

Treball de Fi de Grau

Enginyeria en Tecnologies Industrials

Disseny i fabricació de pròtesis amb impressores 3D

MEMÒRIA

Autor: Oriol Gómez Díaz-Pavón
Director: Jordi Bonada Bo
Convocatòria: Abril 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest treball s'estudia la viabilitat i efectivitat d'utilitzar com a aparell mèdic una impressora 3D, per tal d'imprimir pròtesis –comparativament amb les convencionals- molt més econòmiques per a infants, en llocs on no es tenen els recursos suficients per accedir a pròtesis més cares. La pròtesi ha d'estar fabricada majoritàriament amb impressió 3D, i el que no es pugui imprimir, ha de ser materials molt comuns disponibles en qualsevol lloc, com ara cordons o cargols, fins i tot el primer podria substituir-se per corda o altre material assimilable.

Per començar, en el treball es fa una breu introducció a la impressió 3D, així com una cerca de les alternatives existents, i, posteriorment, es passa a dissenyar la pròtesi, en aquest cas de cama per sota del genoll, per tal de trobar el disseny que compleixi les especificacions tècniques requerides i que sigui fàcil d'imprimir i de muntar.

El següent pas del treball és un estudi per tal que el disseny compleixi els requeriments mecànics imposats per la normativa ISO, ja que tot i no ser una pròtesi comercial, sí que és una pròtesi funcional i per això ha de complir la normativa com qualsevol altra pròtesi. Això es fa utilitzant el mètode d'elements finits amb ANSYS, imposant les condicions de la normativa i buscant els punts crítics per on pot fallar la pròtesi per tal de modificar-la i així complir-la.

Un cop s'ha triat el disseny es fa una impressió de la pròtesi per tal de comprovar que el seu funcionament és correcte i que no hi ha cap error de disseny, i es fa una prova de subjecció a la cama per tal de comprovar com aguantarà la pròtesi un cop l'infant la tingui posada.

Per últim es crea una base de dades on es poden baixar els arxius de les pròtesis ordenats segons la mida del peu, l'altura fins al genoll i el perímetre del panxell, per tal que es seleccioni el més adequat per l'infant en qüestió i es procedeixi a la seva impressió.

Sumari

SUMARI	4
1. PREFACI	7
1.1. MOTIVACIÓ.....	7
1.2. REQUERIMENTS PREVIS.....	8
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE	9
2.2. ABAST DEL PROJECTE.....	9
3. INTRODUCCIÓ AL PLA I A L'IMPRESSIÓ 3D	10
3.1. FDM I IMPRESSIÓ 3D	10
3.2. INTRODUCCIÓ AL PLA	12
4. ANÀLISI DE LES ALTERNATIVES DE MERCAT	14
4.1. PEU DE TALÓ ENCOIXINAT I TURMELL SOLID O SACH (SOLID ANKLE CUSHIONED HEEL).....	14
4.2. PEU DE QUILLA FLEXIBLE	15
4.3. PEU D'EIX ÚNIC.....	15
4.4. PEU DE MÚLTIPES EIXOS	15
4.5. PEU DE RESPOSTA DINÀMICA	16
4.6. PEU AMB MICROPROCESSADOR	17
5. NORMATIVA	19
5.1. ISO 10328.....	19
5.2. MARCATGE CE	20
6. DISSENY	21
6.1. MESURES ANTROPOMÈTRIQUES.....	21
6.1.1. ALTURA AL GENOLL.....	21
6.1.2. PERÍMETRE DEL PANXELL.....	21
6.1.3. LONGITUD I AMPLADA DEL PEU.....	22
6.2. ROSQUES.....	22
6.3. BLOQUEJADOR ROTACIO	24
6.4. PEU.....	25
6.5. FIXACIÓ.....	31
6.6. EIX.....	34
6.6.1. UNIÓ AMB LA FIXACIÓ	35

6.6.2.	EIX.....	36
6.6.3.	UNIÓ AMB EL PEU (ROSCA).....	38
7.	ESTUDI AMB ANSYS	40
7.1.	PEU.....	40
7.1.1.	MATERIAL.....	40
7.1.2.	MALLAT.....	41
7.1.3.	CONDICIONS DE CONTORN F2.....	42
7.1.4.	SOLUCIÓ F2.....	42
7.1.5.	CONDICIONS DE CONTORN F1.....	45
7.1.6.	SOLUCIÓ F1.....	45
7.1.7.	MODEL NO LINEAL.....	47
7.2.	FIXACIÓ (FORÇA QUE S'HA DE FER PER TANCAR-LA).....	50
7.2.1.	MATERIAL.....	50
7.2.2.	MALLAT.....	51
7.2.3.	CONDICIONS DE CONTORN.....	52
7.2.4.	SOLUCIÓ.....	52
7.2.5.	MODEL NO LINEAL.....	53
8.	IMPACTE ECONÒMIC	57
8.1.	DEL PROJECTE.....	57
8.1.1.	INVERSIÓ.....	57
8.1.2.	COSTOS TOTALS.....	57
8.2.	COST UNITARI.....	58
8.2.1.	COSTOS DIRECTES/VARIABLES.....	59
8.2.2.	COSTOS INDIRECTES/ASSIGNABLES.....	59
8.2.3.	COSTOS FIXOS/ESTRUCTURALS.....	59
9.	IMPACTE SOCIAL	61
9.1.	EQUITAT EN L'ACCÉS A UNA PRÒTESIS.....	61
9.2.	DESLOCALITZAR ELS RECURSOS.....	61
9.3.	DISMINUIR L'EXCLUSIÓ SOCIAL.....	61
10.	IMPACTE MEDIAMBIENTAL	62
10.1.	RECICLABILITAT.....	62
10.2.	PETJADA ECOLÒGICA.....	62
11.	PRESA DE MIDES, DESCÀRREGA I IMPRESSIÓ DE LA PRÒTESI	64
11.1.	PRESA DE MIDES.....	64
11.2.	DESCÀRREGA.....	64
11.3.	IMPRESSIÓ.....	64

CONCLUSIONS	66
AGRAÏMENTS	67
BIBLIOGRAFIA	68
Referències bibliogràfiques	68
11.4. Bibliografia complementària.....	68
ANNEXOS	70
Annex 1	70
Annex 2	74
Annex 3	92
Annex 4	110

1. PREFACI

1.1. MOTIVACIÓ

Aquest projecte està inspirat per un altre projecte, anomenat *Atomic Lab*, de pròtesis de braços com el de la Figura 1.1, que estan impresos en 3D. Aquest projecte -sense ànim de lucre- va ser creat per un enginyer argentí anomenat Gino Tubaro, i és un projecte en el qual es fabrica pròtesis de braços per a gent amb pocs recursos, i utilitzen un sistema "d'ambaixadors", que són persones que tenen impressores 3D, i que imprimeixen i envien les pròtesis a les persones que les requereixen, així, qui ho necessiti, pot rebre una pròtesi de manera gratuïta.

Aquest projecte també es diferencia dels altres, pel fet que incorpora una idea molt enginyosa que agilitza moltíssim el procés de la presa de mides i és que només passant una foto del membre en el qual anirà la pròtesi davant d'un paper quadriculat, automàticament es calculen les mides de la pròtesi.



Figura 1.1: Pròtesi de braç d'Atomic Lab

Després de fer una recerca de projectes similars a aquest, no es va trobar cap de pròtesis de cames, pel que es va decidir dur a terme aquest treball per cobrir aquesta necessitat.

1.2. REQUERIMENTS PREVIS

A banda dels coneixements que es varen adquirir en el grau, per tal de poder dur a terme aquest treball també es va haver d'adquirir coneixements sobre la impressió 3D.

Per una banda, es va haver d'aprendre el funcionament de la impressora, tant com carregar les bobines de PLA, com calibrar la placa d'impressió, com les comandes bàsiques del controlador de la impressora.

També es va haver d'aprendre a utilitzar el programa *Ultimaker Cura 3D*, ja que és el programa que et permet convertir el teu model 3D en un format que la impressora reconegui, i el pugui imprimir, però abans d'això s'ha d'aprendre a configurar el programa per a la impressora que s'està utilitzant, i a configurar-ne els paràmetres d'impressió com ara la velocitat d'extrusió, la densitat de la peça o l'altura de capa entre d'altres.

2. INTRODUCCIÓ

2.1. OBJECTIUS DEL PROJECTE

L'objectiu principal d'aquest projecte és comprovar la viabilitat d'utilitzar com a equip mèdic una impressora en 3D, per tal que les persones de països en vies de desenvolupament que ho requereixin, -i que no tinguin els recursos suficients per accedir a una pròtesi- se'ls hi pugui prendre les mides necessàries, per després descarregar la pròtesi més adequada per a les mides obtingudes i fabricar-la de manera molt més econòmica comparativament amb una pròtesi estàndard.

Un altre objectiu d'aquest projecte, és comprovar si existeix algun sistema amb el qual augmentar o disminuir l'altura de la pròtesi, per regular a mesura que creix l'usuari, i en el cas que es trobi, implementar-lo per augmentar la vida útil de les pròtesis.

També es vol comprovar si el PLA, que és el plàstic més habitual en la impressió 3D, és el millor material per a l'elaboració de pròtesis, ja que dins dels plàstics no és un material amb molta flexibilitat i, per algunes parts com ara el peu, es necessita cert grau de flexibilitat per donar dinamisme al moviment de la pròtesi.

2.2. ABAST DEL PROJECTE

Els objectius d'aquest projecte, fan referència a un àmbit d'actuació de situacions en les quals, amb molta freqüència, es donen casos de persones que necessiten una pròtesi però no tenen els recursos econòmics ni alternatives per adquirir-la.

En aquest projecte es dissenyarà una pròtesi, prenent les mides corresponents al rang d'edats d'entre 4 i 17 anys, i se'n fabricarà un prototip mitjançant la impressió 3D, i com a material de fabricació s'utilitzarà PLA (Àcid Polilàctic).

Del disseny obtingut, se'n farà una simulació estructural estàtica de resistència mecànica per tal d'assegurar que compleix la normativa vigent sobre pròtesis i que és segura i funcional.

3. INTRODUCCIÓ AL PLA I A L'IMPRESSIÓ 3D

3.1. FDM I IMPRESSIÓ 3D

Per a l'elaboració d'aquest projecte, s'ha escollit la tecnologia FDM perquè aquest procés s'utilitza principalment per a prototipus o per a fabricació a baixa escala, ja que és fàcil d'utilitzar i ocupa poc espai, i permet fabricar geometries que amb altres processos de fabricació seria difícil fabricar-les. També s'ha escollit tenint en compte que, és una tecnologia que està disponible en un rang de preus molt amplis, es poden adquirir impressores des de 100€ fins a 10000€ o més, així, depenent del pressupost que es disposi, s'escollirà una o altra impressora.

El modelat per deposició fosa o FDM (Fused Deposition Modeling), és un procés de fabricació utilitzat en la impressió 3D, el qual consta de tres elements: una base d'impressió, a partir de la qual s'imprimirà la peça, un material en forma de bobina que es fondrà per fabricar la peça, i un extrusor que dipositarà el material fos en la base d'impressió.

El funcionament de l'FDM es basa en l'addició successiva de capes de material fos, que superposant les suficients capes, conforma un objecte en tres dimensions. Per fer-ho, la impressora té dos motors units a unes guies, que fan moure l'extrusor en els eixos de les abscisses i ordenades, així es creen les capes en dues dimensions, després, gràcies a un vis sens fi, l'extrusor es mou verticalment uns mil·límetres per tal de crear una nova capa sobre la que ja havia creat.

La tecnologia FDM és compatible amb un ample rang de materials amb característiques molt diferents, com ara Polímers termoplàstics, com el PLA i l'ABS, també policarbonats com el PET, PVA, o nylon entre d'altres. Aquesta tecnologia també funciona amb filaments de metall, pedra i fusta, com es pot veure en la Figura 3.1.

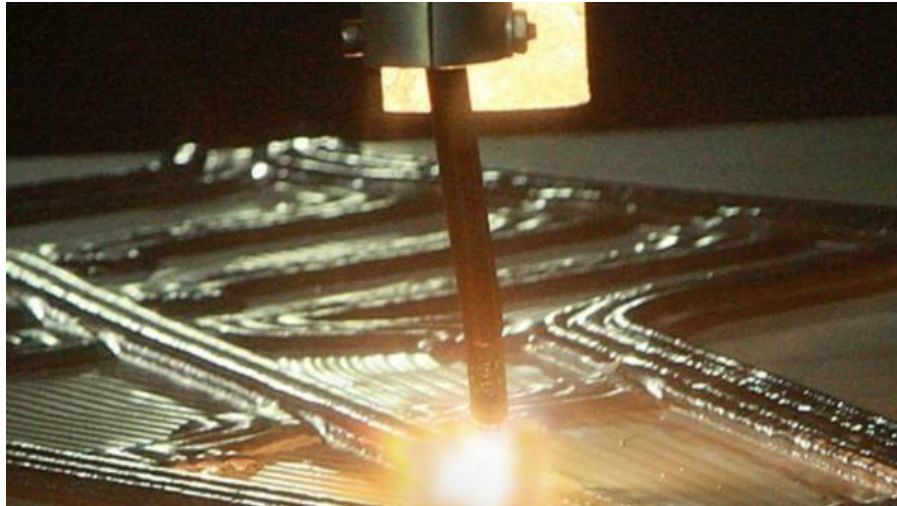


Figura 3.1: Fabricació additiva en 3D de metall

El primer pas per imprimir un objecte, és el seu disseny. En el cas d'aquest treball s'ha utilitzat *Autodesk Inventor*, que és un programa de disseny assistit per ordinador, que permet dissenyar objectes en tres dimensions. Un cop l'objecte està dissenyat, s'ha de guardar en format ".STL". Aquest fitxer s'ha d'importar en un programa, en el cas d'aquest treball s'utilitza *UltimakerCura3D*, que, tal com es pot veure en la Figura 3.2, donant-li uns paràmetres com la velocitat d'extrusió, la densitat de l'objecte, o el tipus d'adherència a la placa d'impressió, crea un document amb el model de l'objecte per capes amb un software anomenat "slicer", el qual utilitza la impressora per poder imprimir l'objecte.

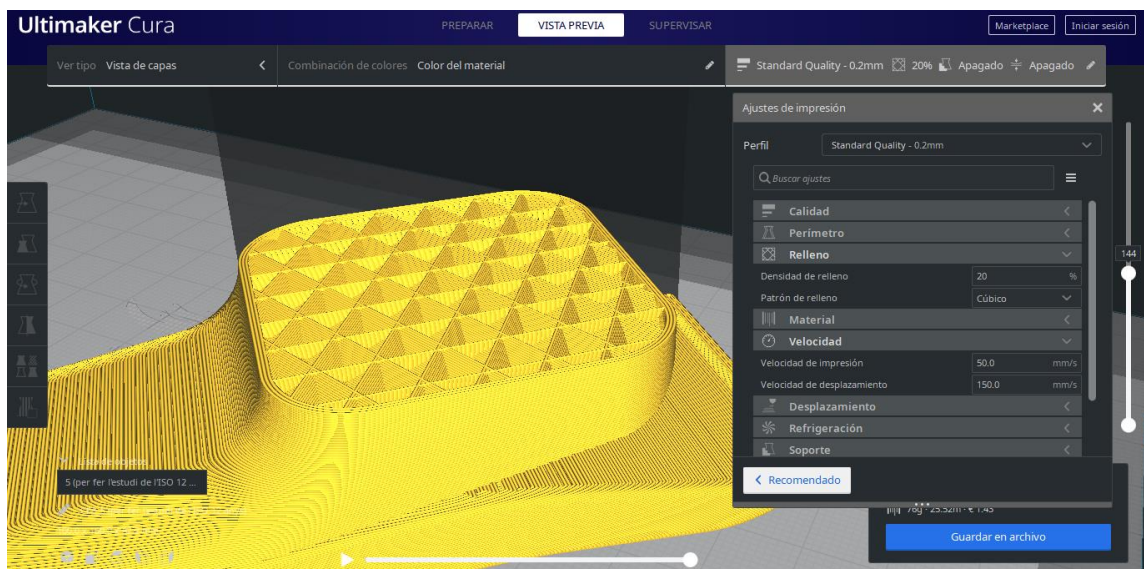


Figura 3.2: Paràmetres d'impressió del Cura3D

Algunes peces amb geometria complexa, poden requerir la utilització de suports, que com es pot veure en la Figura 3.3, són impressions de material que s'utilitzen per a imprimir parts

que sobresurten del model o geometries que tenen un canvi bruscat d'angle, que sense la utilització d'aquests suports, seria molt difícil la seva impressió. Aquests suports poden estar impresos amb el mateix material del model o amb materials solubles en aigua, que un cop acabada la impressió, es submergeix en aigua i l'eliminació d'aquests suports és més senzilla. Un altre element d'ajuda a la impressió és el tipus d'adherència a la base, que en aquest cas només s'imprimeix tocant a la base d'impressió, i n'hi ha tres tipus:

- Falda: Imprimeix unes capes de material al voltant de la peça per delimitar on estarà impresa. Aquesta opció serveix principalment per eliminar possibles restes de material residual a l'extrusor.
- Vora: És similar a la falda, però amb contacte directe amb la peça, utilitzada per peces en les quals es podrien desenganxar les arestes de la base d'impressió.
- Bassa: Crea unes capes de material sota la peça, per imprimir-hi a sobre, per tal de millorar l'adherència. Aquesta opció és recomanable per a peces altes que podrien caure durant la impressió.



Figura 3.3: Figura impresa amb suports

3.2. INTRODUCCIÓ AL PLA

En la impressió 3D, el més usual és utilitzar plàstics, en concret termoplàstics, que gràcies a les seves propietats són ideals per ser impresos. Dins dels termoplàstics, els dos materials més utilitzats són l'ABS (Acrilonitril Butadiè Estirè) i el PLA (Àcid Polilàctic), i per aquest treball s'ha escollit el PLA, ja que, tot i tenir pitjors qualitats mecàniques que l'ABS, no emet gasos nocius al ser imprès, cosa que sí que ho fa l'ABS, i s'adhereix millor a la placa d'impressió.

El PLA és un polímer termoplàstic, obtingut a partir del midó del blat de moro o de la canya de sucre a diferència d'altres polímers obtinguts del petroli. Aquest polímer es produeix

molent el material natural i barrejant-lo amb àcid làctic, trencant el midó en dextrosa. Fermentant la glucosa s'obté l'àcid L-làctic, que és el component principal del PLA.

Actualment, és un dels materials d'impressió més utilitzats per tenir l'etiqueta de biodegradable, ja que en provenir de materials naturals, aquest polímer es degrada sota unes condicions ambientals específiques, minoritzant la petjada ecològica respecte als polímers amb base de petroli.

Aquest polímer és molt fàcil d'utilitzar, ja que té un punt de fusió de 180°C, relativament baix comparat amb els 260°C de l'ABS, i no requereix un postprocessament complex. Es pot llimar per eliminar les desigualtats superficials i eliminar-ne els suports. També ofereix una àmplia varietat de colors i el seu preu és de 20€/kg de mitjana.

En el cas de la impressió 3D, el PLA té unes propietats mecàniques diferents del PLA injectat [1], i té les següents propietats mecàniques:

- Mòdul de Young:
 - 2613,83MPa a tracció
 - 2330MPa a flexió
- Tensions de ruptura:
 - 37,38MPa a tracció
 - 50,772MPa a flexió

Ja que en [1] no hi ha les tensions de ruptura a compressió del PLA imprès, es farà una aproximació tenint en compte que la tensió de ruptura a tracció teòrica és de 47MPa, l'experimental és un 79,53% de la teòrica, per tant, podem aproximar la tensió de ruptura a compressió com un 75% de la teòrica, -agafem aquest valor per ser conservadors-, resultant amb un valor de 49,5MPa.

4. ANÀLISI DE LES ALTERNATIVES DE MERCAT

Amb l'avanç de la tecnologia i la investigació, les pròtesis -en aquest cas de cama- han evolucionat per tal d'adaptar-se a les necessitats de cada usuari, és a dir, han passat d'utilitzar-se únicament per caminar a utilitzar-se per activitats com l'escalada, ballar, córrer o anar amb bicicleta, adaptant-ne les parts necessàries per a poder ser utilitzades en aquestes àrees.

Gràcies al descobriment de nous materials s'ha passat d'elaborar pròtesis de metalls pesants o de fusta a utilitzar plàstics lleugers, aliatges metàl·lics o materials com la fibra de carboni, millorant-ne tant les propietats mecàniques, com el pes, per tal millorar l'experiència de l'usuari i que pugui utilitzar la pròtesi durant més temps sense cansar-se.

Actualment hi ha pròtesis per a moltes activitats, però al ser un treball encarat a fer pròtesis econòmiques, s'estudiaran les pròtesis per a caminar, les quals es poden agrupar en funció de si tenen el turmell articulat o no, i segons la seva funció es poden categoritzar en els següents subgrups:

4.1. PEU DE TALÓ ENCOIXINAT I TURMELL SOLID O SACH (SOLID ANKLE CUSHIONED HEEL)

És el tipus de peu no articulat més senzill, tal com es pot veure a la Figura 4.1, el peu té una quilla rígida, i la resta és de goma, el que proporciona estabilitat, però té poc moviment lateral.



Figura 4.1: Pròtesi de peu de taló encoixinat i turmell rígid

4.2. PEU DE QUILLA FLEXIBLE

Aquest peu no articulats té un funcionament similar al SACH, amb la particularitat que la punta del peu es pot deformar per tal d'adaptar-se a les desigualtats del terreny.

4.3. PEU D'EIX ÚNIC

Aquest peu articulats té una articulació de turmell, tal com es pot observar de la Figura 4.2, que permet moure el peu amunt i avall tal, millorant així l'estabilitat del genoll, cosa que la fa ideal per persones que tinguin amputacions per sobre del genoll.

Tot i tenir avantatges respecte a les pròtesis no articulades, l'articulació afegeix pes a la pròtesi i també l'encareix.



Figura 4.2: Pròtesi de peu d'eix únic

4.4. PEU DE MÚLTIPES EIXOS

Com s'observa a la Figura 4.3, aquest peu presenta moltes similituds amb el d'un eix, però el que els diferencia és que aquest no només pot moure el turmell amunt i avall, sinó que l'eix addicional li permet tenir moviment cap als costats, i pel fet d'afegir un altre eix, no hi ha gran diferència tant de pes com de preu.



Figura 4.3: Pròtesi de peu de múltiples eixos

4.5. PEU DE RESPOSTA DINÀMICA

Els peus de resposta dinàmica són ideals per aquelles persones que tenen un estil de vida actiu, el qual requereix canvis de velocitat, canvis d'orientació o recórrer distàncies llargues, ja que com es pot veure en la Figura 4.4, gràcies al seu disseny, aquest peu emmagatzema l'energia per després alliberar-la durant el cicle de caminada, donant una sensació més natural de caminar a l'individu que l'utilitza. Aquest tipus de pròtesis és l'escollit per fer aquest treball gràcies a les seves característiques i pensant en la facilitat a l'hora de la impressió en 3D.



Figura 4.4: Pròtesi de peu de resposta dinàmica

4.6. PEU AMB MICROPROCESSADOR

Els peus amb microprocessador tenen sensors que prenen informació tant de l'extremitat de l'individu com de l'entorn. Aquesta informació és processada per tal de prendre decisions de com hauria d'actuar el turmell o el peu depenent de la situació.

Aquesta capacitat per prendre decisions és el principal avantatge d'aquest tipus de pròtesis sobre les altres, ja que en superfícies desiguals, les altres pròtesis poden tenir problemes d'equilibri o de mobilitat, en canvi les pròtesis amb microprocessador, s'adapten a cada tipus de superfície imitant el funcionament del peu humà.

Per altra banda, aquestes pròtesis tenen certs inconvenients, com la necessitat d'utilitzar una bateria per a alimentar els components electrònics que la componen, tampoc es poden utilitzar sota l'aigua a no ser que els components més susceptibles a espatllar-se amb l'aigua estiguin aïllats, i a causa dels components electrònics que conté, tant el preu com el pes són més grans que en les altres pròtesis.

Un cas especial d'aquestes pròtesis, és el cas d'en Hugh Herr, que amb un equip d'investigació va aconseguir unes pròtesis de cama com el que es pot veure en la Figura 4.5, que funcionen de forma molt similar a una cama humana, permetent a l'usuari caminar, córrer i fins i tot ballar, i els pocs usuaris que les han pogut provar, afirmen que en utilitzar aquestes pròtesis, tenen la sensació d'estar utilitzant les seves pròpies cames. La clau de l'èxit d'aquest equip d'investigació és que en comptes de posar el seu objectiu en fer una pròtesi que igualés les capacitats del peu humà com la resta de les altres pròtesis, ells varen fixar els seus objectius en crear una pròtesi millor que el peu humà, trencant límits al pensament creatiu i obrint un nou futur per les pròtesis.



Figura 4.5: Pròtesi de peu amb microprocessador

5. NORMATIVA

5.1. ISO 10328

Tot i que aquest projecte es caracteritza perquè l'entrega del producte final ni es produeixi a través d'una venda ni incorpora cap benefici comercial, la normativa que ha de complir tant en l'àmbit de resistència mecànica com de legislació de productes sanitaris ha de ser la mateixa que una pròtesi destinada a la seva venda.

Una de les normatives ISO que ha de complir la pròtesi és l'ISO 10328, que és un assaig estructural de pròtesis de membres inferiors, amb els requisits i els mètodes d'assaig els quals s'han de seguir per portar-lo a terme.

Per la realització d'aquest treball no s'ha pogut disposar d'aquesta normativa, però s'ha trobat un estudi derivat d'aquesta normativa[2], adaptant-la a nens de 12 anys, la qual adequa a les necessitats del treball, ja que està dins del rang d'edats que contempla.

Aquest estudi consisteix a realitzar uns assajos de resistència mecànica, posant la pròtesi en les situacions més extremes, com serien que l'usuari es recolzés només amb el taló o amb la punta de la pròtesi tal com es pot observar de la Figura 5.1.

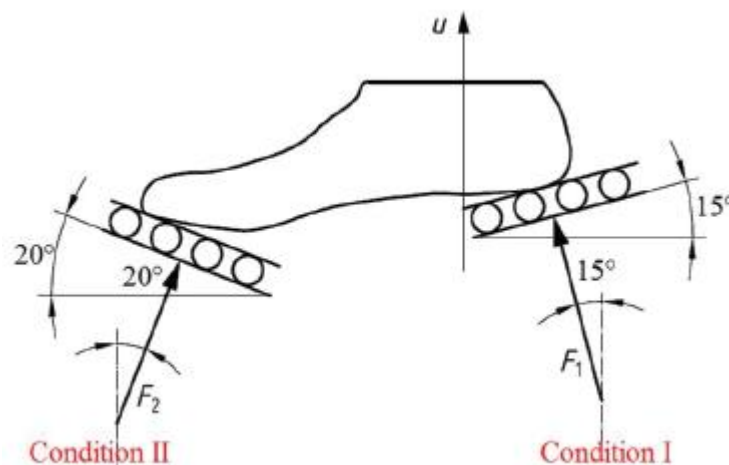


Figura 5.1: Assajos de resistència mecànica de la ISO 10328:2016

L'ISO marca les forces que s'han d'utilitzar en l'assaig depenent del pes de la persona que l'utilitzarà, però només contempla a persones adultes, però en aquest estudi extrapolen les dades dels adults a nens de dotze anys per tal de poder fer els assajos amb pròtesis per infants, i, com es pot observar a la Taula 5.1, s'arriba al resultat que les forces amb les quals

s'ha d'assajar la pròtesi en cada una de les configuracions és de 2580 N, que seria la representació d'un esdeveniment on es posés la pròtesi al límit com ara caure amb la pròtesi o saltar.

Test	Load			
	P3 ISO 10328		12-years old	
	I	II	I	II
Separate static proof	1610 N	1610 N	1290 N	1290 N
Separate static ultimate strength	2415 N	2415 N	1935 N	1935 N
	3220 N	3220 N	2580 N	2580 N
Separate cyclic (min)	50 N			
(max)	970 N	970 N	777 N	777 N
(number of cycles)	2000000			
Separate static in torsion	50 Nm			

Taula 5.1: Taula de càrregues segons el tipus de test

5.2. MARCATGE CE

Una pròtesi està afectada per la legislació que regula els “productes sanitaris”. Segons aquesta legislació, per comercialitzar-los legalment a la Unió Europea, han d'estar proveïts del marcatge CE, distintiu que declara la conformitat del producte amb els requisits de seguretat, eficàcia i qualitat, establerts per la legislació, i encara que aquesta pròtesi no estigui destinada a la comercialització, sí que ha de complir aquesta legislació per garantir la seva qualitat.

Segons [3] (annex I), per obtenir aquest marcatge el producte ha de complir uns requisits, com per exemple:

- Els productes s'han de dissenyar i fabricar de tal manera que la seva utilització no comprometi la seguretat i la salut dels usuaris, i reduir en tant que sigui possible, del risc derivat d'errors d'utilització deguts a les característiques ergonòmiques del producte i a l'entorn en què és previst utilitzar el producte (disseny que tingui en compte la seguretat del pacient), i tenir en compte els coneixements tècnics, l'experiència, la formació, la instrucció i, si s'escau, les condicions mèdiques i físiques dels usuaris previstos (disseny per a usuaris no professionals, professionals, amb discapacitat o altres).
- Els productes s'han de dissenyar i fabricar posant especial atenció a l'elecció dels materials utilitzats, especialment pel que fa a la toxicitat i, si s'escau, la inflamabilitat, la compatibilitat recíproca entre els materials utilitzats i els teixits biològics, cèl·lules i líquids corporals, tenint en compte la finalitat prevista del producte.

6. DISSENY

6.1. MESURES ANTROPOMÈTRIQUES

La pròtesi dissenyada en aquest treball, és una pròtesi de cama per sota del genoll, i està dividida en tres parts, la subjecció a la cama, el peu i l'eix que uneix la subjecció amb el peu.

Per tal de començar a dissenyar les parts, primer es requereix tenir les mides de cada part en funció de l'edat, i hi ha un estudi fet a Sud-amèrica[6], en el qual es prenen les mesures antropomètriques de nenes i nens en funció de la seva edat, i s'arriba als següents resultats els quals s'utilitzaran per a la pròtesi:

6.1.1. ALTURA AL GENOLL

En ser una pròtesi per sota el genoll, per poder definir-ne l'altura total, es necessita saber l'altura des de la planta del peu fins al genoll, i tal com es pot observar a la Figura 6.1, el rang és massa ampli per poder-ho fer tot amb una pròtesi, per tant es requerirà dissenyar més d'una pròtesi, amb diferents longituds de l'eix, per tal que les altures del conjunt de la pròtesi estiguin entre el rang de 250 i 500mm d'alçada.

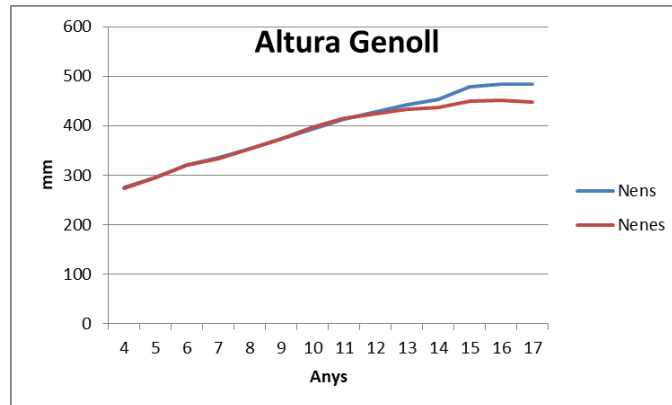


Figura 6.1: Gràfic de l'altura del genoll en funció de l'edat

6.1.2. PERÍMETRE DEL PANXELL

La fixació a la cama, es farà amb un sistema que, envoltant el panxell, es subjecti a la cama per tal que amb el moviment es mantingui adherida. Per tant, per tal de poder dissenyar la fixació, necessitem saber el perímetre del panxell, i, de la Figura 6.2, fixem que el rang de valors del perímetre interior de la pròtesi per on se subjectarà al panxell, ha d'estar comprès entre 200 i 350mm.

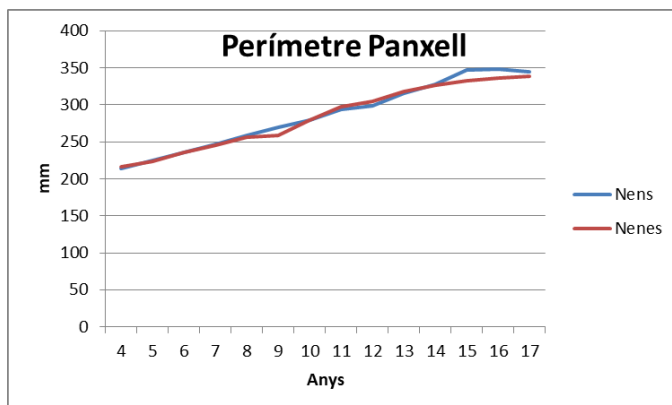


Figura 6.2: Gràfic del perímetre del panxell en funció de l'edat

6.1.3. LONGITUD I AMPLADA DEL PEU

Les mesures del peu que s'utilitzaran a l'hora de dissenyar la pròtesi seran la longitud i l'amplada.

En la Figura 6.3 es pot veure que la longitud de les pròtesis ha de comprendre els valors dins del rang entre 150 i 260mm, i l'amplada entre 65 i 100mm, per tal de poder abastir a tots els infants.

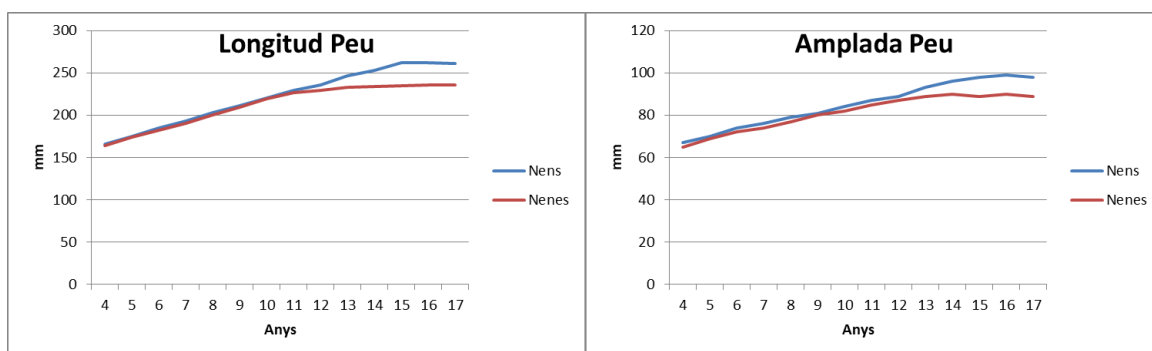


Figura 6.3: Gràfics de la longitud i amplada del peu en funció de l'edat

6.2. ROSQUES

Ja que la finalitat d'aquest treball és que les persones que tenen pocs recursos tinguin accés a pròtesis, aquestes han de ser duradores, i en el cas dels nens, que estan en constant creixement, s'ha de procurar que l'alçada de la pròtesi sigui regulable, -dintre del que sigui possible-, per tal de garantir que podran seguir utilitzant la pròtesi encara que creixin sense la necessitat d'haver-ne d'imprimir un altre. Per tal d'aconseguir-ho, es farà la unió del peu amb l'eix amb una rosca, per tal que cargolant-la o descargolant-la, es pugui regular l'alçada.

Tant el programa que s'ha utilitzat per dissenyar la pròtesi, com la majoria de programes de disseny, en utilitzar l'operació de rosca, la marca en el disseny, però en fer el 3D no apareix, i per tal de crear-la, s'ha de fer un 2D del perfil de la rosca, i utilitzar l'operació de bobina al voltant d'un eix.

A l'hora de la impressió, s'ha de tenir en compte que la impressora té unes toleràncies, i quan es tracta de mides petites, si no se'n deixa prou, pot passar que elements com ara les roques no es puguin rosca o desenroscar, i davant la falta d'informació a internet, es va fer un experiment de quina havia de ser la tolerància que s'havia de deixar a l'hora d'imprimir roques amb impressores 3D.

L'experiment, tal com es pot veure a la Figura 6.4, consistia imprimir una rosca de mètrica M20, i imprimir quatre femelles, també de M20, però el diàmetre de les quals seria més gran que el de la rosca, concretament 0,4, 0,6, 0,8 i 1mm més de diàmetre.

Un cop impreses totes les parts, es va procedir a intentar enroscar la rosca en cada una de les femelles, i es va veure, que en les de 0,4 i 0,6mm no entrava, en la de 0,8mm s'enroscava bé, i en la de 1mm s'enroscava però tenia massa joc, per tant, es pot concloure que per tal de dissenyar una rosca i la seva corresponent femella, els seus diàmetres han de tenir 0,8mm de diferència.

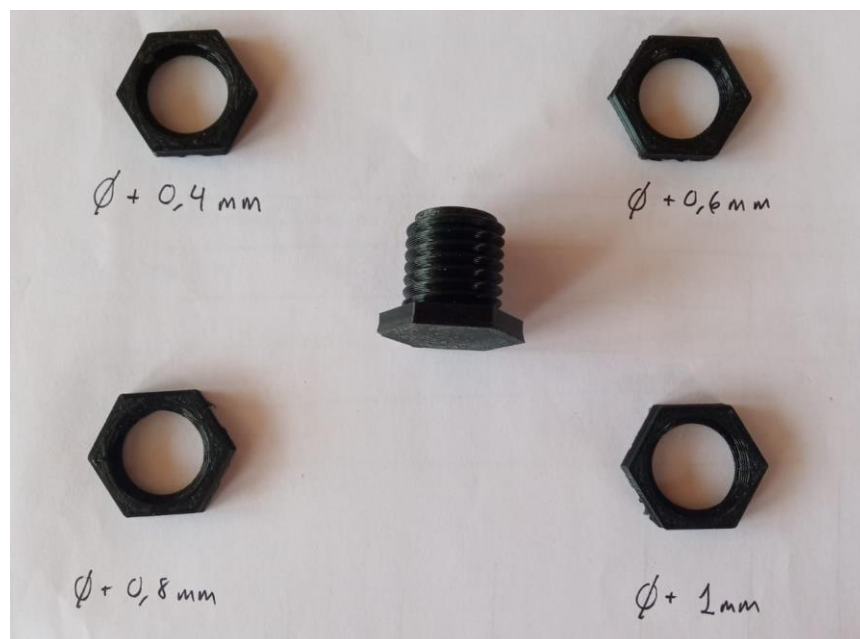


Figura 6.4: Rosca i femelles amb diferents toleràncies

6.3. BLOQUEJADOR ROTACIO

Com s'ha exposat en l'apartat anterior, la unió entre el peu i l'eix serà una rosca. Això comporta una dificultat que és que la rosca té el grau de llibertat de rotació respecte a l'eix que la defineix, i això a l'hora de caminar podria portar problemes, ja que la pròtesi es podria girar innecessàriament i fer caure a l'usuari.

Per tal de garantir la seguretat, incorpora un mecanisme similar al d'una xaveta, però amb algunes modificacions que ens permet la impressora 3D.

Com es pot veure en la Figura 6.5, tant la part del peu com l'eix tenen la "xaveta", i s'ha dissenyat una nova peça, que té el seu negatiu, per tal que, un cop sigui escollida l'altura ideal amb la rosca, en col·locar aquesta peça sobre l'eix i el peu, quedin bloquejats i no es puguin moure de la posició en la qual estan.

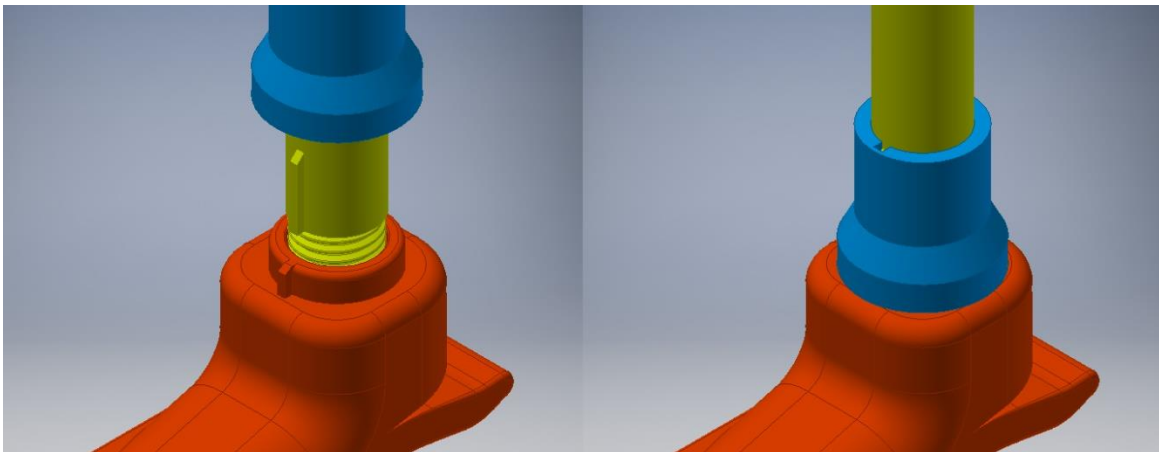


Figura 6.5: Diferents posicions del bloquejador de rotació

Aquesta peça, també protegeix la rosca de la pols que podria impedir el seu normal funcionament i durabilitat, i un cop impresa s'obté la peça de la Figura 6.6. (Plànols en l'Annex 1)



Figura 6.6: Bloquejador de rotació imprès

6.4. PEU

Per tal d'escollir el tipus de pròtesi, es varen tenir en compte diversos factors, com ara la facilitat d'impressió, el pes, el preu de la impressió, o la utilització del mínim nombre d'elements que no es puguin imprimir. Tenint en compte aquests factors, es va descartar peus amb microprocessador, ja que tant el pes com el preu seria massa elevat, i s'hauria d'utilitzar un microprocessador que no es pot imprimir amb una impressora 3D. També es varen descartar els peus amb articulacions, ja que es requeririen elements externs com ara motlles. Finalment es va decidir fer una pròtesi de resposta dinàmica, ja que és fàcil d'imprimir, i la part del peu es pot fer tota d'una peça, al no tenir elements externs pesa poc i és econòmica.

