



**Escola Politécnica Superior  
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TREBALL FINAL DE GRAU**

**PROTOTIPATGE D'UNA MICROINJECTORA DE TERMOPLÀSTICS**

**Martínez Melià, Marcel**

**Juny, 2021**

**COGNOMS:** Martínez Melià

**NOM:** Marcel

**TITULACIÓ:** Enginyeria mecànica

**PLA:**

**DIRECTOR:** Joan Josep Aliau i Pons

**DEPARTAMENT:** Departament d'enginyeria gràfica i de disseny

**QUALIFICACIÓ DEL TFG**

**TRIBUNAL**

**PRESIDENT**

**SECRETARI**

**VOCAL**

**DATA DE LECTURA:**

**Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals:**  Sí  No

## RESUM

Aquest projecte es contextualitza dintre del món de les màquines d'emmotllament per injecció, més concretament en la microinjecció. L'objectiu es dissenyar un prototip d'una màquina d'injecció en miniatura de manera que pugui ser fabricable i reproduïble en un entorn no professional, sense la necessitat d'utilitzar eines o mètodes de fabricació complexos.

Un cop establertes aquestes condicions i després de realitzar un exhaustiu estudi sobre el funcionament i la tecnologia que incorporen les màquines d'injecció i les diverses opcions que hi ha disponibles al mercat es comença a treballar en les diferents versions del possible disseny, descartant totes aquelles peces i opcions que al llarg del procés de creació es consideren no vàlides, fins a arribar a un disseny viable, el qual primerament es modela en CAD i sobre el que és pot iniciar el prototipatge.

El document descriu amb precisió tots els components utilitzats així com la seqüència de treball seguida durant tot el procés de disseny i construcció, fent incisos en els càlculs i simulacions realitzades per a verificar el funcionament de la màquina així com els treballs experimentals portats a terme per a confirmar-los.

Finalment s'obtenen els plànols d'una màquina completament operativa capaç de fondre diferents polímers i injectar-los per a crear peces funcionals. Encara així es segueix tractant d'un prototip, i per tant es presenten certes propostes de millora de cara a una producció de caràcter definitiu, com també un enfoc diferent per simplificar el disseny de la màquina i abaratir encara més el seu preu.

### Paraules clau (màxim 10):

Injecció	Emmotllament	Prototip	Motlle
Fabricació additiva	Modelat CAD	DIY	Polímer

## ABSTRACT

This project contextualises inside the world of Injection Moulding Machines, more precisely in microinjection.

The objective is to design a prototype of a small sized injection machine so it can be fabricated and reproduced in a non-professional context, without the need of using complex tools or fabrication methods.

Once this conditions are established and after performing an exhaustive study about the functioning and technology that injection machines incorporate and the diverse options available at the market work begins on the different versions of the possible design, throwing away all those pieces and options that throughout the creation process are considered non-valid, since the final one gets modelled on CAD and the prototyping process can be started upon it.

The document describes with precision all the components used as well as the working sequence followed through the whole designing and construction process, making a point on the calculations and FEA simulations performed to verify the proper function of the machine as well as the experimental procedures that confirm its veracity.

Finally the blueprints of a completely operative machine capable of melting polymers and inject them to create functional pieces are obtained. Even so it stills being a prototype, and as so presents some improvement proposals to face a definitive production and also a different approach to simplify the machine design and lower even more its price.

### Keywords (10 maximum):

Injection	Moulding	Prototype	Mould
Additive fabrication	CAD	DIY	Polymer

## SUMARI

<b>INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>8</b>
<b>OBJECTIUS</b> .....	<b>8</b>
<b>1. CONTEXT HISTÒRIC</b> .....	<b>9</b>
<b>2. ESTAT DE L'ART</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Parts d'una IMM</b> .....	<b>10</b>
2.1.1 Unitat de tancament.....	10
2.1.2 Unitat d'injecció.....	12
<b>2.2 Màquines all-electric</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3 Microinjecció</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4 Motlles per fabricació additiva</b> .....	<b>18</b>
<b>2.5 Impressores RepRap</b> .....	<b>19</b>
<b>3. DISSENY DEL PROTOTIP</b> .....	<b>21</b>
3.1 Maqueta inicial .....	22
<b>3.2 Propostes preliminars</b> .....	<b>22</b>
3.2.1 Sistema d'injecció amb un cargol premsa olives .....	22
3.2.2 Escalfament de la boquilla amb un hotend d'impressora 3D .....	23
3.2.3 Tolva lateral amb entrada per ampolla.....	23
3.2.4 Actuador central únic pel tancament del motlle .....	24
3.2.5 Tancament mitjançant braços articulats.....	24
3.2.6 Distribució mitjançant engranatges.....	25
3.2.7 Fixació de la politja entre parets.....	25
<b>3.3 Disseny proposat</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 Estructura.....	29
3.2.2 Subconjunt d'injecció.....	30
3.2.3 Subconjunt motlle.....	33
3.2.4 Subconjunt de tancament.....	35
3.2.5 Electrònica .....	37
<b>4 SIMULACIONS MITJANÇANT ELEMENTS FINITS</b> .....	<b>39</b>
4.1 Omplerta del motlle.....	39
4.2 Resistència estructura .....	44
<b>5 CÀLCULS JUSTIFICATIUS</b> .....	<b>48</b>
5.2 Moment del cargol injector .....	48
5.3 Potència elèctrica .....	49

<b>5.4</b>	<b>Requeriments per a la plastificació.....</b>	<b>49</b>
5.4.1	Temps de residència .....	49
5.4.2	Volum de plastificació i rpm de la broca.....	50
<b>5.5</b>	<b>Força de tanca .....</b>	<b>50</b>
5.5.1	Pressió a la cavitat.....	50
5.5.2	Parell motor .....	51
<b>6</b>	<b>FABRICACIÓ DEL PROTOTIP.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>PROCÉS EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
7.1	Plastificació i dosificació del material .....	58
7.2	Injecció, emmotllament i ejecció .....	59
7.3	Automatització .....	60
<b>8</b>	<b>PRESSUPOST.....</b>	<b>62</b>
<b>9.</b>	<b>PROPOSTA DE MILLORA .....</b>	<b>65</b>
	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>68</b>
	<b>AGRAÏMENTS.....</b>	<b>70</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>71</b>

## SUMARI DE FIGURES

FIGURA 1. DIBUIX ORIGINAL DE LA PATENT DELS GERMANS HYATT. (FONT: INJECTION MOLDING HANDBOOK).....	9
FIGURA 2. SISTEMA DE TANCAMENT HIDRÀULIC. (FONT: SINOTECH.COM).....	11
FIGURA 3: SISTEMA DE TANCAMENT MECÀNIC. (FONT: SINOTECH).....	12
FIGURA 4: CARGOL DE COMPRESSIÓ. (FONT: DC.ENGR.SCU.EDU).....	13
FIGURA 5: SODICK V-LINE TWO STAGE INJECTION. (FONT: SODICK).....	13
FIGURA 6. ENGEL E-CAP. (FONT: ENGEL GLOBAL).....	14
FIGURA 7. NISSEI DCE-III. (FONT: NISSEI PLASTIC).....	15
FIGURA 8. HUSKY HYLECTRIC. (FONT: HUSKY).....	15
FIGURA 9. BABY PLAST, MODEL 10/12. (FONT: BABYPLAST.COM).....	16
FIGURA 10. MOIRON M1. (FONT: MOIRONS.COM).....	17
FIGURA 11. APSX-PLASTIC INJECTION MOLDING. (FONT: APSX.COM).....	17
FIGURA 12. POLYJET 3D PRINTED MOLD. (FONT: STRATASYS.COM).....	18
FIGURA 13. CREALITY ENDER 5 AMB L'ESTRUCTURA DE PERFILS D'ALUMINI. (FONT: CREALITY3D).....	19
FIGURA 14. HOTEND AMB RESISTÈNCIA I TERMISTOR. (FONT: PRÒPIA).....	19
FIGURA 15. ANET A8, TRANSMISSIÓ COMPOSTA DE CORRETGES I CARGOLS SENS FI. (FONT: ANET 3D).....	20
FIGURA 16. MAQUETA INICIAL. (FONT: PRÒPIA).....	22
FIGURA 17. PRIMERA VERSIÓ DE L'ENTRADA DEL MATERIAL. (FONT: PRÒPIA).....	23
FIGURA 18. ESBÓS DELS BRAÇOS ARTICULATS I DIAGRAMA DE FORCES. (FONT: PRÒPIA).....	24
FIGURA 19. DISTRIBUCIÓ MITJANÇANT ENGRANATGES. FONT: PRÒPIA).....	25
FIGURA 20. MUNTATGE INICIAL DE LA POLITJA D'INJECCIÓ. (FONT: PRÒPIA).....	26
FIGURA 21. FORCES CREADES AL CARGOL PER LA TENSIÓ DE LA CORRETJA. (FONT: PRÒPIA).....	26
FIGURA 22. RENDERITZAT DEL DISSENY FINAL EN 3D. (FONT: PRÒPIA).....	27
FIGURA 23. RECORREGUT DEL POLÍMER I FUNCIONAMENT DEL PROCÉS D'INJECCIÓ. (FONT: PRÒPIA).....	28
FIGURA 24. ESTRUCTURA PRINCIPAL DE LA MÀQUINA I PUNTS D'UNIÓ. (FONT: PRÒPIA).....	29
FIGURA 25. COMPONENTS DEL SUBCONJUNT D'INJECCIÓ. (FONT: PRÒPIA).....	30
FIGURA 26. TALL DEL BLOC INJECTOR. (FONT: PRÒPIA).....	32
FIGURA 27. COMPONENTS DEL SUBCONJUNT DEL MOTLLE. (FONT: PRÒPIA).....	33
FIGURA 28. COMPONENTS DEL SUBCONJUNT DE TANCAMENT DEL MOTLLE. (FONT: PRÒPIA).....	35
FIGURA 29. COMPONENTS ELECTRÒNICS DEL PROTOTIP. (FONT: PRÒPIA).....	37
FIGURA 30. DISSENY DE LA PEÇA A INJECTAR AMB ELS SEUS CANALS.....	39
FIGURA 31. PARÀMETRES DEL PROCÉS. (FONT: PRÒPIA).....	40
GRÀFICA 1. PRESSIÓ D'INJECCIÓ EN FUNCIÓ DEL TEMPS. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	40
GRÀFICA 2. FORÇA DE TANCA EN FUNCIÓ DEL TEMPS. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	41
FIGURA 32. TEMPS QUE TRIGA EL POLÍMER A ARRIBAR A CADASCUNA DE LES PARTS DE LA COLADA. ....	41
(FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	41
FIGURA 33. TEMPERATURA DEL POLÍMER AL FINALITZAR LA INJECCIÓ. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	42
FIGURA 34. XUCLETS I CONSEGÜENTS ATRAPAMENTS D'AIRE. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	42
FIGURA 35. FRACCIÓ SOLIDIFICADA. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	43
FIGURA 36. DISTRIBUCIÓ DE CARREGUES QUE AFECTEN A LA PEÇA A ESTUDIAR. (FONT: PRÒPIA).....	44
FIGURA 37. TENSIONS DE VON MISES EN N/M <sup>2</sup> . (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	45
GRÀFICA 3. DIAGRAMA S-N DEL ABS PER A DIFERENTS TEMPERATURES DE TREBALL. (FONT: MDPI AG).....	45
FIGURA 38. CREACIÓ DEL DIAGRAMA S-N PER L'ABS. (FONT: PRÒPIA).....	46
FIGURA 39. DANY PERCENTUAL AL QUE CONTRIBUEIX CADA PART DE LA PEÇA. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	46
FIGURA 40. NÚMERO DE CICLES ABANS DE LA FALLADA. (FONT: PRÒPIA MITJANÇANT SOLIDWORKS).....	47
GRÀFICA 4. RELACIÓ DE FLUX. (FONT: TECNOLOGIA DE LOS PLÁSTICOS).....	51
FIGURA 41. ESTRUCTURA POSTERIOR. (FONT: PRÒPIA).....	52
FIGURA 22. ESTRUCTURA DEL SUBCONJUNT DE TANCAMENT. (FONT: PRÒPIA).....	53
FIGURA 43. ESTRUCTURA COMPLETA. (FONT: PRÒPIA).....	54
FIGURA 44. MUNTATGE DE TOTS ELS COMPONENTS MECÀNICS. (FONT: PRÒPIA).....	55
FIGURA 45. MUNTATGE COMPLET. (FONT: PRÒPIA).....	57
FIGURA 46. ZONA FREDA AL SUBCONJUNT D'INJECCIÓ. (FONT: PRÒPIA).....	59

