 [mm]					
<b>Node 2</b>	=	0,106	0,208	0,317	0,423	0,529

<b>Angle <math>\alpha</math> [deg]</b>	$\alpha$ [deg] =	0,030	0,060	0,091	0,121	0,152
<b>Rigidesa torsional</b>						
<b>[Nm/deg]</b>	<b>Ct= T/<math>\alpha</math> =</b>	1808,32	1824,84	1807,46	1807,46	1805,75
<b>Secció 2</b>						
<b>Distància entre nodes</b>	L34 [mm] = 650					
	Desplaçament u3 [mm]					
<b>Node 3</b>	=	-0,107	-0,214	-0,321	-0,428	-0,535
	Desplaçament u4 [mm]					
<b>Node 4</b>	=	0,107	0,215	0,323	0,431	0,538
<b>Angle <math>\alpha</math></b>	$\alpha$ [deg] =	0,019	0,038	0,057	0,076	0,095
<b>Rigidesa torsional</b>						
<b>[Nm/deg]</b>	<b>Ct= T/<math>\alpha</math> =</b>	2901,88	2895,12	2892,87	2891,75	2893,77
<b>Secció 3</b>						
<b>Distància entre nodes</b>	L56 [mm] = 400					
	Desplaçament u5 [mm]					
<b>Node 5</b>	=	-0,040	-0,081	-0,122	-0,163	-0,204
	Desplaçament u6 [mm]					
<b>Node 6</b>	=	0,040	0,081	0,122	0,163	0,204
<b>Angle <math>\alpha</math></b>	$\alpha$ [deg] =	0,011	0,023	0,035	0,047	0,058
<b>Rigidesa torsional</b>						
<b>[Nm/deg]</b>	<b>Ct= T/<math>\alpha</math> =</b>	4776,95	4717,97	4698,64	4689,03	4683,28

Taula 7 - Resultats dels angles i la rigidesa a cada secció i etapa del xassís 2.

Els càlculs realitzats en el xassís 3 s'indiquen en la taula 8:

<b>Secció 1</b>						
<b>Distància entre nodes</b>	L12 [mm] = 425					
	Desplaçament u1					
<b>Node 1</b>	[mm] =	-0,158	-0,317	-0,475	-0,634	-0,798
	Desplaçament u2					
<b>Node 2</b>	[mm] =	0,160	0,321	0,481	0,642	0,802
<b>Angle <math>\alpha</math> [deg]</b>	$\alpha$ [deg] =	0,043	0,086	0,129	0,172	0,216
<b>Rigidesa torsional</b>	Ct= T/ $\alpha$ =	1276,86	1272,86	1274,19	1272,86	1268,88
<b>Secció 2</b>						
<b>Distància entre nodes</b>	L34 [mm] = 650					

	Desplaçament	u3					
<b>Node 3</b>	[mm] =		-0,121	-0,243	-0,365	-0,487	-0,609
	Desplaçament	u4					
<b>Node 4</b>	[mm] =		0,122	0,245	0,368	0,491	0,614
<b>Angle <math>\alpha</math></b>	$\alpha$ [deg] =		0,021	0,043	0,065	0,086	0,108
<b>Rigidesa torsional</b>	$Ct = T/\alpha =$		2555,57	2545,10	2541,62	2539,89	2538,86
<b>Secció 3</b>							
<b>Distància entre nodes</b>	L56 [mm] = 400						
	Desplaçament	u5					
<b>Node 5</b>	[mm]		-0,045	-0,091	-0,137	-0,183	-0,229
	Desplaçament	u6					
<b>Node 6</b>	[mm]		0,045	0,091	0,137	0,183	0,229
<b>Angle <math>\alpha</math></b>	$\alpha$ [deg] =		0,013	0,026	0,039	0,052	0,066
<b>Rigidesa torsional</b>	$Ct = T/\alpha =$		4246,18	4199,52	4184,19	4176,57	4172,01

Taula 8 - Resultats dels angles i la rigidesa a cada secció i etapa del xassís 3..

Els resultats finals obtinguts del xassís 2 i 3 s'indiquen en la taula 9:

<b>XASSIS 2</b>		
	<b>Rigidesa torsional [Nm/º]</b>	<b>Distància en Z [mm]</b>
<b>Secció 1</b>	1810,77	470,38
<b>Secció 2</b>	2895,08	1550,00
<b>Secció 3</b>	4713,18	2170,00
<b>Mitjana total Rigidesa</b>	<b>3139,67</b>	Nm/º
<b>Pes del xassís 2</b>	<b>39,74</b>	Kg

<b>XASSIS 3</b>		
	<b>Rigidesa torsional [Nm/º]</b>	<b>Distància en Z [mm]</b>
<b>Secció 1</b>	1273,13	470,38
<b>Secció 2</b>	2544,21	1550,00
<b>Secció 3</b>	4195,69	2100,00
<b>Mitjana total Rigidesa</b>	<b>2671,01</b>	Nm/º
<b>Pes del xassís 3</b>	<b>39,19</b>	Kg

Taula 9 - Resultats definitius del xassís 2 i 3 respectivament.



Com es pot veure, la rigidesa torsional del xassís 2 supera amb escreix en totes les seccions al xassís 2 i tenint en compte la massa de cada xassís ens quedaríem amb el xassís 2.

### **C3. Conclusions**

Pel que fa a l'anàlisi d'impactes els xassís que ha donat millor resultat ha sigut el 2, tot i això s'ha de tenir en compte que el xassís 3 compleix també els requeriments imposats a la normativa.

D'altra banda a l'anàlisi de rigidesa torsional s'ha determinat que el xassís 2 es el disseny amb una rigidesa torsional superior al xassís 3.

Per tant, el xassís 2 es la estructura que s'utilitzarà per a la realització d'aquest projecte.