Dins de la categoria de pròtesis de resposta dinàmica, hi ha diferents tipus de dissenys depenent de les activitats que es vulguin dur a terme.

En un primer moment es va dissenyar una pròtesi com la de la Figura 6.7, el qual és un disseny utilitzat per córrer, ja que els nens necessiten molta activitat física, i es va pensar que aquest tipus de pròtesi tindria un grau d'aprofitament més alt per un perfil indicat.



Figura 6.7: Pròtesi de resposta dinàmica per atletes

Un cop es va tenir el peu dissenyat (Figura 6.8), es va passar a estudiar amb ANSYS, com aguantava aquesta pròtesi diverses proves de resistència mecànica, i es va veure, que pel seu disseny i al ser impresa en 3D, -que encara que s'imprimeixi amb una densitat del 100% continua tenint espais buits en el seu interior-, no aguantava bé els esforços mecànics i es trencava, com es pot veure en la Figura 6.9, ja que les tensions que apareixen són molt més grans que les del límit elàstic del PLA i que per fer viable aquest disseny, es necessitava augmentar molt el gruix de la pròtesi el que la faria molt més rígida, per la qual cosa es va decidir descartar aquest disseny i provar-ne un altre.

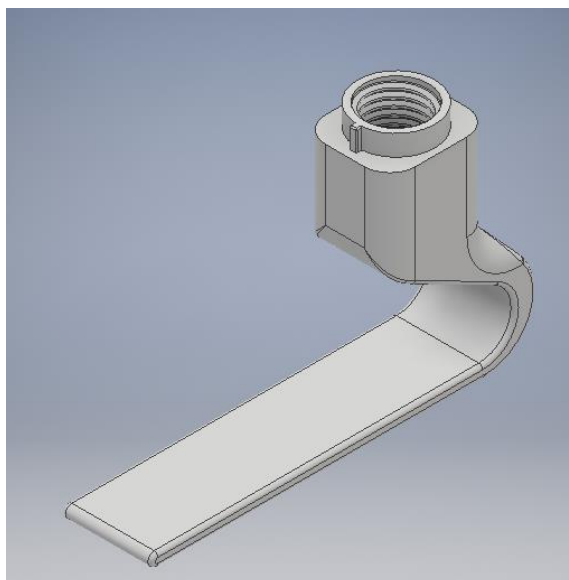


Figura 6.8: Primer disseny del peu de la pròtesi

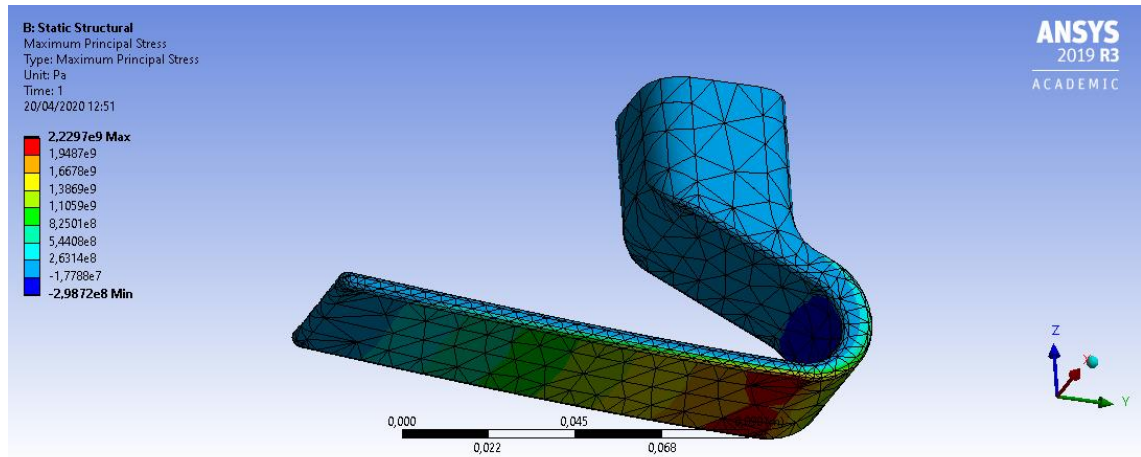


Figura 6.9: Tensió principal màxima I del primer disseny

El següent disseny que es va provar, va ser un disseny que permet un moviment molt similar al d'un peu, i per tant, que hauria d'afavorir la comoditat de l'usuari que l'utilitza.

El primer pas per a obtenir el disseny definitiu, va ser fer un disseny bàsic de la pròtesi, per definir-ne l'estructura, i, seguidament, es va passar a arrodonir les cantonades tal com es pot veure en la Figura 6.10, tant per eliminar el material sobrant, i el que és el més important, afegint seguretat eliminant les cantonades vives i evitar possibles lesions com ara talls.

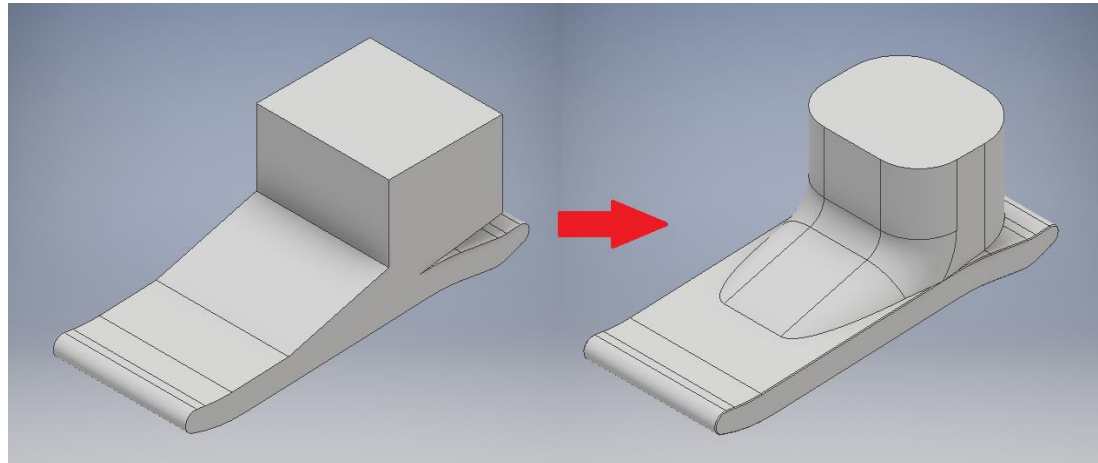


Figura 6.10: Arrodoniment de les cantonades de la pròtesi

Un cop analitzada la pròtesi amb ANSYS, com es pot veure en la Figura 6.11, es va veure que es necessitava augmentar el gruix a la part de la planta, ja que en fer les simulacions de resistència mecànica, la pròtesi estava sotmesa a tensions més altes que les tensions de ruptura del PLA, per tant es va fer augmentar el gruix tal com es pot veure en la Figura 6.12, les tensions a la base del peu es van reduir considerablement amb aquesta modificació.

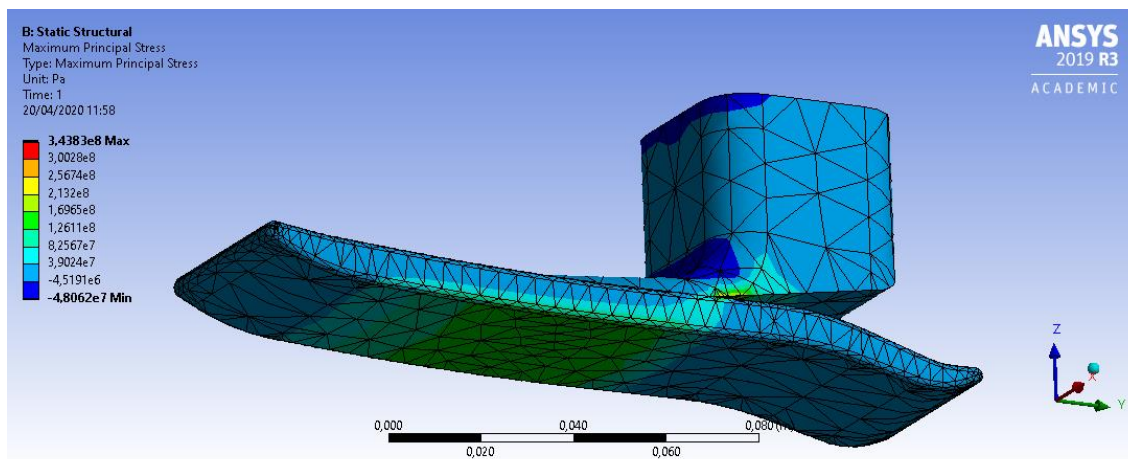


Figura 6.11: Tensió màxima principal I, base prima

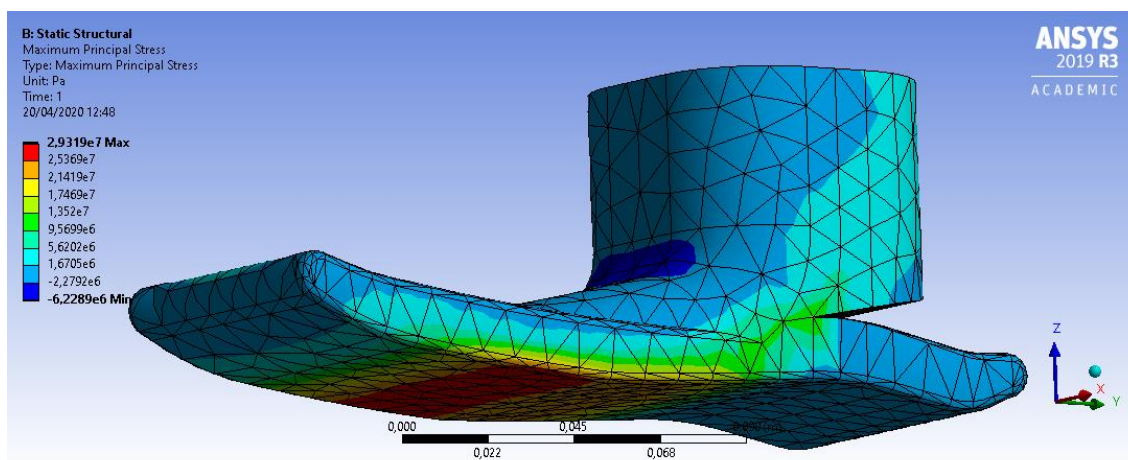


Figura 6.12: Tensió màxima principal I, base gruixuda

Seguidament, es va arrodonir l'entalla del taló per tal d'evitar que s'hi acumulessin tensions, ja que com es pot veure en la Figura 6.12, hi ha una acumulació de tensions que podria provocar una fallada de la pròtesi en aquest punt. També, tal com es pot veure en la Figura 6.13, es va allargar l'àrea de contacte amb el terra de la planta de la pròtesi, ja que després de fer una prova d'impressió (Figura 6.14), es va veure que la qualitat de la impressió era molt baixa, ja que l'amplada del peu és considerablement gran, i que, per causa que l'angle respecte la base és menor de 45°, sense la utilització de suports no era viable la impressió de la pròtesi, i augmentant l'àrea de contacte amb el terra, disminuïa considerablement la

quantitat de suports a utilitzar durant la impressió i en millorava la qualitat.

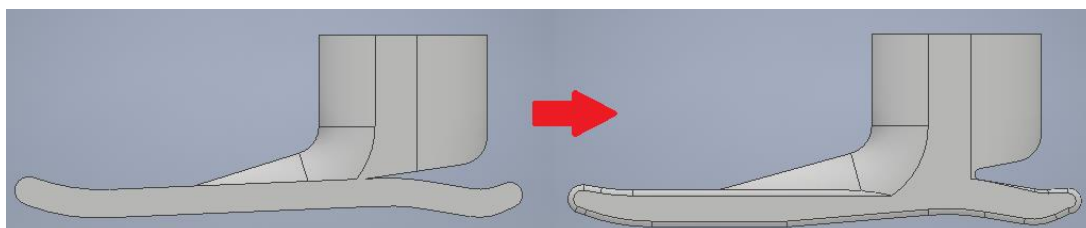


Figura 6.13: Millores al disseny de la pròtesi



Figura 6.14: Prova d'impressió errònia

Un cop es va tenir el disseny acabat i simulat amb ASYS per tal de comprovar que complia els requisits tècnics de la normativa (apartat 7), es va procedir a fer-ne el forat roscat, així com l'acoblament pel bloquejador de la rotació, resultant amb el disseny de la Figura 6.15.

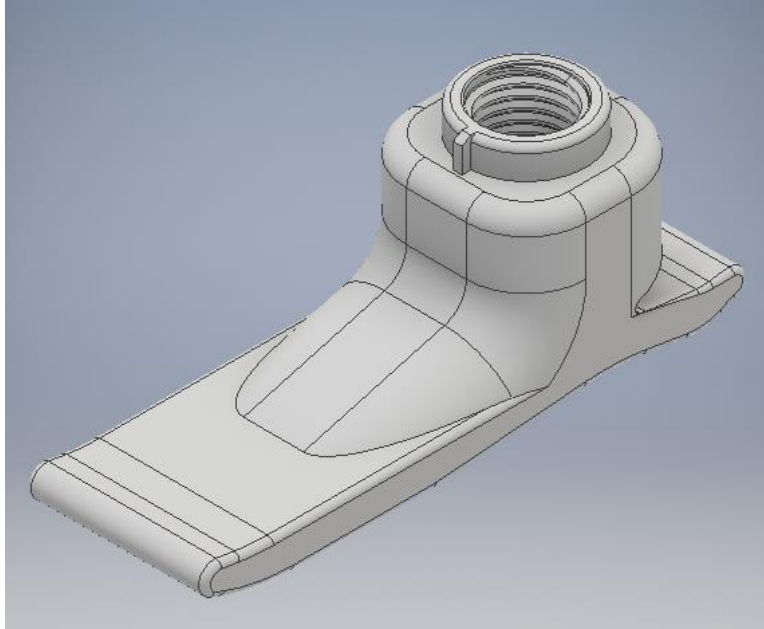


Figura 6.15: Disseny definitiu del peu de la pròtesi

Després de fer-ne la impressió s'obté la peça de la Figura 6.16. (Plànols en l'Annex 1)



Figura 6.16: Peu de la pròtesi imprès

6.5. FIXACIÓ

Per fixar la pròtesi a la cama, es requereix una fixació que mantingui la pròtesi unida a la cama durant la seva utilització.

En un primer moment, es va optar per un disseny, el qual tenia una forma similar al panxell de la cama, tal com es pot veure a la Figura 6.17, per tal d'adaptar-se el millor possible, i, utilitzava un sistema que, lligant-hi un cinturó o una corda, permetia estrènyer la part de dalt i, així, fixar la pròtesi a la cama.

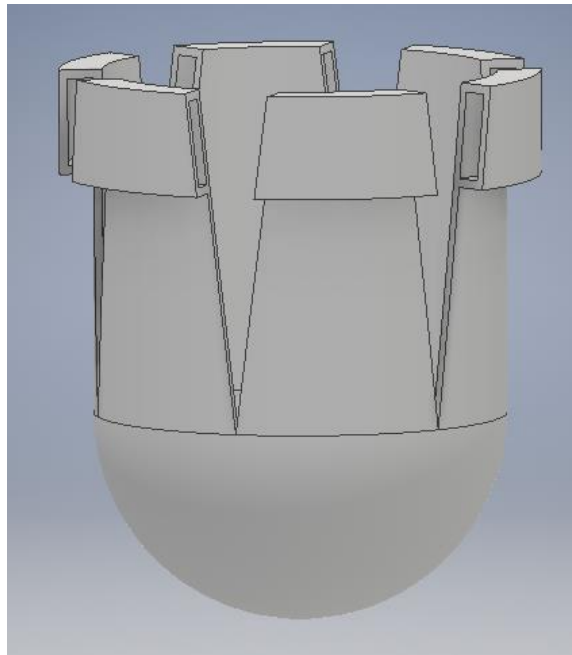


Figura 6.17: Primer disseny de la fixació de la pròtesi

Un cop es va tenir el disseny fet, es va veure que el fet d'haver d'utilitzar un cinturó era molt limitant, ja que en els països en vies de desenvolupament pot ser difícil trobar-ne, però que hi ha materials com ara cordons, per exemple de sabates, que poden ser més accessibles, per tant, el següent disseny es va dissenyar tenint en compte que s'utilitzarien cordons.

Aquest nou disseny va prendre la base de l'anterior, però en aquest cas, tal com es pot veure en la Figura 6.18, en comptes de fer-li diversos "talls", se'n fa només un que serà el que s'estrenyerà amb els cordons per tal d'ajustar-la a la cama, i també es fan quatre forats a cada banda per poder-hi passar el cordó.

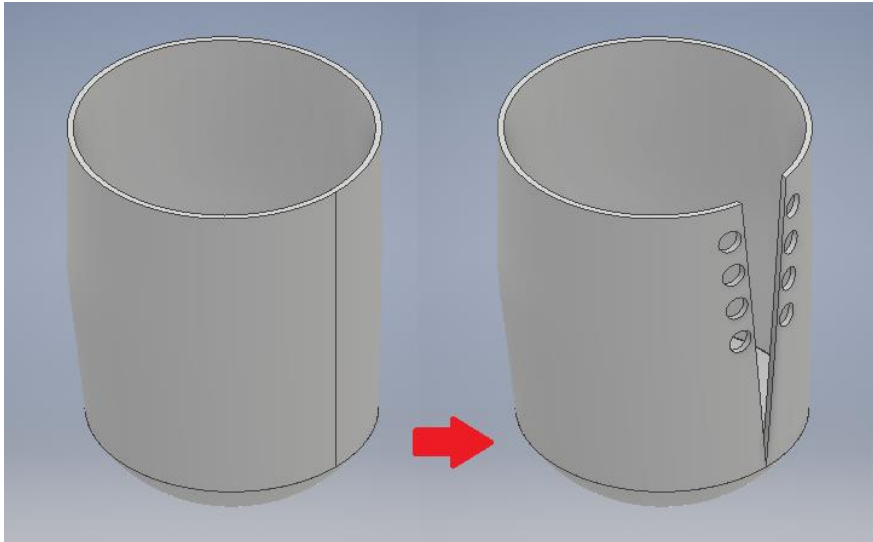


Figura 6.18: Tall i forats a la fixació de la pròtesi

Seguidament es va passar a reforçar la part dels forats pel cordó per tal d'augmentar la seva resistència, ja que la part dels cordons serà la que patirà més desgast, i finalment, tal com es pot veure a la Figura 6.19, es va fer l'acoblament amb l'eix i els forats per passar-hi el cargol.

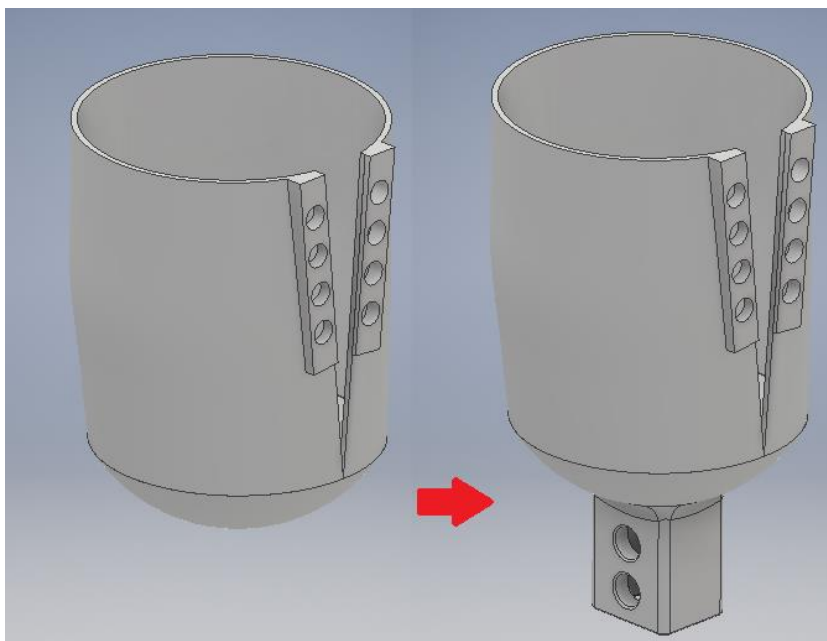


Figura 6.19: Implementació de l'acoblament a l'eix

Aquest disseny, a l'utilitzar cordons, té un sistema similar al de les sabates, que en cordar-los, s'estreny la pròtesi i queda fixada, i per unir-la amb l'eix de la pròtesi, s'utilitza un sistema de subjecció amb cargols, concretament amb dos cargols per tal de poder ajustar l'altura en les dues posicions, i un cop triada la posició més òptima, acabar d'ajustar la

posició de manera més precisa amb la rosca de l'eix.

Un cop es va tenir el disseny acabat, es va fer una simulació amb ANSYS, per analitzar les tensions que es produïen en tancar la pròtesi, i com es pot veure en la Figura 6.20, es produïen unes tensions superiors a les del límit elàstic, pel que es va modificar el disseny en aquesta part on es concentraven les tensions (Figura 6.21) per tal de disminuir-les, i en l'apartat 7.2.4, es comprovarà aquesta disminució de les tensions.

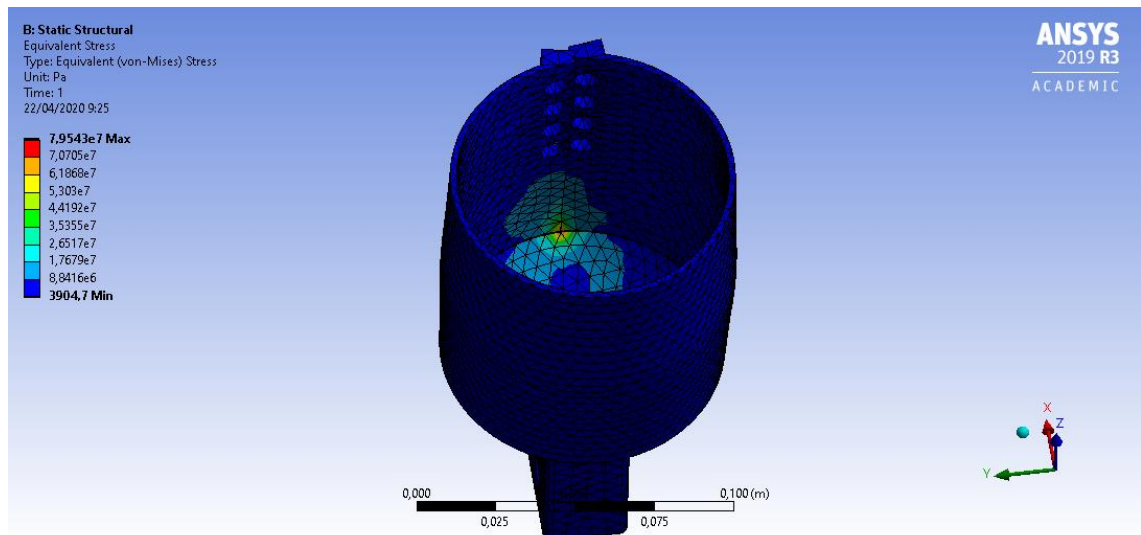


Figura 6.20: Anàlisi de les tensions de la fixació

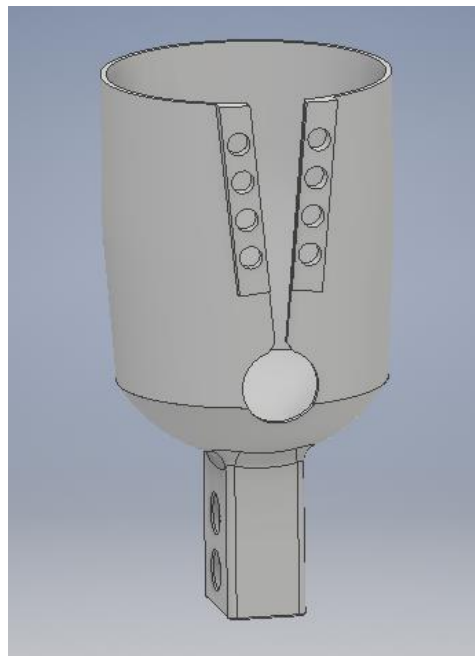


Figura 6.21: Disseny millorat de la fixació

Per veure si la pròtesi quedava ben fixada a la cama es va fer una prova amb una ampolla d'un diàmetre similar al de la cama, i un neoprè per tal de simular la textura de la pell, ja que té un coeficient de fricció similar, i tal com es pot veure en la Figura 6.22, la pròtesi queda perfectament fixada per si sola. Tot i aguantar-se sola, si es pot tenir accés a materials com el neoprè o la goma, és recomanable la seva utilització per a una millor fixació.



Figura 6.22: Fixació fixada a una ampolla recoberta de neoprè

6.6. EIX

L'eix és el nexa d'unió entre la fixació a la cama i el peu, i és el que definirà en major mesura l'alçada de la pròtesi, i com es pot veure a la Figura 6.23, està compost per tres parts, la unió amb la fixació, l'eix i la unió amb el peu (rosca).



Figura 6.23: Disseny de l'eix de la pròtesi

6.6.1. UNIÓ AMB LA FIXACIÓ

Com s'ha comentat a l'apartat 6.5, la unió entre la fixació i l'eix es realitza mitjançant un sistema amb un cargol passant i dos forats per poder triar quina alçada convé més per les mides de la cama. Per tal de triar quins cargols s'han d'utilitzar i el diàmetre dels forats, s'ha realitzat un estudi dels cargols sotmesos a cisallament.

Per calcular la tensió d'aixafament fictícia, s'utilitzarà l'Eq.1, on:

- σ' : Tensió d'aixafament fictícia
- N: Força a la qual esta sotmesa
- A' : Secció d'aixafament fictícia

$$\sigma' = \frac{N}{A'} \quad (\text{Eq.1})$$

De l'Ec.1 podem veure que les tensions d'aixafament fictici més grans es donaran on hi hagi una secció d'aixafament fictícia menor. Com es pot veure en la Figura 6.24, hi ha dues àrees fictícies, la A_1 , que pertany a l'eix, i la A_2 , que pertany a la fixació, i per calcular aquestes àrees utilitzarem l'Eq.2, on:

- n: Nombre de superfícies
- d: Diàmetre
- e: Espessor

$$A' = nde \quad (\text{Eq.2})$$

Amb l'Eq.2, i tenint en compte que per A_1 : $n=1$ i $e=10\text{mm}$, i que per A_2 : $n=2$ i $e=5\text{mm}$, trobem que $A_1=A_2=0,01d=A'$. Tenint en compte que la σ' ha de ser menor que la tensió admissible a compressió, que si prenem un coeficient de seguretat d'1,5, és de 33MPa, i que $N=2580\text{N}$, obtenim que el diàmetre mínim del forat ha de ser de 7,82mm.

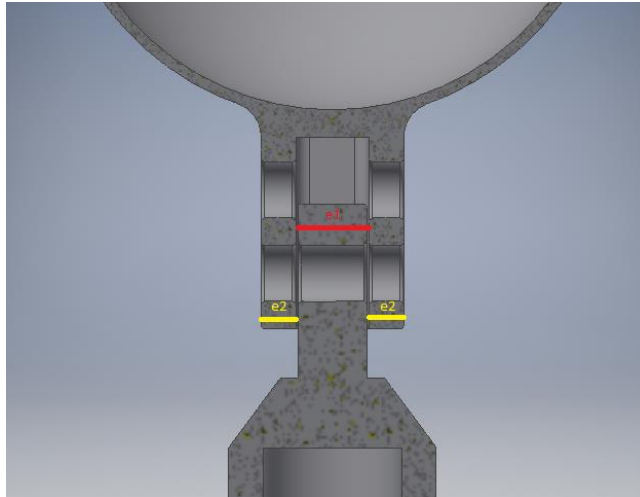


Figura 6.24: Unió entre fixació i eix

Per calcular el diàmetre mínim que han de tenir els cargols, es farà un càlcul de les tensions a cisalladura a la que estan sotmesos mitjançant l'Eq.3 de [7], on:

- τ : Tensions tangencials
- A: Secció sotmesa a cisalladura
- d: Diàmetre del cargol
- σ_{adm} : Tensió admissible del cargol
- N: Força normal

$$\tau = \frac{N}{2A} = \frac{N}{4\pi \frac{d^2}{4}} = 0,65\sigma_{adm} \quad (\text{Eq.3})$$

Per ser conservadors, s'utilitzarà la tensió del límit elàstic de cargols de qualitat baixa (4.6), que és de 240MPa, per calcular la tensió admissible amb un coeficient de seguretat de 1,5. I aplicant una força de 2580N, obtenim que el diàmetre mínim que ha de tenir el cargol és de 2,81mm.

Prenent les dades del càlcul a cisalladura i el d'aixafament, s'ha d'escollir el valor del diàmetre mínim més gran, en aquest cas de 7,82mm.

6.6.2. EIX

Per la facilitat d'impressió i les seves propietats mecàniques, es va escollir un eix cilíndric, concretament amb un diàmetre exterior de 30mm per encaixar de la millor manera amb les dimensions de la pròtesi.

Per trobar el diàmetre interior mínim que ha de tenir l'eix per tal de poder suportar els esforços de compressió als que estarà sotmès s'utilitza l'Eq.4, on:

- σ_{nc} : Tensió equivalent a compressió
- N: Força aplicada
- A: Secció transversal

$$\sigma_{nc} = \frac{N}{A} \quad (\text{Eq.4})$$

En el cas de l'eix, σ_{nc} ha de ser més petita que la tensió admissible a compressió del PLA, prenent un coeficient de seguretat d'1,5 (33MPa), N són 2580N, la força màxima que dicta la normativa que ha de suportar la pròtesi, i obtenim una superfície de 78,18mm². Per tant, si el diàmetre exterior és de 30mm utilitzant la fórmula $A = \pi \frac{D_{ext}^2}{4} - \pi \frac{D_{int}^2}{4}$, s'obté que el diàmetre interior màxim haurà de ser de 28,29mm.

Ja que l'eix estarà sotmès a un esforç normal, es comprovarà si hi ha vinclament. Per fer-ho, es farà un càlcul amb moment flector i normal mitjançant l'Eq.5 (Fórmula d'Euler [4]), on:

- P_{crit} : Força normal, a partir de la qual apareixerà vinclament
- E: Modul de Young
- I: Inèrcia
- L: Longitud de vinclament

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{Eq.5})$$

En el cas de l'eix, la inèrcia d'una secció circular tubular és $I = \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4)$, el mòdul de Young el del PLA, i com que l'eix està encastat pels dos extrems, la longitud de vinclament és igual a la meitat de la longitud de l'eix. Amb aquestes dades, la P_{crit} a partir de la qual apareix el vinclament és 130441,68N. També s'ha calculat la longitud que hauria de tenir l'eix perquè aplicant la força de la normativa de l'apartat 5.1 (2580N), no vinclés, i el resultat obtingut és que si la longitud de l'eix és major de 1066,57mm, apareix vinclament.

Per validar si es tracta d'un cas dominat pel vinclament, cal determinar l'esveltesa límit utilitzant l'Eq.6, on:

- λ_{lim} : esveltesa límit
- E: Mòdul de Young
- σ_e : Límit elàstic

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_e}} \quad (\text{Eq.6})$$

Prenent els valors del mòdul de Young i el límit elàstic del PLA imprès, s'obté una esveltesa

límit de 21,28. Per validar si es dóna vinclament, s'ha de comparar l'esveltesa de la peça amb l'esveltesa límit, i es trobarà amb l'Eq.7, on:

- λ : Esveltesa de la peça
- L: Longitud de vinclament
- I: Inèrcia
- A: Secció

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (\text{Eq.7})$$

Com en el càlcul de P_{crit} , s'utilitzarà una longitud de vinclament de la meitat de la longitud de l'eix, per estar encastat pels dos extrems (75mm), la inèrcia d'una secció tubular, utilitzant l'expressió $I = \frac{\pi}{64}(D_{\text{ext}}^4 - D_{\text{int}}^4)$, amb un diàmetre exterior de 30mm i l'interior de 20mm, i l'àrea de la secció, es calcularà amb l'expressió $A = \pi(\frac{D_{\text{ext}}^2}{4} - \frac{D_{\text{int}}^2}{4})$, amb els mateixos diàmetres que pel càlcul de la inèrcia, i s'obté una esveltesa de la peça de 8,32. Aquest valor és inferior al de l'esveltesa límit, que significa que no es tracta d'un cas dominat pel vinclament.

6.6.3. UNIÓ AMB EL PEU (ROSCA)

Ja que l'eix s'ha dissenyat amb un diàmetre exterior de 30mm, s'ha de comprovar si una rosca de M30, -que per mides és la més indicada-, supera les proves de resistència mecànica imposades per la normativa sobre pròtesis.

Per fer-ho, s'ha de mirar quines tensions suporta la rosca quan està sotmesa a compressió, utilitzant l'Eq.8, extreta de [5], on:

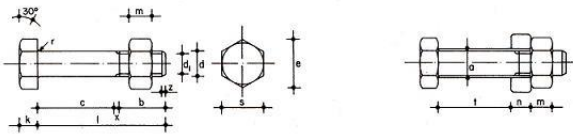
- N: força a compressió
- σ_c : tensió de ruptura a compressió
- A: àrea resistent a compressió
- γ : coeficient de seguretat

$$N = \frac{0,9\sigma_c A}{\gamma} \quad (\text{Eq.8})$$

La força a compressió, serà de 2580N, que és la força a la qual s'ha de sotmetre la pròtesi per complir la normativa, la tensió de ruptura a compressió és la del PLA imprès i el coeficient de seguretat és d'1,5.

Amb aquestes dades, s'obté que es necessita una àrea mínima de 86,87mm². Tenint en

compte que l'àrea resistent d'un cargol de M30 és de 561mm², equivalent a un diàmetre exterior de 26,72mm, obtinguda de la Taula 6.1, utilitzant la fórmula $A = \pi \frac{D_{ext}^2}{4} - \pi \frac{D_{int}^2}{4}$, el diàmetre del forat interior podrà ser com a màxim de 24,57mm.



Tornillo tipo	Vástago					Cabeza				Diámetro del agujero a mm	Area neta del núcleo An cm ²	Area resistente Ar cm ²
	Diámetro de la caña d mm	Diámetro interior d ₁ mm	Longitud roscada b mm	Longitud de la salida x mm	Longitud del chafán z mm	Espesor k mm	Medida entre caras s mm	Medida entre aristas e mm	Radio del acuerdo r mm			
T 10	10	8.160	17.5	2.5	1.7	7	17	19.6	0.5	11	0.523	0.580
T 12	12	9.853	19.5	2.5	2.0	8	19	21.9	1.0	13	0.762	0.843
T 16	16	13.546	23.0	3.0	2.5	10	24	27.7	1.0	17	1.440	1.570
T 20	20	16.933	25.0	4.0	3.0	13	30	34.6	1.0	21	2.250	2.750
(T 22)	22	18.933	28.0	4.0	3.3	14	32	36.9	1.0	23	2.820	3.030
T 24	24	20.319	29.5	4.5	4.0	15	36	41.6	1.0	25	3.240	3.530
(T 27)	27	23.319	32.5	4.5	4.0	17	41	47.3	1.0	28	4.270	4.560
T 30	30	25.706	35.0	5.0	5.0	19	46	53.1	1.0	31	5.190	5.610
(T 33)	33	28.706	38.0	5.0	5.0	21	50	57.7	1.0	34	6.470	6.940
T 36	36	31.093	40.0	6.0	6.0	23	55	63.5	1.0	37	7.590	8.170

Se recomienda no utilizar los tornillos cuyo tipo figura entre paréntesis.

Taula 6.1: Taula de dimensions dels cargols ordinaris

Amb els resultats d'aquest apartat i del 6.6.2, es pot concloure que es dissenyarà i fabricarà un eix amb un diàmetre interior de 20mm com la de la Figura 6.25.

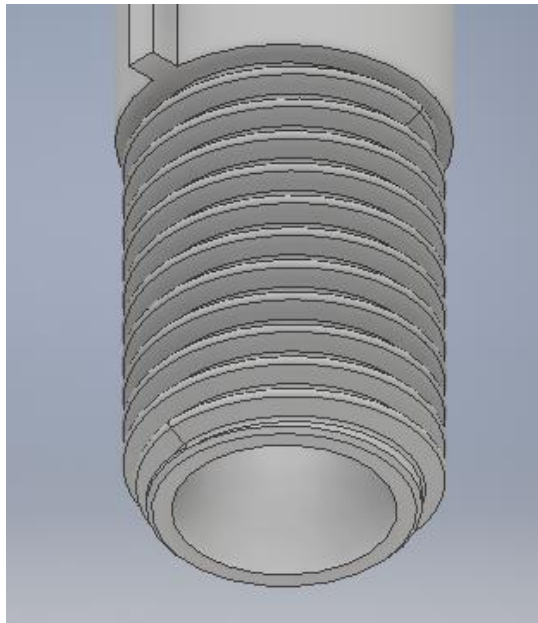


Figura 6.25: Rosca per unir l'eix amb el peu de la pròtesi

7. ESTUDI AMB ANSYS

Per tal de comprovar que la pròtesi compleix la normativa, -passant les proves de resistència mecànica que imposa-, es requereix una maquinària i unes eines de les quals no es disposa, per tant una bona alternativa és utilitzar l'ANSYS, que és un programa que utilitza el mètode dels elements finits per a fer simulacions físiques. Ja que en l'apartat 5.1 s'utilitza una pròtesi per a un nen de 12 anys per a fer les proves de resistència mecànica, en aquest apartat, la geometria que s'utilitzarà serà la pròtesi amb les mides de l'apartat 6.1 per a un nen de 12 anys.

7.1. PEU

En aquest apartat es descriuen els passos seguits per confirmar si el peu de la pròtesi compleix la normativa de l'apartat 5.1.

7.1.1. MATERIAL

Com s'ha comentat anteriorment, el PLA imprès i el PLA injectat tenen propietats diferents, i a l'ANSYS, només hi ha definit el PLA injectat, per tant, per poder fer l'anàlisi, s'ha de canviar les propietats per les descrites a l'apartat 3.2, i s'ha d'assignar aquest material a tota la geometria de la peça. S'ha definit un material lineal i isotròpic, amb un mòdul de Young de 2330MPa, tal com es pot veure a la Figura 7.1, i una tensió de ruptura a flexió de 50,772MPa.

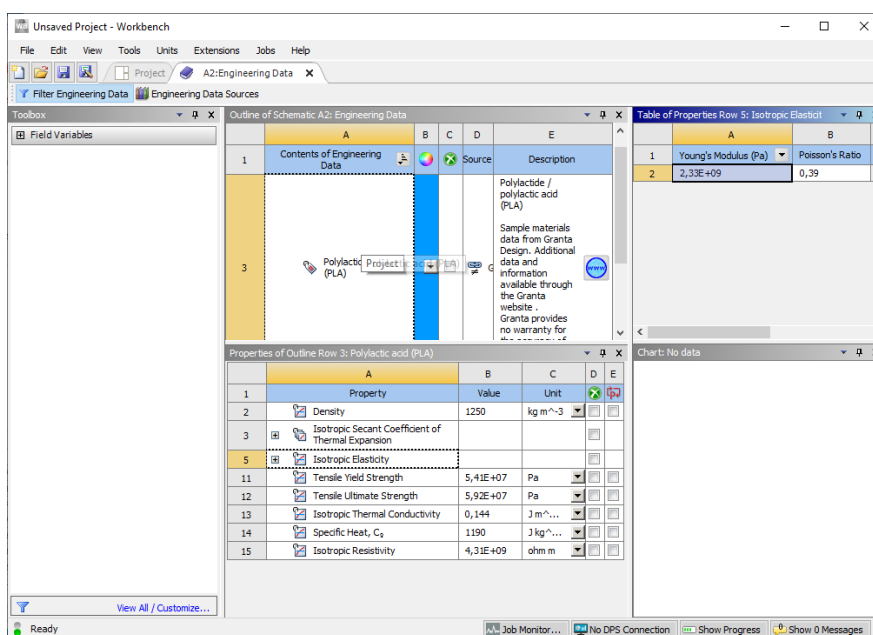


Figura 7.1: Taula de propietats del material d'ANSYS

7.1.2. MALLAT

Pel mallat de la pròtesi s'utilitzen elements triangulars, i per trobar-ne la mida òptima es va fer diverses simulacions (Annex 2) imposant les condicions de contorn de 7.1.3, per veure a partir de quina mida d'element, les solucions s'estabilitzaven. S'ha començat les simulacions amb una mida de l'element de 7mm, ja que la versió per estudiants d'ANSYS no permetia una malla més petita, i, tal com es pot veure tant en la Figura 7.2 com en la Figura 7.3, els valors s'estabilitzen amb una mida de 12mm, obtenint el mallat de la Figura 7.4.