FIGURA 47. RESTES DE POLÍMER AL TUB INJECTOR EN RETIRAR EL PISTÓ. (FONT: PRÒPIA) .....	60
TAULA 1. HORES I COST DELS TREBALLS D'ENGINYERIA. (FONT: PRÒPIA) .....	62
TAULA 2. UNITATS, PREU UNITARI I COST TOTAL DELS COMPONENTS NORMALITZATS INCLOSOS AL PROTOTIP. (FONT: PRÒPIA) .....	63
TAULA 3. COST TOTAL DE FABRICACIÓ DESGLOSSAT EN PROCESSOS. (FONT: PRÒPIA) .....	64
TAULA 4. PRESSUPOST TOTAL DEL PROJECTE A PARTIR DELS VALORS DE LES TAULES ANTERIORS. (FONT: PRÒPIA).....	64
FIGURA 48. REFERENT DE MILLORA PER LA BROCA. (FONT: HARBORFREIGHT.COM) .....	66



## INTRODUCCIÓ

Aquest projecte s'emmarca dintre del món de l'emmotllament per injecció, més concretament en la injecció de termoplàstics. El meu interès personal en l'àmbit de les IMM (Injection Molding Machines) ve motivat des de que vaig cursar l'assignatura de *Disseny i prototipatge de motllos i matrius* on vaig poder veure amb detall tot el procés de construcció dels motllos i les increïbles màquines que els omplien. Però, degut a les grans dimensions de les màquines d'injecció i les forces que apliquen durant el procés, aquest procés de fabricació suposa una despesa econòmica molt elevada inicialment i només està al abast de grans empreses que necessiten fer series llargues i voluminoses.

És per això que es pretén dissenyar un prototip d'injectora, de mida reduïda, que és pugui fabricar en un petit taller o casa particular per a poder fer servir aquesta tecnologia de manera assequible, en un àmbit domèstic i de baixa demanda. El seu disseny està centrat en la utilització de eines el més senzilles possibles i que tots puguem tenir al nostre abast, s'evitaran els mecanitzats complexos, a banda del propi motllo que cadascú vulgui fer servir, i el ús de soldadura en les peces. També s'intentaran utilitzar elements normalitzats i demes components (electrònica, elements calefactors...) assequibles, així com materials comuns i de fàcil accés, per a mantenir el preu de la màquina el més baix possible i fer que la seva fabricació sigui realitzable pel màxim de persones possible, alhora que aconseguir una màquina fiable i robusta que mantingui unes prestacions adequades al llarg de tota la seva vida útil.

## OBJECTIUS

L'objectiu final d'aquest projecte construir un prototip automatitzat d'una microinjectora per a reutilitzar el PLA residual de les impressions 3D, així com altres termoplàstics que fem servir dia a dia, seguint tots els càlculs fets per a assegurar el seu correcte funcionament, de manera que resti com a exemple per a que altres persones puguin reproduir-lo com a projecte DIY de manera senzilla i assequible.

## 1. CONTEXT HISTÒRIC

Avui en dia més d'una tercera part dels termoplàstics d'arreu del món són produïts mitjançant l'emmotllament per injecció, fet que estableix aquest procés de fabricació com el més important en la producció de productes plàstics.

La tecnologia de l'emmotllament per injecció s'origina el 1872 quan els germans Hyatt patenten la primera màquina d'injecció de polímers seguint l'exemple de l'existent patent del 1870 en injecció de metalls<sup>[1]</sup>. Es basava en un sistema de xeringa operat manualment que injectava el material, prèviament escalfat a dintre del tub, a un motllo de formes més aviat senzilles.

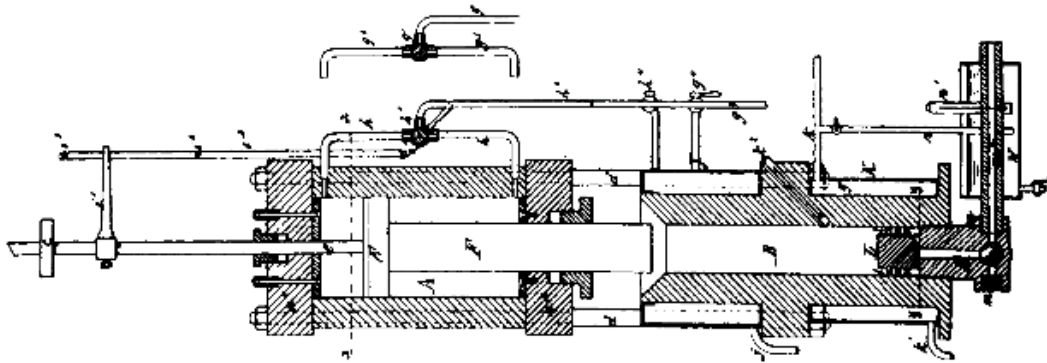


Figura 1. Dibuix original de la patent dels germans Hyatt. (Font: Injection Molding Handbook)

A mesura que es sintetitzaven nous polímers noves tècniques van anar sorgint i amb elles noves màquines com la de H. Buchholz el 1933 que ja incorporava un procés automatitzat i operat per un sistema hidràulic que injectava el material a motllos més complexos amb canals de distribució que podien desplaçar el material a més d'una cavitat i que es va convertir en el prototip a seguir en les següents màquines.

## **2. ESTAT DE L'ART**

En l'actualitat existeixen mils de models diferents de màquines que utilitzen la tecnologia de l'emmotllament per injecció en les diferents variants que ofereix. En aquest capítol es farà un repàs de les seves parts principals i del seu funcionament i aportació al procés, així com dels diferents tipus de màquines que podem trobar actualment, el particular procés de la microinjecció i les noves tecnologies que es podrien aplicar a aquest projecte.

### **2.1 PARTS D'UNA IMM**

El funcionament general d'una màquina d'injecció és en principi senzill. El procés comença amb l'alimentació mitjançant pellets del polímer a injectar a un cilindre calefactable, on es plastifica fins a aconseguir la temperatura i propietats físiques desitjades. Seguidament el material es desplaça a alta pressió i velocitat mitjançant un pistó fins a la cavitat del motllo, que es troba tancat a alta pressió també, on adopta la forma d'aquest i queda solidificat. Finalment el motllo s'obre i la peça és ejectada per a poder repetir el procés un altre cop. Però, com es veurà a continuació, els components i mecanismes que s'encarreguen de portar a terme aquestes funcions solen ser força complexos.

#### **2.1.1 UNITAT DE TANCAMENT**

Aquest subconjunt és l'encarregat d'obrir i tancar el motllo així com de mantenir la força de tanca durant la injecció per evitar que la pressió del material pugui obrir el motllo i que aquest sobresurti de la cavitat augmentant la mida de les rebaves.

La força de tancament que pot oferir una màquina és una característica clau a l'hora d'escollir-la, perquè si no és capaç de mantenir la pressió interna de la cavitat la qualitat de la peça quedarà malmesa o fins i tot podria haver-hi una fuga de material.

Principalment trobem tres sistemes de tancament:

- **Sistema hidràulic:** La força requerida per fer avançar la placa mòbil es crea mitjançant la pressurització de l'aire o oli a dintre d'un pistó, de forma que la pressió exercida per aquest és directament proporcional a la pressió donada al fluid, així com la distància d'avanç la longitud que avanci el pistó serà la mateixa que avanci el motllo en si. Es tracta d'un sistema més simple i fàcil de muntar que els següents, però alhora és més brut a causa de les pèrdues de fluid i té un major gest energètic i per tan major cost d'ús.

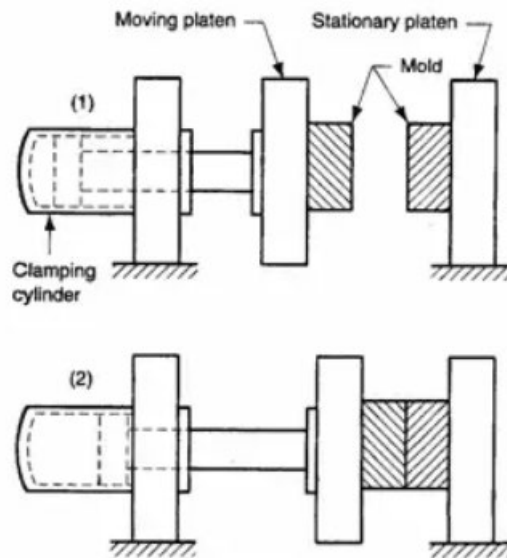


Figura 2. Sistema de tancament hidràulic. (Font: sinotech.com)

- **Sistema hidromecànic:** Com al exemple anterior la força d'avanç es crea mitjançant la pressurització d'un pistó, amb la diferència que la longitud de fluid pressuritzat és independent de la longitud d'avanç de la placa mòbil de forma que es necessita pressuritzar un menor volum d'aquest. Això s'aconsegueix bloquejant la placa mòbil a la seva posició final mitjançant femelles roscades a la barra guia, de manera que el pistó només ha de mantenir la pressió sense pràcticament avançar.

- **Sistema mecànic:** En aquest cas la força requerida pel tancament del motllo no passa per l'actuador d'avanç sinó que es manté mitjançant les relacions d'uns braços articulats i la seva rigidesa quan queden alineats entre ells com es veu a la figura 3. En aquest tipus de sistema l'actuador pot ser tant hidràulic com elèctric, aquests últims tenen l'avantatge de ser més nets, perquè no necessiten tanta atenció per possibles fuites d'oli i per tant tampoc tant manteniment, tenen una ràpida preparació i configuració, emeten menys soroll i el seu consum és bastant més baix. Per contra la força que poden transmetre és menor i el seu cost és més elevat.

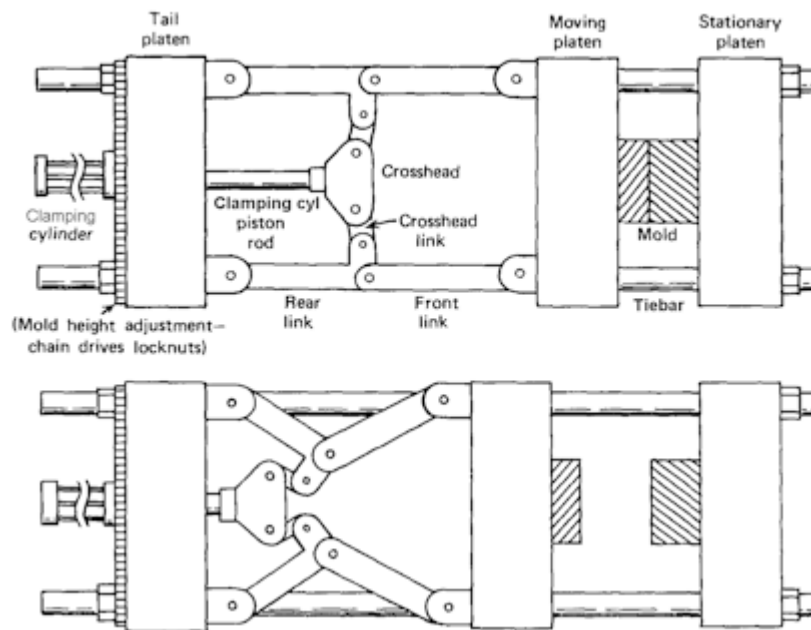


Figura 3: Sistema de tancament mecànic. (Font: *sinotech*)

## 2.1.2 UNITAT D'INJECCIÓ

La unitat d'injecció engloba tots els components que contribueixen a la plastificació del material i a la seva posterior injecció dins el motllo. Poden destacar tres possibles configuracions:

- **Cargol d'injecció únic:** És el sistema més utilitzat avui en dia. Es tracta d'un cargol que té un diàmetre variable entre els seus flancs el qual va creixent a mesura que s'apropa al seu extrem. El cargol gira i retrocedeix a mesura que el plàstic va avançant entre els seus flancs de forma que aquest cada cop queda més comprimit a la cavitat davantera. Un cop dipositat el volum de material necessari el cargol avança, i gràcies a una vàlvula de no-retorn, tot el plàstic és injectat al motllo. Les seves principals avantatges són el curt temps de cicle que permet i per tant el petit temps de residència del plàstic en contacte amb les resistències, evitant així la seva degradació, també les

forces de fricció generades per la seva compressió que faciliten la fosa del polímer, i la neteja en cada cicle de la unitat d'injecció permetent així els canvis de color o de material de forma ràpida i sense gaires pèrdues.