Figura 7.2: Gràfic de la tensió principal màxima en funció de la mida de l'element del mallat

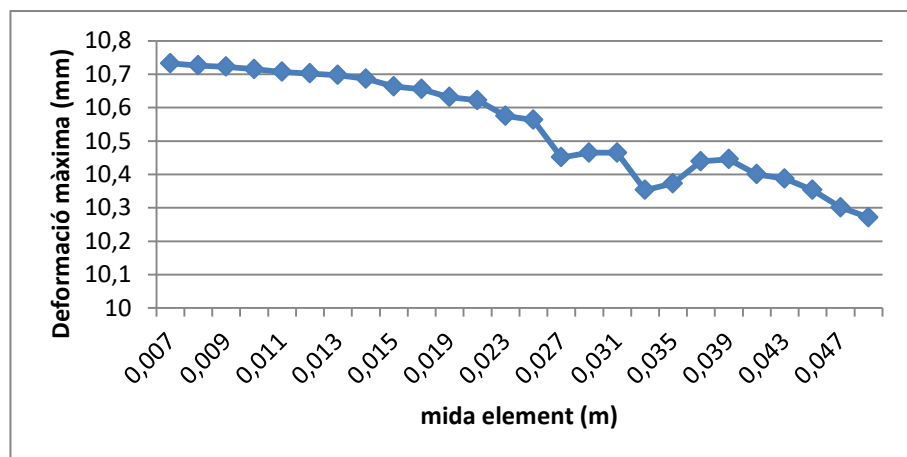


Figura 7.3: Gràfic de la deformació màxima en funció de la mida de l'element del mallat

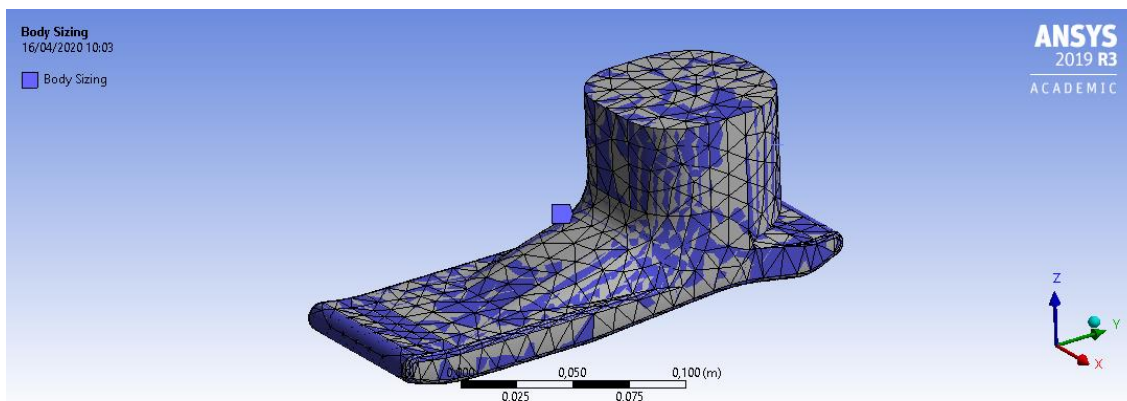


Figura 7.4: Mallat de la pròtesi

7.1.3. CONDICIONS DE CONTORN F2

En aquest apartat es simularà les condicions de contorn de la F2 de la Figura 5.1, que, com es pot veure de la Figura 7.5, sotmetent-la a un estudi estàtic-estructural, i són un suport fixat just a la part de dalt (B), el qual simula el sistema que s'utilitza a l'experiment real per subjectar a la pròtesi, i una força de 2580N (A), amb un angle de 20° respecte a l'eix Z, dins del pla ZY, el qual simula la F2 de l'experiment.

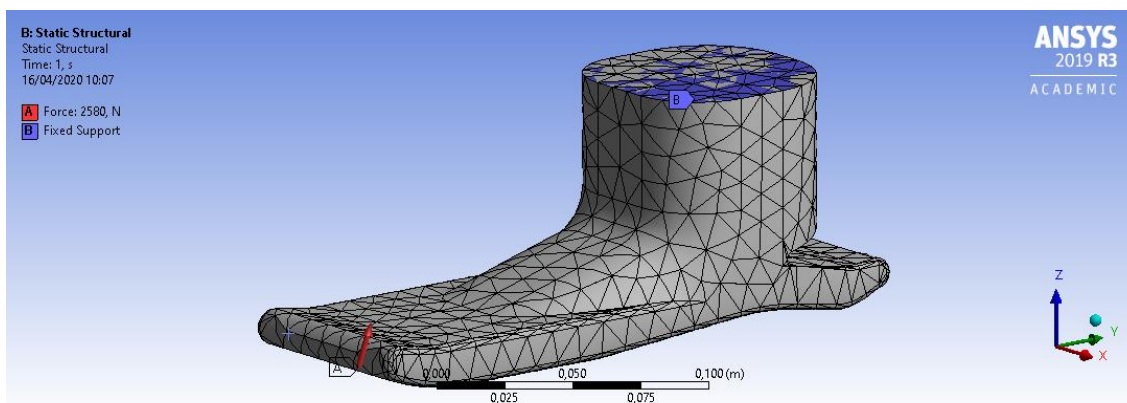


Figura 7.5: Condicions de contorn de la F2

7.1.4. SOLUCIÓ F2

Les deformacions produïdes a la pròtesi per F2, tal com es pot veure a la Figura 7.6, estan focalitzades a la punta del peu, amb un valor màxim de 10,702mm, amb direcció i sentit de la F2.

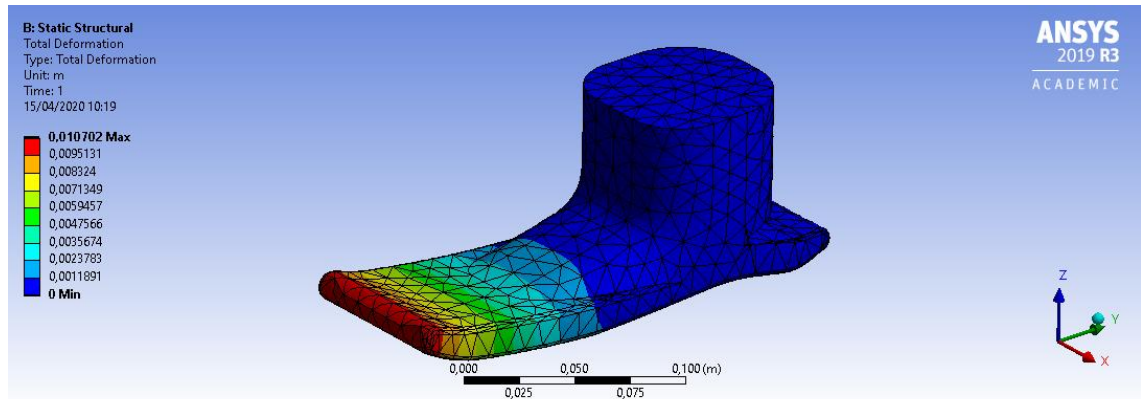


Figura 7.6: Deformació màxima provocada per F2

Per comprovar si la pròtesi aguanta les tensions provocades per la F2, ANSYS permet simular les tensions que es produeixen durant l'anàlisi, i concretament dona el valor de la tensió equivalent de *Von-Mises*, que segons [7] (pag. 40-41): “el estado límite en un punto de un cuerpo en el que existe un estado tensional cualquiera comienza cuando la energía de distorsión por unidad de volumen en un entorno de dicho punto es igual a la energía de distorsión absorbida por unidad de volumen cuando el material alcanza la tensión límite en el ensayo a tracción”.

Com es pot veure de la Figura 7.7, la tensió equivalent de *Von-Mises*, pren un valor màxim de 31,15MPa, que si els comparem amb la tensió de ruptura a flexió del PLA imprès que és de 50,77MPa, ens deixa un coeficient de seguretat a l'hora de fabricar la pròtesi de 1,62.

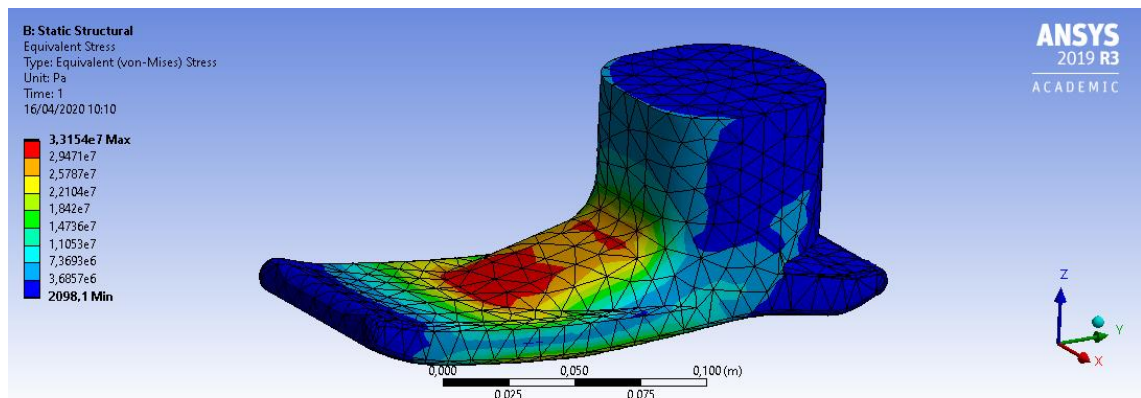


Figura 7.7: Tensió equivalent de *Von-Mises* provocada per F2

Tot i que el criteri de *Von-Mises* és fiable, per a materials fràgils, -com és el cas del PLA-, pot presentar errors de càlcul, ja que està pensat per a materials dúctils, per tant, per comprovar que els resultats obtinguts siguin correctes, es comprovaran amb el mètode de *Rankine*.

Aquest criteri diu que el material resistirà en el punt analitzat sempre i quan la tensió normal

màxima i la tensió normal mínima en aquest punt no superin, amb valor absolut, a la tensió admissible. Assumirem que el material fallarà abans a tracció que a compressió, donat que el límit elàstic a compressió és força superior que el de tracció, per tant, els valors de la simulació els compararem amb tensió admissible a tracció.

Com es pot veure en la Figura 7.8, tant la tensió màxima principal I no supera la tensió de ruptura a tracció del PLA, ja que té un valor de 29,55MPa, que comparada amb els 37,38MPa, obtenim un coeficient de seguretat d'1,26.

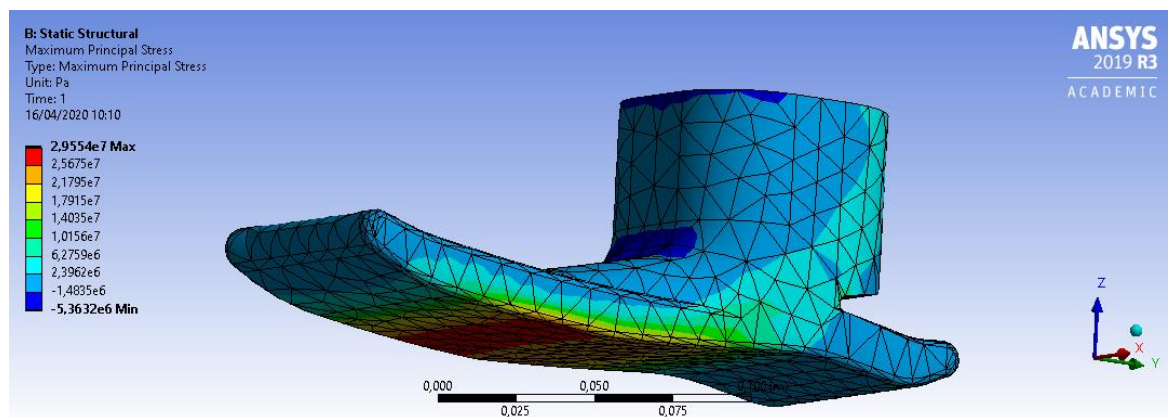


Figura 7.8: Tensió màxima principal I provocada per F2

Pel que fa a la tensió mínima principal III, com es pot veure en la Figura 7.9, pren un valor màxim, en valor absolut, de 36,63MPa. Per tal de trobar el coeficient de seguretat, comparem aquest valor amb el de la tensió de ruptura a compressió, obtenint un coeficient d'1,35.

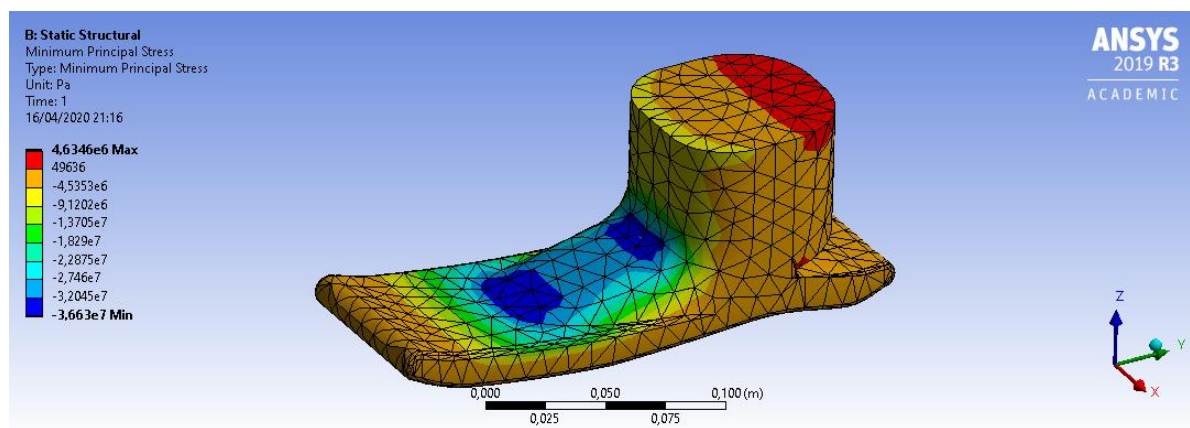


Figura 7.9: Tensió mínima principal III provocada per F2

7.1.5. CONDICIONS DE CONTORN F1

La següent simulació consisteix a fer una anàlisi de les tensions que es produeixen en aplicar F1 de la Figura 5.1 a la pròtesi sotmetent-la a un estudi estàtic-estructural, fixant la part de dalt (B) com un suport, i aplicant una força de 2580N (A), formant un angle de 15° respecte a l'eix Z i compresa en el pla ZY, aplicada al taló de la pròtesi, tal com es pot comprovar a la Figura 7.10.

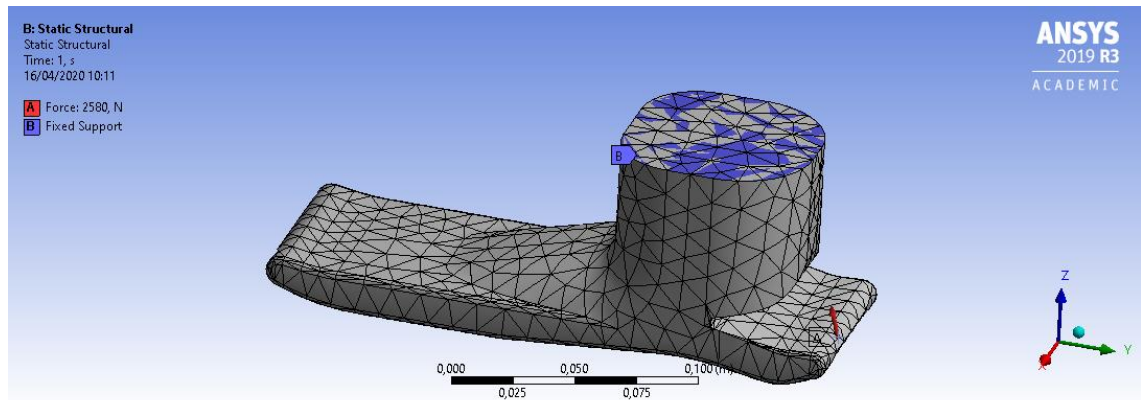


Figura 7.10: Condicions de contorn de la F1

7.1.6. SOLUCIÓ F1

Les deformacions provocades per F1, estan focalitzades principalment en el taló de la pròtesi, com es pot veure de la Figura 7.11, amb un valor màxim de 1,85mm amb direcció i sentit d'F1.

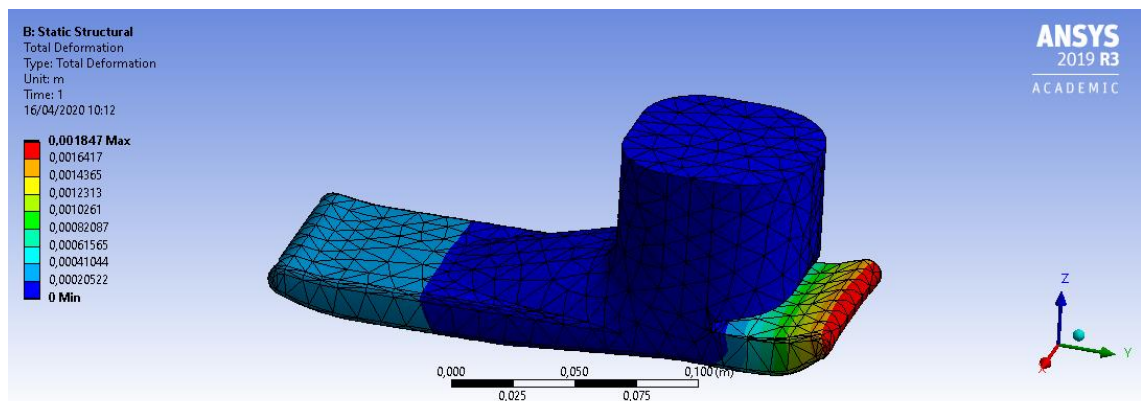


Figura 7.11: Deformació màxima provocada per F1

En aquesta simulació, el valor de la tensió equivalent de *Von-Mises* màxima que presenta la pròtesi, tal com es pot comprovar de la Figura 7.12, és de 38,39MPa, que si la comparem amb la tensió de ruptura a flexió del PLA, obtenim un coeficient de seguretat d'1,32.

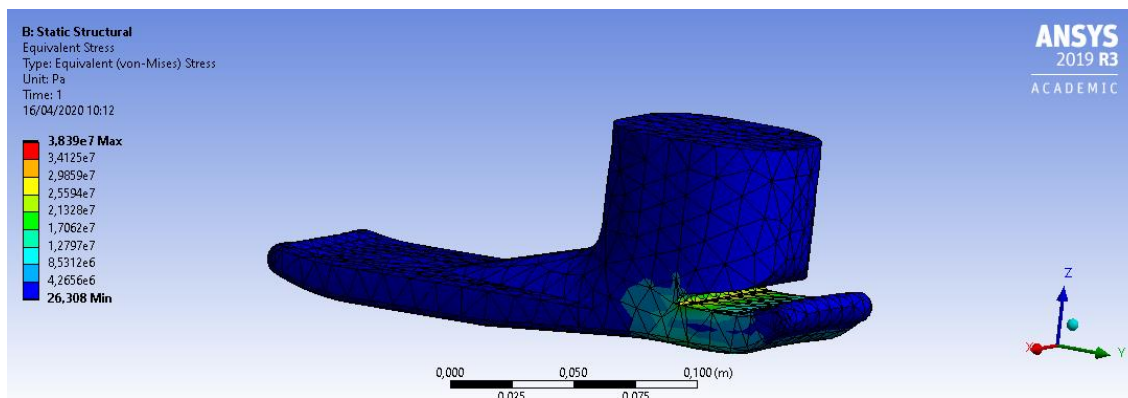


Figura 7.12: Tensió equivalent de Von-Mises provocada per F1

Com s'ha fet en l'apartat 7.1.4, es compararà els resultats obtinguts pel criteri de *Von-Mises* amb els del criteri de *Rankine*. En aquest assaig, com es pot comprovar de la Figura 7.13, la tensió màxima principal I té un valor de 23,3MPa, que si la comparem amb la tensió de ruptura del PLA a tracció, obtenim un coeficient de seguretat d'1,6.

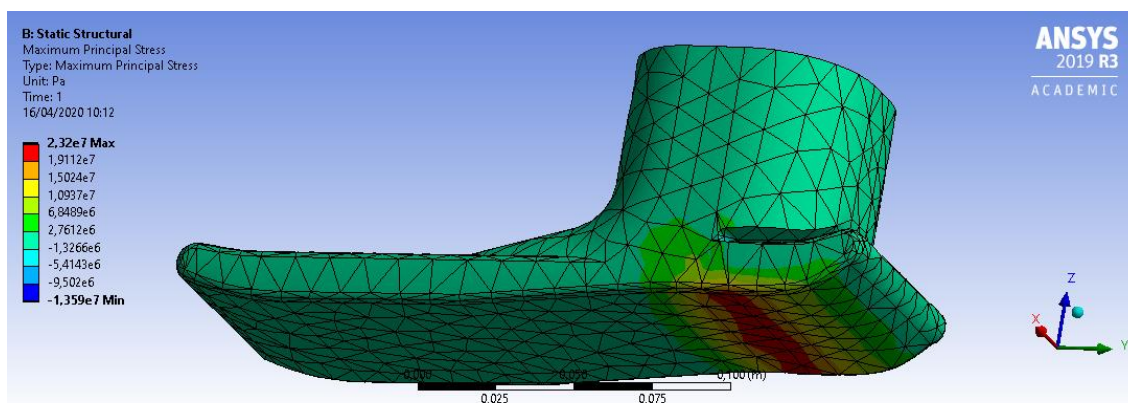


Figura 7.13: Tensió màxima principal I provocada per F1

La tensió mínima principal III obtinguda amb la simulació de l'F1, com es pot veure en la Figura 7.14, té un valor màxim, en valor absolut, de 46,88MPa, que comparada amb la tensió de ruptura a compressió obtenim un coeficient de seguretat d'1,06.

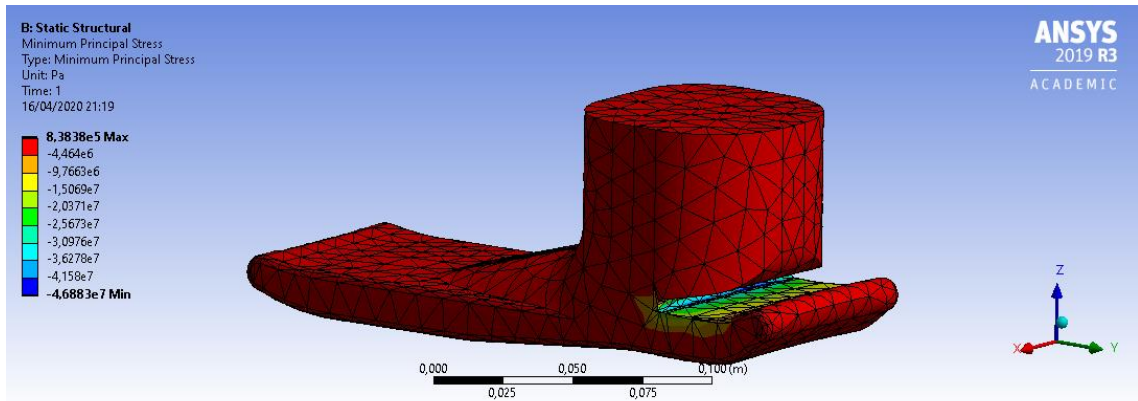


Figura 7.14: Tensió mínima principal III provocada per F1

Com a conclusió d'aquestes dues simulacions, podem afirmar que la part del peu de la pròtesi compleix els requeriments mecànics imposats per la normativa de l'apartat 5.1, tant si utilitzem els criteris de *Von-Mises* com els de *Rankine*, i que té un coeficient de seguretat (γ), estarà entre 1,1 i 1,7 aproximadament.

7.1.7. MODEL NO LINEAL

Per defecte ANSYS realitza els càlculs de manera lineal, és a dir, considerant fixes les condicions de contorn, i en el cas que aquestes condicions de contorn canviïn considerablement en el temps, caldrà analitzar si és necessari fer els càlculs de manera lineal o no lineal.

Per tal de dur a terme l'anàlisi no lineal s'ha utilitzat les mateixes condicions de contorn que a l'apartat 7.1.3, i, com es pot veure en la Figura 7.15, s'ha definit un temps d'anàlisi de dos segons, dividit en 10 intervals.

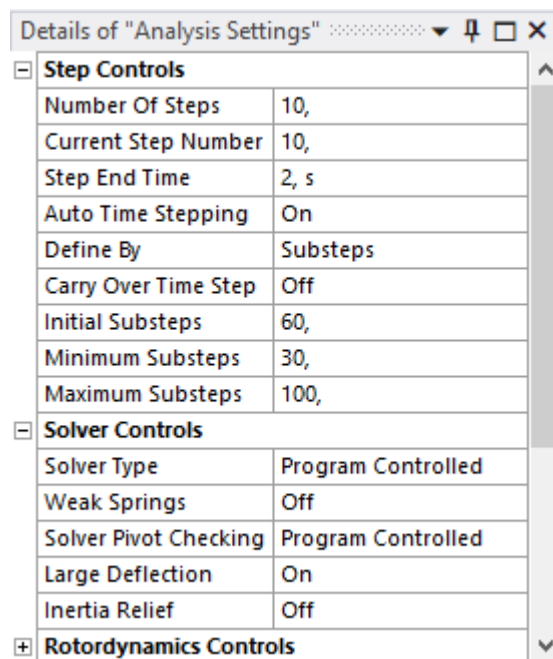


Figura 7.15: Configuració de l'anàlisi no lineal

La primera solució d'aquesta anàlisi, és el gràfic de la Figura 7.16, el qual és un gràfic de la tensió màxima principal I en funció de temps, i com es pot veure, a 0,2s, pren el seu valor màxim de 31,20MPa, representat en la Figura 7.17.

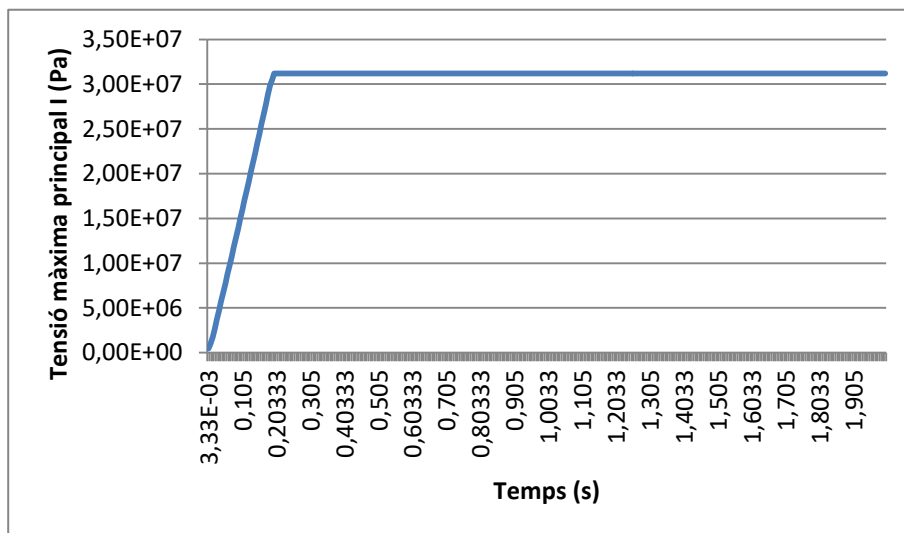


Figura 7.16: Gràfic de la tensió màxima principal I en funció del temps

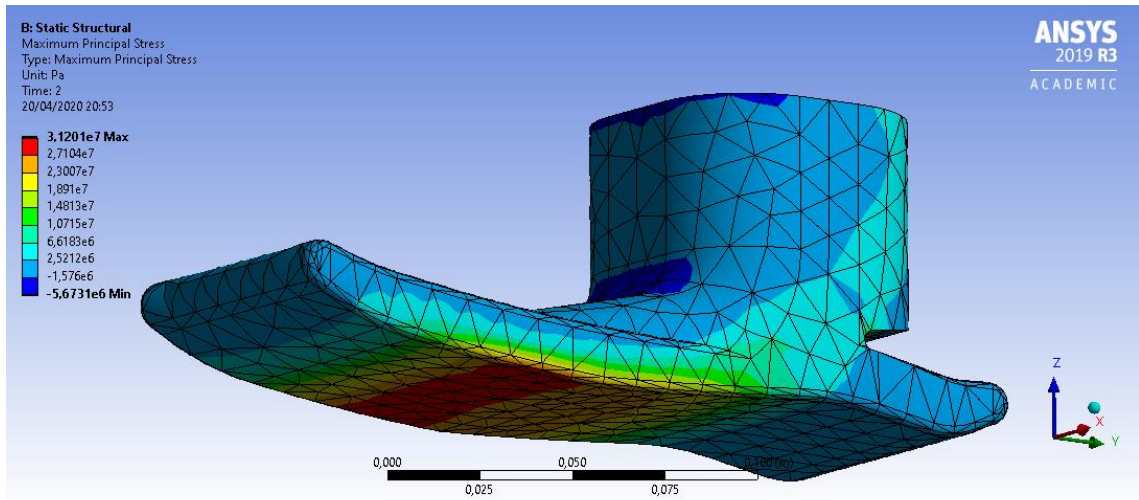


Figura 7.17: Càlcul no lineal de la tensió màxima principal I

Pel que fa a la segona solució, és el gràfic de la Figura 7.18, el qual és un gràfic del desplaçament màxim en funció del temps, i a 0,2s pren el valor màxim de 11,099mm, de la Figura 7.19.

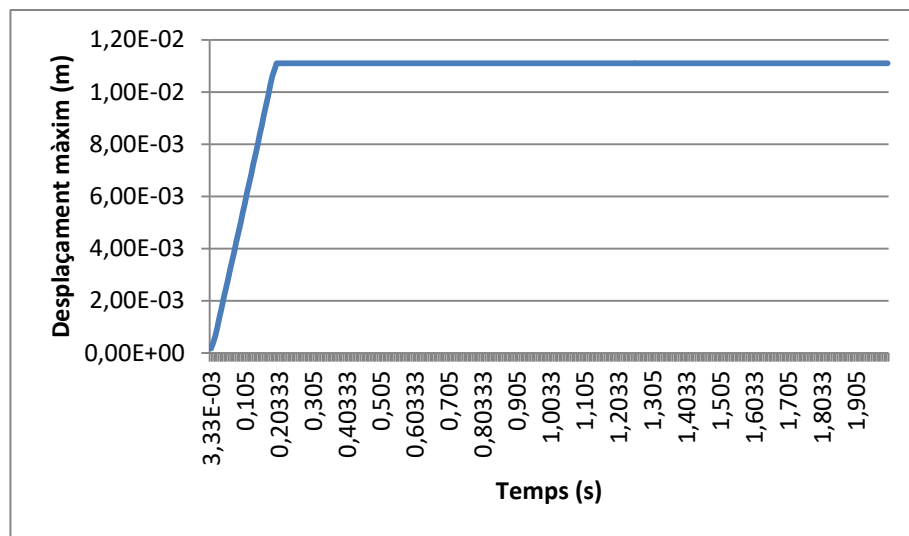


Figura 7.18: Gràfic del desplaçament màxim en funció del temps

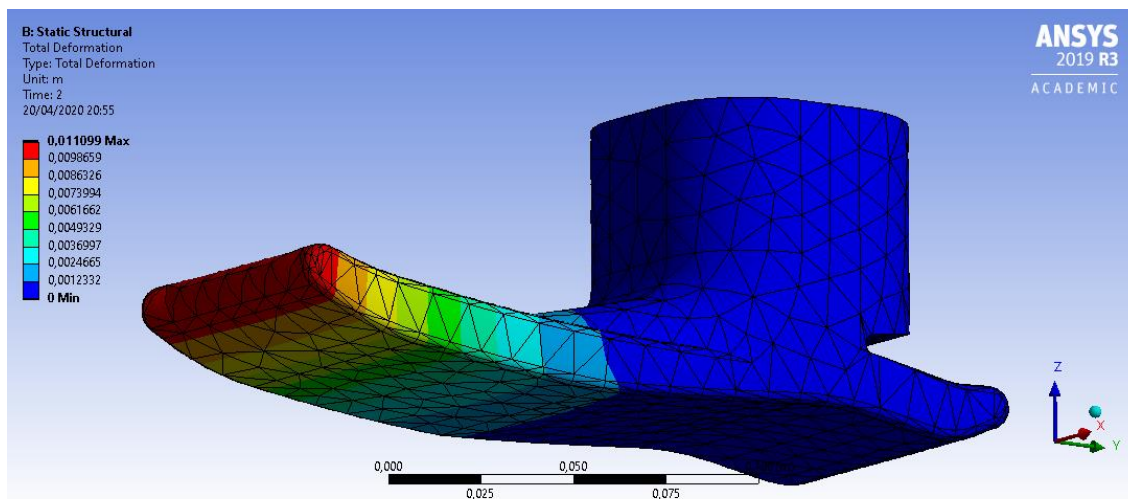


Figura 7.19: Càlcul no lineal de les deformacions màximes

Després d’haver dut a terme aquesta anàlisi, es pot concloure que les solucions del càlcul no lineal presenten una solució similar al càlcul lineal, com es pot veure en la Taula 7.1, entre les tensions calculades pel mètode lineal i no lineal hi ha una diferència del 5,12%, i pel que fa als desplaçaments del 3,57%, per tant, es poden donar com a vàlides les simplificacions lineals.

	Càlcul lineal	Càlcul no lineal
Tensió màxima principal I (MPa)	29,6	31,2
Desplaçament màxim (mm)	10,702	11,099

Taula 7.1: Taula comparativa del model lineal i no lineal

7.2. FIXACIÓ (FORÇA QUE S’HA DE FER PER TANCAR-LA)

7.2.1. MATERIAL

Per tal de trobar quina és la força que s’ha d’aplicar per a tancar la fixació de la pròtesi, s’ha dut a terme una simulació amb ANSYS. Per definir el material de la fixació, s’ha seguit el mateix procediment que en l’apartat 7.1.1, ja que es tracta del mateix material i el mateix procés de fabricació.

7.2.2. MALLAT

Pel mallat, s'ha utilitzat elements triangulars, i per trobar-ne la mida òptima s'ha dut a terme un estudi (Annex 3) imposant les mateixes condicions de contorn, i canviant la mida de l'element, per tal de veure on convergia la solució. Com es pot veure en la Figura 7.20 i en la Figura 7.21, la solució convergeix aproximadament amb una mida d'element de 5,3mm, que serà la mida de l'element utilitzat en la simulació, obtenint el mallat de la Figura 7.22.

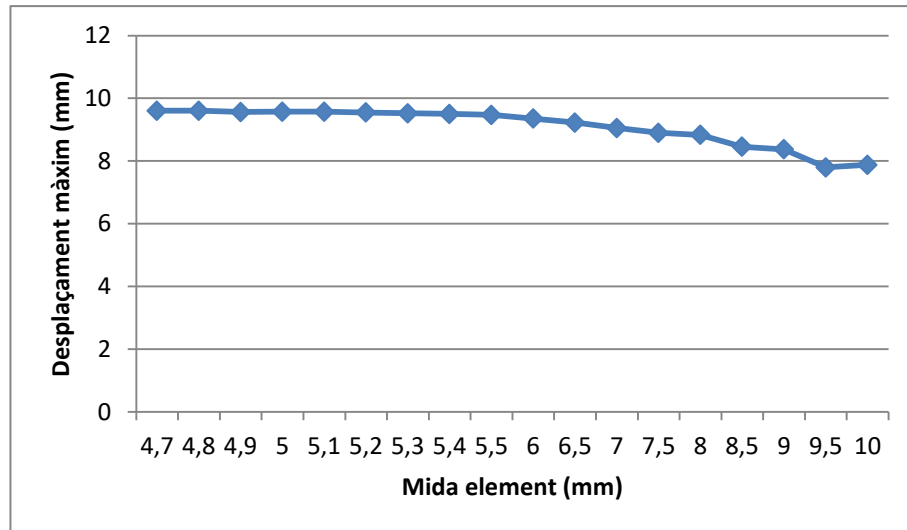


Figura 7.20: Gràfic del desplaçament en funció de la mida de l'element del mallat

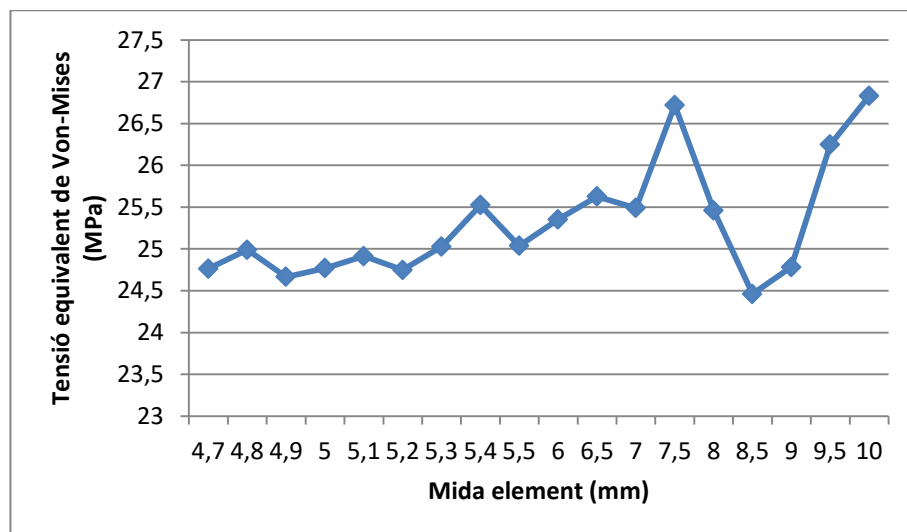


Figura 7.21: Gràfic de la tensió equivalent de Von-Mises en funció de la mida de l'element del mallat

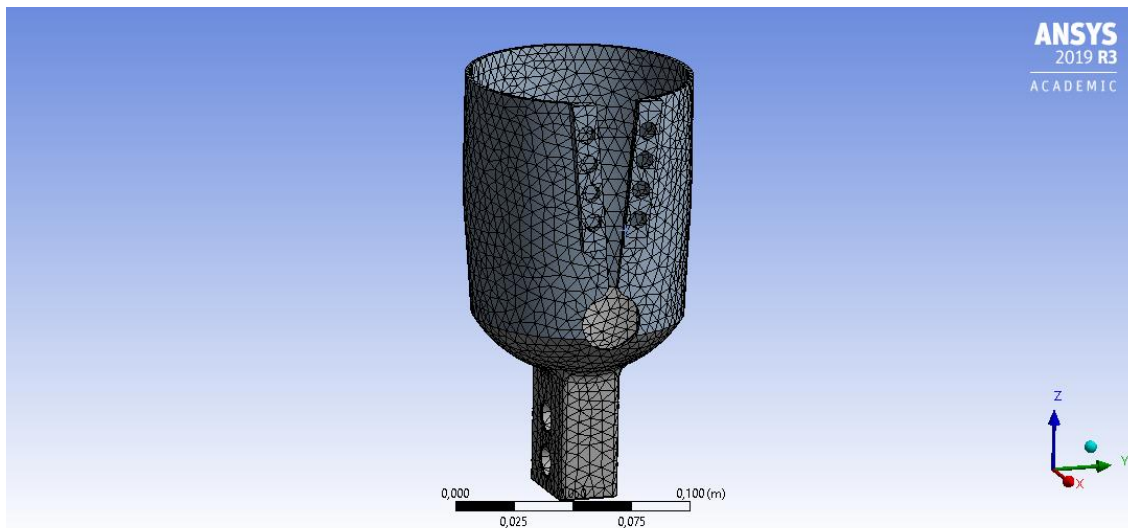


Figura 7.22: Mallat de la fixació

7.2.3. CONDICIONS DE CONTORN

Com es pot observar en la Figura 7.23, les condicions de contorn imposades en aquesta simulació és una fixació a la base (C), i dues forces de 15N en sentits oposats (A i B), en les superfícies dels talls, simulant la força que farien els cordons.

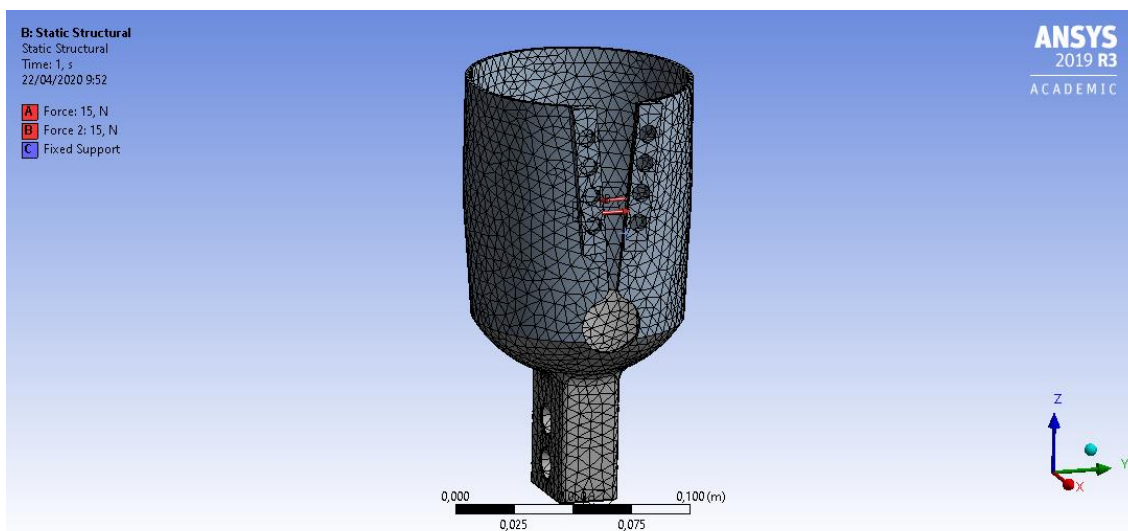


Figura 7.23: Condicions de contorn

7.2.4. SOLUCIÓ

La distància superior del tall, és a dir, la distància total que s'han d'apropar les dues parts per tal de tancar la fixació, és de 19,5mm, i imposant les condicions de contorn de l'apartat 7.2.3, obtenim un desplaçament en l'eix Y de 9,52 mm per una part i 9,53mm per l'altre, tal

com es pot veure en la Figura 7.24. Per tant, podem concloure que per tancar la fixació, es necessita aplicar una força de 15N a cada banda del tall.

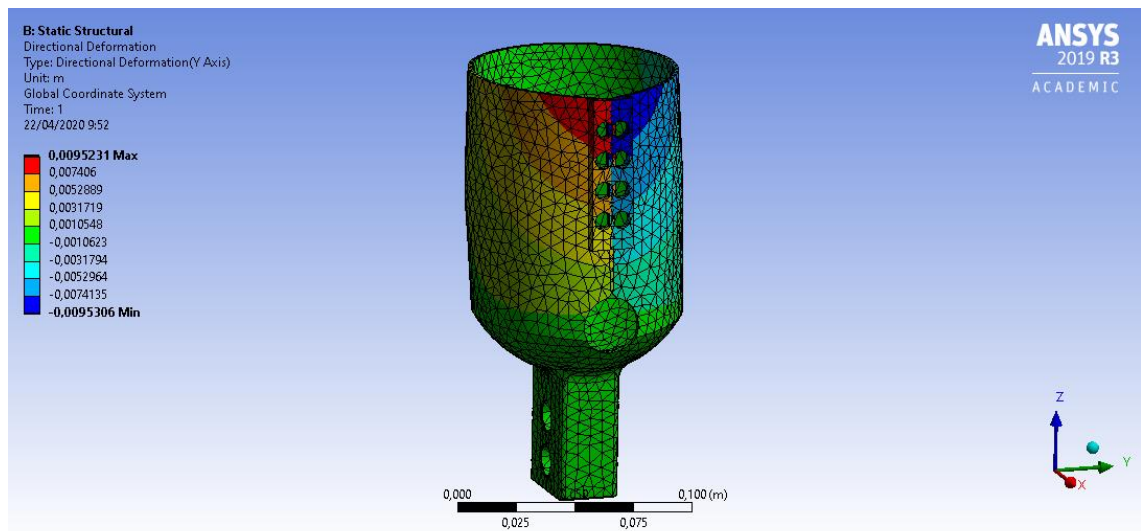


Figura 7.24: Desplaçament en direcció Y

Les tensions que es produeixen durant la simulació, tal com es pot veure en la Figura 7.25, prenen un valor màxim de 25,028MPa, per sota de la tensió admissible, per tant, podem afirmar que en cordar els cordons de la pròtesi, no hi ha risc que falli.

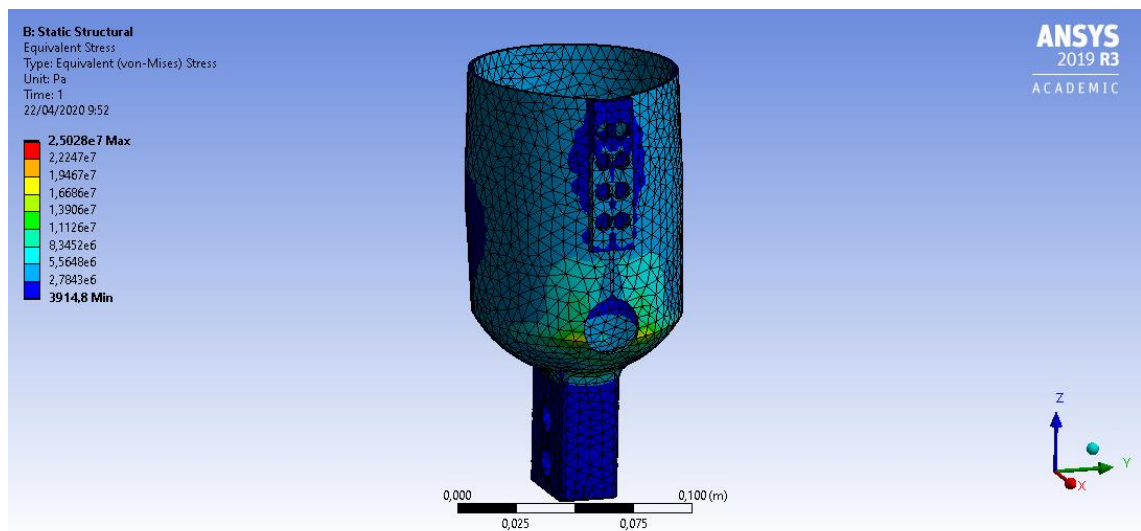


Figura 7.25: Tensió equivalent de Von-Mises

7.2.5. MODEL NO LINEAL

Per tal d'analitzar si es pot utilitzar la simplificació lineal o pel contrari, en aquest model s'ha de fer un càlcul no lineal, s'ha realitzat un estudi no lineal, amb la mateixa configuració que a

l'apartat 7.1.7, i amb les condicions de contorn de la Figura 7.23, i com es pot veure en la Figura 7.26, la solució pren el seu valor màxim en valor absolut als 0,2s des de l'inici, i com es pot observar en la Figura 7.27, el desplaçament en l'eix Y assoleix un valor màxim de 9,8824mm i un valor mínim de -9,8821mm.

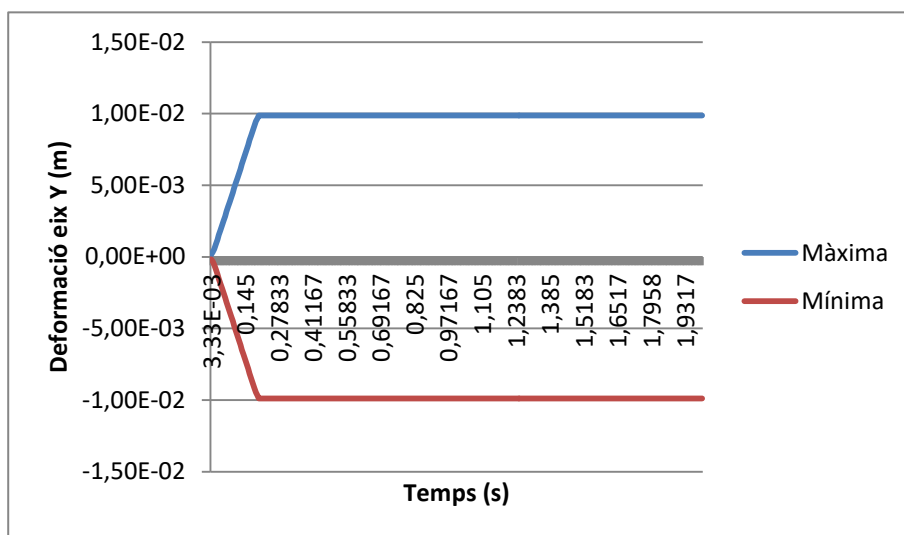


Figura 7.26: Gràfic del desplaçament en l'eix Y en funció del temps

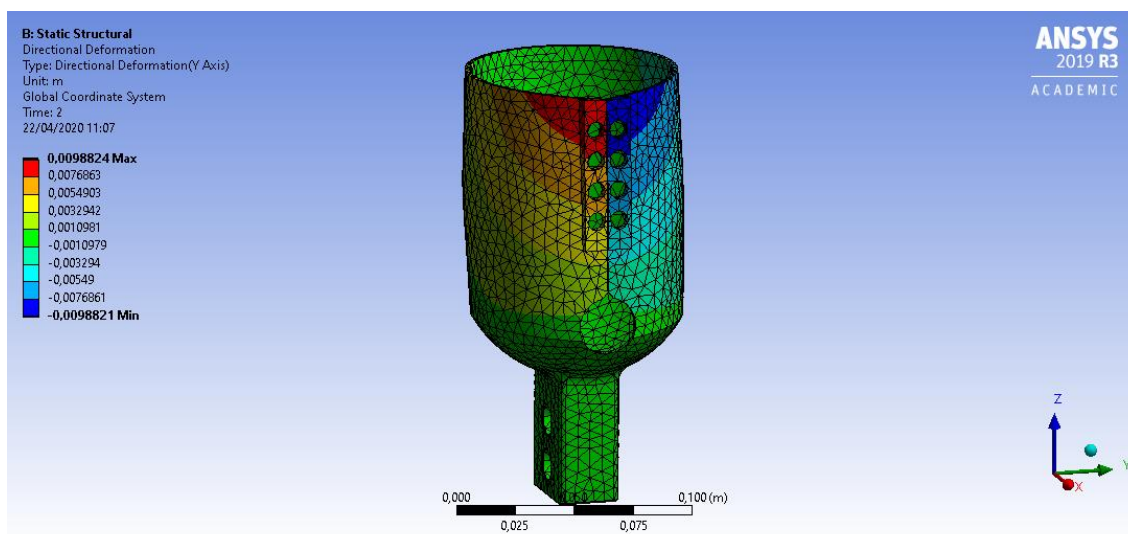


Figura 7.27: Desplaçament en l'eix Y del model no lineal

Respecte a les tensions produïdes durant la simulació, es pot observar en la Figura 7.28, també assoleix el seu valor màxim en valor absolut als 0,2s, i de la Figura 7.29, podem dir que pren un valor màxim de 26,066MPa.

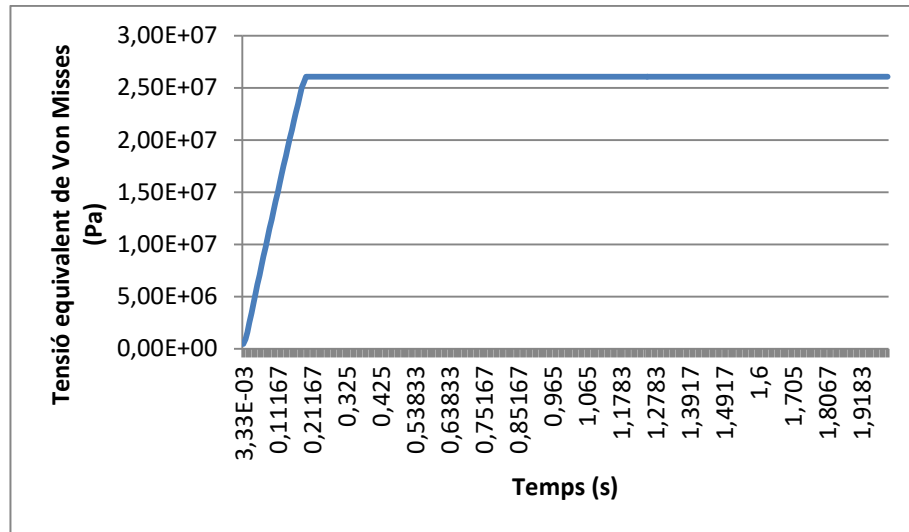


Figura 7.28: Gràfic de la tensió equivalent de Von-Mises en funció del temps

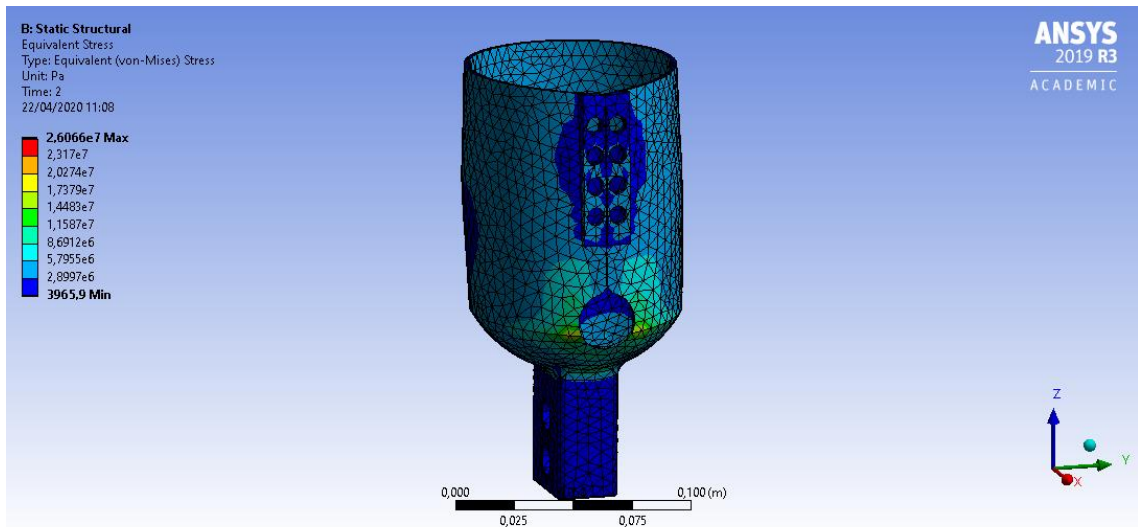


Figura 7.29: Tensió equivalent de Von-Mises del model no lineal

Com a conclusió d'aquesta simulació, es pot afirmar que la diferència entre el model lineal i el no lineal és baixa, com es pot veure en la Taula 7.2, en el cas del desplaçament màxim hi ha una diferència del 3,6%, pel mínim del 3,5%, i per la tensió del 4%. Amb aquests resultats, es donarà com a vàlida l'aproximació lineal d'ANSYS.

	Càlcul lineal	Càlcul no lineal
Desplaçament màxim (mm)	9,5231	9,8824
Desplaçament mínim (mm)	-9,5306	-9,8821
Tensió equivalent de Von-Mises (MPa)	25,028	26,066

Taula 7.2: Taula comparativa del model lineal i no lineal

8. IMPACTE ECONÒMIC

8.1. DEL PROJECTE

8.1.1. INVERSIÓ

Existeixen multitud d'impressores 3D en el mercat, i les seves característiques milloren en funció del seu preu, com més cara sigui la impressora més gran serà la seva placa d'impressió, més ràpid i amb millor qualitat podrà imprimir, fins i tot hi ha impressores que tenen dos extrusors i permeten fer dues impressions a la vegada. Tenint en compte les seves característiques i el seu preu, la impressora seleccionada per aquest treball és la *Creality Ender 3*, ja que el seu rang de preus és entre 150 i 250€, té una placa d'impressió de 220x220x250mm, el que permet imprimir totes les mides de pròtesi que contempla aquest treball, i la qualitat amb la que imprimeix és molt bona pel preu que té. Suposarem que es compra per 200€ (iva inclòs).

Per calcular el que hauria de cobrar un enginyer per dur a terme aquest treball, s'ha tingut el nombre d'hores totals que teòricament, hi hauria d'invertir. El nombre de crèdits ECTS del TFG és de 12, que per a treballs, cada crèdit equival a 30 hores, sumant un total de 360h.

Segons l'observatori de l'Enginyeria, els enginyers a Catalunya tenen un salari mitjà de 40000€ bruts/any, i tenint en compte que, segons CCOO, realitzant una jornada laboral de 39h/setmanals, la jornada màxima anual és de 1764h/any, obtenim un cost de 22,67€ bruts/h, que per les 360h de treball, el que costa contractar a un enginyer per dur a terme aquest projecte és d'aproximadament 8161,2€.

Durant la realització del projecte, s'ha utilitzat aproximadament una bobina de PLA, aprenent a imprimir en 3D, realitzant proves d'impressió de la pròtesi i imprimint el prototip de la pròtesi, i si tenim en compte que de mitjana, una bobina d'1kg de PLA costa 20€, el material d'impressió del treball ha costat 20€.

Pel que fa al subministrament, es calcula que un 70% del temps invertit en el projecte, equivalent a 250h, ha sigut o bé utilitzant un ordinador, o bé utilitzant la impressora 3D, i tenint en compte que requereixen un 0,360kW per funcionar, i que el preu del kWh a Espanya és de 0,08€ de mitjana, el subministrament del projecte costa 7,2€.

8.1.2. COSTOS TOTALS

Donat que el projecte no inclou ingressos corresponents a vendes, pel fet de ser un projecte sense ànim de lucre i per tant que no incorpora beneficis econòmics, els costos totals

coincideixen amb el compte de resultats, i per tant retornarien pèrdues, el que suggeriria buscar subvencions que equilibrassin els costos (despeses efectives), que hauran d'incloure:

- Costos directes/variables
- Costos indirectes/assignables
- Costos fixos/estructurals

Es pot concloure que, tal com es pot veure en la Taula 8.1, per dur a terme aquest projecte s'ha de realitzar una inversió de 8388,4€.

Concepte	Import (€)
Adquisició impressora	200
Sou de l'enginyer	8161,2
Cost dels materials	20
Subministraments i altres	7,2
TOTAL	8388,4

Taula 8.1: Taula del cost total del projecte

8.2. COST UNITARI

Per tal de fer els càlculs de les amortitzacions per la compra de la màquina, es varen buscar estudis sobre la vida útil de les impressores 3D, però no n'hi ha cap, ja que, per una banda, no és el mateix imprimir quatre objectes d'una hora d'impressió que un objecte de quatre hores d'impressió, és a dir, que cada usuari d'impressora la utilitzarà de manera molt diferent d'un altre usuari, cosa que augmenta molt la variabilitat de la vida útil de les impressores, i per altra banda, les impressores 3D estan formades per parts o per blocs, i quan s'espalla una part, es canvia només aquesta part, no és gaire comú que s'espalli tot el conjunt de la màquina. Per aquestes raons, s'ha optat per utilitzar com a criteri la garantia del fabricant, que és de dos anys, per estimar la vida útil de la màquina.

Davant la impossibilitat de determinar el nombre d'unitats màximes que pot imprimir una impressora, i per tant, que el cost unitari sigui el resultat del cost total entre el nombre d'unitats màximes, s'ha optat per calcular directament, el cost unitari (iva inclòs).

8.2.1. COSTOS DIRECTES/VARIABLES

- Bovines: el preu d'una bobina de PLA està entre 15 i 20€/kg, per tant, si el pes de la pròtesi és de 0,508kg, i considerant un preu de compra de 17,5€/kg, obtenim que el cost del plàstic per a una pròtesi és de 8,89€.
- Cordó: El preu del cordó s'ha tret de la botiga *Decathlon*, ja que és una multinacional que es pot trobar a diversos països, i és de 2,99€/parell de cordons, per tant un cordó val 1,50€.
- Cargol i femella: Tant del cargol com la femella s'ha buscat el preu a *Leroy Merlin*, i el preu d'un conjunt de 20 cargols i 20 femelles val 1,99, per tant, un cargol i una femella val 0,1€.
- Recurs humà: Suposant que per a cada pròtesi, s'ha d'invertir 30 minuts per preparar la impressora, pujar els fitxers i treure les peces acabades, i que el cost/hora és de 22,67€bruts/hora, el recurs humà ens costa 11,33€/pròtesi.

Els costos directes o variables totals d'una pròtesi sumen un total de 21,82€.

8.2.2. COSTOS INDIRECTES/ASSIGNABLES

- Subministraments: Segons les especificacions tècniques de la impressora, requereix 0,360kW per a funcionar, que multiplicats per les 67h que dura la impressió (Annex 4) de la pròtesi de mitja obtenim els kWh de la impressora, i tenint en compte que el preu del kWh a Espanya és 0,08€ de mitjana, obtenim un cost de subministrament de 1,93€.
- Amortitzacions de la màquina: Agafant com a vida útil de la màquina els dos anys de garantia del fabricant, i contant que la màquina treballa tots els 255 dies laborables de l'any, -ja que necessita algú que l'encegui i l'apagui-, i que treballa durant 16h/dia de mitjana, ja que encara que la jornada laboral no duri 16 hores, la màquina pot treballar sense supervisió, obtenim que la impressora treballarà durant 8160h en aquests dos anys, i si la impressió d'una pròtesi dura 67h, obtenim que el cost d'amortització és de 1,44€.

El total dels costos indirectes o assignables suma un total de 3,37€.

8.2.3. COSTOS FIXOS/ESTRUCTURALS

- Sous directius
- Edifici
- Altres

Davant del desconeixement, alguns economistes recomanen aplicar un percentatge sobre

els costos directes, a l'hora de tenir en compte els costos fixos/estructurals, en aquest cas s'ha aplicat un 10%, amb el benentès que cada sector retorna mitjanes o estàndards de costos estructurals diferents, retornant un valor de 2,18€.

Per concloure, es pot afirmar que, tal com es pot veure en la Taula 8.2, el cost unitari d'una pròtesi estarà entorn dels 27,37€.

Concepte		Import (€)
Costos directes/variables	Bobines	8,89
	Cordó	1,50
	Cargol i femella	0,1
	Recurs humà	11,33
Costos indirectes/assignables	Subministraments	1,93
	Amortitzacions de la màquina	1,44
Costos fixes/estructurals	Sous directius/Edifici/Altres	2,18
TOTAL		27,37

Taula 8.2: Taula del cost unitari

9. IMPACTE SOCIAL

L'impacte social és l'efecte que produeix un fet o esdeveniment sobre la societat.

En aquest treball, els agents d'interès identificats són: l'usuari, la família de l'usuari, la societat, els organismes i la indústria, i a continuació es desglossarà quines necessitats poden ser cobertes totalment o parcialment pel fet de disposar de la pròtesi.

9.1. EQUITAT EN L'ACCÉS A UNA PRÒTESIS

Aquest projecte contribueix a millorar l'equitat trencant l'estigma que les pròtesis són exclusivament per a països amb recursos, oferint la possibilitat d'accedir a una pròtesi sense tenir els recursos per adquirir-ne una.

9.2. DESLOCALITZAR ELS RECURSOS

També contribueix a millorar la deslocalització i flexibilitat dels recursos com a societat i als organismes des d'una cultura col·laborativa, apropant-nos com a societat.

9.3. DISMINUIR L'EXCLUSIÓ SOCIAL

Tant l'usuari com la família, es veuen beneficiats amb la inclusió social i amb una millora de la qualitat de vida, tant els nens que pel fet de tenir una limitació física, es podien veure exclosos a l'hora de jugar amb els seus companys, i el fet d'accedir a una pròtesi que els hi permeti realitzar aquestes activitats, els farà sentir molt més inclosos en la societat, com també els adults, que han de deixar de treballar per les seves limitacions físiques, poder reprendre la seva feina, els pot fer sentir molt més útils dins de la societat i millorar tant la seva qualitat de vida com la de la seva família, i a més d'afavorir la indústria pel fet d'incorporar més persones en el mercat laboral.

10. IMPACTE MEDIAMBIENTAL

10.1. RECICLABILITAT

El PLA és un dels materials més utilitzats en la impressió 3D, per la seva facilitat d'ús i perquè és un material que, en principi, és més sostenible que d'altres. El PLA es fabrica a partir del blat de moro, i tot i que això pot ser positiu pel fet de no dependre del petroli, que és un recurs limitat, també té conseqüències negatives com ara que el blat de moro és un aliment, i aquest aliment que es deriva a fabricar PLA deixa de ser aliment que es podria consumir. Per altra banda, es necessita una gran quantitat de blat de moro per fabricar 1kg de PLA, concretament 2,65kg.

Una de les característiques per les quals es ven el PLA és pel fet de ser biodegradable, i és cert que és biodegradable, però a diferència del que molta gent pensa, pel fet de ser-ho no es descompondrà en pocs dies o mesos, per degradar-se, s'haurà de fer de manera industrial amb unes condicions de temperatura i humitat controlades, ja que de no fer-ho així, podria tardar més de 80 anys en descompondre's.

A part de servir de compostatge, també és un plàstic que es pot reciclar, i s'està investigant en diversos sistemes per reciclar impressions fallides o restos de PLA tant per fabricar més filament com per altres fins. També hi ha projectes, com ara *ProtoCycler* o bé *Filabot*, que pretenen elaborar plàstic a apte per a la impressió 3D, utilitzant envasos de plàstic i altres residus habituals en les cases.

10.2. PETJADA ECOLÒGICA

Segons [8], la petjada ecològica es defineix com: "Área de territorio ecológicamente productiva (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población determinada con un nivel de vida específico de forma indefinida, sea donde sea que se encuentre esa área".

Per tal d'obtenir els kg de CO₂ emesos en la fabricació d'una pròtesi, s'utilitzarà l'Eq.9.

$$Emissions(kgCO_2) = Consum(un) \cdot Factor\ d'Emissió\left(\frac{kgCO_2}{un}\right) \quad (Eq.9)$$

En aquest cas considerarem dos consums, els d'energia i els de plàstic. Pel que fa als kWh d'energia consumits, els traurem de l'apartat 8.2.2, i el consum de plàstic en kg de l'apartat 8.2.1. Utilitzant aquestes dades, i la Taula 10.1, de la qual utilitzarem el factor d'emissió de

l'energia elèctrica i el dels residus urbans no perillosos, obtenim que el consum d'energia emet 13,75kgCO₂, i el plàstic 46,58kgCO₂.

		Factor emisió	Unidades	Fuente
Agua	Agua	0,50	kgCO ₂ /m ³	Ayuntamiento de Santiago
	Construcción del edificio	520	kgCO ₂ /m ²	Informe MIES ⁵ , 1999
	Energía eléctrica	0,57	kgCO ₂ /kWh	Instituto Energético de Galicia, 2007
	Gas Natural	56,10	kgCO ₂ /l	IPCC, 2006
	Gasóleo	74,10	kgCO ₂ /kWh	
Cogeneración	56,10	kgCO ₂ /kWh		
Papel	Reciclado	0,61	kgCO ₂ /kg papel	Elaboración propia
	Virgen	1,84		Elaboración propia
Residuos peligrosos	Residuos urbanos (no peligrosos ⁶)	91,70	kgCO ₂ /kg residuo	IPCC, 2006
	Aceites	5,54·10 ⁻⁰²	kgCO ₂ /kg residuo	Universidad de Oviedo ⁷
	Ácidos y álcalis	1,08·10 ⁻⁰²		
	Absorbentes usados	3,00·10 ⁻⁰³		
	Biosanitarios	8,00·10 ⁻⁰²		
	Disolventes	1,58·10 ⁻⁰²		
	Baterías	2,14·10 ⁻⁰³		
	Equipos electrónicos (incluye tubos fluorescentes)	1,35·10 ⁻⁰²		
	Envases (plásticos, metálicos y de vidrio)	4,18·10 ⁻⁰³		
	Filtros de aceite	3,99·10 ⁻⁰³		
Pilas	5,35·10 ⁻⁰⁵			

Taula 10.1: Taula dels factors d'emissió

Un cop conegut els kgCO₂ emesos, utilitzant l'Eq.10 es calcularà l'àrea de territori ecològicament productiu que es necessitarà per fabricar una pròtesi.

$$Petjada \left(\frac{ha}{any} \right) = \frac{Emissions(tonCO_2)}{c.Fixació \left(\frac{tonCO_2}{ha} \right)} \quad (Eq.10)$$

Utilitzant la Taula 10.2, i agafant com a àrees principals una mitjana de l'agricultura i els boscs, ja que solen ser els més comuns, obtenim una petjada ecològica de 0,034ha/any.

Tipo de área	Factor de equivalencia (hag/ha)
Agricultura (tierras principales)	2,21
Agricultura (tierras marginales)	1,79
Bosques	1,34
Ganadería	0,49
Pesca (aguas marinas)	0,36
Pesca (aguas continentales)	0,36
Artificializado	2,21

Taula 10.2: Taula dels factors d'equivalència

11. PRESA DE MIDES, DESCÀRREGA I IMPRESSIÓ DE LA PRÒTESI

11.1. PRESA DE MIDES

Per tal de prendre correctament les mesures de l'infant i que garanteixi la pròtesi adequada, s'ha de tenir en compte les següents consideracions:

- Panxell: Per tal de mesurar el perímetre del panxell, s'ha d'agafar un cordill o un element similar, agafar-lo per l'extrem i rodejar el panxell i marcar on coincideix l'extrem amb el cordill. Seguidament amb l'ajuda d'un regle, mesurar aquesta distància.
- Altura del genoll: Per mesurar l'altura del terra al genoll, es farà amb l'ajuda d'una cinta mètrica, posant la punta en el terra i mesurant just fins on comença el genoll.
- Longitud i amplada de peu: Per mesurar les dimensions del peu la manera més fàcil és marcar el contorn del peu en un paper, i després, amb l'ajuda d'un regle o una cinta mètrica, fer les mesures.

11.2. DESCÀRREGA

Per descarregar les parts de la pròtesi, s'ha de seguir el següent enllaç, <https://mega.nz/folder/LFciilpQ#1zLlqAaJSBIP25hN4h4aFw>, el qual dirigeix a una pàgina del servidor *Mega*, amb les parts de la pròtesi separades per carpetes, i dins de les carpetes hi ha els arxius amb les pròtesis ordenades per mides, per, amb les mides preses en l'apartat 11.1, seleccionar l'arxiu que corresponent.

11.3. IMPRESSIÓ

Per a garantir un bon resultat en la impressió de la pròtesi com la de la Figura 11.1, es recomana utilitzar els següents paràmetres d'impressió:

- Velocitat d'impressió: 50mm/s
- Velocitat de desplaçament: 150mm/s
- Densitat d'ompliment: 100%
- Altura de capa 0,2mm

En el cas que es vulgui millorar la qualitat es pot fer per exemple, reduint la velocitat d'impressió a 40mm/s, o reduint l'altura de capa, però com a conseqüència, s'augmentarà el

temps d'impressió.

Cada part de la pròtesi, al tenir una geometria diferent de les altres, requereix uns paràmetres d'impressió particulars a tenir en compte per a millorar la qualitat de la impressió i són els següents:

- **Peu:** Es recomana utilitzar suports a la base d'extrusió, ja que tot i que l'angle no és molt gran, l'àrea és considerablement gran, i si s'imprimeix sense suport a la base, no aguanta bé i pot haver-hi errors en la impressió.
- **Eix:** Es recomana utilitzar com a adherència a la base d'extrusió l'opció "Bassa", ja que aquest tipus d'adherència és molt fàcil de retirar, i és molt recomanable per a peces molt altes, que sense aquest tipus d'adherència podrien caure durant la impressió, com és el cas de l'eix.
- **Fixació:** L'única recomanació respecte a aquesta impressió és l'orientació, és millor imprimir la peça del revés, ja que així no s'ha d'utilitzar cap suport.
- **Bloquejador rotació:** cap recomanació.

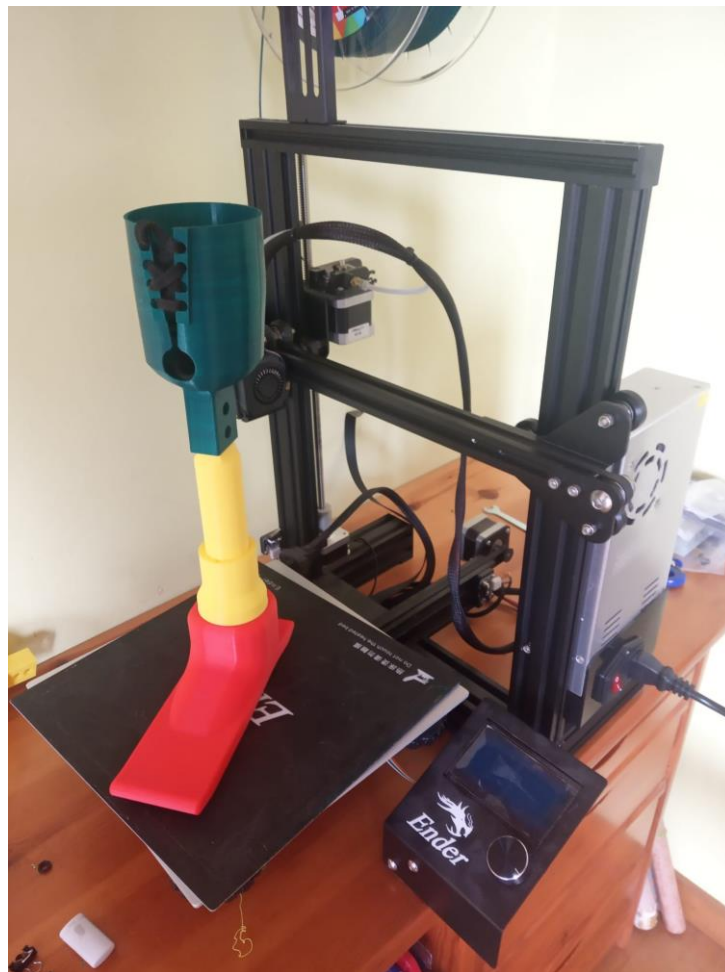


Figura 11.1: Prototip de la pròtesi imprès

Conclusions

Com a conclusions d'aquest projecte, es pot afirmar que és viable utilitzar una impressora 3D com a material mèdic, per fabricar pròtesis que compleixin la normativa vigent i que siguin funcionals.

Des del punt de vista econòmic, els recursos que s'utilitzen per fabricar les pròtesis són comparativament molt menors que una pròtesi convencional o estàndard, assumibles des del punt de vista de països amb recursos, i amb la possibilitat d'obtenir ajudes per donacions o inversors externs, que fan encara més realista l'assumpció del cost del projecte.

Pel que fa a allargar la pròtesi per augmentar-ne la vida útil, s'ha vist que un dels millors sistemes, -tenint en compte que es fabricarà mitjançant la impressió 3D-, és una rosca amb un bloquejador de rotació, ja que permet ajustar l'alçada de manera precisa i bloquejar-la un cop escollida l'alçada adequada, i sobretot perquè a més de la durabilitat afegeix seguretat.

Com a material d'impressió, el PLA és un dels millors materials gràcies a les seves característiques i a la seva facilitat d'utilització, i es pot afirmar que per a la majoria de la pròtesi és un bon material per a fabricar-la, però en concret, per a la part del peu de la pròtesi, potser seria més adequat un material que resistís els assajos de resistència mecànica, però que fos més flexible que el PLA, ja que aquest és un material rígid, i en utilitzar un material més flexible s'augmentaria la comoditat de l'usuari a l'hora de caminar. Així doncs podem concloure que compleix els requisits mínims però seria un dels aspectes amb recorregut de millora.

Agraïments

En primer lloc, es vol agrair al tutor del treball Jordi Bonada Bo, per la seva disposició i ajuda en la realització del treball, a l'Anna Masdeu i Mas, de l'associació d'enginyers industrials a Catalunya per guiar-me a l'hora d'escollir la normativa més adequada per aquest projecte i a la meva família, tant pel seu suport moral com per l'ajuda rebuda en els seus camps de coneixement.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] ANDREA GIMENO JOVÉS, Utilització d'eines d'optimització topològica per a estructures impreses en 3D, 2017
- [2] SUWATTANARWONG PHANPHET, SURANGSEE DECHJARERN, SERMKIAT JOMJANYONG, Above-knee prosthesis design based on fatigue life using finite element method and design of experiment, 2017
- [3] MINISTERI DE SANITAT I POLÍTICA SOCIAL, Boletín oficial del estado 17606, 2009
- [4] UPC, Prismàtic 1.0, <https://www.upc.edu/prismatic/prismatic.html>
- [5] HERMENEGILDO RODRÍGUEZ GALBARRO, Ingemecánica, 2020, <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn32.html>
- [6] ROSALÍO ÁVILA CHAURAND, LILIA ROSELIA PRADO LEON, ELVIA LUZ GONZÁLEZ MUÑOZ, Dimensiones antropométricas de población llatinoamericana, 2007
- [7] LUIS ORTIZ BERROCAL, Resistencia de materiales, 2007
- [8] NOELIA LÓPEZ ÁLVAREZ, Metodología para el cálculo de la huella ecológica de universidades

11.4. Bibliografia complementària

Els criteris amb els quals s'ha seleccionat la bibliografia han sigut la credibilitat dels autors, i fiabilitat de les dades.