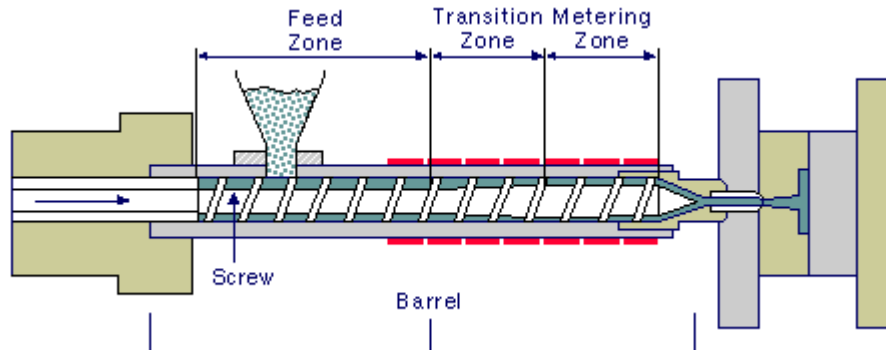


Figura 4: Cargol de compressió. (Font: dc.engr.scu.edu)

- **Extrusor de xeringa:** És el mecanisme utilitzat en les primeres màquines injectores i per tant el més senzill. Es tracta d'un únic èmbol a dintre d'un cilindre calefactable on es diposita el polímer fins que arriba a la temperatura optima llavors es fa avançar l'èmbol i el polímer és injectat al motllo. Suposa una mescla i fosa del material molt més pobre que en el cas del cargol de compressió, doncs la part externa del polímer és calenta més que el seu interior i pot produir la degradació d'aquesta primera capa o que el nucli no arribi a la temperatura d'injecció establerta. En canvi suposa un major control en el volum d'injecció i una disminució de la potència requerida.
- **Extrusor de cargol assistit per pistó:** Aquest sistema és una combinació dels dos anteriors. Primer un cargol fon i mescla el polímer per a poder dipositar-lo, un cop a la temperatura adequada, en un segon tub on un èmbol l'injecta dins el motllo. Així s'aconsegueix el millor dels dos mons, una bona mescla i fosa del material i una injecció controlada i amb una major força disponible. Actualment s'utilitza per l'empresa Sodick sota el nom de V-LINE System.<sup>[3]</sup>

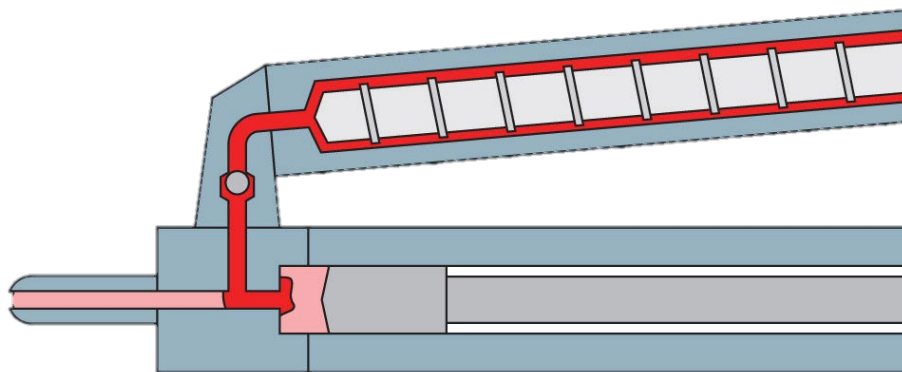


Figura 5: Sodick v-line two stage injection. (Font: sodick)

## 2.2 MÀQUINES ALL-ELECTRIC

Amb la millora dels motors elèctrics i la seva baixada de preu les màquines *all-electric* van sortir al mercat com a contrapart de les màquines d'accionament hidràulic, doncs tot i tenir un cost inicial més elevat proporciona uns avantatges bastant significatius. Com que no disposen de circuits hidràulics el seu manteniment és molt més reduït, no te fuites ni vàlvules que revisar, no necessiten escalfar cap fluid pel qual el seu inici de cicle pot ser molt més ràpid. Generen molt menys soroll que les versions hidràuliques i els seus motors elèctrics només consumeixen energia quan estan en moviment, mentre que el sistema hidràulic consumeix fins i tot en repòs. Però la seva principal avantatge és que el seu control és molt més precís i eficient, el que fa que el procés pugui ser més ajustat i consistent.

Algunes de les màquines o empreses que fan servir motors elèctrics per al seu funcionament són:

- **Engel:** empresa alemanya estesa per tot el món que, tot i que va començar produint màquines hidràuliques, a dia d'avui disposa de tres models diferents de màquines d'injecció completament elèctriques que, com per exemple el model e-cap de la figura 6, són capaces de produir forces de tanca de fins a 6500 kN i temps de cicle de menys de 2s.<sup>[4]</sup>



Figura 6. Engel e-cap. (Font: [Engel Global](#))



- **Nissei:** empresa japonesa dedicada completament a la fabricació de màquines d'injecció elèctriques o híbrides. Disposen de més de 10 models de diferents mides en tot el rang de forces de tanca necessaris.<sup>[5]</sup>



Figura 7. Nissei DCE-III. (Font: [Nissei plastic](#))

- **Husky:** empresa situada al canada amb bases a tots els continents dedicada a aportar solucions a la tecnologia d'injecció per emmotllament així com la fabricació de màquines. La seva família de màquines elèctriques s'anomena Hylectric i disposen d'una força de tanca de fins a 13.000 kN.<sup>[6]</sup>



Figura 8. Husky Hylectric. (Font: [Husky](#))



## 2.3 MICROINJECCIÓ

La microinjecció és un procés especialitzat d'emmotllament per injecció que produeix totes aquelles peces que per les seves dimensions, toleràncies o parts especials no poden ser injectades en màquines normals. Aquestes màquines disposen extrusors especialitzats que permeten un control de volum i una injecció molt més precisa, així com uns sistemes d'ejecció capaços d'extreure les peces més petites sense fer-les malbé.

Les principals marques de màquines de microinjecció que podem trobar al mercat avui en dia són:

- **Baby-plast:** Es tracta de la millor posicionada al mercat i la més coneguda. Està encarada a la gran indústria i la producció en massa. Disposen de diferents models completament hidràulics amb forces de tanca que van des de les 6 fins a les 10 tones en el seu model més gran, el qual té una petjada de menys de 0,6 m<sup>2</sup>. Dintre del seu catàleg incorporen unitats de braços robòtics per a extreure les peces mitjançant ventoses de buit.<sup>[7]</sup>



Figura 9. Baby plast, model 10/12. (Font: babyplast.com)

- **Moiron:** Disposen de màquines molt més petites que la resta de marques i d'accionament completament elèctric, amb una superfície ocupada de 0,18 m<sup>2</sup> que juntament amb les 2 tones de força màxima de tanca fa que sigui considerada una màquina de sobretaula, més enfocada a hobbies o petits treballs personals que a la seva utilització en la indústria.<sup>[8]</sup>



Figura 10. Moiron M1. (Font: moirons.com)

- **ApsX-Pim:** La seva injectora es podria considerar a mig camí entre les dues anteriors, té una petjada de menys de 0,4 m<sup>2</sup> i un accionament complet per motors elèctrics que la doten d'una força de tanca de 5 tones. Està enfocada a ser una alternativa més econòmica per aquells tallers, centres educatius o de recerca que necessitin colades de petites peces inferiors a 100.000 unitats a l'any.<sup>[9]</sup>

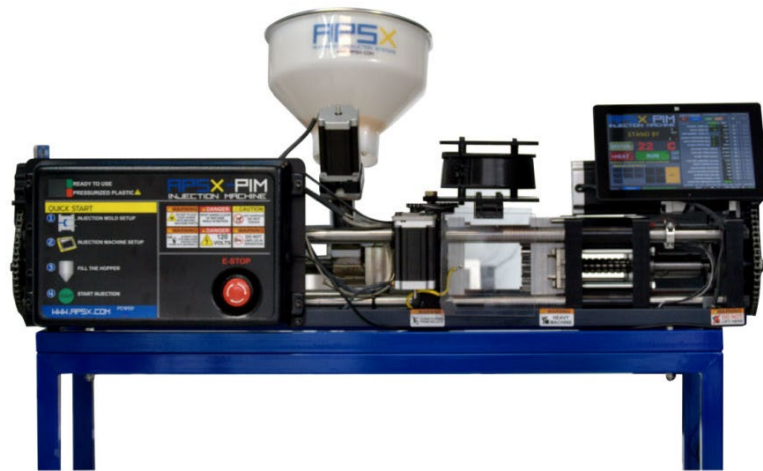


Figura 11. ApsX-Plastic Injection Molding. (Font: apsx.com)

## 2.4 MOTLLES PER FABRICACIÓ ADDITIVA

La fabricació del motlle és una de parts més importants a l'hora d'aconseguir una bona peça per emmotllament per injecció. Normalment, a les màquines d'injecció estàndard el motlle es fabrica a partir del mecanitzat d'un bloc d'alumini o acer en el cas de plàstics més abrasius, en canvi amb l'aparició de les impressores 3D i els nous polímers que són capaces d'imprimir la utilització d'aquestes s'ha fet més i més important per a la fabricació dels motlles, sobretot en màquines petites, perquè així s'asseguren que les geometries són correctes i que el seu funcionament és l'adequat abans de crear la seva versió en metall que és molt més costosa i requereix un temps més elevat en la seva fabricació i per tant les modificacions suposen un esforç, tant econòmic com de treball, que en comparació és quasi inexistent en el cas de la fabricació additiva.

Per altra banda trobem que aquest mètode de fabricació no és utilitzable en llargues colades, perquè els materials amb els que és compatible s'acaben degradant a causa de les altes temperatures i cicles de fatiga que crea l'obertura i pressurització del motlle, és per això que la seva utilitat queda renegada al prototipatge.

Una marca molt utilitzada per aquesta tasca és **Stratasys**, amb la seva tecnologia *Polyjet*, amb la que aconsegueixen una resolució de capes microscòpica amb una precisió de fins a 0,014 mm que permet la creació de geometries complexes i els detalls més minúsculs en un gran rang de materials per l'enginyeria.<sup>[10]</sup>

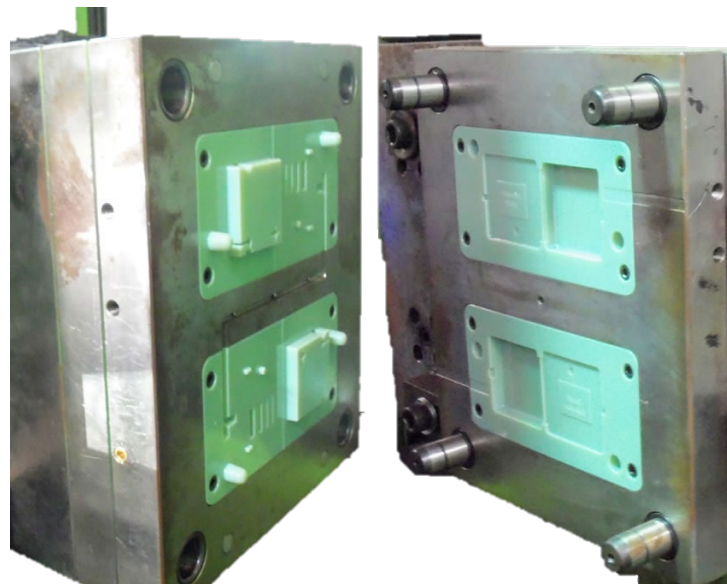


Figura 12. Polyjet 3D printed mold. (Font: stratasys.com)

## 2.5 IMPRESSORES REPRAP

Una de les idees inicials del projecte era construir una màquina d'injecció que seguis el mateix patró de disseny que les impressores 3D estil RepRap, és a dir que utilitzes peces normalitzades disponibles normalment, com varetes roscades, cargols i femelles estàndard, motors pas a pas controlats per Arduino, i peces impreses en 3D (o injectades en aquest cas) perquè pogués ser reproduïda fàcil i econòmicament de forma DIY.

Tant les impressores 3D com les injectores sorgeixen per a un mateix propòsit, extrudir plàstic fos per a crear peces. Es per això que molts dels components utilitzats en la construcció d'impressores 3D pot ser adaptat per a la creació del prototip d'injectora.

- **Estructura de perfils d'alumini:** gran part de les anomenades impressores cartesianes utilitzen extrusions d'alumini amb perfil V-Slot per a crear una carcassa i allotjar tota la resta de components en ella. A part les ranures del perfil V-Slot serveixen com a carril per al desplaçament lineal de components mòbils com a substitució dels rodaments lineals. La marca Creality ha estat incorporant aquest sistema en totes les seves impressores cartesianes.



Figura 13. Creality ender 5 amb l'estructura de perfils d'alumini. (Font: Creality3D)

- **Hotend:** per a fondre el plàstic de manera uniforme i controlada utilitzen capçals de metall just a sobre de la boquilla, on s'insereixen resistències i termistors per a mantenir la temperatura desitjada mitjançant un control PID.



Figura 14. Hotend amb resistència i termistor. (Font: pròpia)

- **Motors pas a pas:** gràcies a aquests motors les impressores són capaces de moure els seus components a escala mil·limètrica i sabent en cada moment on es troben. Els més utilitzats són els nema 17 a causa de la seva mida reduïda, però existeixen models més grans segons el parell necessari en la seva aplicació, com els nema 23 o 34.
- **Transmissió del moviment:** els components utilitzats per a transmetre el moviment rotacional dels motors en un desplaçament lineal són majoritàriament cargols sense fi i corretges de llaç obert GT2. Els cargols utilitzen el seu gir per a fer desplaçar les femelles amunt i avall dels seus flancs, mentre que les corretges fixen els seus extrems als components que volen desplaçar i amb el gir d'una politja mouen dits components al llarg del recorregut de la corretja. Un exemple que incorpora ambdós sistemes és l'Anet A8, que mou l'eix Z mitjançant cargols sense fi i el X i Y amb corretges.



Figura 15. Anet A8 de transmissió composta entre corretges i cargols sens fi. (Font: Anet 3D)

### 3. DISSENY DEL PROTOTIP

Després d'una llarga recerca i estudi sobre el funcionament de les IMM i de les diferents solucions disponibles al mercat que podrien ser aplicables al propi prototip, es decideix apostar per un disseny amb les següents característiques:

- Dos canals independents per a la injecció, un per fondre el material (plastificació) i un altre per extrudir-lo a alta pressió (injecció). D'aquesta manera s'evita la utilització de complexes vàlvules i flancs d'un cargol únic per ambdues tasques.
- Una estructura de perfils d'alumini T-slot per a poder delimitar la forma bàsica de la màquina i poder fixar la resta de components a ella simplement passant femelles en T a dintre dels seus canals.
- Moviment automatitzat amb motos pas a pas. Aquests són capaços de transmetre un moviment molt precís i controlat alhora que permeten escollir entre diferents models segons el par necessari per a les diferents tasques.
- Transformació del moviment rotatori dels motors a lineal mitjançant cargols sense fi. Són una opció econòmica i robusta per a aconseguir desplaçar linealment tots els components.
- Mottle imprès en 3D amb resina mitjançant tecnologia SLA. Les impressores SLA proporcionen peces massisses amb uns acabats superficials i toleràncies molt superiors a les convencionals FDM. Suposen una alternativa molt més ràpida i accessible al mecanitzat de blocs d'alumini.

Un cop establertes aquestes premisses bàsiques es procedeix a donar forma al conjunt global del prototip així com al disseny inicial dels diferents components i sistemes que integrarà.



### 3.1 MAQUETA INICIAL

El projecte comença el novembre de 2019 amb la creació d'una maqueta impresa en 3D d'una màquina d'emmotllament per injecció automatitzada com a repte o petit projecte en forma de hobby, aprofitant els components d'una antiga impressora RepRap.

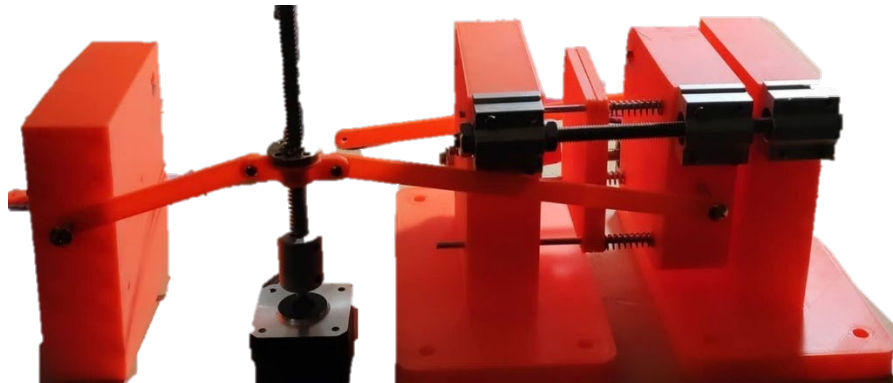


Figura 16. Maqueta inicial. (Font: pròpia)

Com es pot apreciar en la imatge la màquina distava molt de ser ideal i funcional pel que es va decidir adaptar el projecte com a TFG per així poder millorar-la i aconseguir crear un prototip capaç de produir productes plàstics injectats.

### 3.2 PROPOSTES PRELIMINARS

En aquest apartat es presenten els diferents dissenys que s'han anat contemplant, durant l'apartat anterior, per a la realització dels diferents components del prototip i que s'han descartat per donar pas al disseny definitiu.

#### 3.2.1 SISTEMA D'INJECCIÓ AMB UN CARGOL PREMSA OLIVES

Una de les primeres opcions per a plastificar el polímer i injectar-lo al motlle era utilitzar els cargols per a premsar olives i extreure'n l'oli, perquè la seva profunditat entre flancs és variable, d'una manera similar a la dels cargols utilitzats en les IMM. A més a més, aquest sistema d'injecció es podria implantar en vertical, reduint així la petjada horitzontal de la màquina i aprofitant la força de la gravetat en el procés. Els seus inconvenients, a part de l'elevat preu, eren el pes extra que aportaven a la màquina i per tant l'increment de potència necessària per a la seva rotació. També comportava el disseny d'un mecanisme que permetés

la rotació i alhora el moviment lineal del cargol complicant sobre manera el projecte i fent necessaris components a mida de geometries complexes, com una vàlvula antiretorn a la punta per poder empènyer el polímer i evitar el retrocés d'aquest.

### 3.2.2 ESCALFAMENT DE LA BOQUILLA AMB UN HOTEND D'IMPRESSORA 3D

Per a garantir el flux de material a través de la boquilla dins el motlle es va estudiar utilitzar el mateix sistema que les impressores 3D, un bloc d'alumini escalfat mitjançant una resistència es localitzaria entre el cilindre d'injecció i la boquilla, d'aquesta manera s'asseguraria una correcta temperatura a l'última. El problema és que el sistema ocupava un espai massa significatiu entre el final de carrera del pistó injector i l'inici dels canals del motlle, pel que una gran quantitat de material es retenia allà provocant que es degradés entre un cicle i el següent.

### 3.2.3 TOLVA LATERAL AMB ENTRADA PER AMPOLLA

L'entrada del material en forma de pellets al tub plastificador s'aconseguia inicialment mitjançant un embut com el que es veu a la Figura 17, que disposava d'una entrada amb rosca per una ampolla PET on es podia emmagatzemar gran quantitat de material.

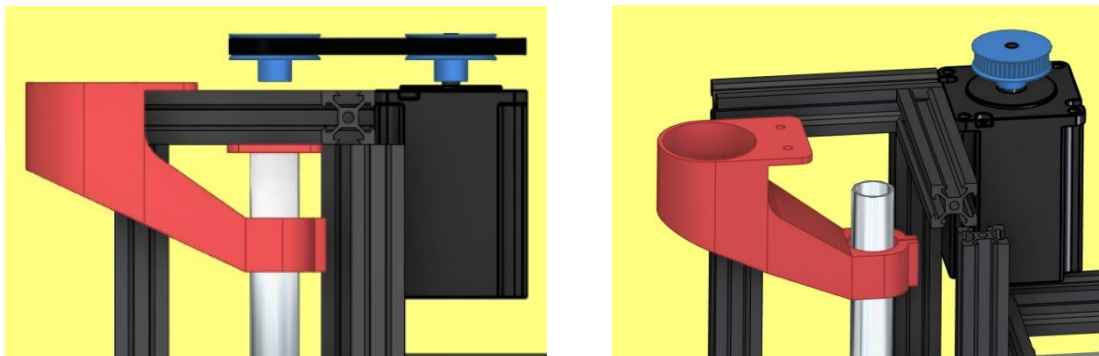


Figura 17. Primera versió de l'entrada del material. (Font: pròpia)

L'inconvenient que generava era que no garantia un flux uniforme de material dins el tub, perquè la seva secció interior era molt estreta i l'angle d'entrada massa obtús, pel que feia necessari un segon mecanisme que assegurés la deposició constant i controlada dels pellets a dintre del mecanisme de plastificació.



### 3.2.4 ACTUADOR CENTRAL ÚNIC PEL TANCAMENT DEL MOTLLO

Aquest disseny es basava en la utilització d'un únic cargol de potència al centre de la placa mòbil com a actuador pel tancament i l'obertura del motlle. El problema sorgia perquè no es podia garantir la resistència dels flancs del cargol en transmetre la força necessària per a mantenir el motlle tancat i s'hauria d'haver utilitzat un cargol de diàmetres superiors. A part, a l'estar localitzat al centre de la placa, interferia amb el posicionament dels pins ejectors que haurien d'haver estat inclosos al mateix motlle, encarint i complicant molt el disseny d'aquests.

### 3.2.5 TANCAMENT MITJANÇANT BRAÇOS ARTICULATS

Una altra opció per a aconseguir mantenir el motlle tancat durant la injecció era utilitzar un sistema de braços articulats i pins. Era un disseny molt robust que proporcionava una gran força de tancament amb un actuador de baixa potència. Es va descartar a causa de la degradació que sofreixen els pins de les articulacions i la necessitat de canviar-los bastant sovint si no es fa un bon manteniment, així mateix el disseny requeria una gran exactitud geomètrica i de toleràncies que no complia amb els objectius d'aquest projecte.

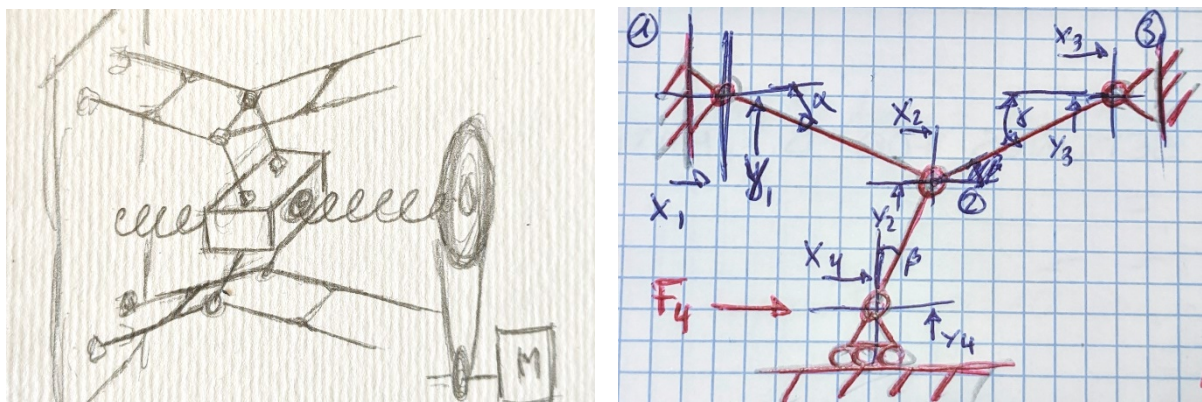


Figura 18. Esbós dels braços articulats i diagrama de forces. (Font: pròpia)

### 3.2.6 DISTRIBUCIÓ MITJANÇANT ENGRANATGES

Pel disseny definitiu s'utilitzen dos cargols sense fi per aconseguir el desplaçament lineal de la placa mòbil. En una primera idea es pretenia fer la distribució del gir del motor als cargols mitjançant engranatges, com es veu a la figura 19.