THE AMPUTEE COALITION, Prosthetic Feet, <https://www.amputee-coalition.org/resources/prosthetic-feet/>, 08/2016

IMPRESORAS 3D, ABS y PLA: diferencias, ventajas y desventajas, <https://www.impresoras3d.com/abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas/>, 01/2017

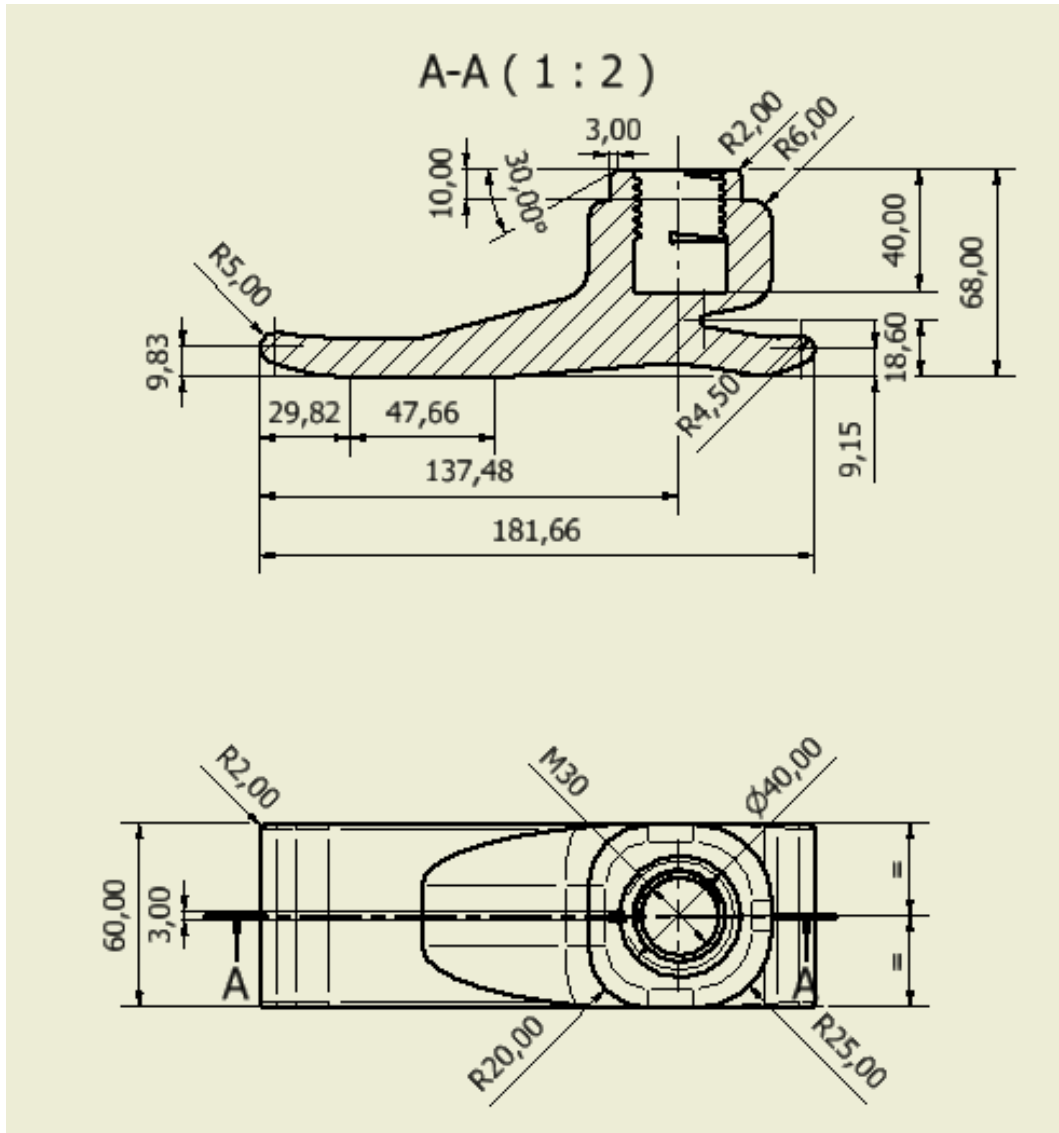
3D NATIVES, Guía completa: el filamento PLA en la impresión 3D, <https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>, 08/2017

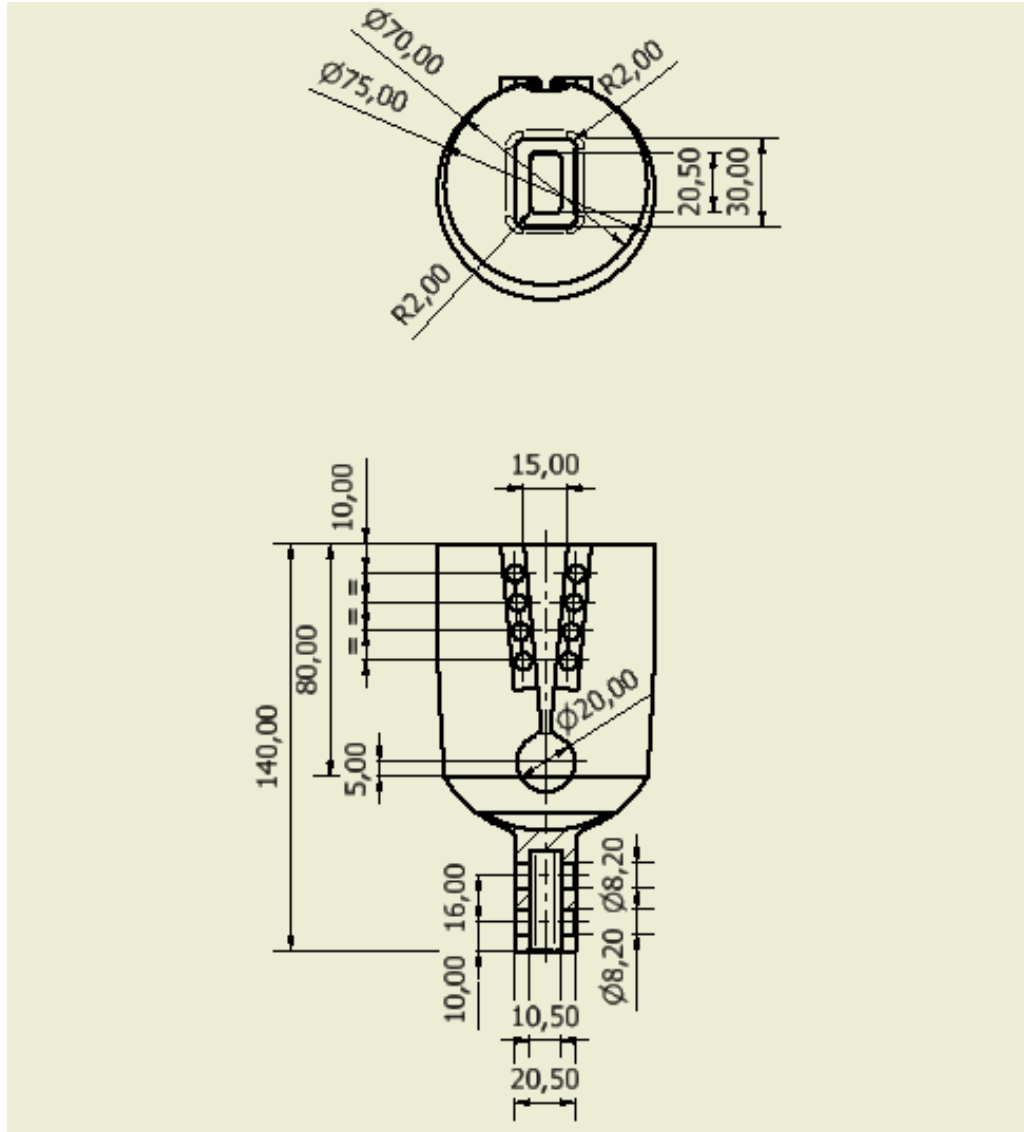
PORTAL DE DIBUJO TÉCNICO, Representación de roscas,
http://dibujo.ramondelaquila.com/?page_id=2699

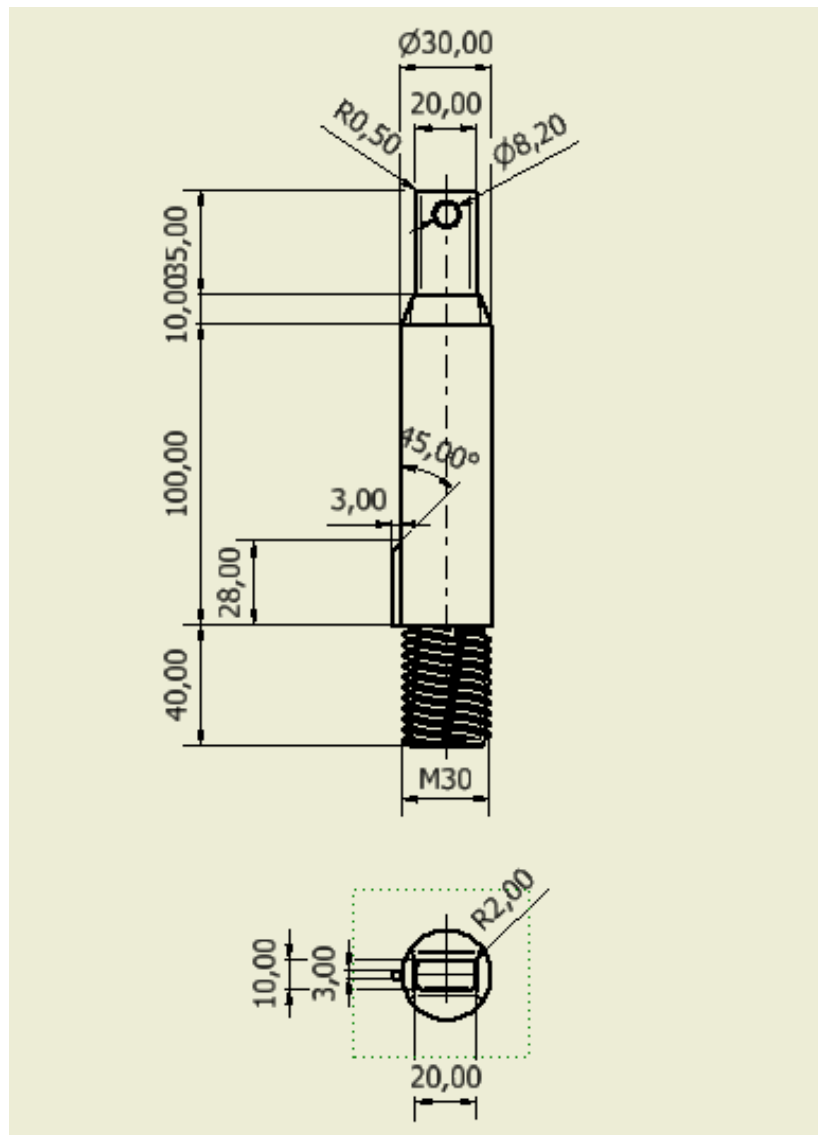
3D NATIVES, ¿Qué tan “ecológico” es realmente el filamento PLA?,
<https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/>

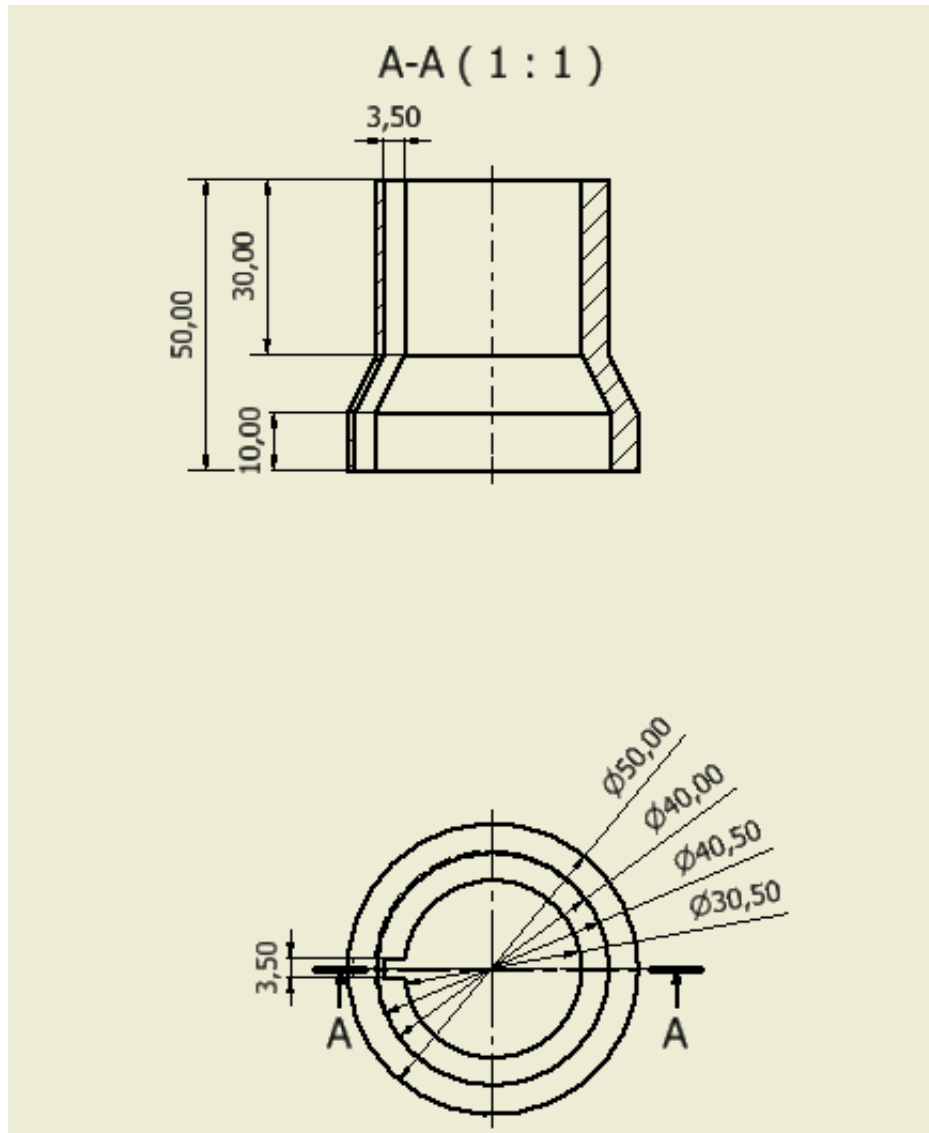
ANNEXOS

Annex 1



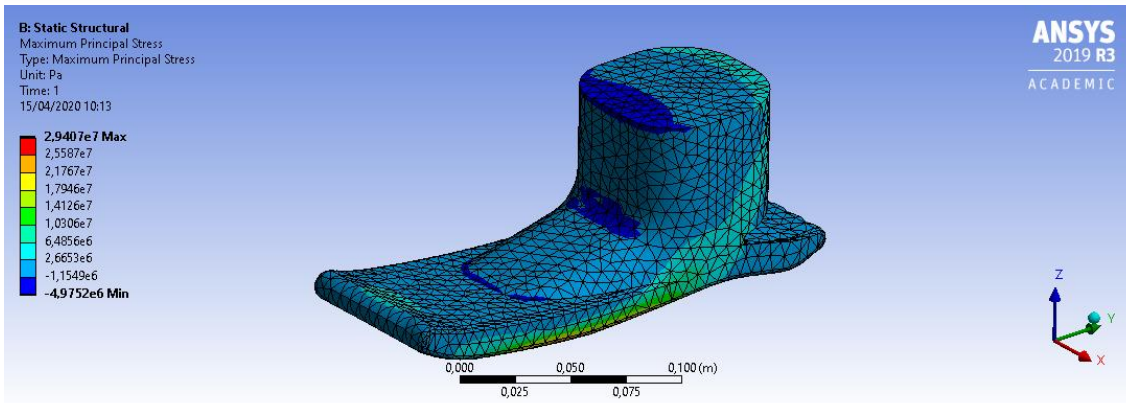
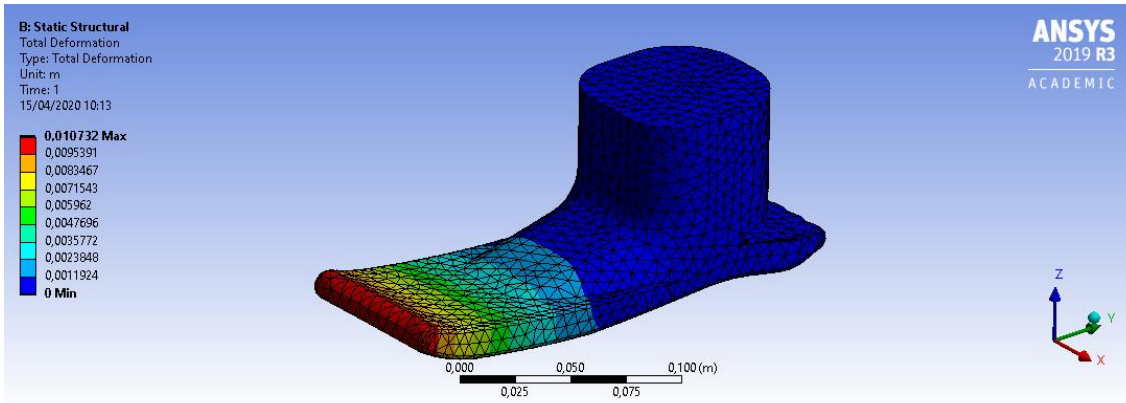




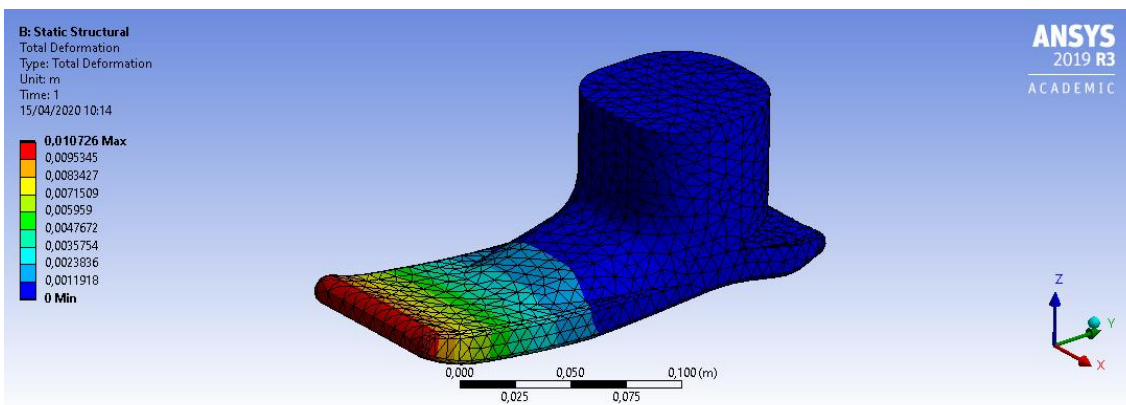


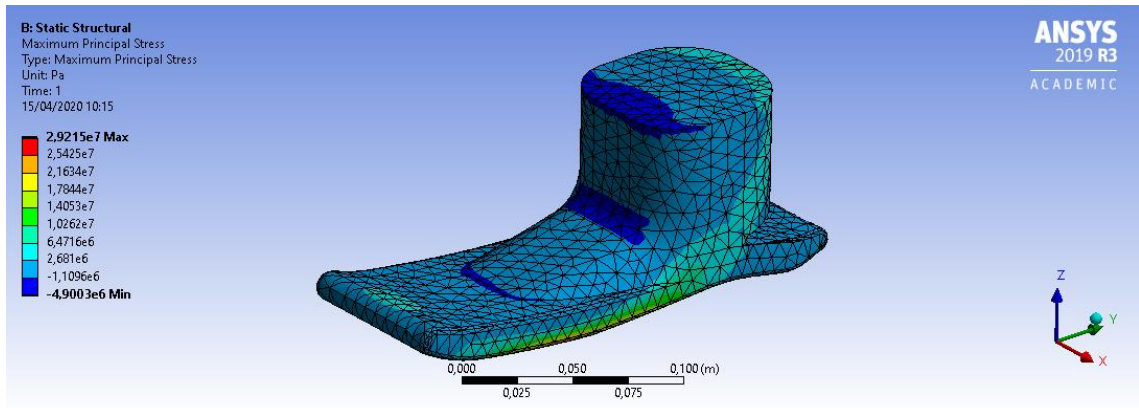
Annex 2

Element de mida 0.007m

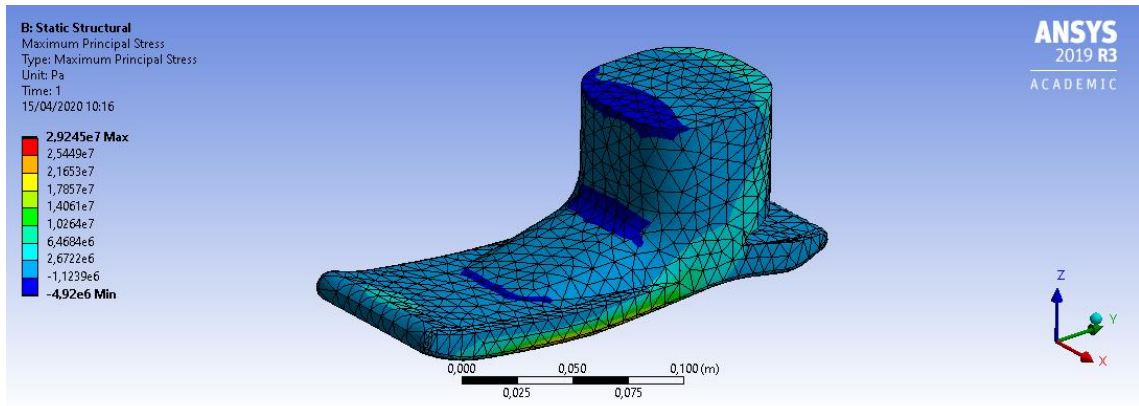
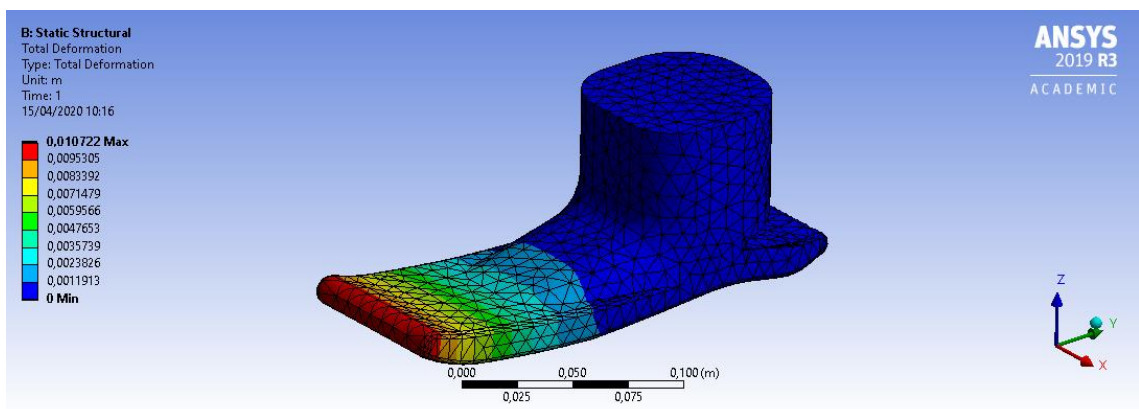


Element de mida 0.008m

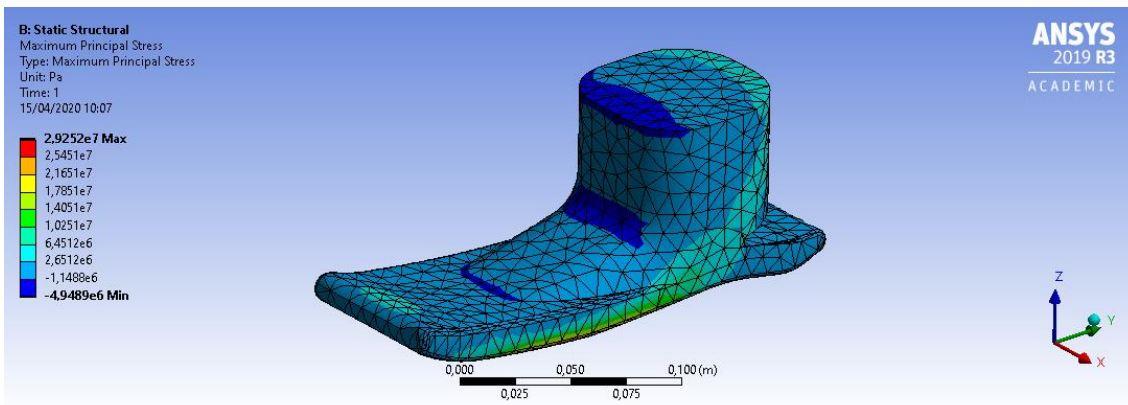
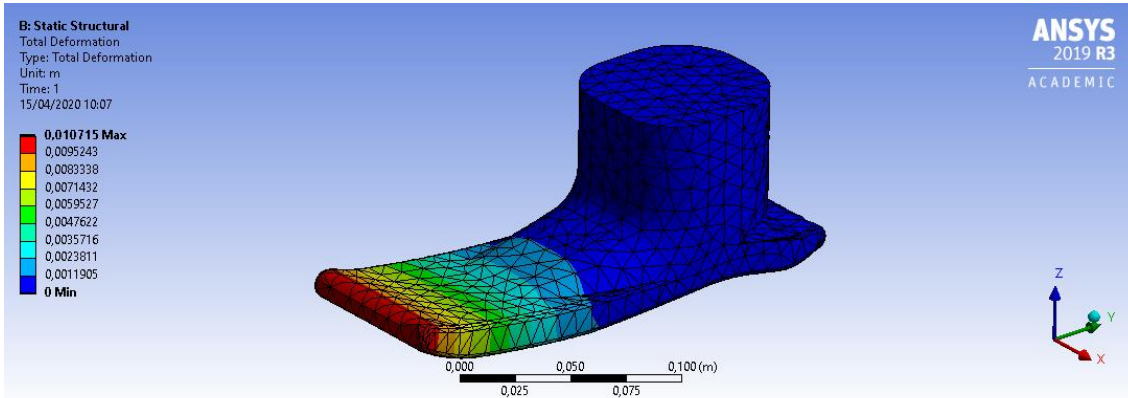




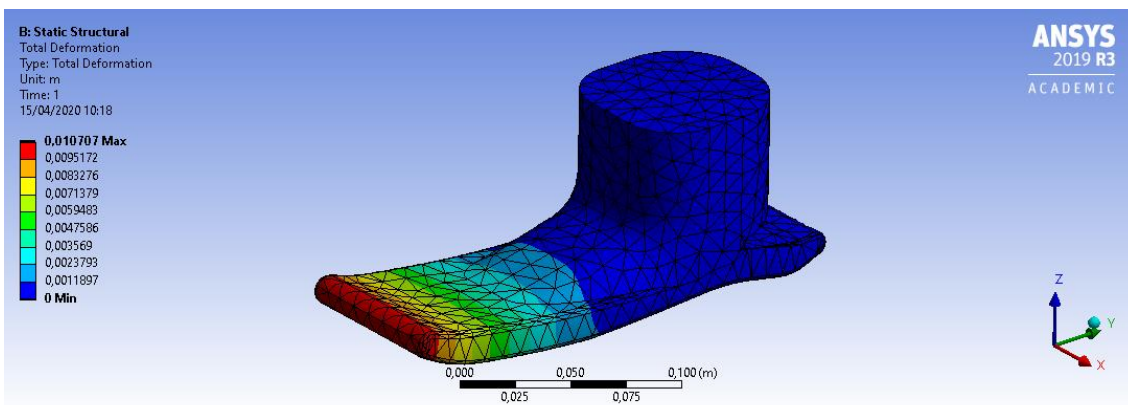
Element de mida 0.009m

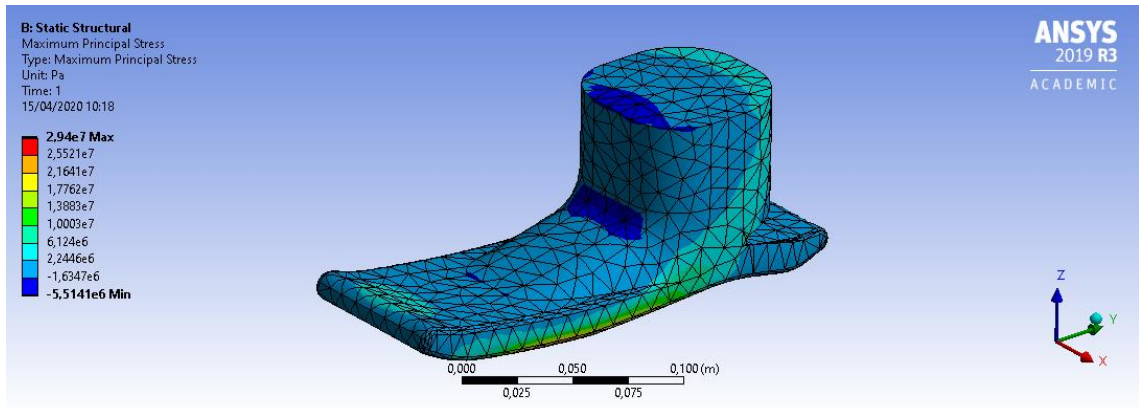


Element de mida 0.01m

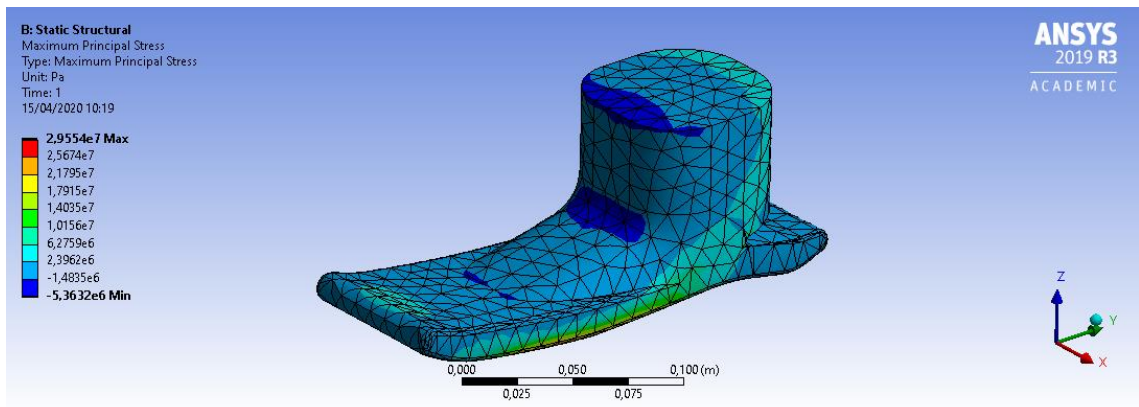
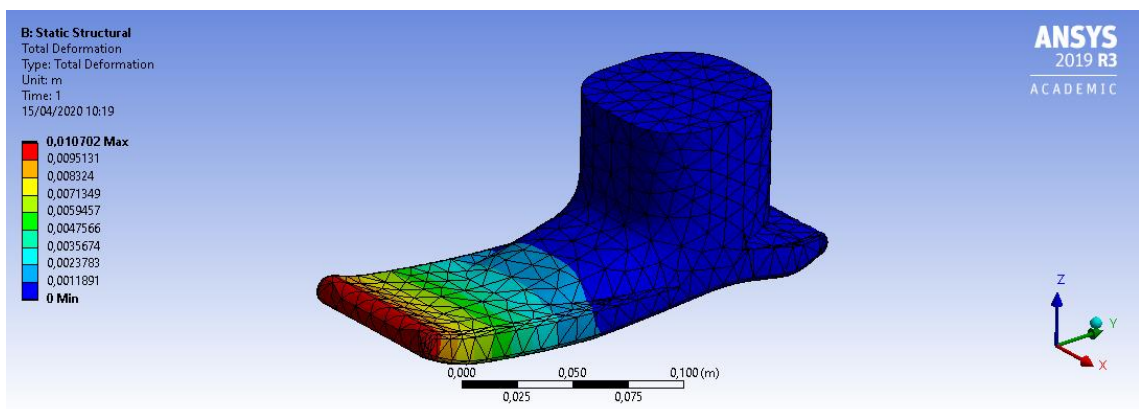


Element de mida 0.011m

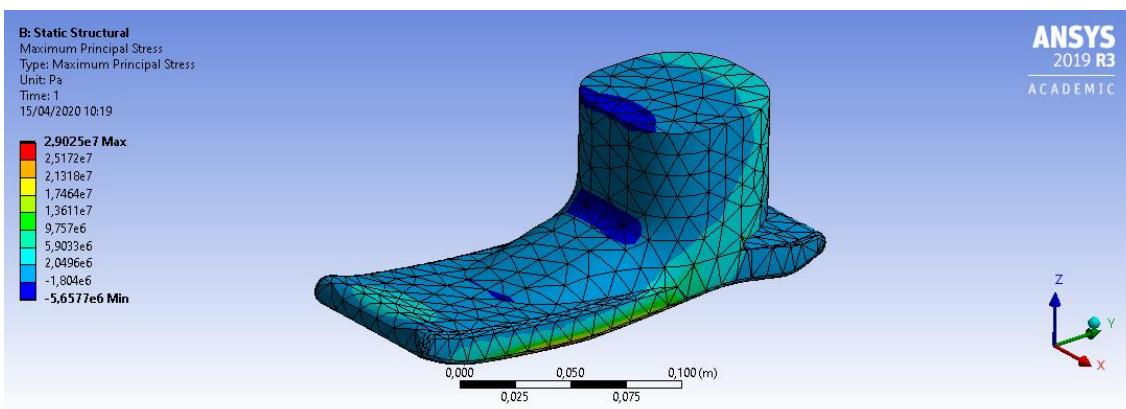
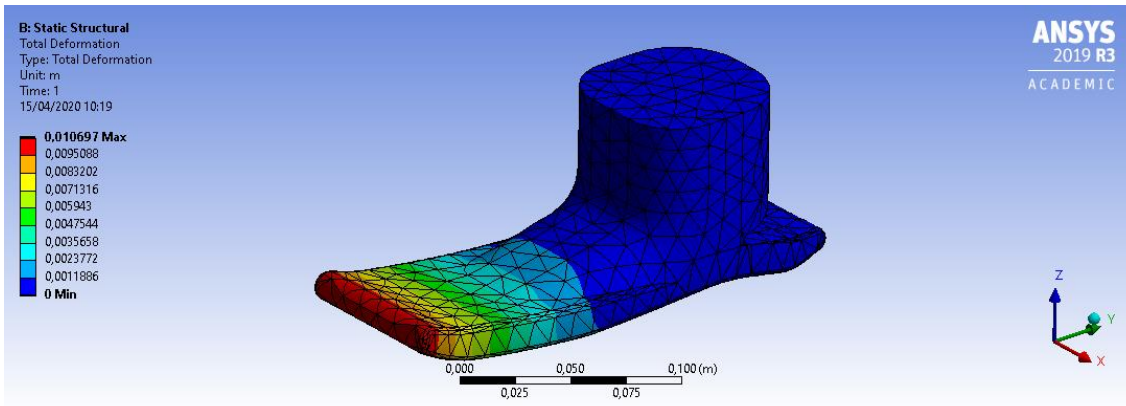




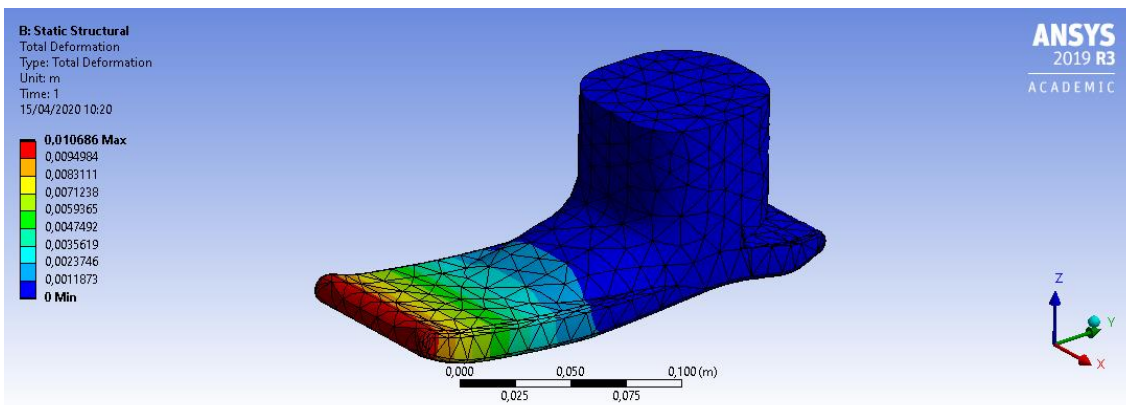
Element de mida 0.012m

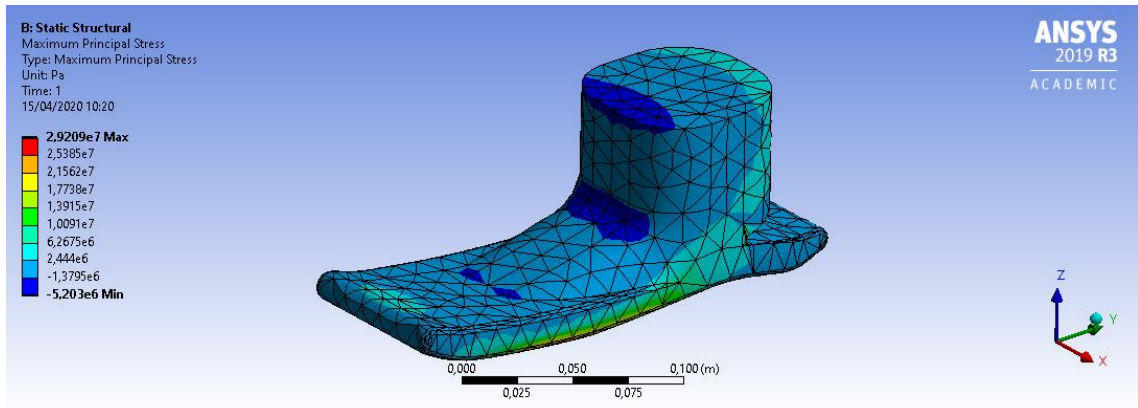


Element de mida 0.013m

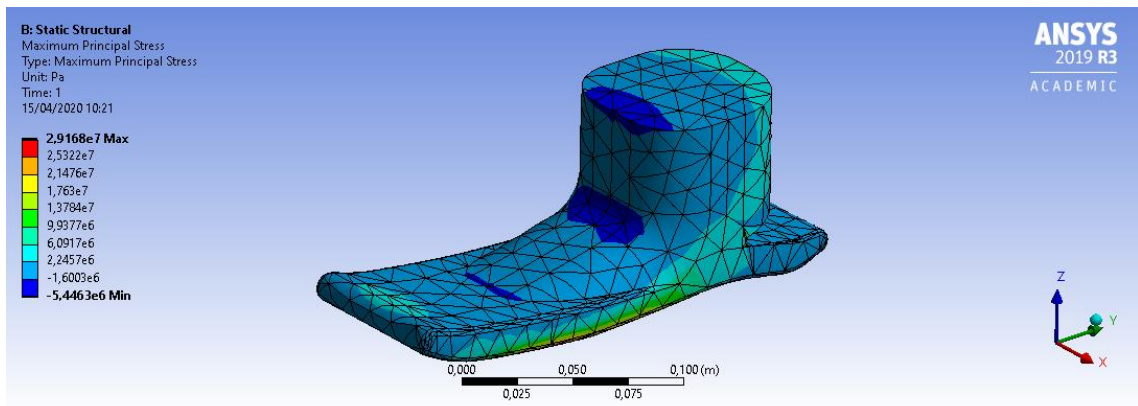
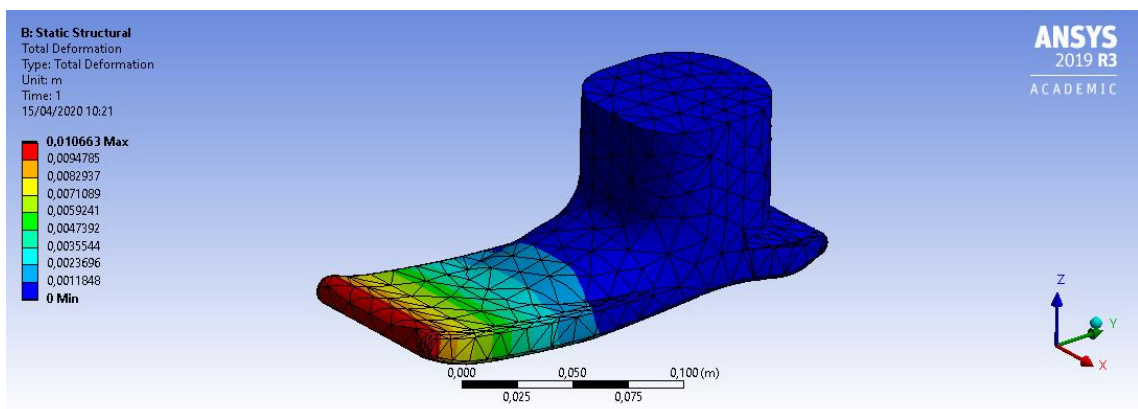


Element de mida 0.014m

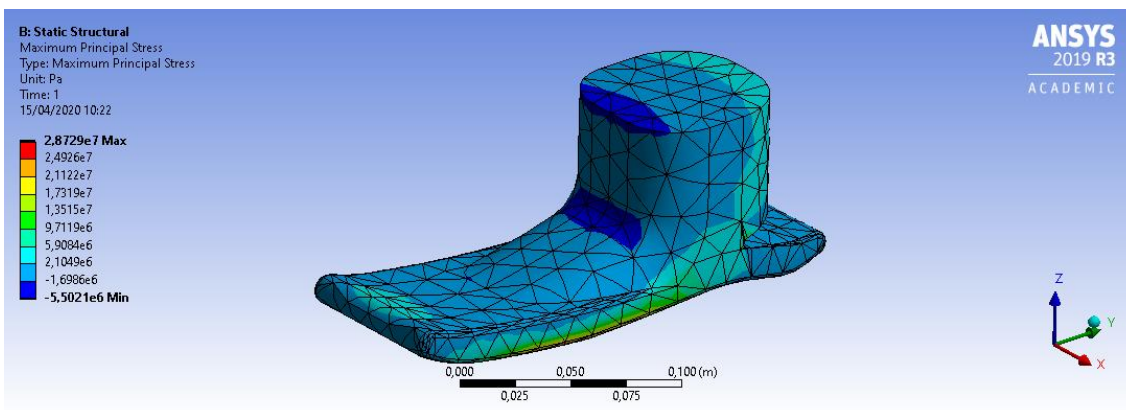
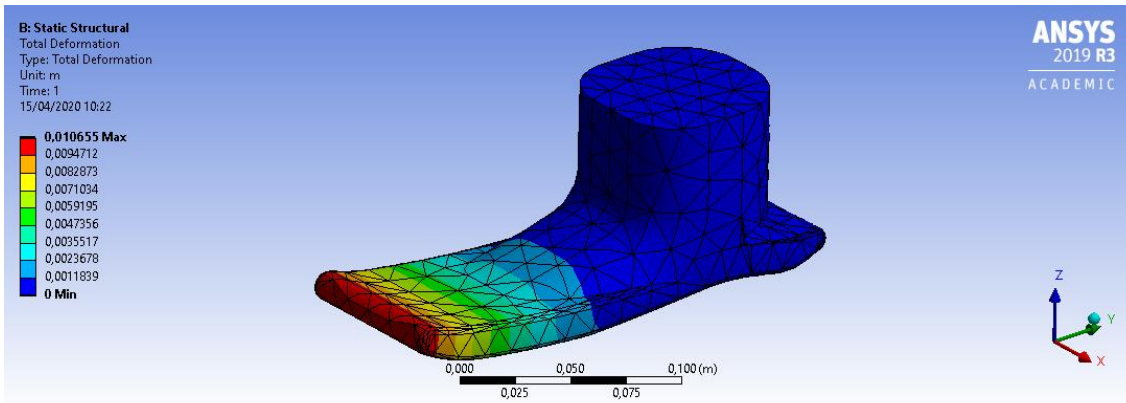




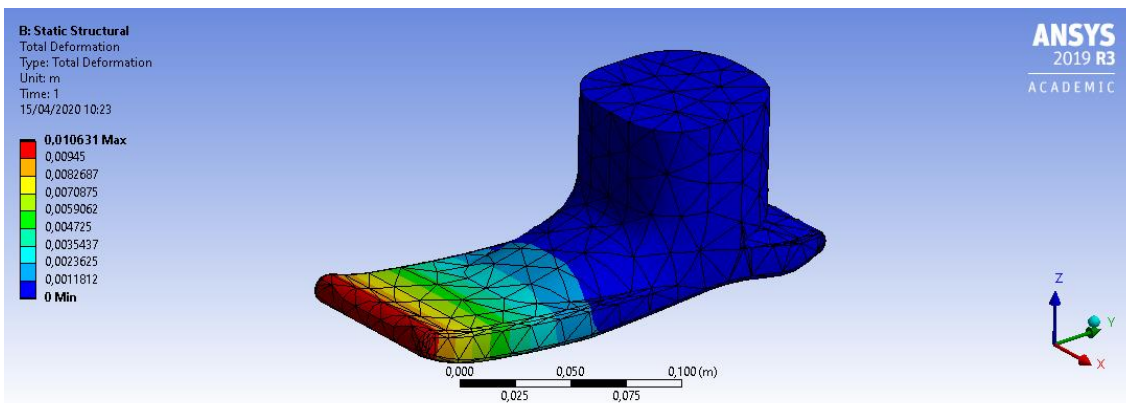
Element de mida 0.015m

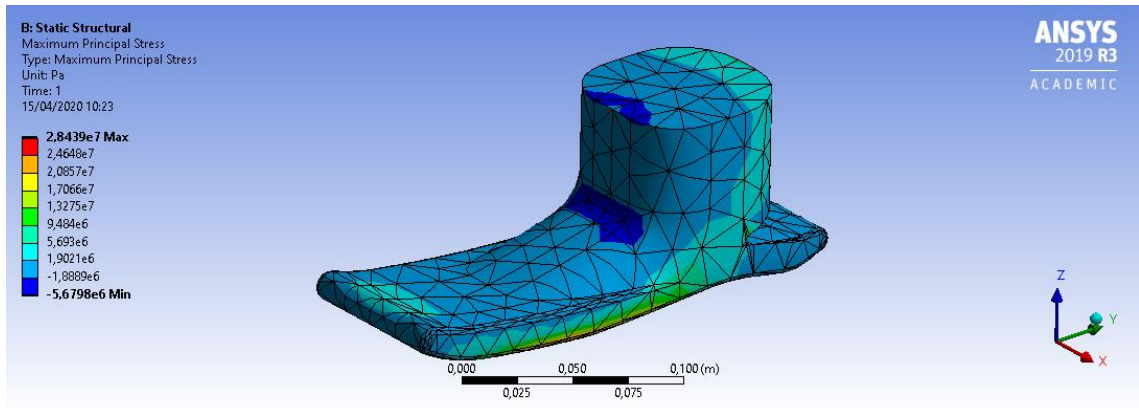


Element de mida 0.017m

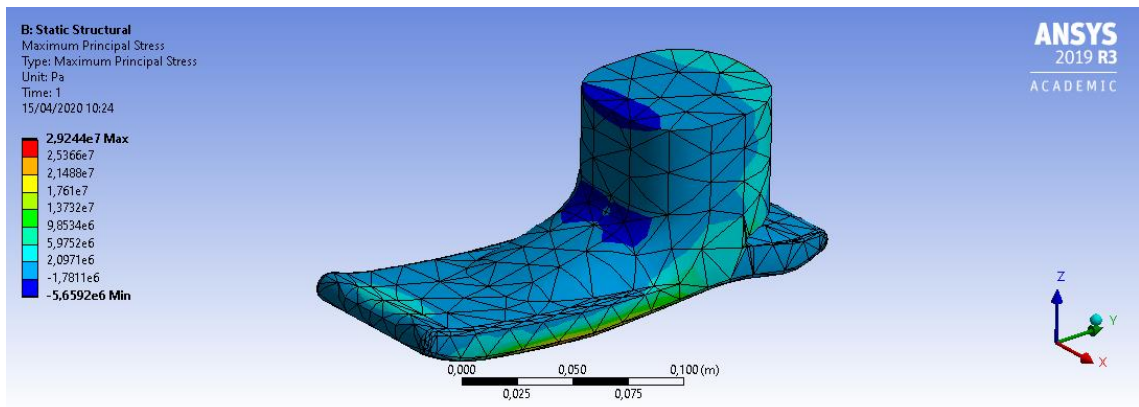
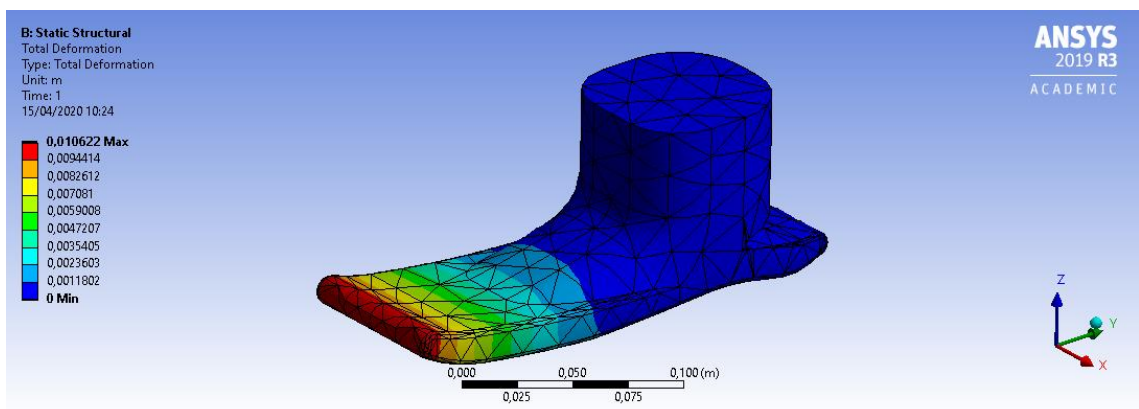


Element de mida 0.019m

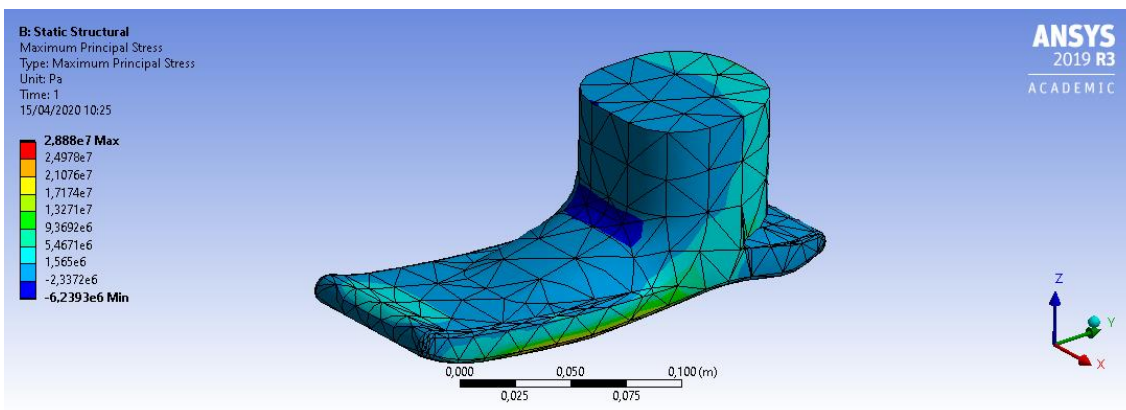
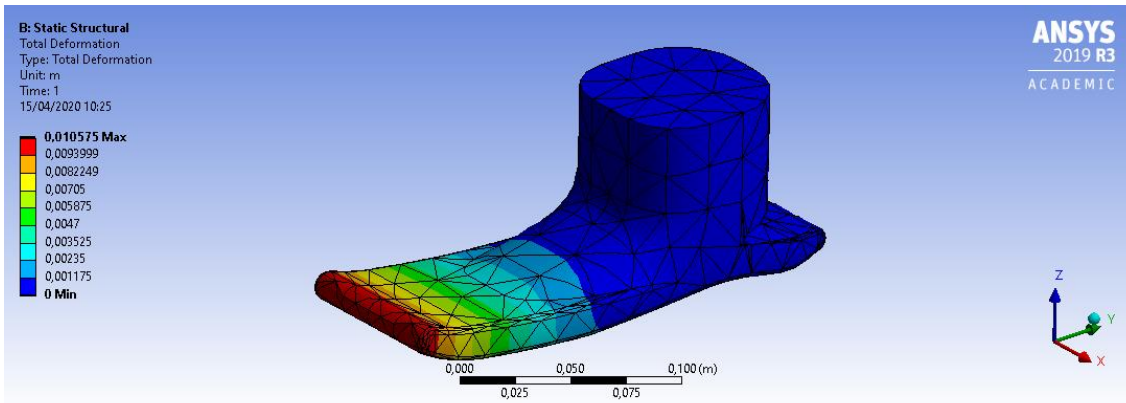




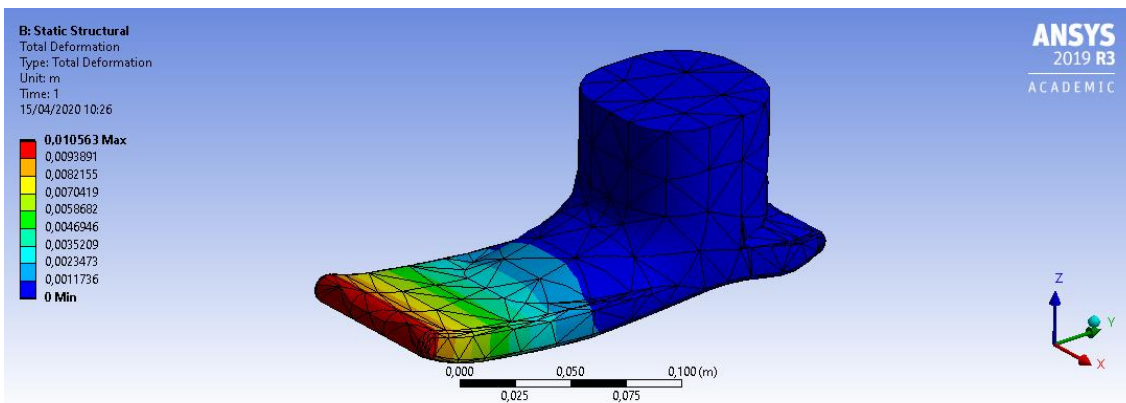
Element de mida 0.021m

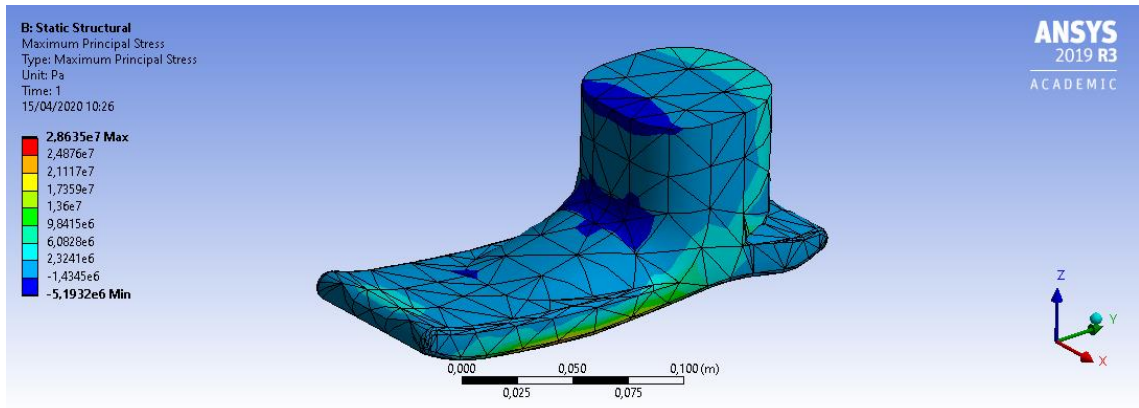


Element de mida 0.023m

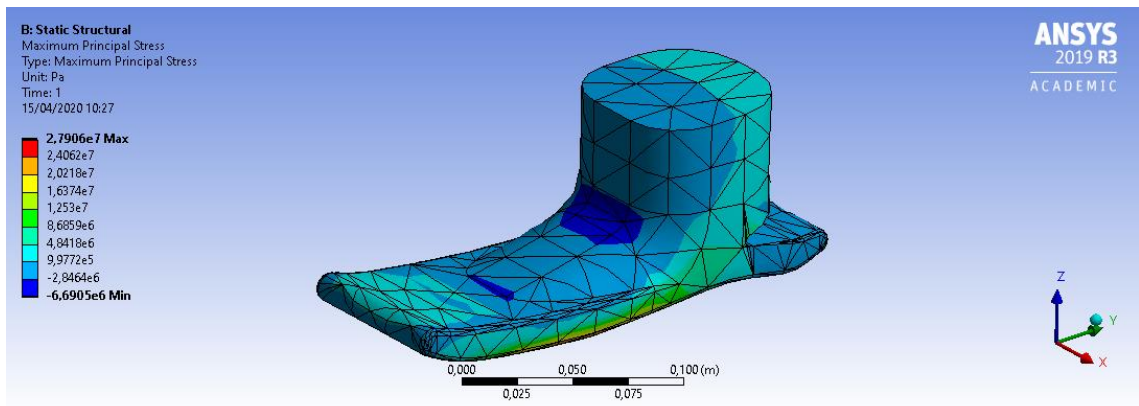
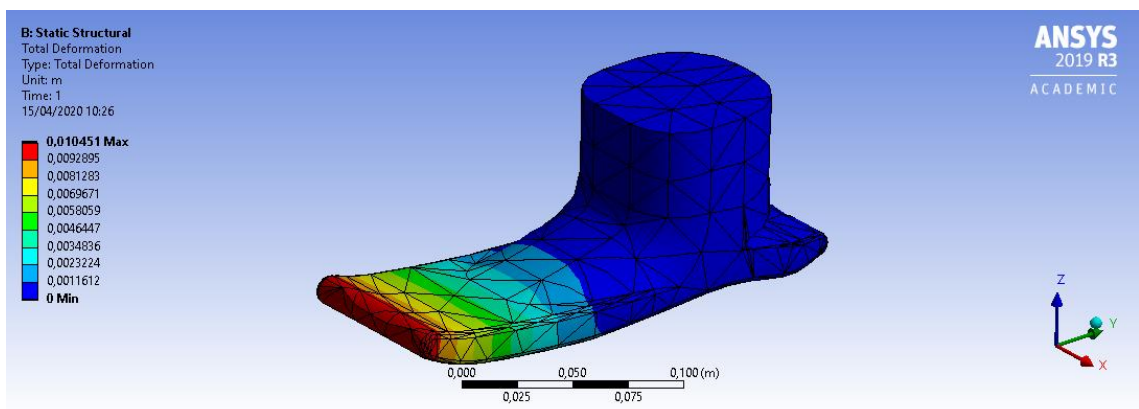


Element de mida 0.025m

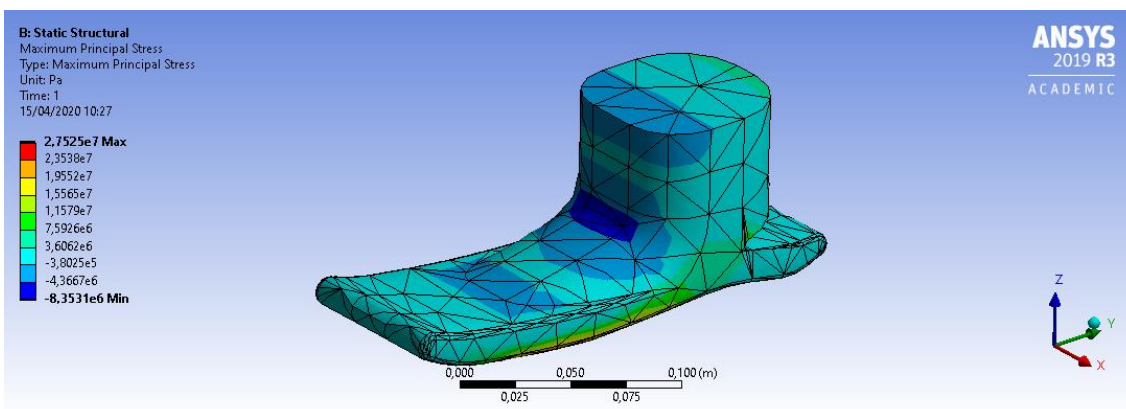
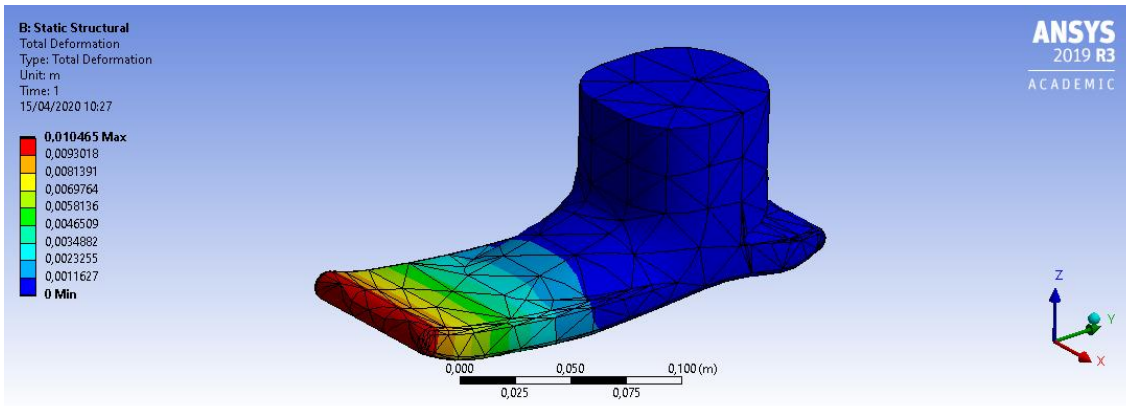




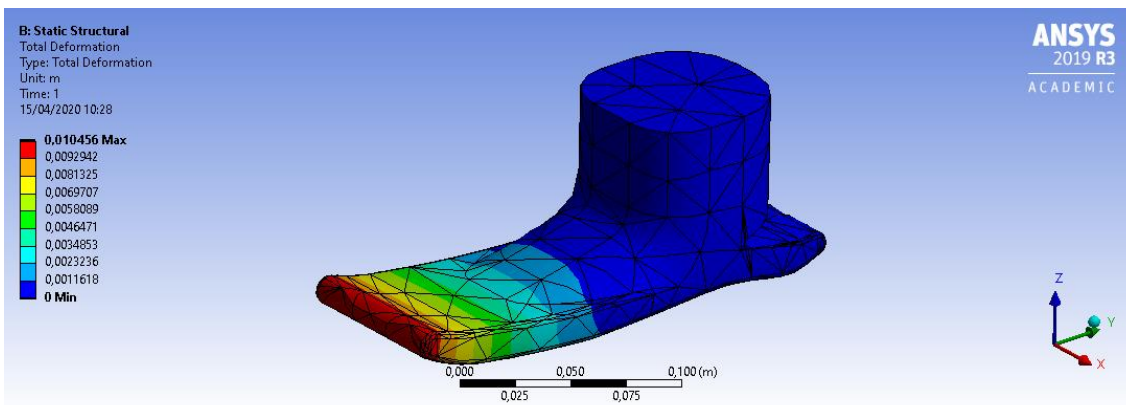
Element de mida 0.027m

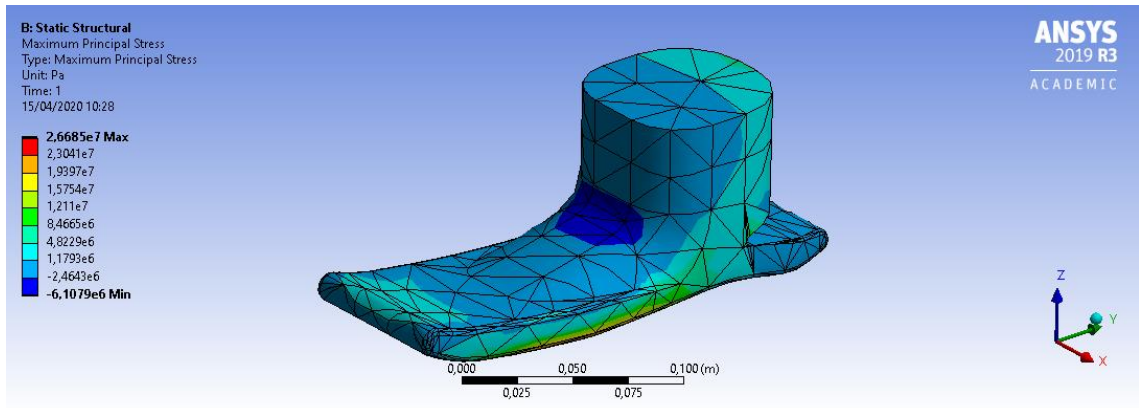


Element de mida 0.029m

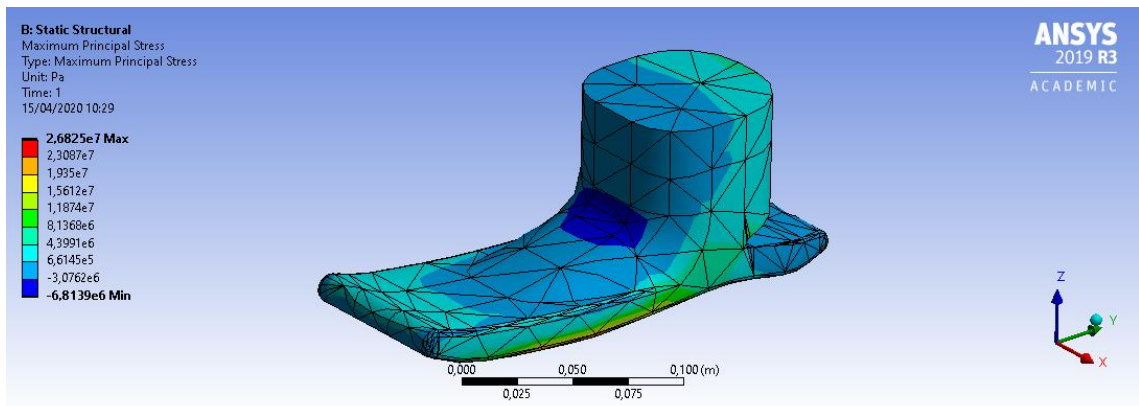
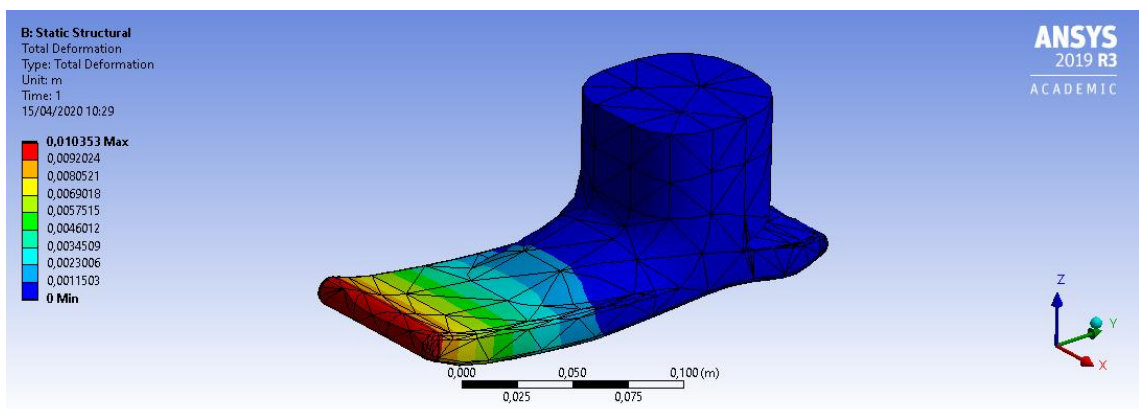


Element de mida 0.031m

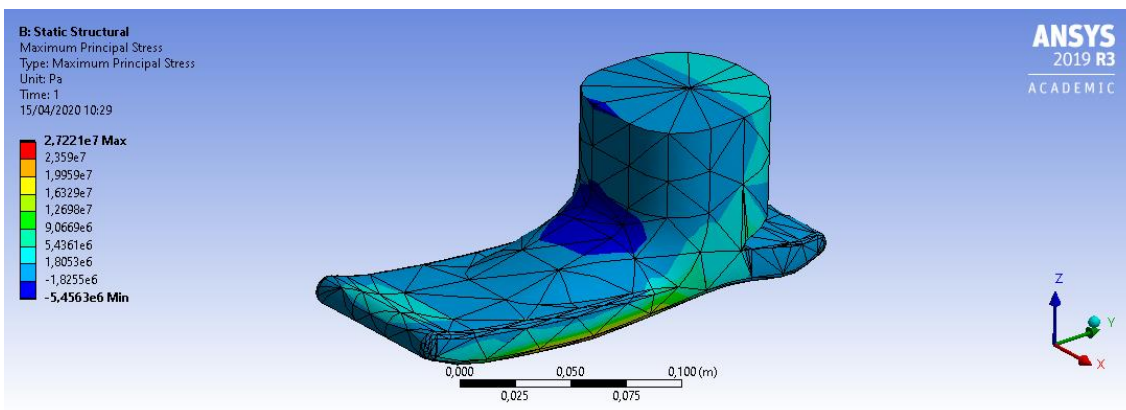
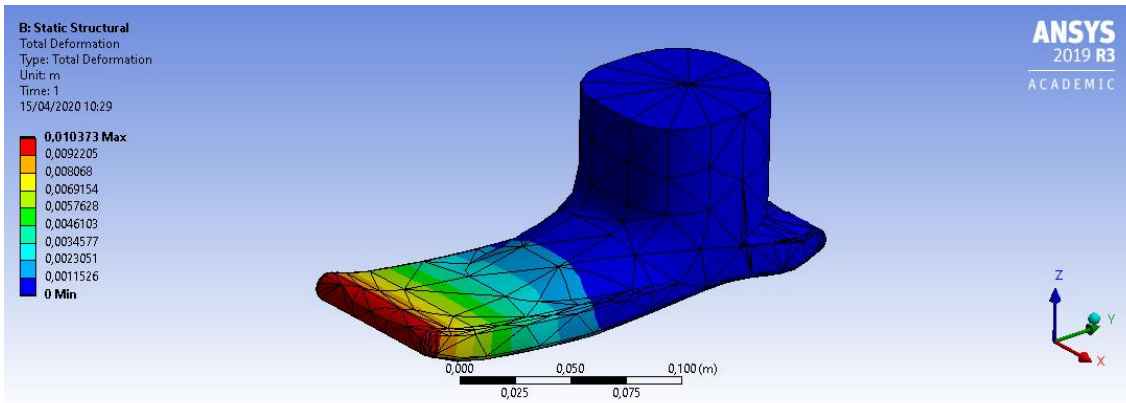




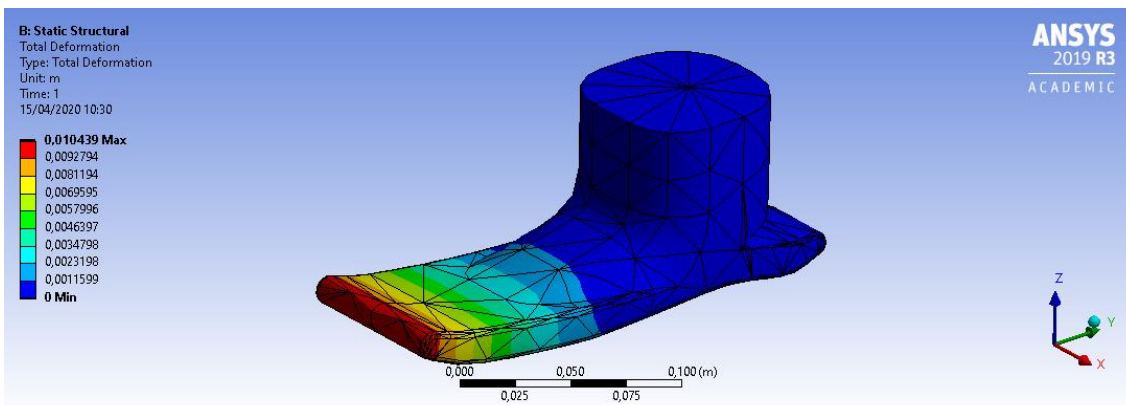
Element de mida 0.033m

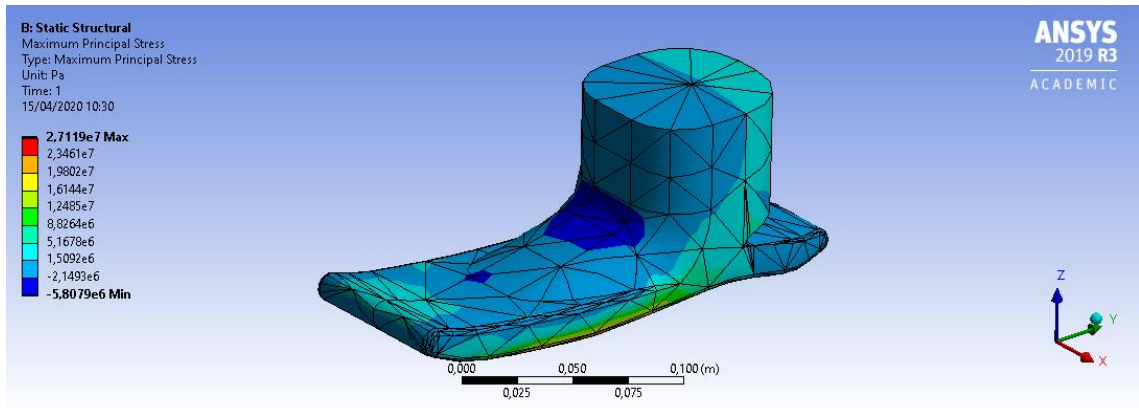


Element de mida 0.035m

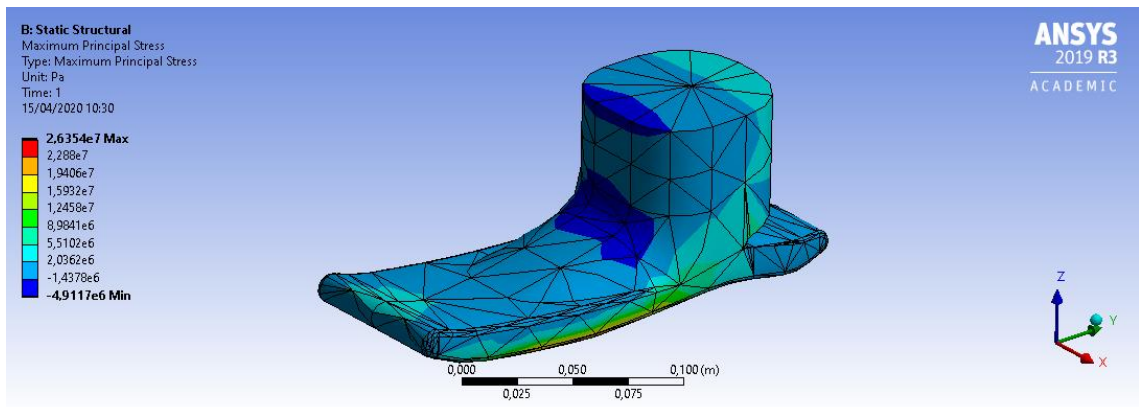
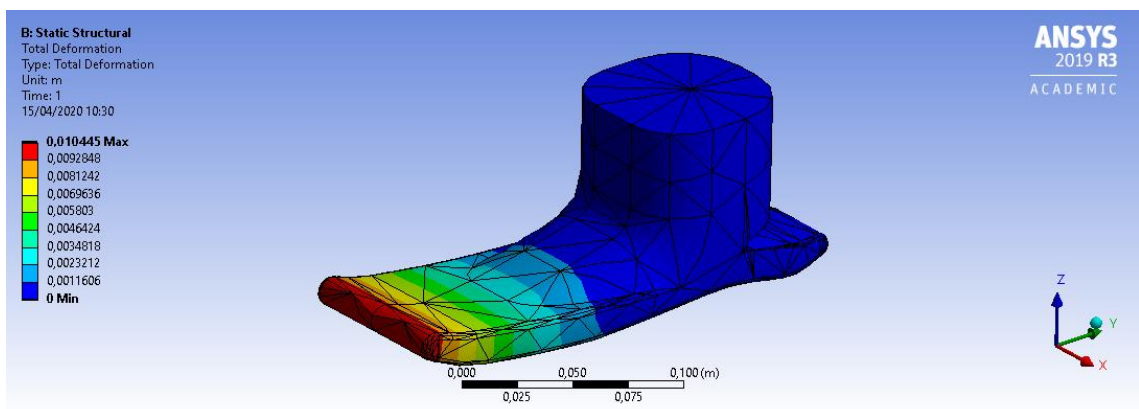


Element de mida 0.037m

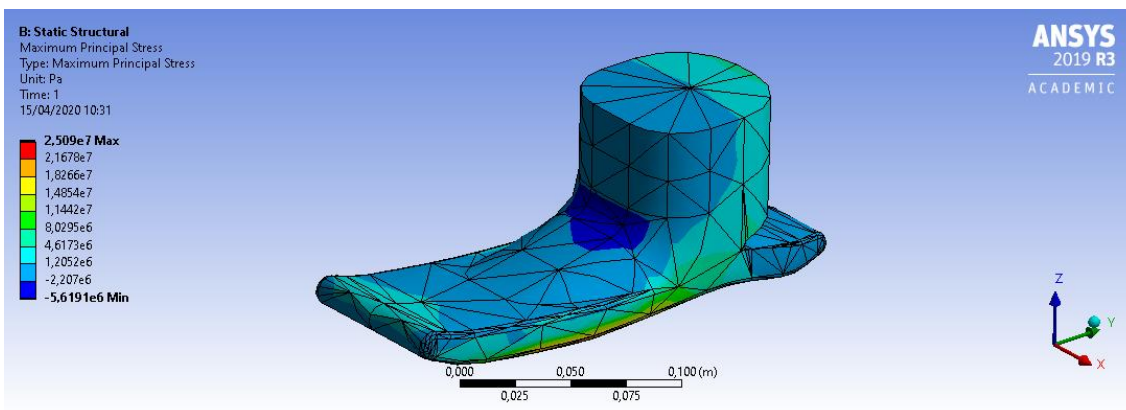
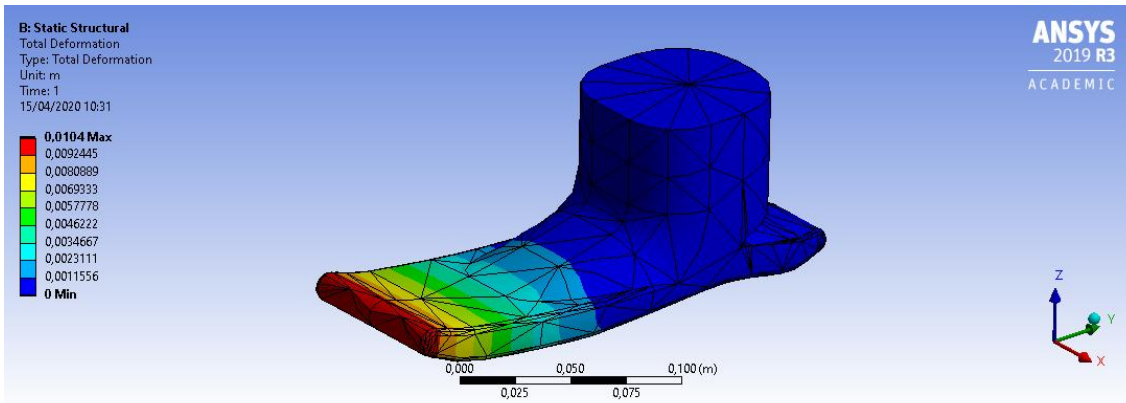




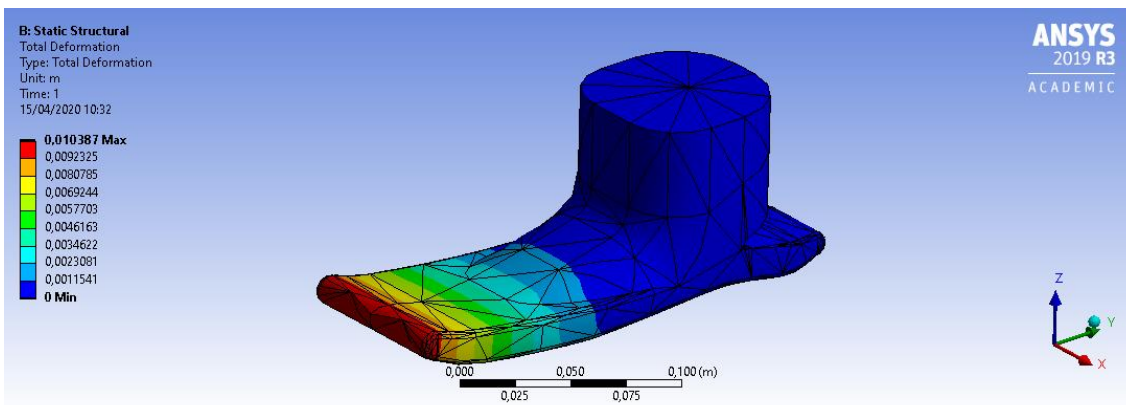
Element de mida 0.039m

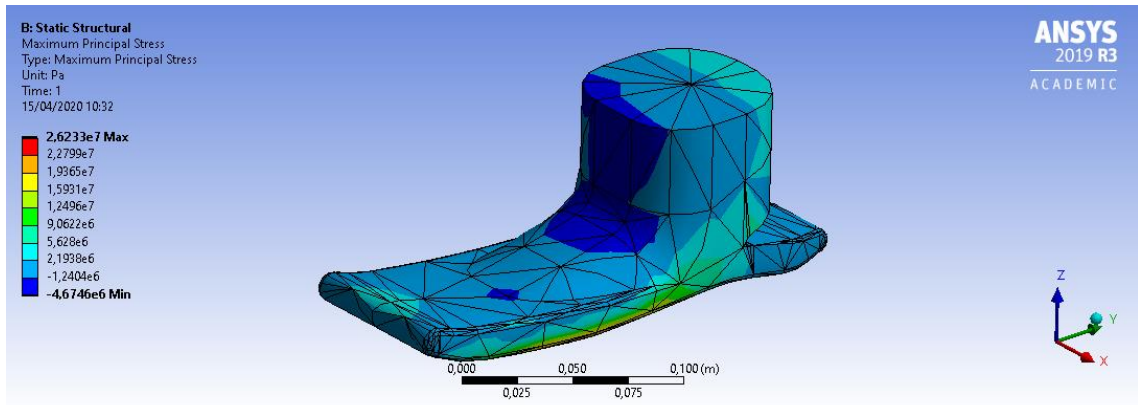


Element de mida 0.041m

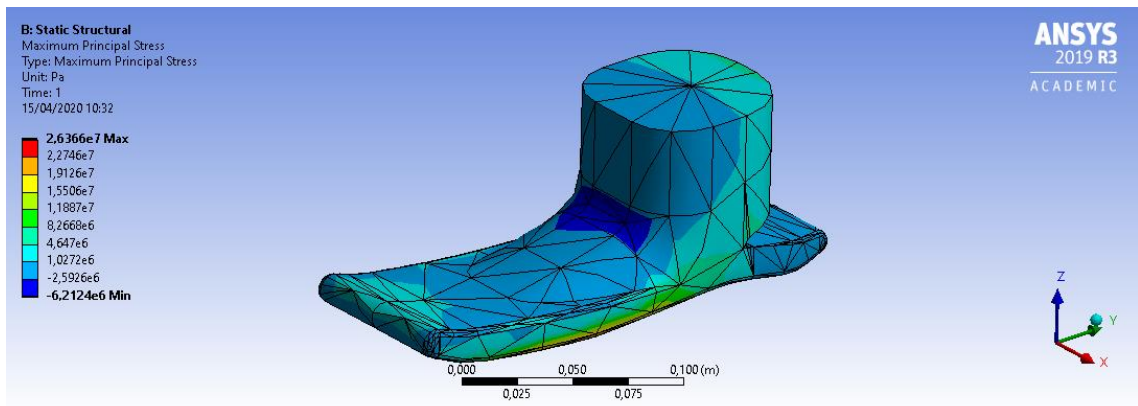
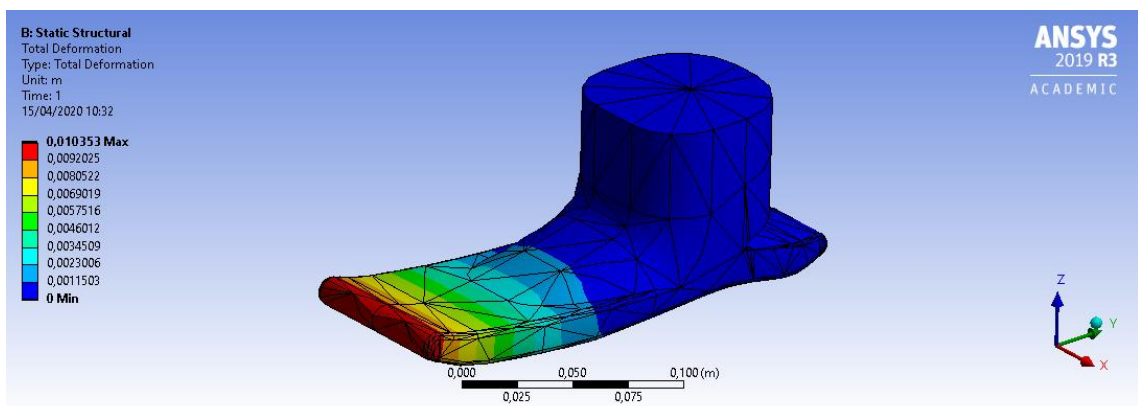