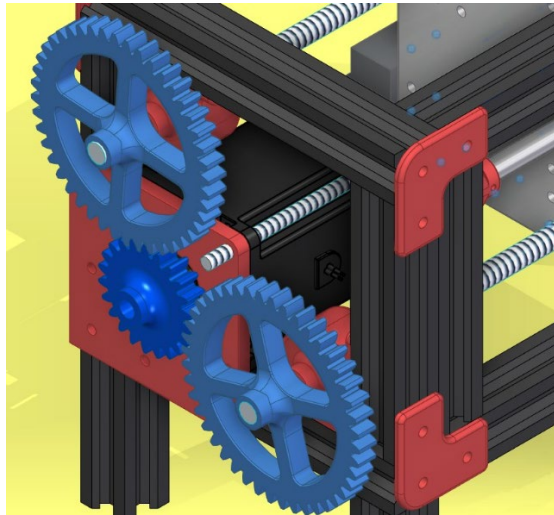


Figura 19. Distribució mitjançant engranatges. Font: pròpia)

Tot i presentar una transmissió robusta del moviment cap als cargols, el motor havia d'estar a dintre de l'estructura limitant en gran part el recorregut disponible per a l'obertura del motlle i l'expulsió de les peces, raó per la qual es va descartar aquesta opció.

### 3.2.7 FIXACIÓ DE LA POLITJA ENTRE PARETS

Per a poder fer avançar el pistó linealment s'utilitza una politja amb femella interior que fa avançar un cargol sense fi mitjançant la seva rotació. Per a poder mantenir-la fixada axialment alhora que permetre la seva rotació se'n van col·locar dues parets a banda i banda que retenien un parell de casquillos, com es pot veure a la figura 20.

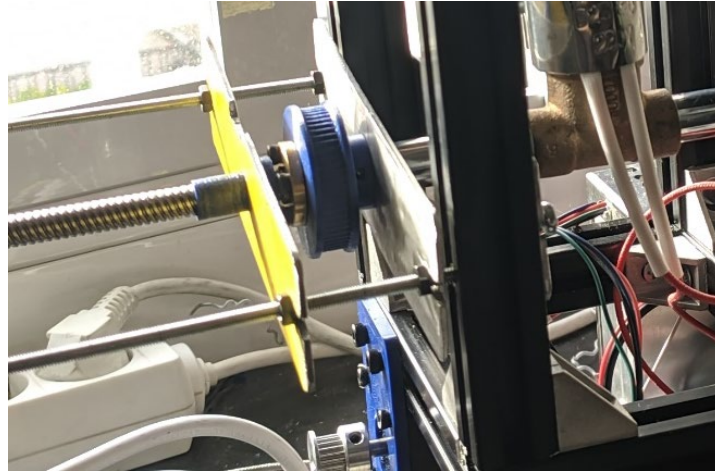


Figura 20. Muntatge inicial de la politja d'injecció. (Font: Pròpia)

Després de construir la primera versió de prototip es va descartar aquesta idea pel fet que la tensió de la corretja de distribució creava un parell de forces que feien treballar el cargol sense fi amb molta fricció i una lleugera inclinació fent que el pistó no avancés recte.

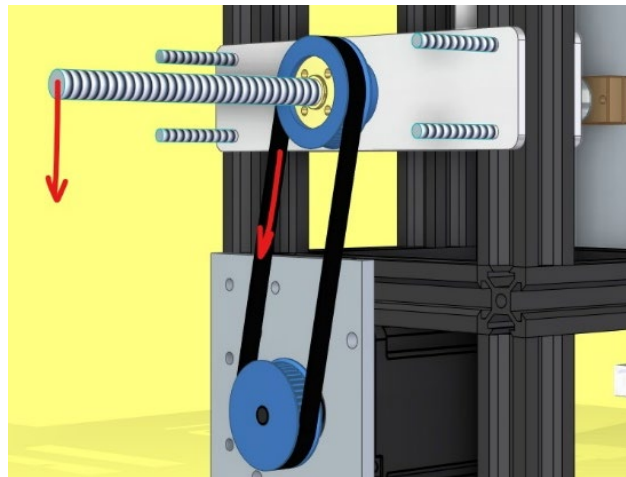


Figura 21. Forces creades al cargol per la tensió de la corretja. (Font: Pròpia)

### 3.3 DISSENY PROPOSAT

Finalment el disseny escollit per a la fabricació del projecte és el següent:

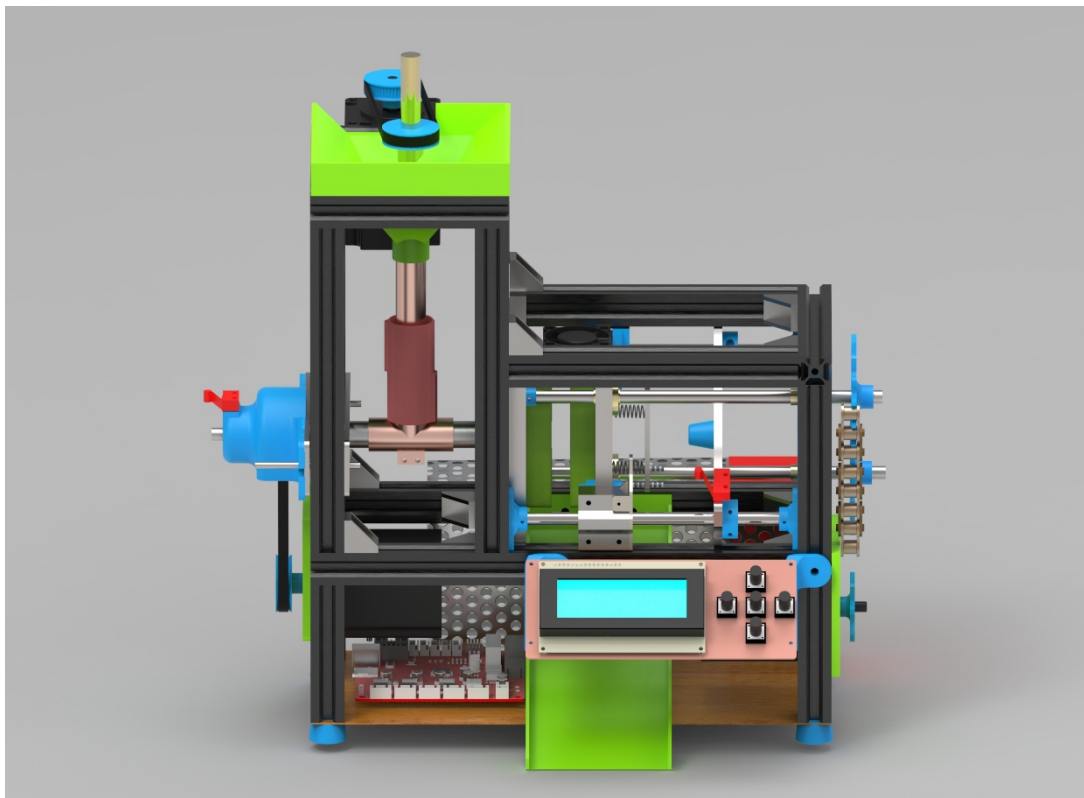
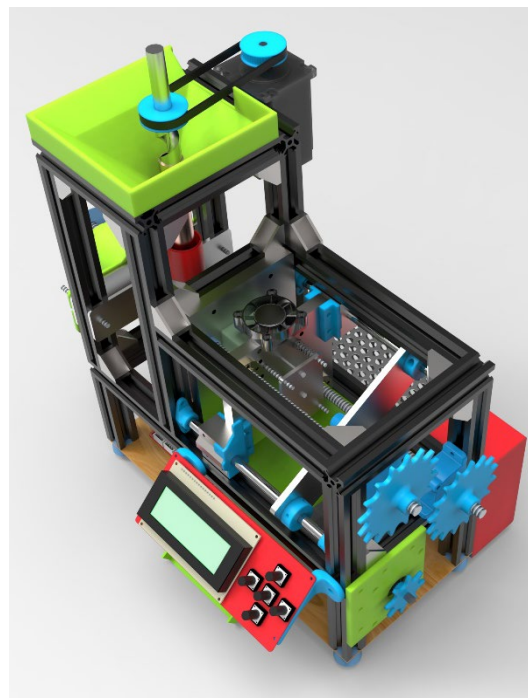
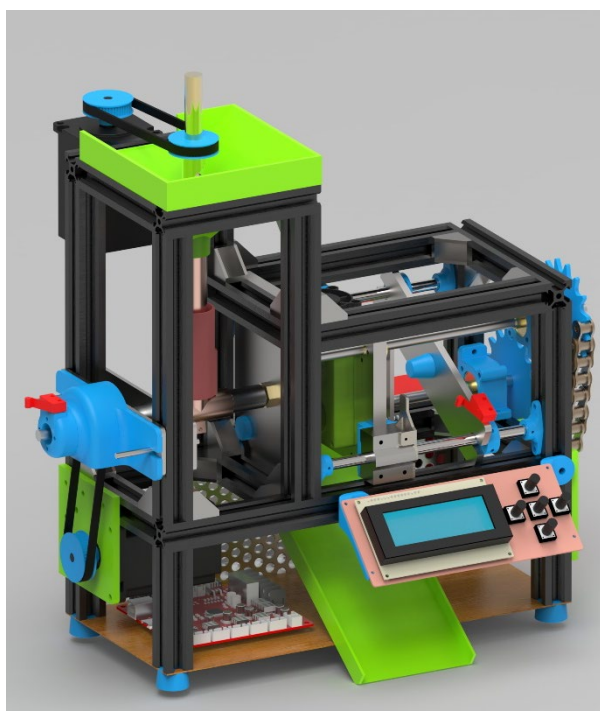


Figura 22. Renderitzat del disseny final en 3D. (Font: pròpia)



Tot el mecanisme reposa dintre d'una estructura de perfils d'alumini anoditzat que li dóna rigidesa i delimita el volum ocupat per la màquina. El seu funcionament, que podem observar a la figura 23, comença per la tolva que trobem a la part superior de la torre dreta on es diposita tot el material a injectar. Els pellets es precipiten pel forat central a dintre del tub de plastificació on una broca el desplaça cap a sota entre els seus flancs, a mesura que avança el polímer s'apropa a un primer anell calefactable que augmenta la seva temperatura fins a un estat plastós. Aquest tub connecta amb un altre d'horitzontal en el que es diposita la quantitat necessària de material per a un cicle, seguidament un pistó desplaçat per un cargol sense fi empeny el polímer fins a la boquilla, la qual està a la temperatura necessària gràcies a un segon anell calefactable a l'extrem del tub d'injecció. El material passa a través de la boquilla fins a l'emboadura que connecta amb el motlle, el qual està tancat a alta pressió mitjançant els dos cargols sense fi de les cantonades que reben la potència d'un motor a través d'una distribució per plats i cadena. Quan el polímer ha refredat i adoptat la forma desitjada els cargols giren en el sentit contrari obrint el motlle, que fa xocar una placa amb els pins ejectors amb un topall, fent que aquests s'endinsin al motlle i empenyin la peça ja solidificada fora de la cavitat la qual és recollida per una rampa i dipositada a un contenidor.