Element de mida 0.043m

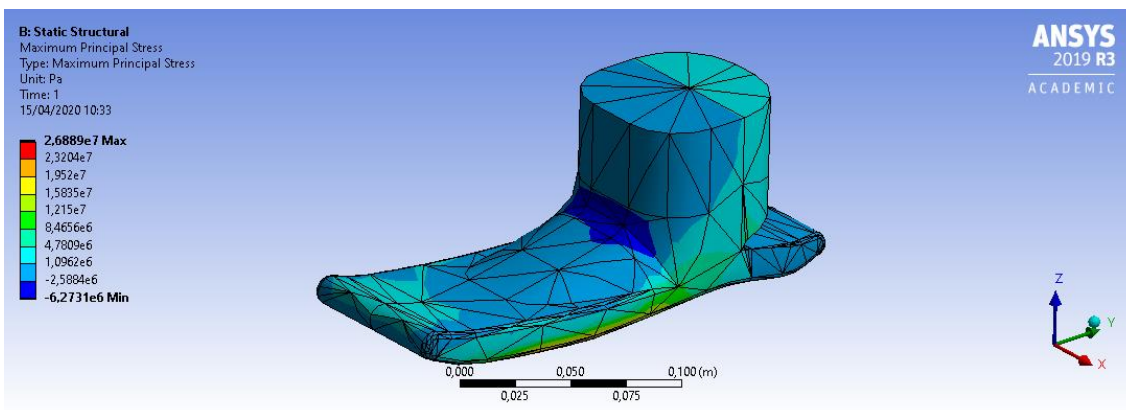
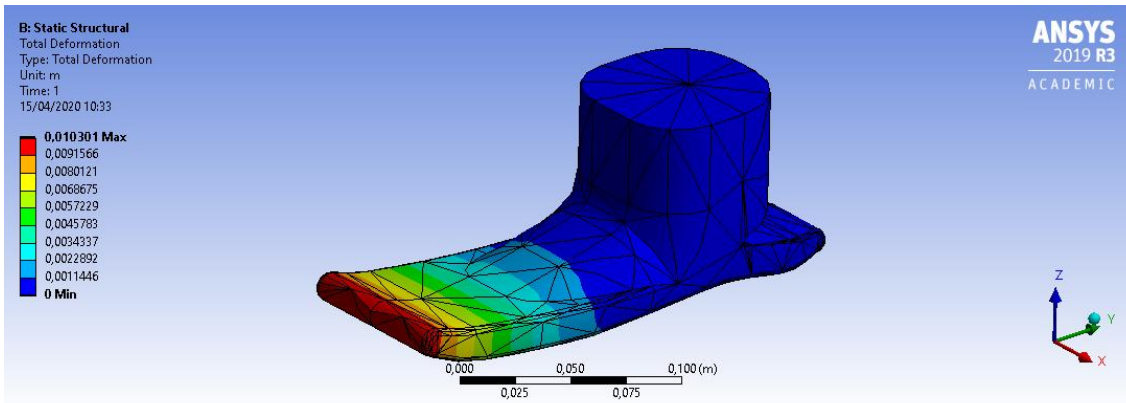




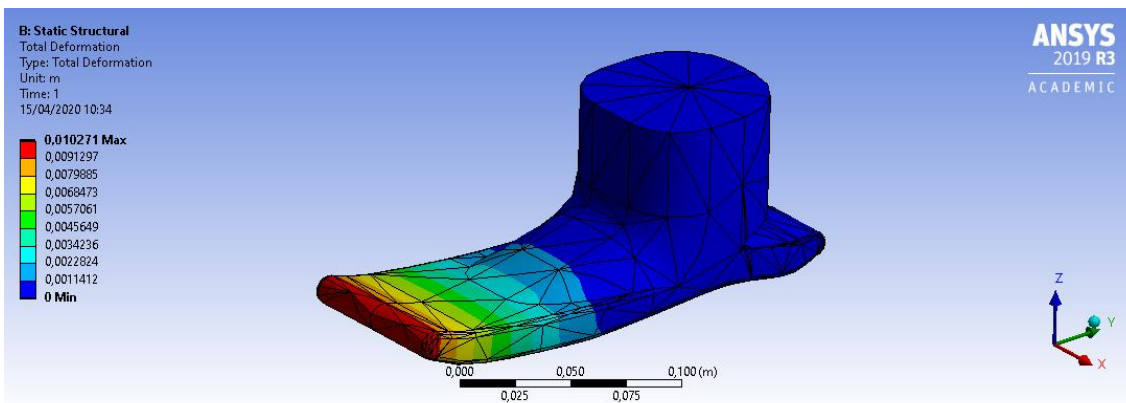
Element de mida 0.045m

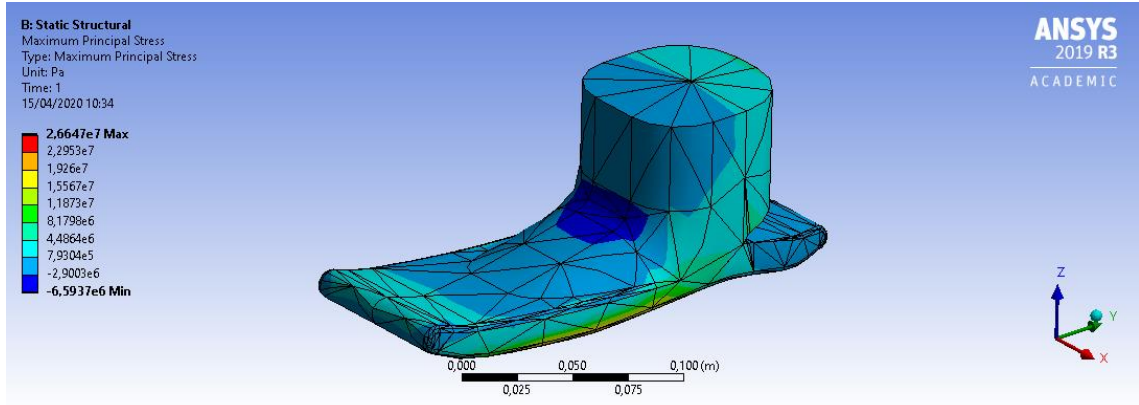


Element de mida 0.047m



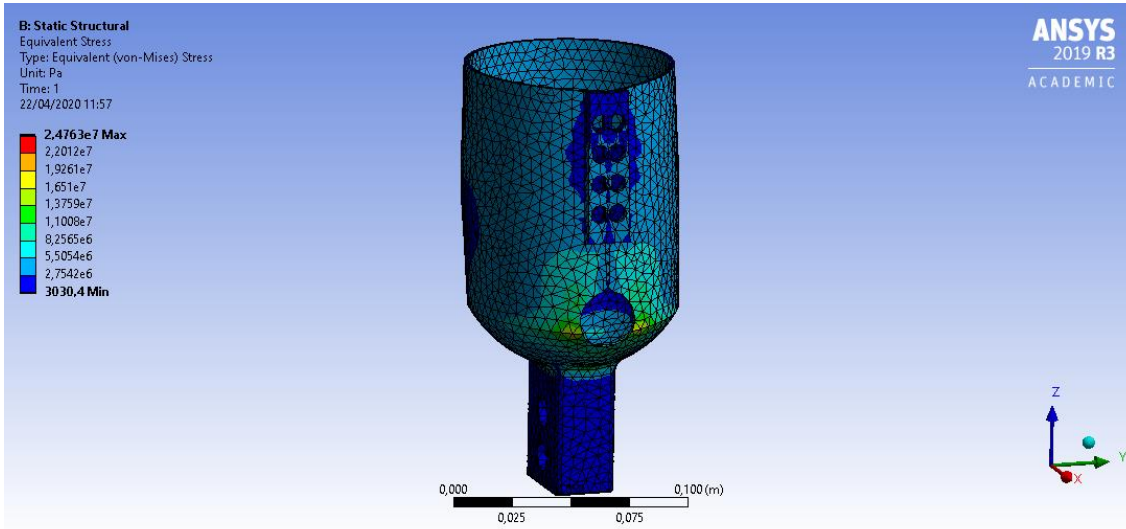
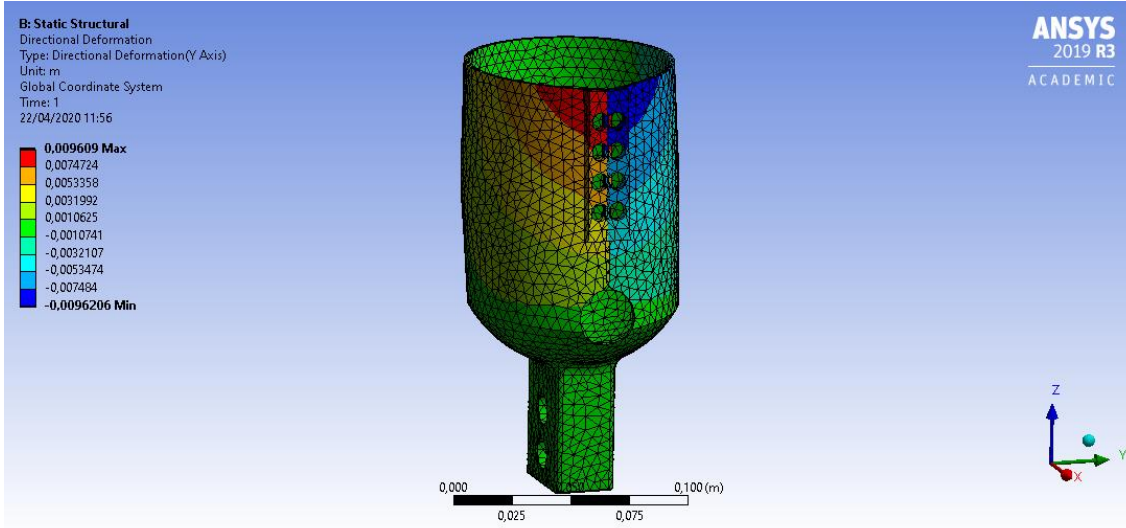
Element de mida 0.049m



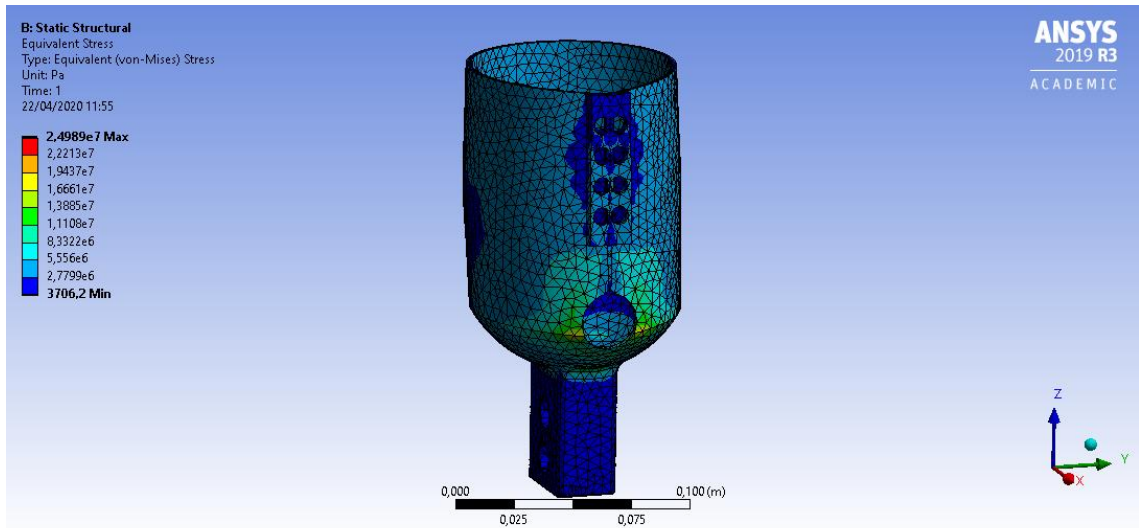
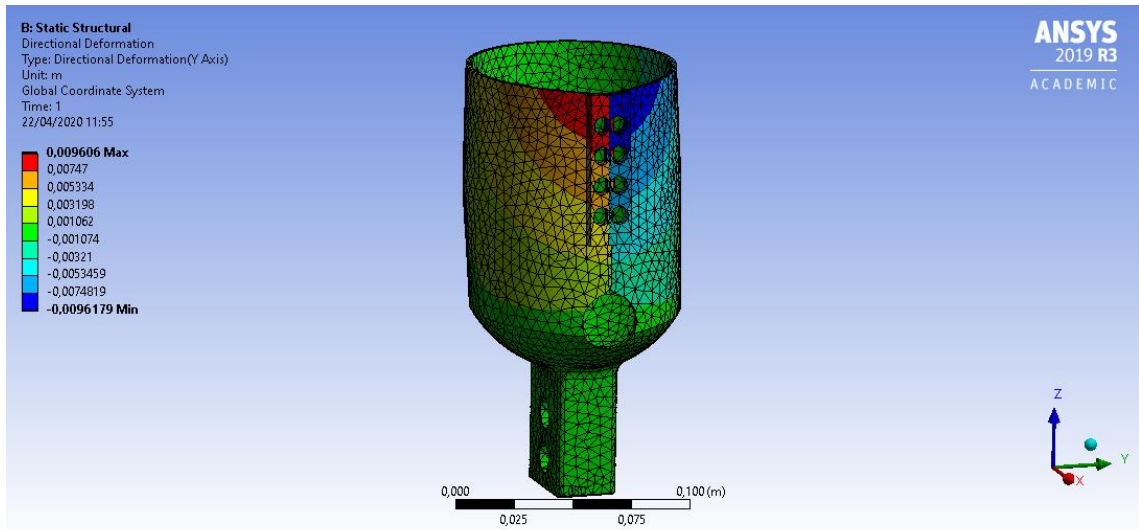


Annex 3

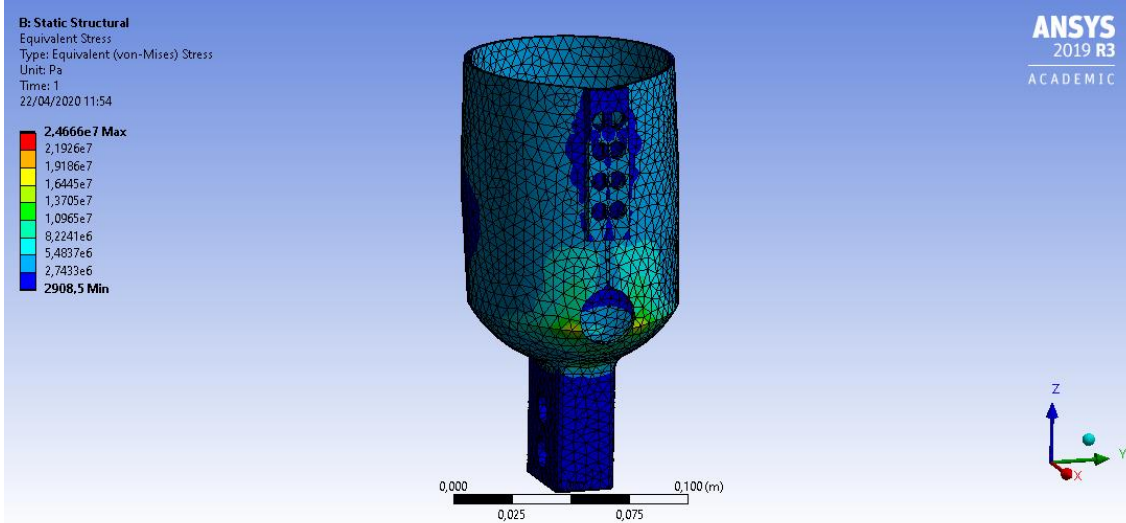
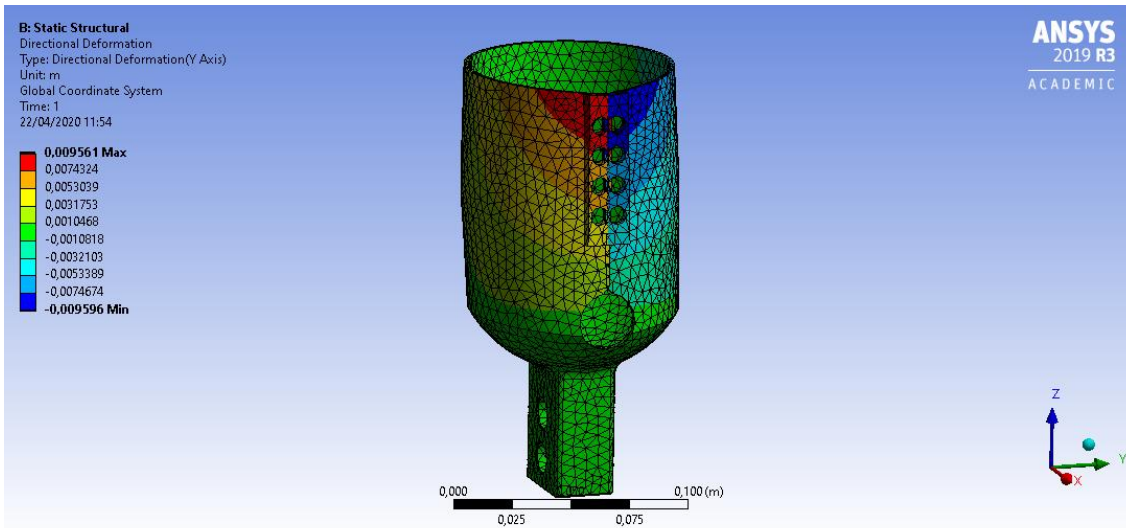
Element de mida 4,7mm



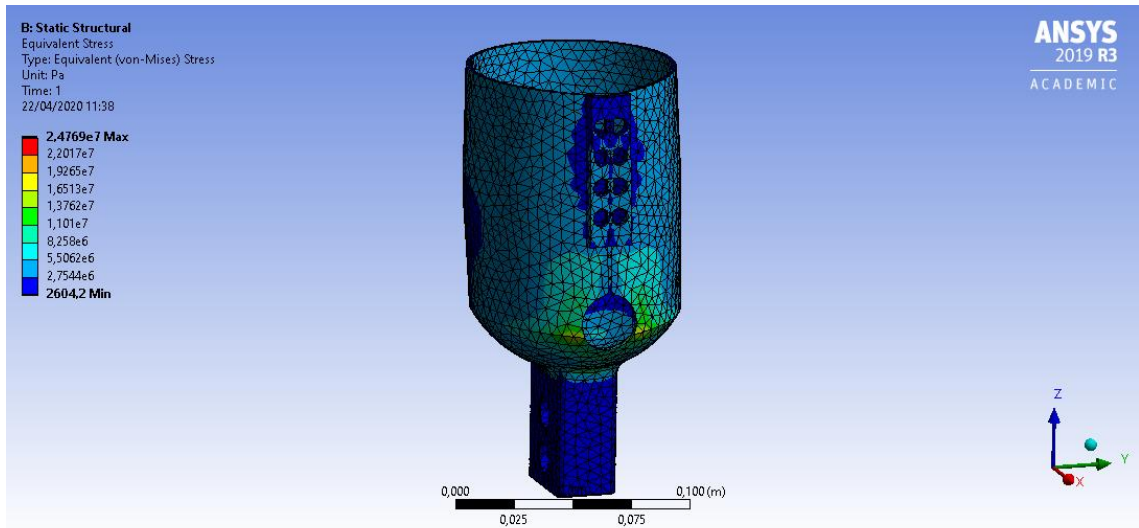
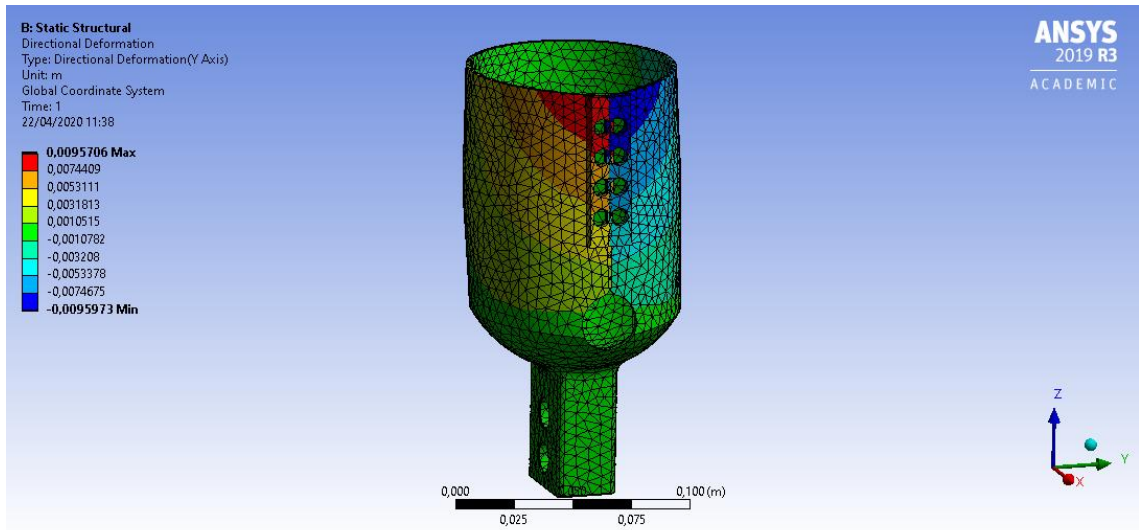
Element de mida 4,8mm



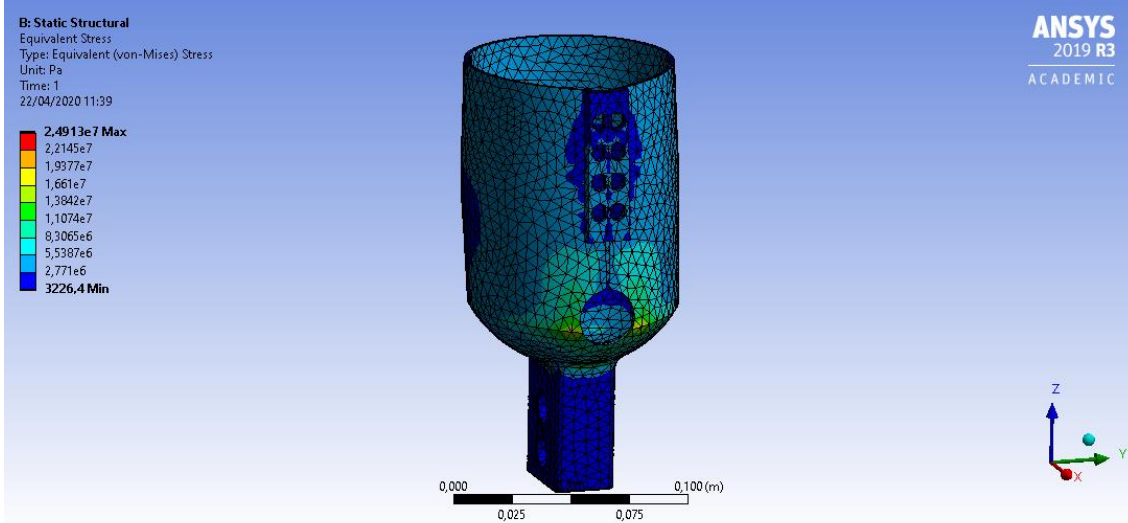
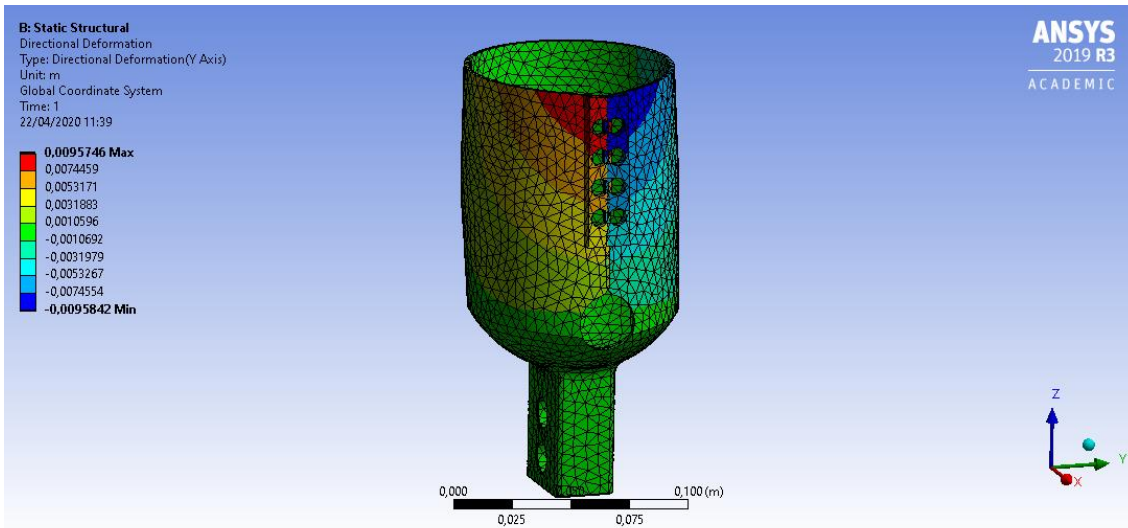
Element de mida 4,9mm



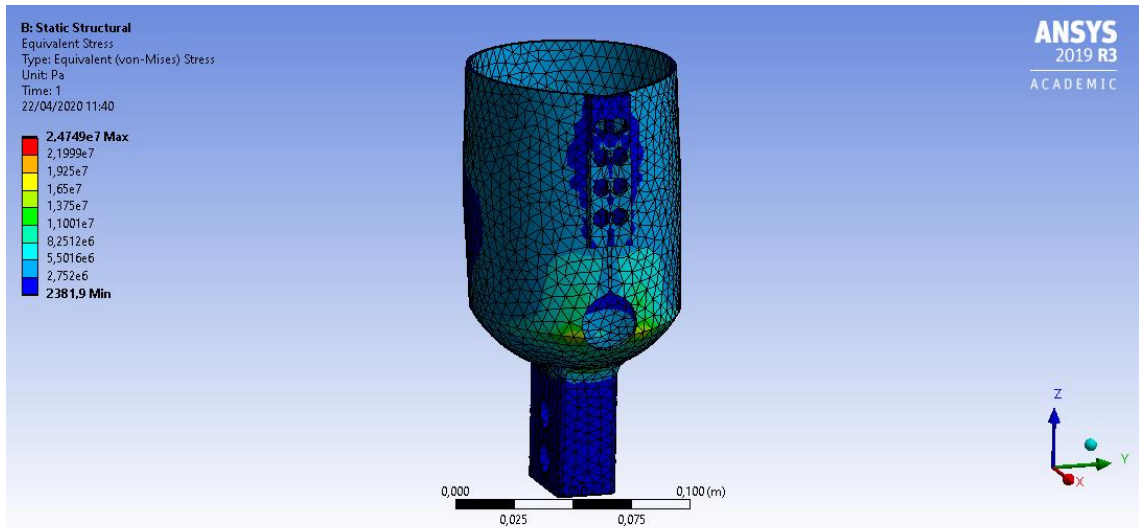
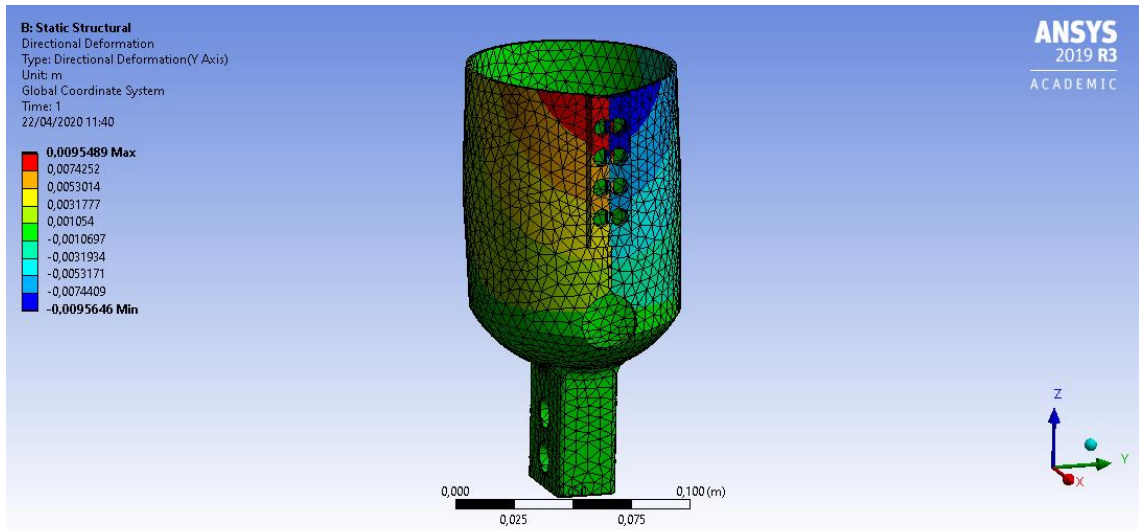
Element de mida 5mm



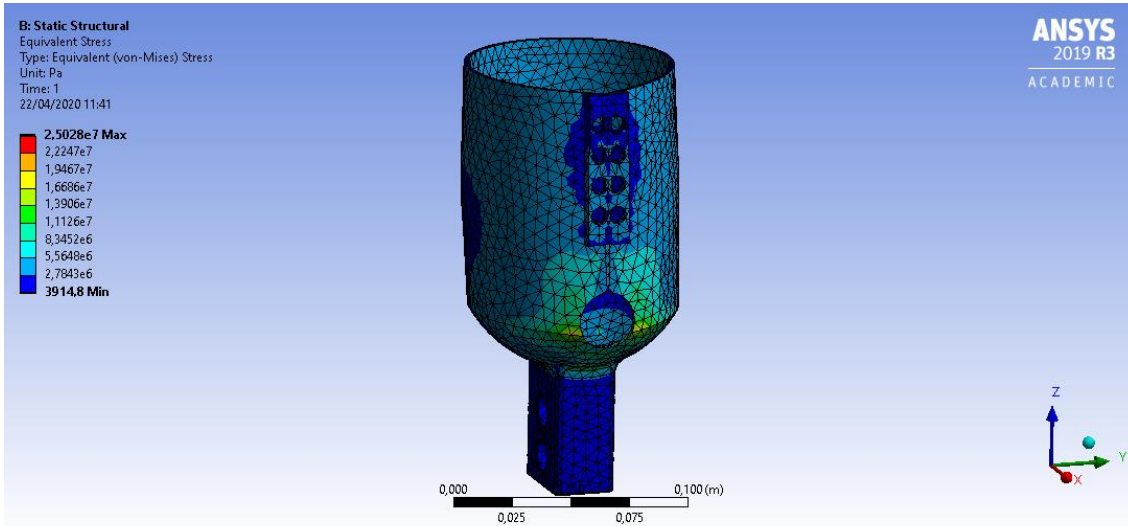
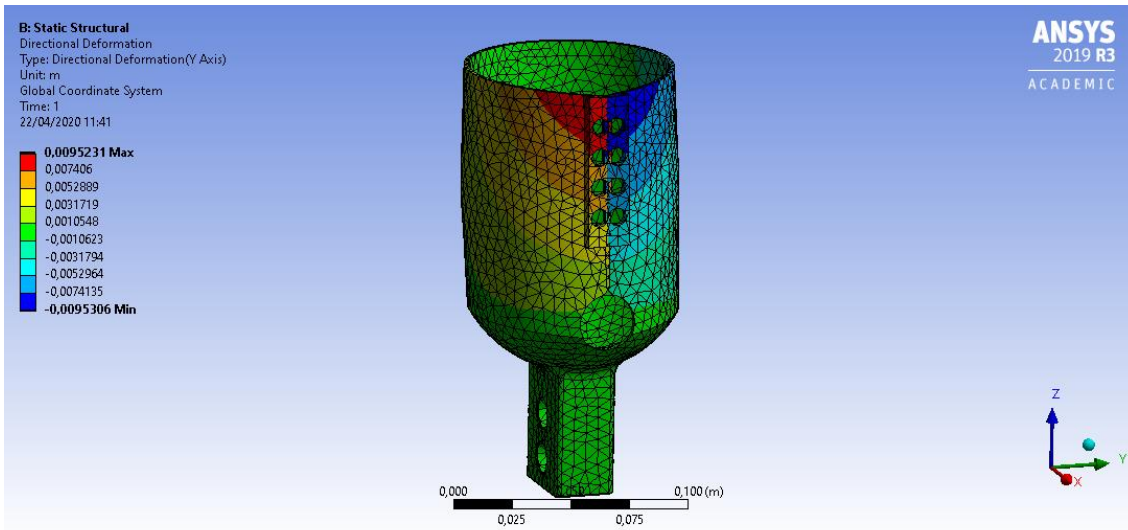
Element de mida 5,1mm



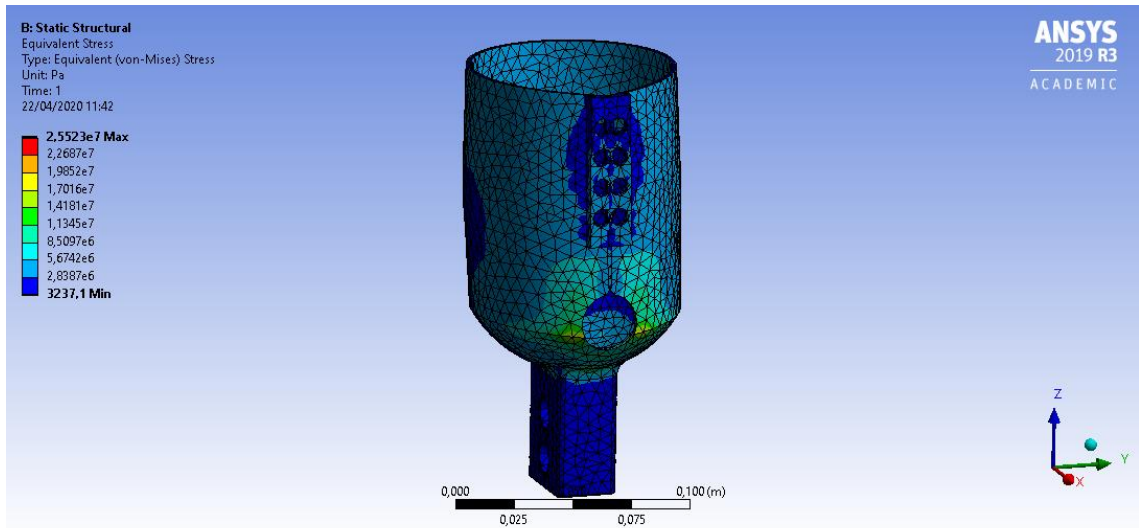
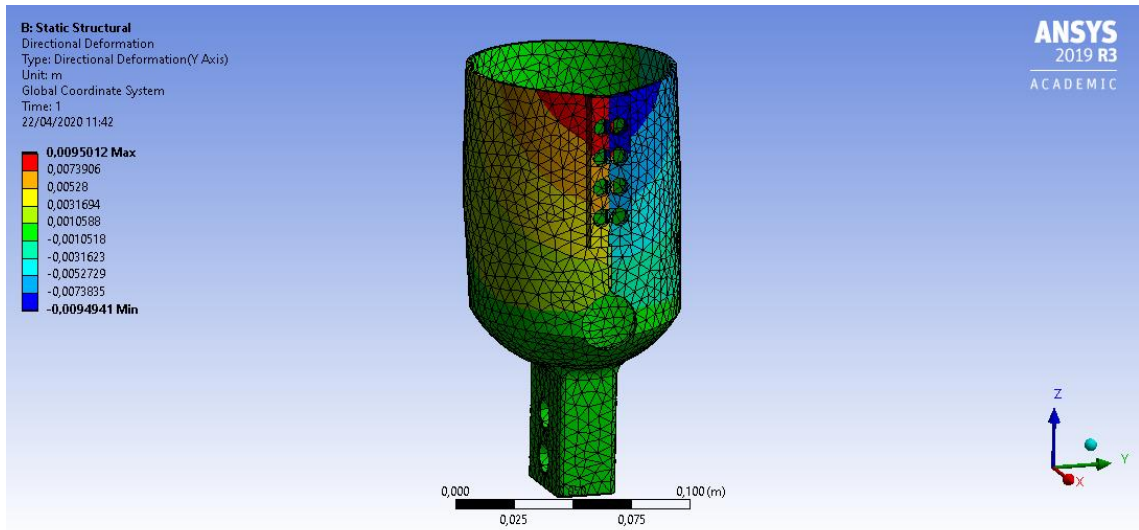
Element de mida 5,2mm



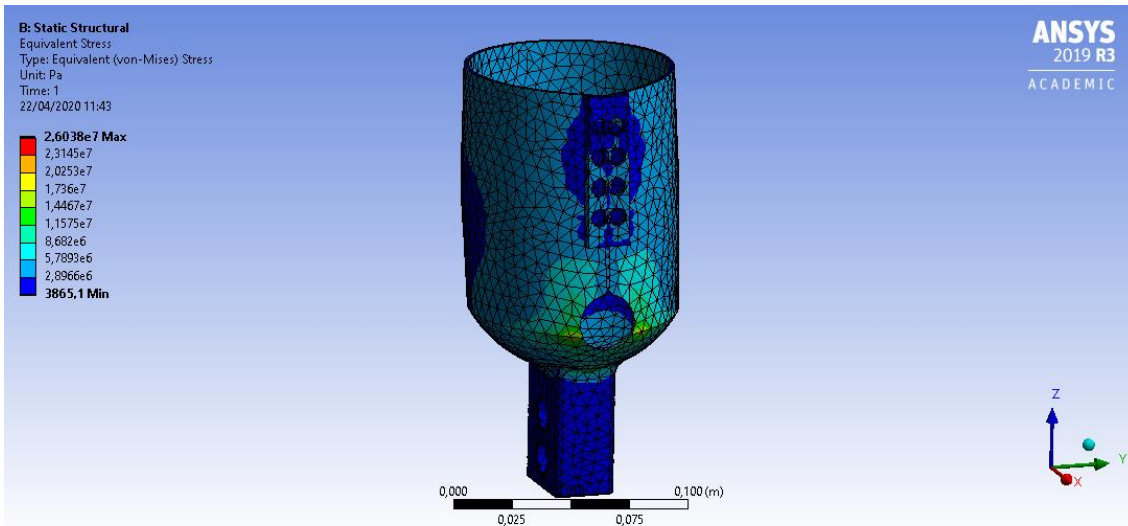
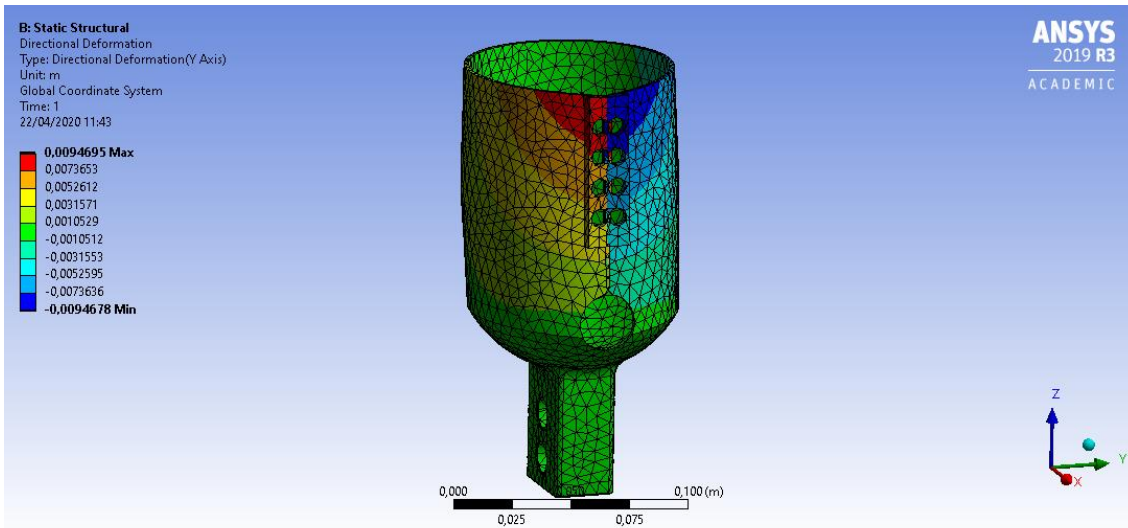
Element de mida 5,3mm