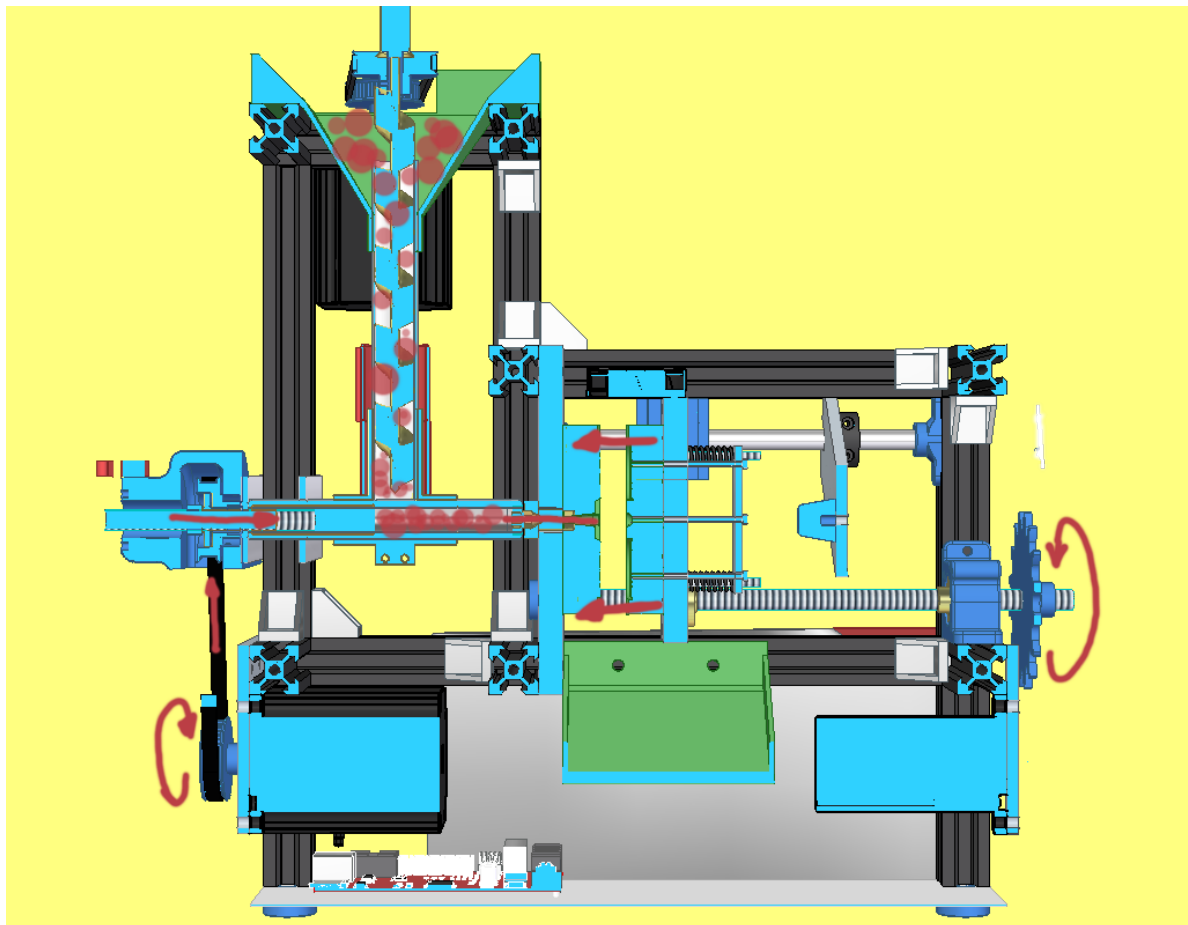


Figura 23. Recorregut del polímer i funcionament del procés d'injecció. (Font: pròpia)



### 3.2.1 ESTRUCTURA

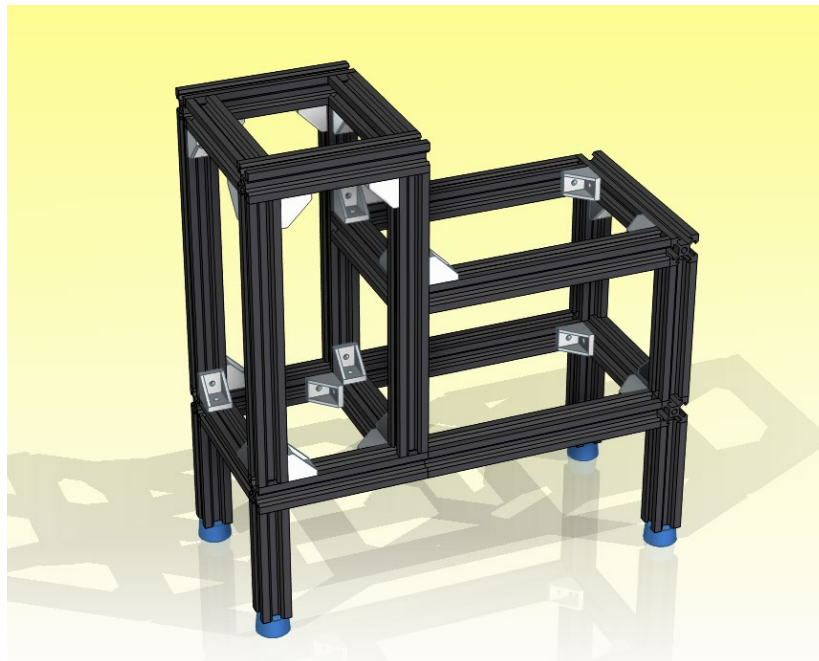


Figura 24. Estructura principal de la màquina i punts d'unió. (Font: pròpia)

- **Perfils d'alumini:** Tota l'estructura de la màquina està conformada mitjançant perfils T-Slots extrusionats de 20x20 mm d'aliatge d'alumini 6063 T5 anoditzat en negre. S'han utilitzat 6 mides diferents: 280, 200, 172, 142, 117 i 102 mm.
- **Unions:** Les unions dels diferents talls de perfils estan, majoritàriament, realitzades amb mètodes no destructius, de manera que no és necessari fer forats a localitzacions exactes sinó que es pot ajustar fàcilment a mà fins aconseguir la posició exacta. En aquest cas s'ha obtingut per posar esquadres de fosa d'alumini a les cantonades per a fixar dos perfils a 90° mitjançant cargols M4 i femelles en forma de T, les quals queden enrasades a dintre del perfil d'alumini. En els perfils que, per les seves sol·licitacions mecàniques, són necessàries unions més resistents s'ha roscat el forat d'un dels extrems per a poder passar un cargol M6 a través d'un forat transversal al perfil amb el que s'ha d'unir.

### 3.2.2 SUBCONJUNT D'INJECCIÓ

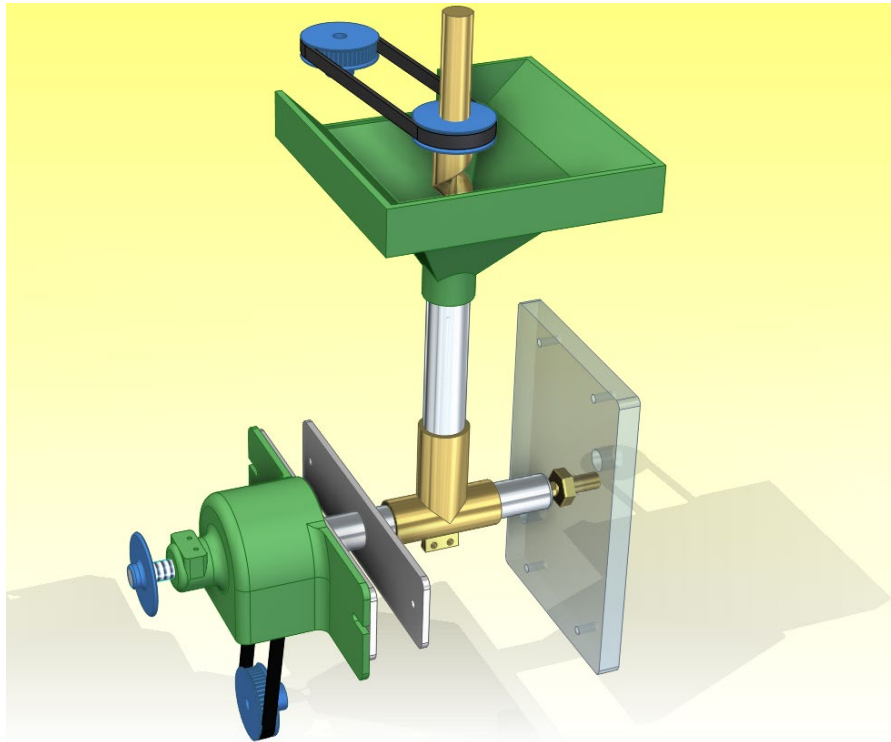


Figura 25. Components del subconjunt d'injecció. (Font: pròpia)

- **Tolva:** La podem localitzar com la piràmide invertida impresa en 3D de la part superior de la màquina. Permet emmagatzemar fins a  $125 \text{ cm}^3$  de material alhora que crea un embut per a facilitar la recollida d'aquest per part de la broca central. Té un rebaix a la paret de darrera per a que pugui passar la corretja que transmet el gir del motor a la politja que fa girar la broca. Tot el pes del material és suportat pel recolzament al llarg del perímetre de la tolva a sobre del quadrat de perfils d'alumini de l'estructura i queda fixada a aquest per quatre lamines que es fixen a cadascun dels lateral d'aquesta amb els perfils.
- **Bloc accionador:** Està format pel conjunt de corretja i politges que distribueix el moviment dels motors tant a la broca plastificadora com al cargol d'injecció. Les corretges són dentades GT2 de 6 mm d'amplitud com les que s'utilitzen a les impressores RepRap. Les politges son normalitzades GT2 però impreses en 3D per a poder fer alguns ajustos als forats centrals per a poder fixar-se correctament amb els diferents eixos, per la banda de la broca tenen una relació 2:1 de 30 dents al motor i 60 a la broca, mentre que a la banda d'injecció de 1:1 de 60 dents, de manera que no es perd ni velocitat ni parell motor.

- **Bloc plastificador:** Consta d'un tub de coure de 16 mm de diàmetre intern, 1 mm d'espessor i 110 mm de llargària que queda inserit a la part de sota de la tolva pel seu extrem superior mentre que l'inferior està fixat al tub injector mitjançant una junta en T també de coure. Pel seu centre trobem una broca de 16 mm per a fusta que ha estat modificada en els seus extrems per obtenir una punta plana a la part inferior i un encaix a la part superior per a poder inserir la roda dentada. Finalment a la cara externa del tub trobem dos resistències de mica que reposen sobre la mateixa junta de coure i es fixen al tub mitjançant les seves pròpies brides.
- **Bloc injector:** Està format pels components horitzontals que veiem a la figura 25. És l'encarregat d'extrudir a gran pressió el polímer que li arriba del bloc plastificador. Al extrem esquerre trobem la carcassa que, apart de cobrir el bloc accionador, manté tant la politja com el cargol sense fi centrats en el seu eix mitjançant un rodament de boles 6004zz pel cas de la politja i un rodament lineal igus drylin R-RJ4JP-01 pel cas del cargol, com podem veure amb més detall a la figura 26. D'aquesta manera la politja és lliure de girar sense friccions i el cargol de moure's linealment. Tocant amb la carcassa trobem una platina d'alumini que és recolza contra el tub injector, mantenint la boquilla del seu extrem fixada a pressió contra l'embocadura per a mantenir el segellament i que el polímer no tingui cap fuga. A la cara oposada de les columnes de l'estructura a la que es fixa aquesta platina en trobem una altra que manté el tub posicionat tant vertical com horitzontalment a través d'un forat central. El tub injector està fabricat per extrusió en acer 40Cr, de forma que no trobem costures al interior, té un diàmetre interior de 12 mm amb 2 mm de gruix i 110 mm de llargària i un rebaix a la part central on connecta amb el tub vertical i és filtra el material fos, el seu extrem està roscat a M12 de forma que és pugui fixar el reductor amb la boquilla. Per dintre del tub es desplaça el cargol sense fi, el qual té rosca mètrica a la punta per a poder fixar el pistó, que és un massís rodo de bronze de 55 mm de llargada per a que quan estigui retirat del tot es trobi per darrere del forat però que al avançar durant la injecció el cobreixi en tot moment de forma que el polímer no pugui dipositar-se als flancs del cargol.