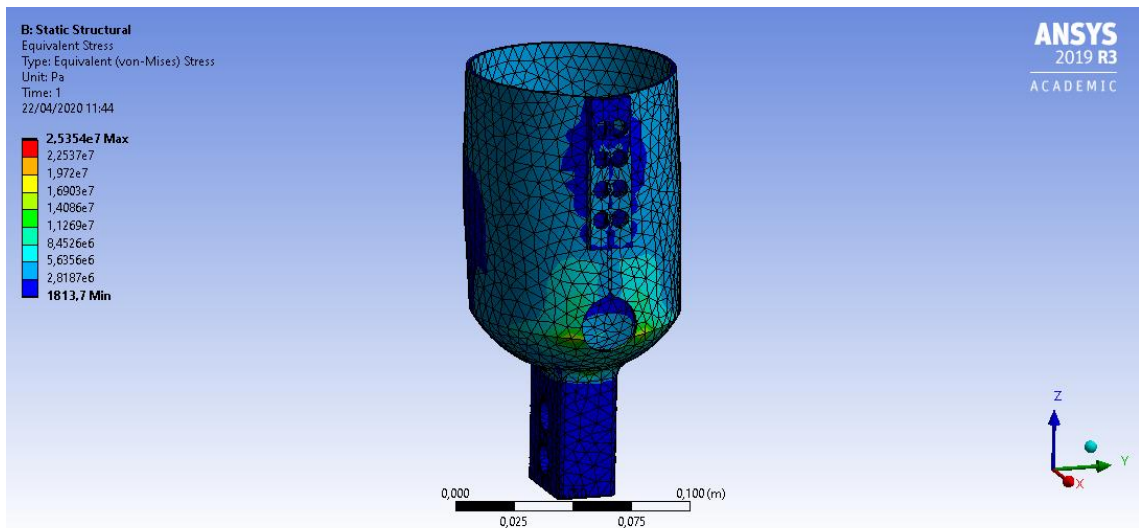
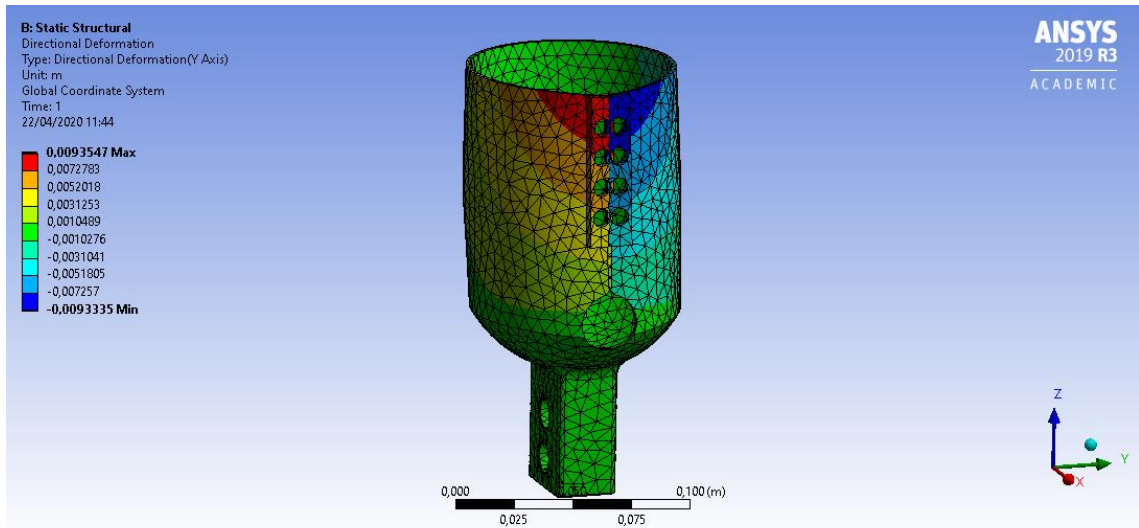
Element de mida 5,4mm



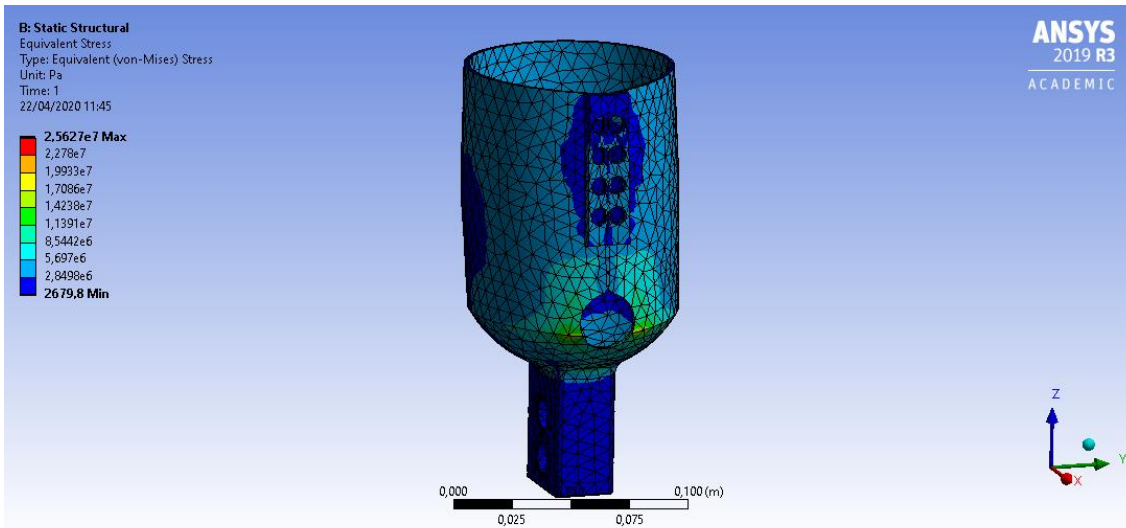
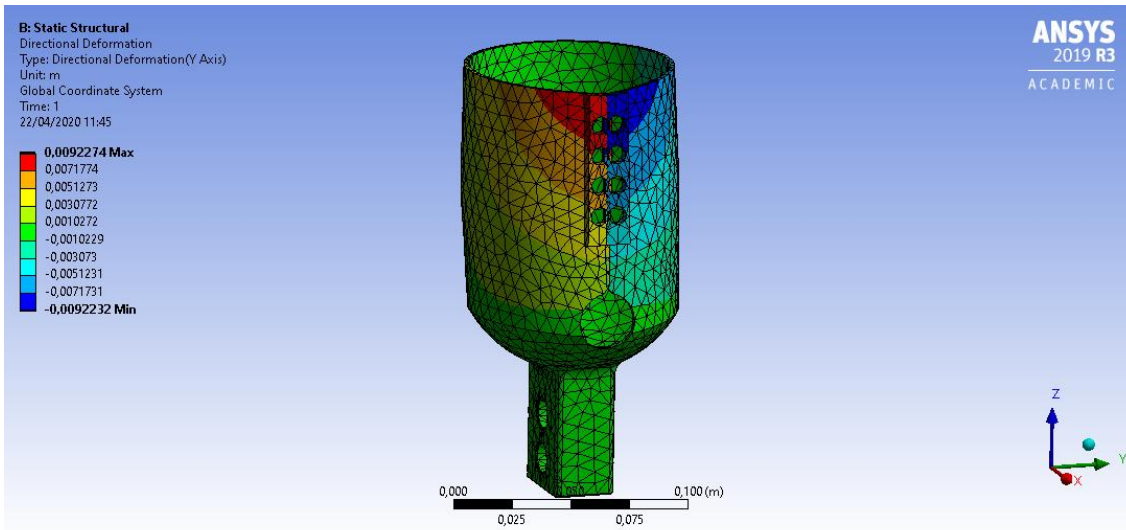
Element de mida 5,5mm



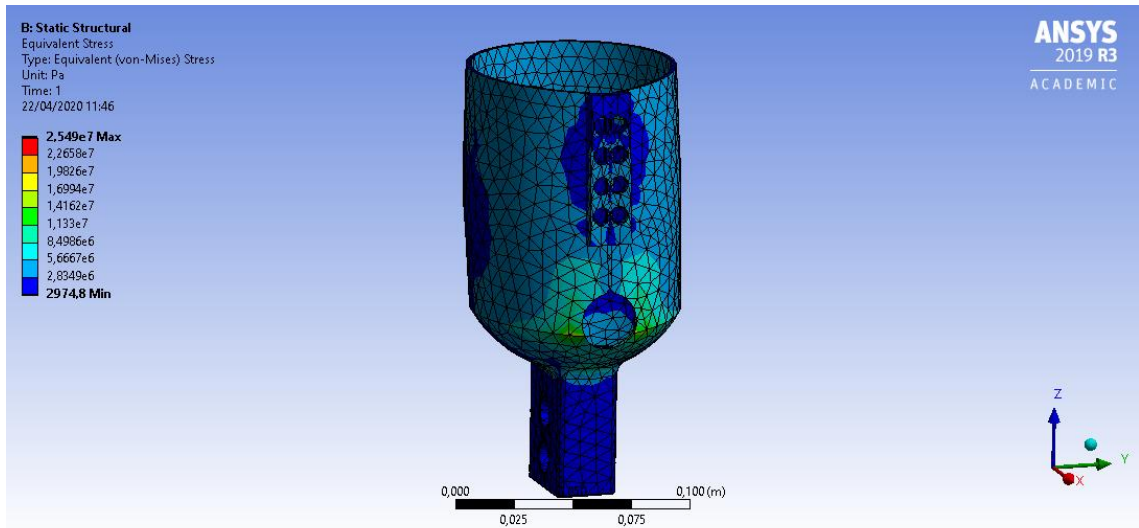
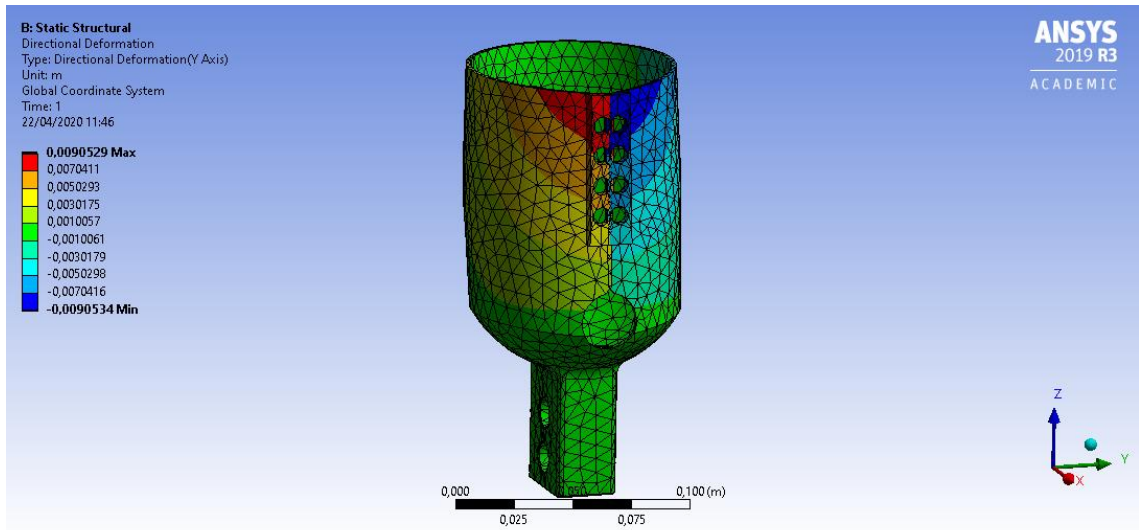
Element de mida 6mm



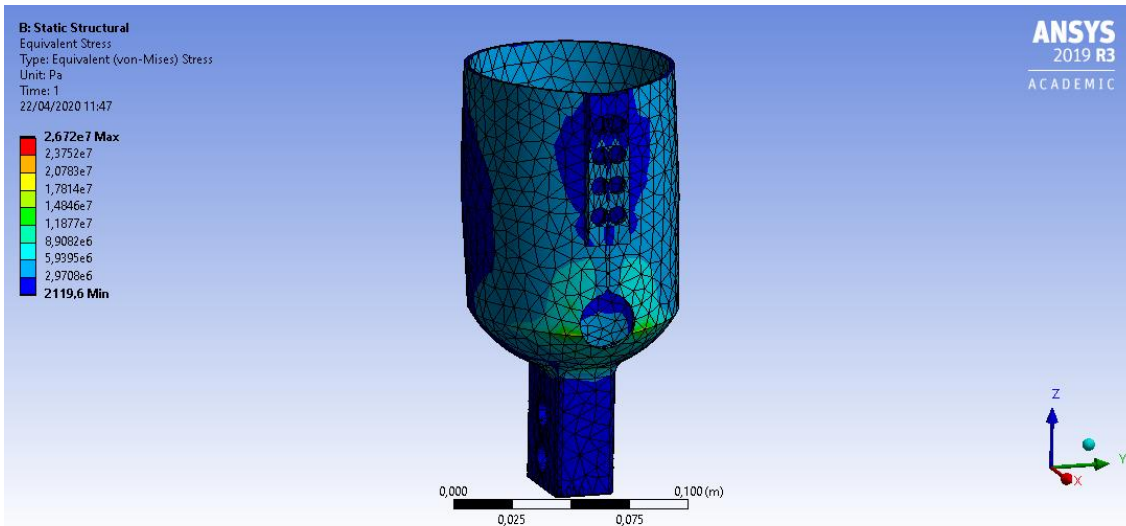
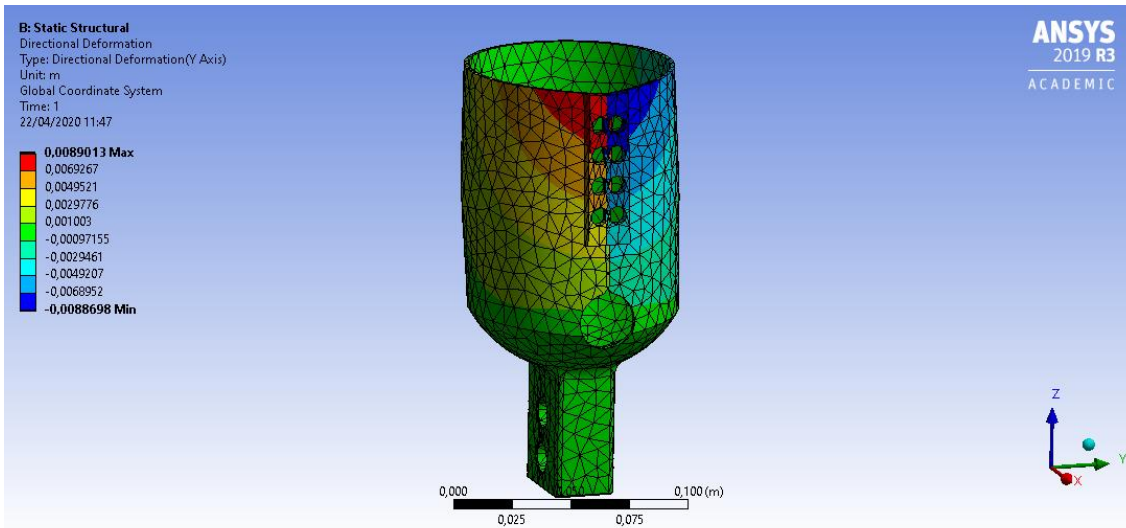
Element de mida 6,5mm



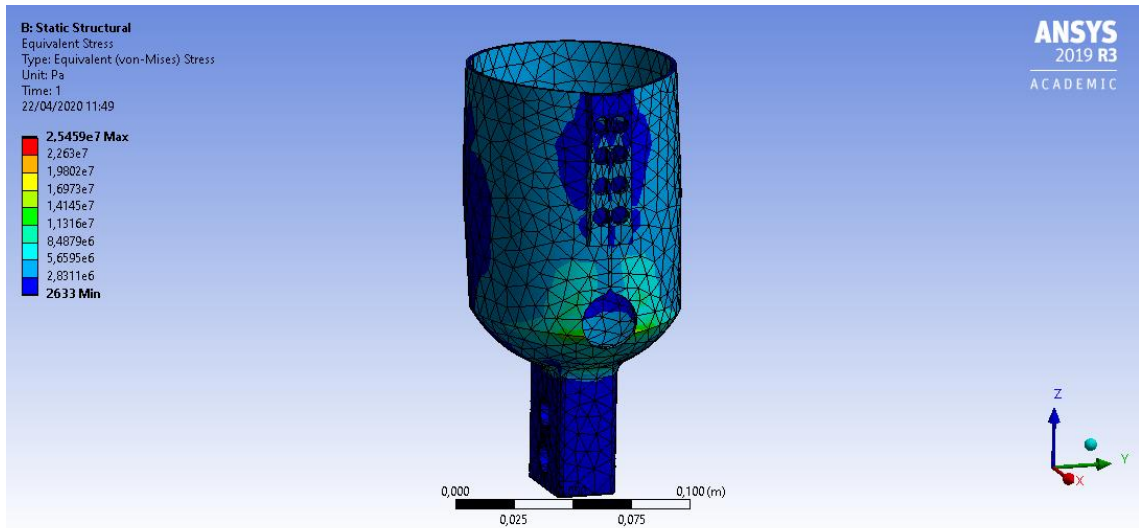
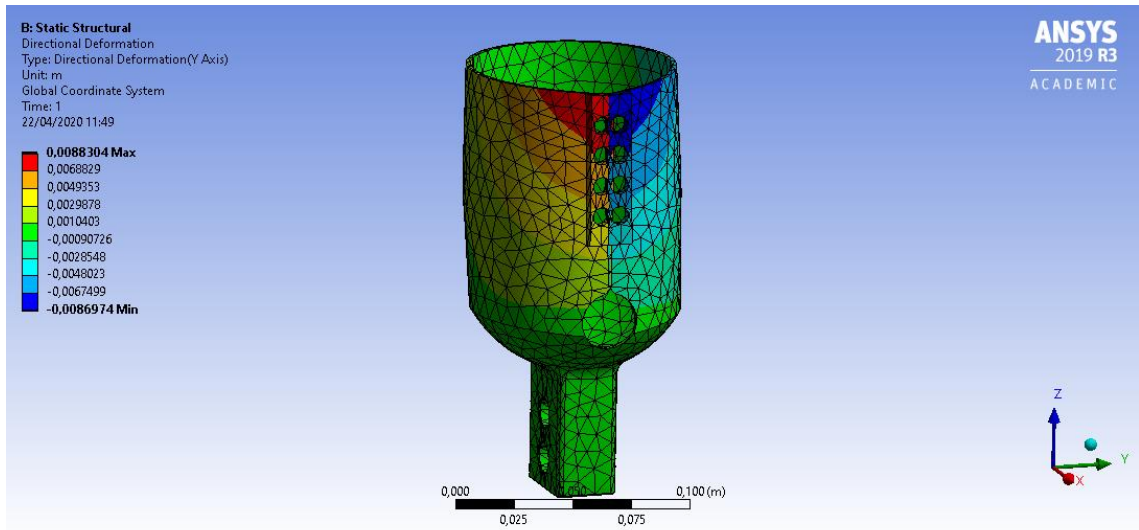
Element de mida 7mm



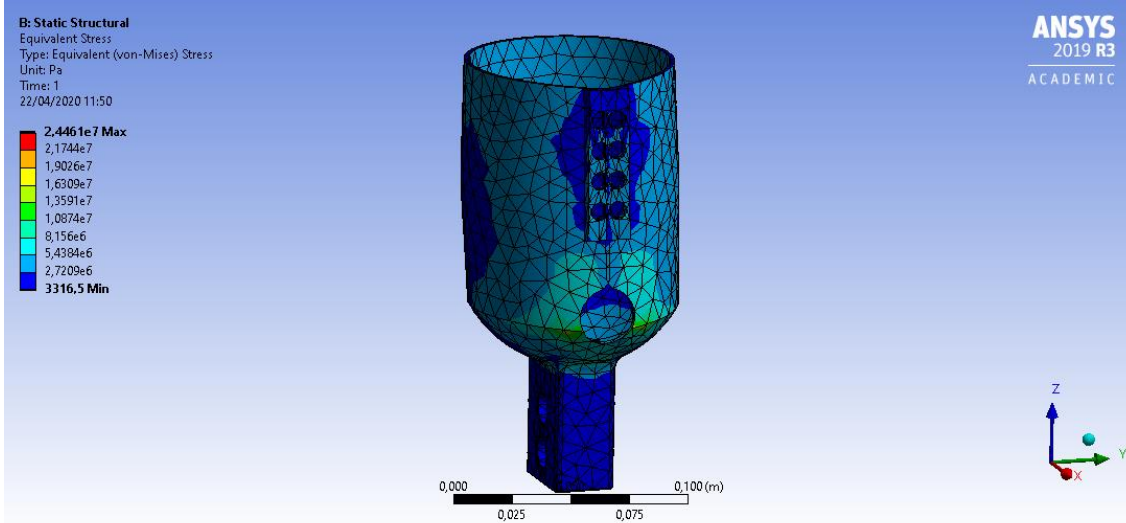
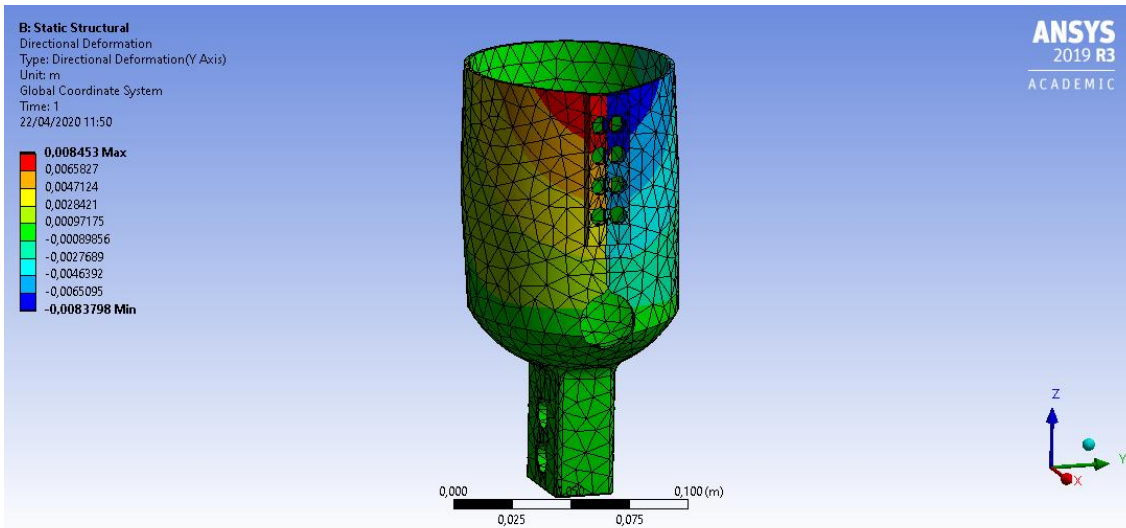
Element de mida 7,5mm



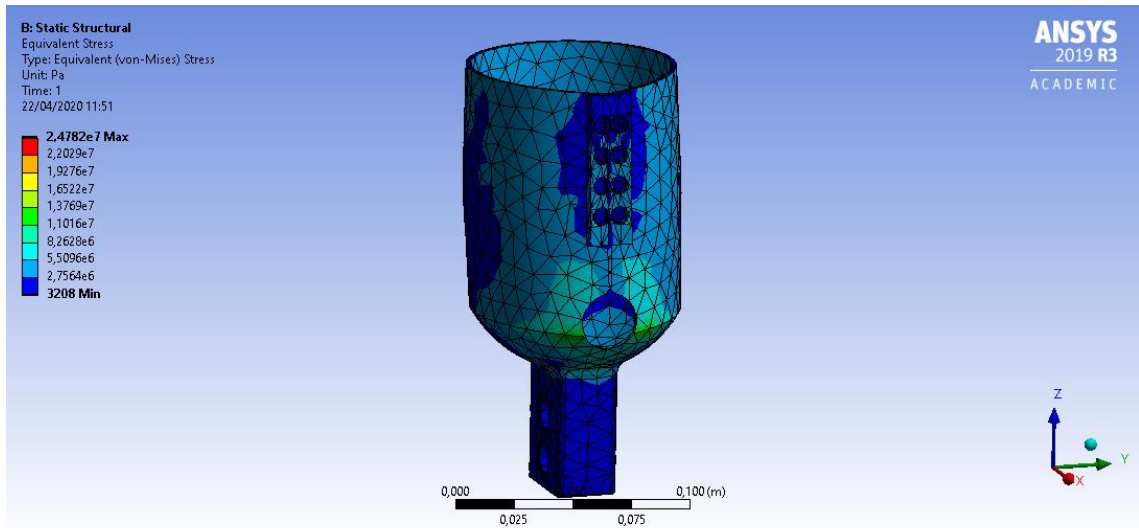
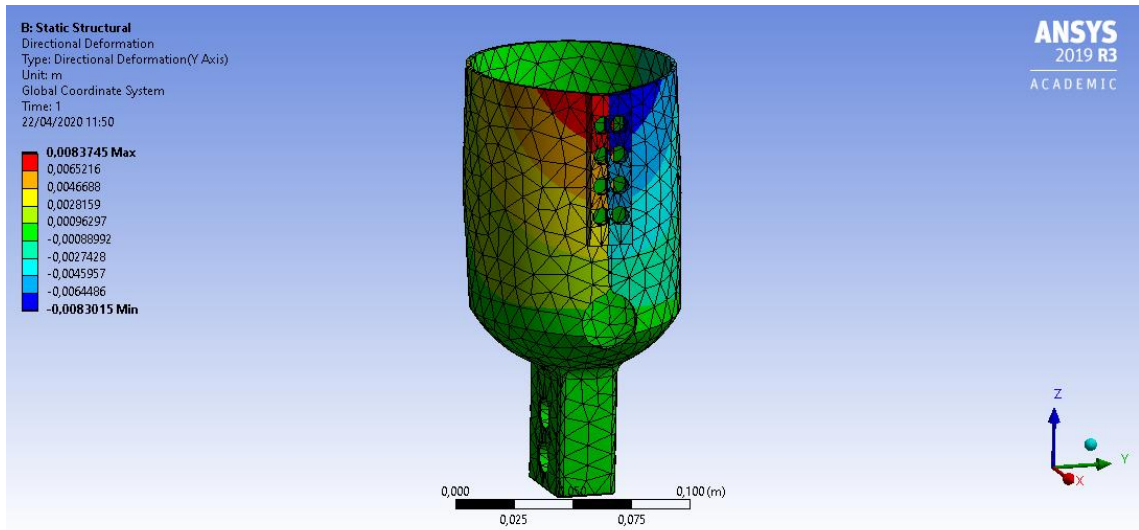
Element de mida 8mm



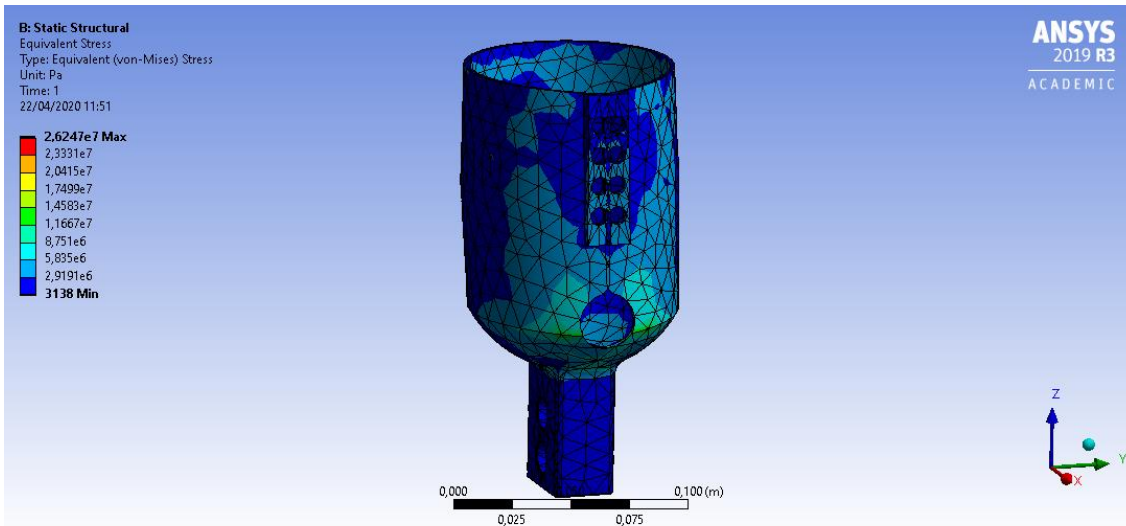
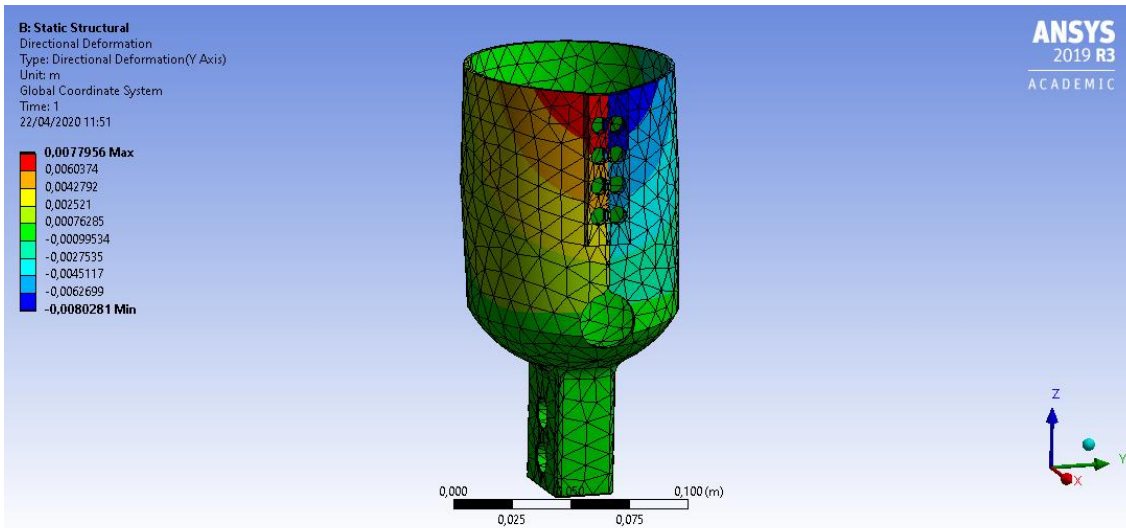
Element de mida 8,5mm



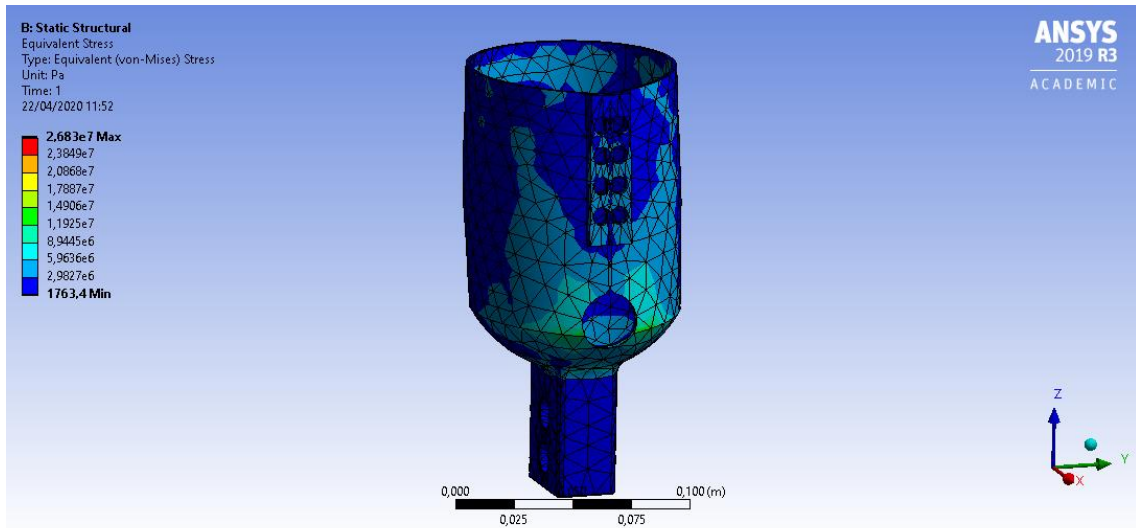
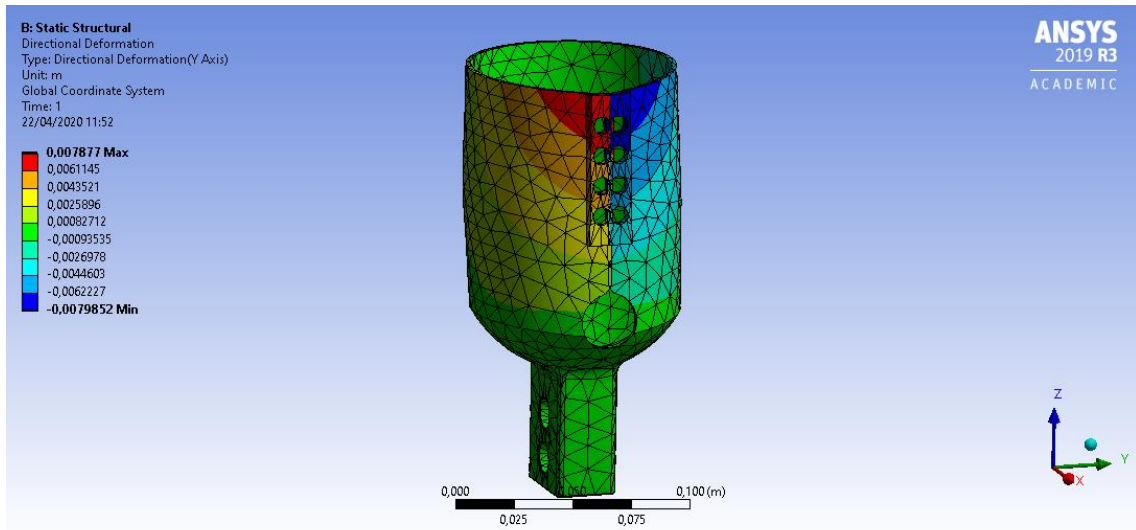
Element de mida 9mm



Element de mida 9,5mm

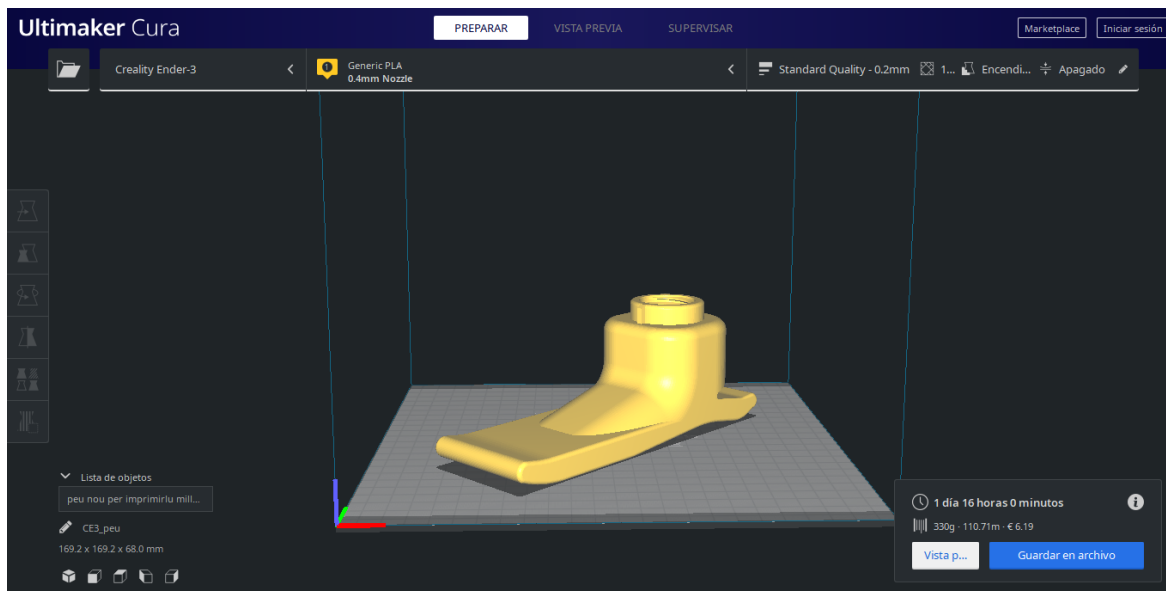


Element de mida 10mm

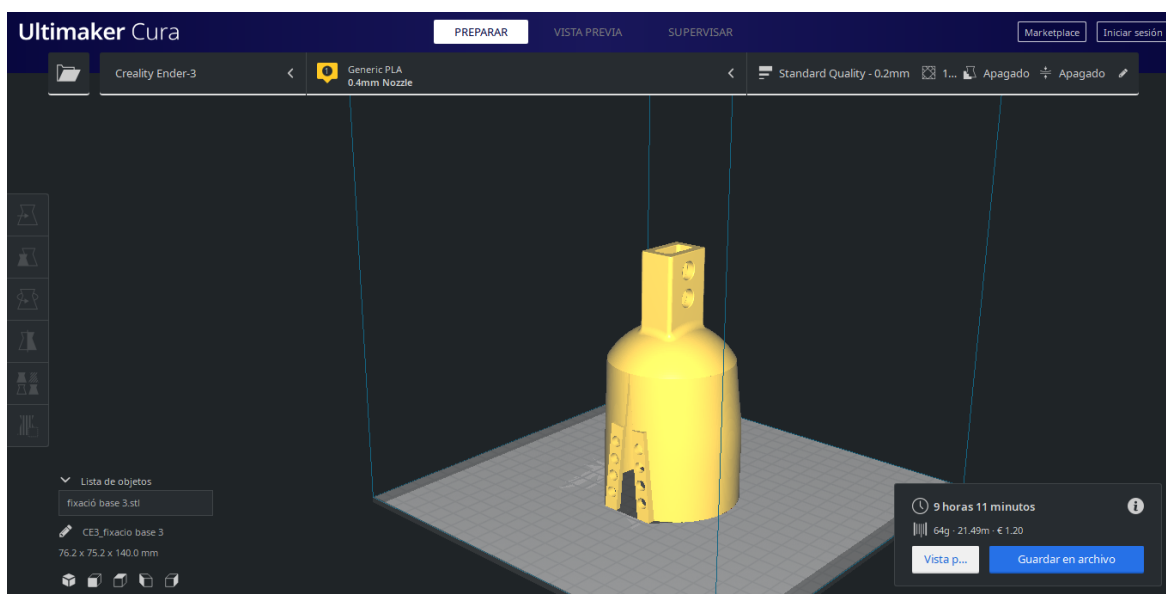


Annex 4

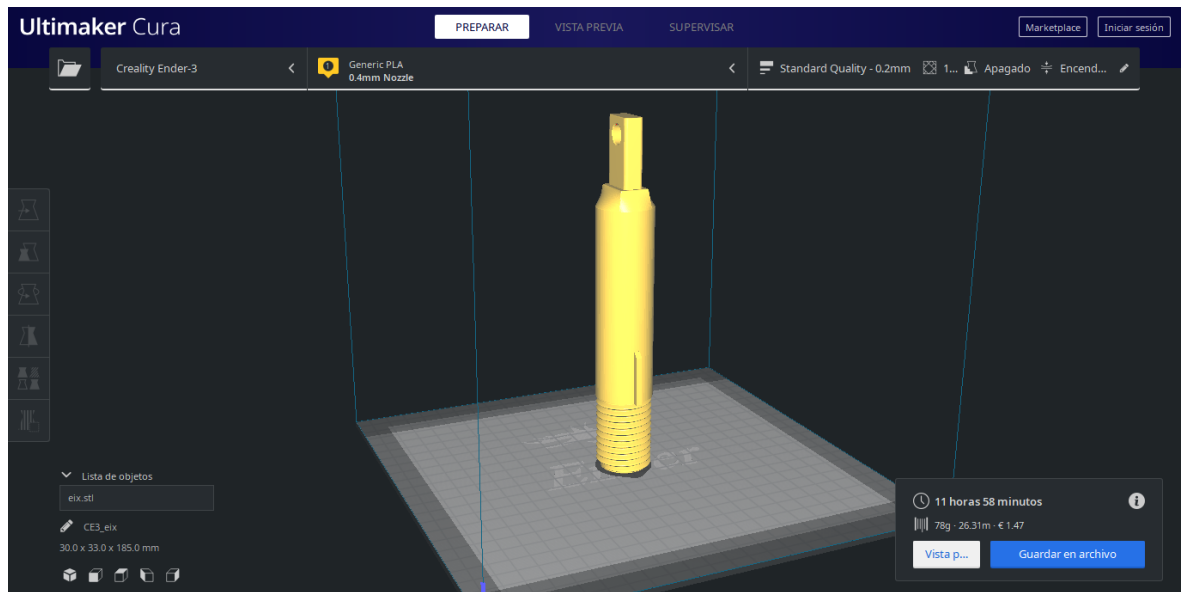
Temps i cost de la impressió del peu



Temps i cost de la impressió de la fixació



Temps i cost de la impressió de l'eix



Temps i cost de la impressió del bloquejador de rotació