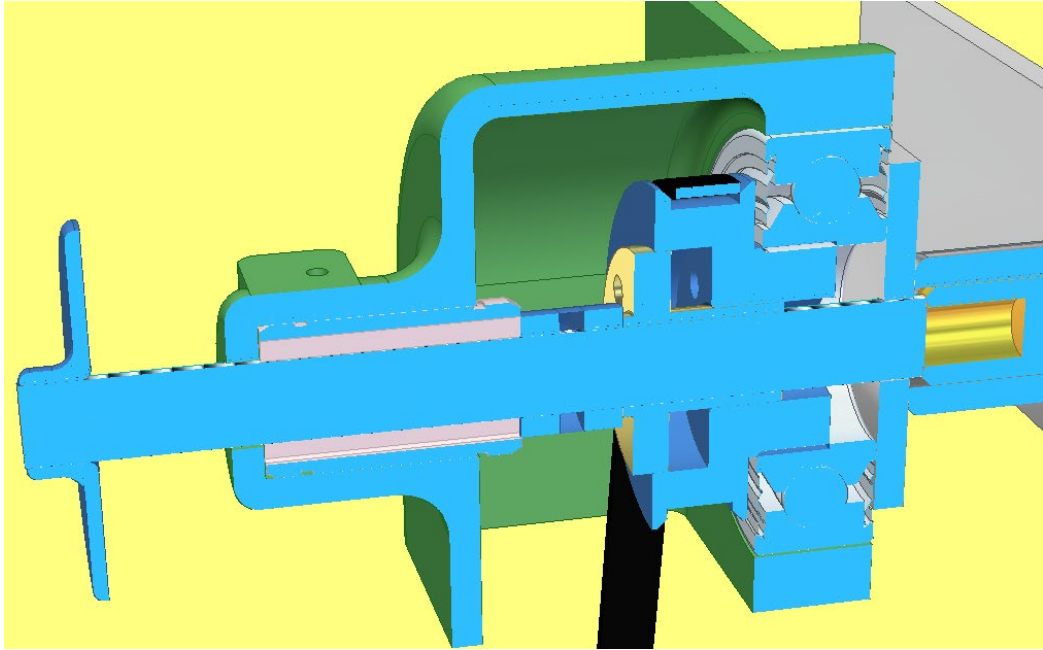


Figura 26. Tall del bloc injector. (Font: pròpia)

- **Boquilla i embocadura:** La boquilla s'encarrega de subministrar un flux uniforme i a alta pressió de material fos a dintre del motlle. Es tracta d'una boquilla de llautó per impressora 3D amb un diàmetre de sortida de 1'2 mm que queda roscada al tub injector mitjançant un adaptador o reductor de mètrica M12 a M6, s'escalfa a la temperatura desitjada mitjançant un cos d'alumini que l'envolta i que conte una resistència i un termistor per al control PID. L'embocadura és la peça d'acer on s'endinsa la boquilla, gràcies a un rebaix cònic, i que connecta amb el motlle a través de la placa fixa. Es fixa també amb una rosca a la placa fixa de la qual sobresurt 2 mm per a fer d'encaix i poder centrar el motlle.

### 3.2.3 SUBCONJUNT MOTLLE

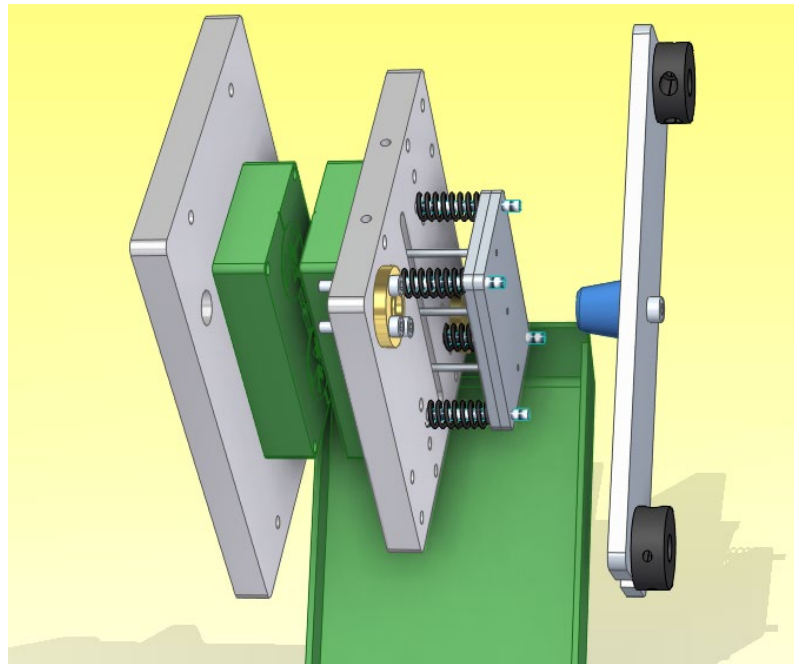


Figura 27. Components del subconjunt del motlle. (Font: pròpia)

- **Placa fixa:** Planxa d'acer de 140x100x10 mm que es fixa als perfils d'alumini de l'estructura mitjançant 4 cargols M4 de qualitat 12.9 i 4 femelles en T, dos a la part superior i dos a la part inferior. Al centre trobem el forat per rosca l'embocadura i al seu voltant els 12 forats que formen les 3 possibles configuracions per a muntar la part fixa del motlle. A dos de les cantonades oposades diagonalment trobem els forats on resten els extrems dels cargols sense fi.
- **Placa mòbil:** Planxa d'acer de 100x100x10 mm que és manté subjecta a dos vares d'acer, a la cantonada superior dreta i a l'inferior esquerra, mitjançant guies lineals que es fixen amb dos cargols M4 cadascuna. A les cantonades contraries trobem els forats amb les fixacions per a dues femelles de llautó que fan avançar o retrocedir la placa mitjançant dos cargols sense fi. Al igual que en la placa fixa trobem els 12 forats necessaris per a poder muntar els diferents motlles compatibles, amb l'adició d'una escaleta vertical al centre per on poden passar les diferents combinacions de pins ejectors.

- **Motlle:** El motlle està fet de resina resistent a la calor, en impressora 3D amb tecnologia SLA, encara que també podria estar fabricat en alumini mecanitzat amb CNC. Es permeten tres mides diferents de motlle segons les necessitats de la peça a injectar: 45x40, 45x60, 45x100 mm. Totes tres mides poden ser fixades tant a la part mòbil com a la fixa mitjançant 4 cargols a les seves cantonades, passant-los per darrere les plaques i fixant-los a rosca al motlle, d'aquesta manera queden a la part exterior del motlle i no interfereixen amb la cara de la cavitat.
- **Bloc ejector:** És l'encarregat d'extreure les peces de dintre del motlle un cop solidificades. Ho aconsegueix mitjançant un conjunt de pins de metall d'un mil·límetre de diàmetre, que s'endinsen per uns orificis creats al motlle fins quedar enrasats amb la superfície de la cavitat. Un cop la placa mòbil retrocedeix per a obrir el motlle, un parell de plaques que es troben a darrere, i contenen tots els pins a les seves corresponents posicions, xoca contra un topall cargolat a una altre placa d'alumini que es troba en diagonal fixada a les vares guia, aquest contacte restringeix el retrocés de la placa ejectora mentre que la placa mòbil segueix el seu camí, fent que els extrems dels pins sobresurtin de la superfície del motlle i empenyin la peça expulsant-la de dintre de la cavitat. Un cop la placa mòbil torna a tancar el motlle la placa ejectora recupera la seva posició inicial gràcies a unes molles, que s'han comprimit durant l'ejecció, a les columnes que la fixen. La distància o recorregut que pot fer la placa mòbil durant l'ejecció pot ser regulada mitjançant les mordasses impreses en 3D que mantenen fixa la placa del topall, permeten que aquest pugui estar més endavant o més lluny.

### 3.2.4 SUBCONJUNT DE TANCAMENT

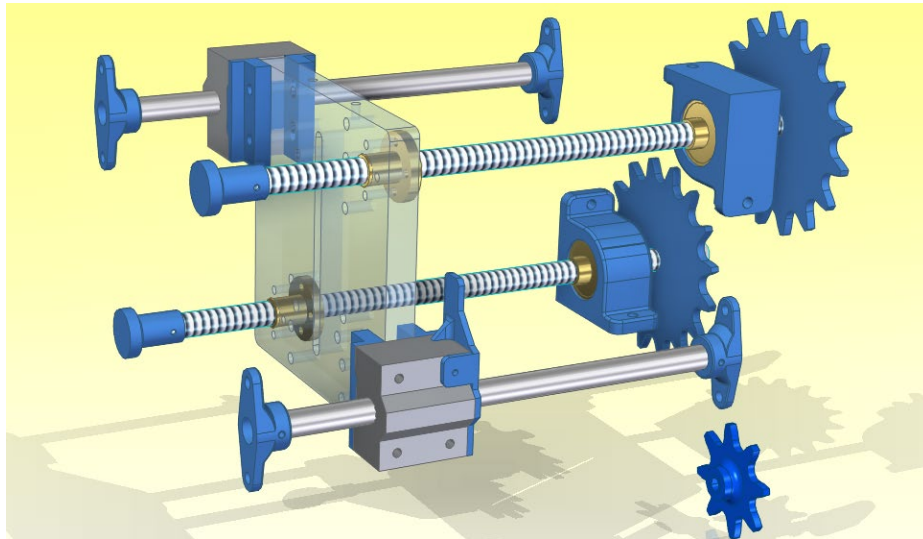


Figura 28. Components del subconjunt de tancament del motlle. (Font: pròpia)

- **Cargol sense fi:** Són els encarregats d'obrir i tancar el motlle mitjançant el seu gir. Estan fabricats en acer de 8 mm de diàmetre i tenen mecanitzada una rosca ACME de 2 mm de pas.
- **Bloc accionador:** El moviment del motor és transmès al mecanisme mitjançant un sistema de plats i cadenes. Al motor hi ha un pinyó de 8 dents amb un gruix de 3mm imprès en 3D fixat a aquest amb un parell de cargols presoners. A partir d'aquest es distribueix el gir mitjançant una cadena de bicicleta fins dos plats de 16 dents, també impresos en 3D, per obtenir una relació de 1:2, i que són solidaris als dos cargols sense fi. Tot el conjunt és pot tensar desplaçant la subjecció del motor amunt i avall pel perfil d'alumini.
- **Punts de recolzament:** Els cargols sense fi reposen sobre tres punts: el primer just després de l'extrem dels plats que el fan girar, al interior de les cantonades de l'estructura estan fixades dos carcasses per a rodaments amb brida que permeten el gir dels cargols però restringeixen el seu desplaçament axial. L'estructura està fabricada amb impressora 3D i per una banda té una paret per fer de topall pels rodaments i per l'altre un rebaix interior per a encaixar una anella seeger. El segon punt són les femelles de llautó que transformen el gir dels cargols en el desplaçament lineal del motlle, és troben per tant a la placa mòbil i estan fixades a aquesta mitjançant 4 cargols M3. Finalment els cargols arriben fins la placa fixa on és recolzen amb uns casquillos de plàstic per a reduir els fregaments amb aquesta.

- **Guies lineals:** Les guies serveixen per assegurar un recorregut recte i horitzontal de la placa fixa durant l'obertura i el tancament del motlle. Estan subjectes a aquesta mitjançant uns adaptadors impresos en 3D, figura 28, que es fixen a la part de sota de la carcassa dels rodaments lineals i als laterals de la placa. En quant als rodaments són uns igus drylin R-RJ4JP-01 de plàstic autolubricant, pel que no necessiten pràcticament manteniment i no creen brutícia, dins una carcassa d'alumini que els fixa amb dos anelles seeger. Finalment els rodaments llisquen sobre dos vares d'acer de 8mm de diàmetre i 170 mm de longitud que estan fixades a l'estructura en els seus extrems amb dues peces impreses en 3D i dos cargols M4.

### 3.2.5 ELECTRÒNICA

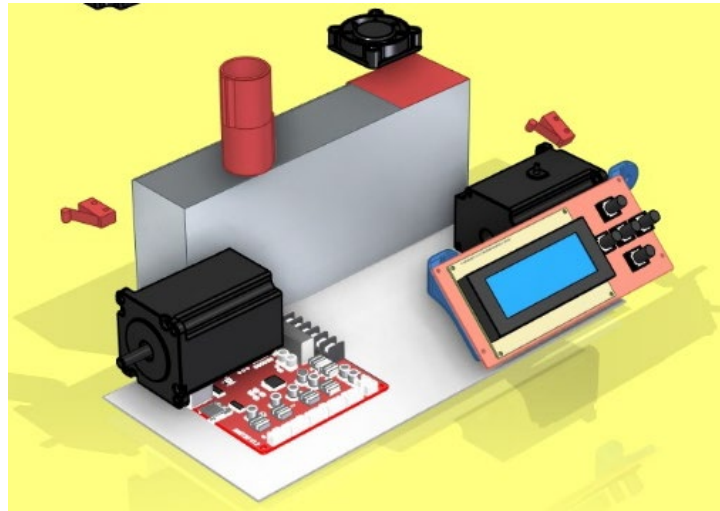


Figura 29. Components electrònics del prototip. (Font: pròpia)

- **Pantalla controladora:** Per al control de la màquina i la visualització de les seves funcions s'ha utilitzat una pantalla LCD de 3 polsades amb una botonera de 5 botons incorporada. Amb ella és pot controlar la temperatura, el moviment dels motors, el flux del ventilador i, per suposat, el mode automàtic per a la injecció de la peça desitjada. És la mateixa pantalla i botonera que s'utilitza en impressores 3D DIY com la Anet A8.
- **Font d'alimentació:** Per a subministrar corrent a tots els components s'ha connectat una font d'alimentació de 360W, amb un voltatge de sortida de 12v i fins a 30A, a la qual se li ha incorporat un connectar per al cable d'alimentació amb botó d'alimentació i un fusible per a prevenir possibles pujades de tensió. Tot això ha estat cobert per una carcassa impresa en 3D i collat a la part de darrere de la injectora, ocupant un volum total de 220x115x53 mm.
- **Placa base:** L'encarregada de processar tots les ordres i moviments de la màquina és una placa MKS base per a impressores RepRap. Treballa a 12v i disposa de connectors compatibles amb la resta de components (pantalla, motors, ventilador, termistors, resistències...). Ocupa un espai de 105x95x20 mm i esta fixada al tauler inferior, que es troba entre les potes de la màquina, mitjançant 4 columnes que la separen lleugerament del terra per afavorir el seu refredament.

- **Motors:** S'han escollit 2 motors pas a pas Nema 23 de la marca Stepperonline amb un parell motor màxim de 3 Nm, amb el que tenen un consum de corrent de 4,2 A, per accionar el bloc injector i el de tancament. Les seves mides són 57x57x113 mm i tenen un pes de 1.67 kg. En canvi pel bloc plastificador s'ha decidit utilitzar un motor més senzill Nema 17 de 0.45 Nm, amb un consum de 1.7A, doncs els requeriments de moments i revolucions no són tan grans. Ambdós tipus estan fixats als perfils de l'estructura mitjançant una placa d'alumini.
- **Bloc tèrmic:** Per a escalfar el tub de plastificació s'utilitzen dos bandes calefactores de mica amb un controlador PID Rex-C100 i una sonda termopar de tipus K, tot el conjunt té un consum de 140W. D'altra banda disposem d'una resistència de cartutx com les utilitzades al capçal d'una impressora 3D amb el seu propi termistor amb el que s'escalfen l'extrem del tub injector i la boquilla, aquesta configuració té un consum de 40W. Finalment per a refredar la peça un cop injectada al motllo tenim un ventilador de 20mm de 12V fixat a la placa mòbil mitjançant dos cargols.
- **Software:** El software encarregat de moure tot el conjunt és una interfície de codi obert utilitzada en el control de Impressores 3D anomenada *Marlin*. Aquesta ha sigut modificada per a poder entendre amb els nous components i ajustar el moviment dels motors al recorregut disponible al prototip, d'aquesta manera mitjançant la pantalla i la botonera podem accedir a un menú on es poden moure els motors mil·límetre a mil·límetre, disminuir o augmentar la temperatura i accionar el ventilador. La automatització d'una colada es realitza programant un arxiu en entorn G, utilitzat en màquines CNC o impressores 3D, per a que els moviments dels motors es realitzin de forma controlada i sincronitzada així com ajustar la temperatura tant de la plastificació com de la boquilla i el flux d'aire del ventilador, per a després carregar-lo a la placa base amb una targeta micro-SD.

## 4 SIMULACIONS MITJANÇANT ELEMENTS FINITS

Durant aquest capítol es portaran a terme dues simulacions utilitzant elements finits mitjançant el software Solidworks amb llicència d'estudiant.

La primera simulació es realitzarà en l'entorn de plàstics per a comprovar com es comportarà el polímer a l'intentar omplir una peça de prova amb les condicions a les quals pot arribar el prototip.

La segona simulació serà un estudi d'esforços a fatiga per a comprovar la resistència del suport dels rodaments als cicles d'obertura i tanca del motlle.

### 4.1 OMLERTA DEL MOTLLE

Es dissenya una peça en forma de moneda per a ser injectada en dues cavitats. Se li calcula, fora dels objectius i abast d'aquest treball, un diàmetre de canal i de les portes d'entrada del material el més òptim possible perquè les dues cavitats puguin ser omplertes alhora i amb el menor esforç possible. També s'aplica un angle de desemmotllament de  $2^\circ$  a totes les parets de la peça per a facilitar l'ejecció d'aquesta, que es farà mitjançant tres pins, un al centre del canal i els altres dos al centre de les peces aprofitant els cercles del dibuix per a dissimular la marca.

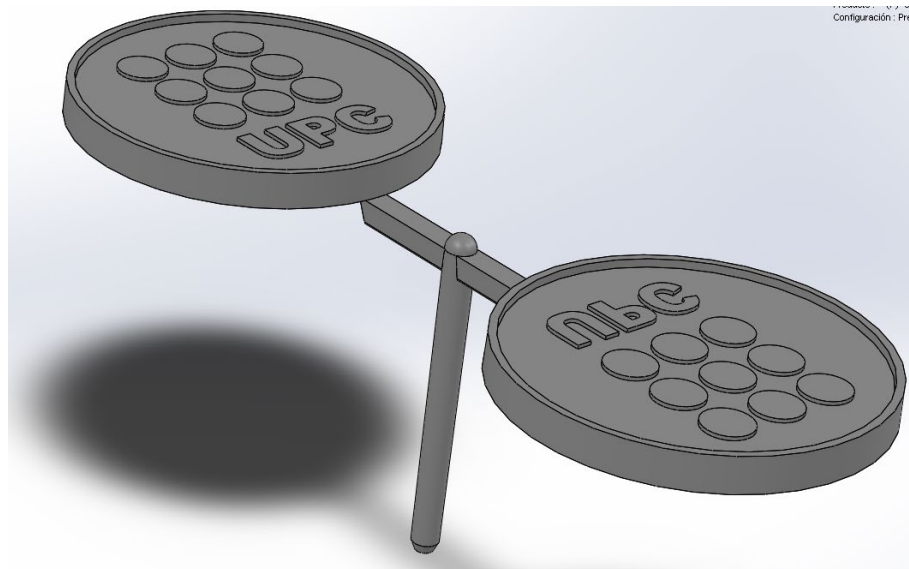


Figura 30. Disseny de la peça a injectar amb els seus canals.

El punt d'injecció es localitza a l'extrem inferior de la tija central amb un diàmetre de 1.2 mm.



Els materials seleccionats són Poliestirè de baixa densitat genèric com a polímer a injectar, degut a la seva semblança quant a viscositat i punt de fusió amb el PLA<sup>[11]</sup>, i nylon 6-10 per al motlle doncs té una gran resistència a la calor i pot ser imprès en 3D per a fabricar el motlle del prototip<sup>[12]</sup>. Les temperatures de treball per a ambdós materials es fixen a 220°C i 40°C respectivament.

La pressió màxima d'injecció és delimitada a 20MPa i a la força màxima de tanca disponible se li dona el valor de 6.5 tones. Aquests valors són aproximats i es calcularan amb més exactitud al següent apartat.

**Parámetros del proceso**

Tiempo de llenado (sec): 0.52

Temperatura del material (°C): 220

Temperatura del molde (°C): 40

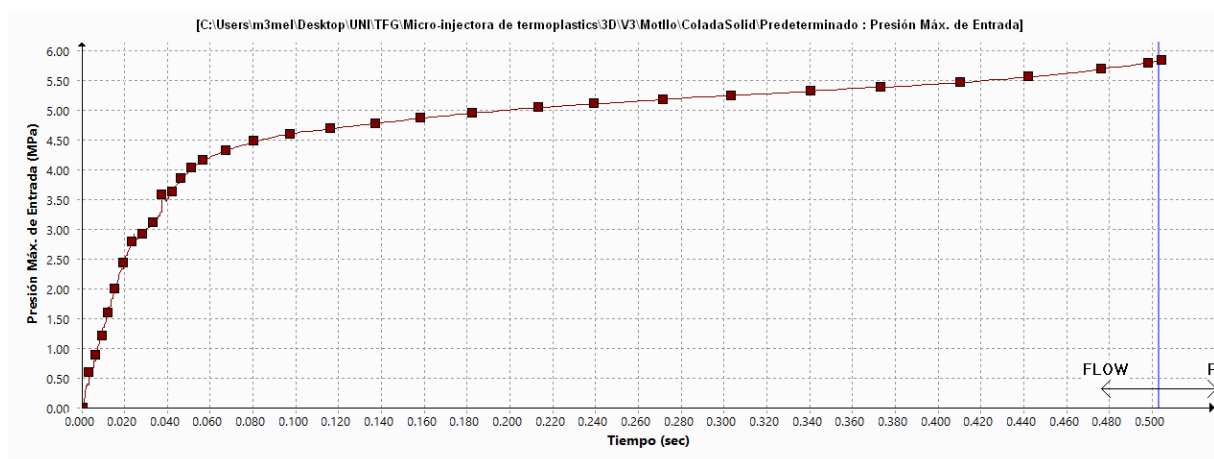
Presión máxima de inyección (MPa): 20

Límite de fuerza de cierre (Tonne): 6.5

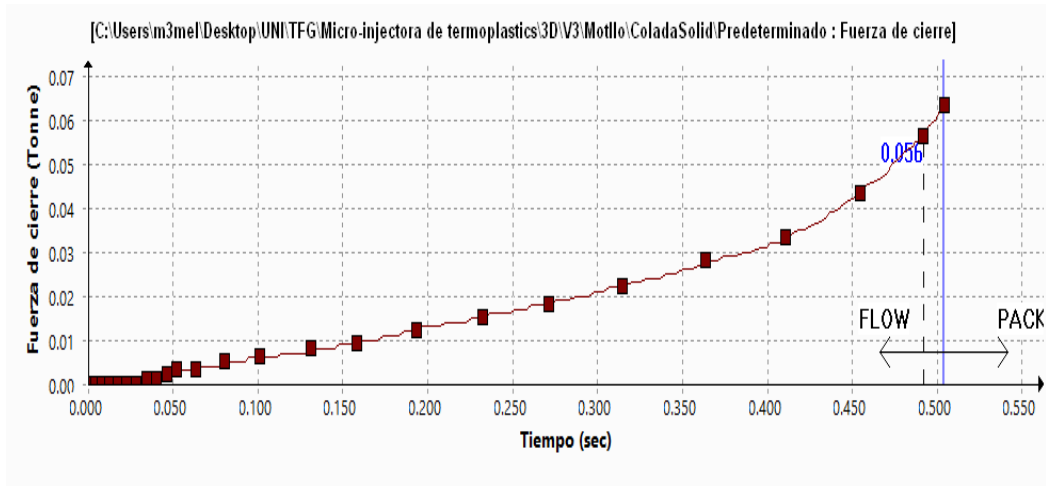
Figura 31. Paràmetres del procés. (Font: pròpia)

Un cop establerts tots els paràmetres i les condicions de contorn es procedeix a l'execució de la simulació.

Els resultats obtinguts són satisfactoris. La peça es pot omplir correctament amb una pressió d'injecció de 5.8 MPa (Gràfica 1), inferior al 66% del límit de pressió d'injecció màxima especificat per aquesta anàlisi, i la força de tanca necessària per a mantenir el motlle tancat té el seu pic màxim a 0.066 Tones o 650 N (Gràfica 2).



Gràfica 1. Pressió d'injecció en funció del temps. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)



Gràfica 2. Força de tanca en funció del temps. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

La peça triga un total de 0.503s en ser omplerta totalment. Com era d'esperar l'última zona a la qual arriba el polímer és a l'extrem oposat de la porta, amb una diferència d'aproximadament 0.4s amb l'entrada del material a aquesta. En ambdues cavitats l'omplerta es realitza de forma simultània com es pot observar a la figura 32.

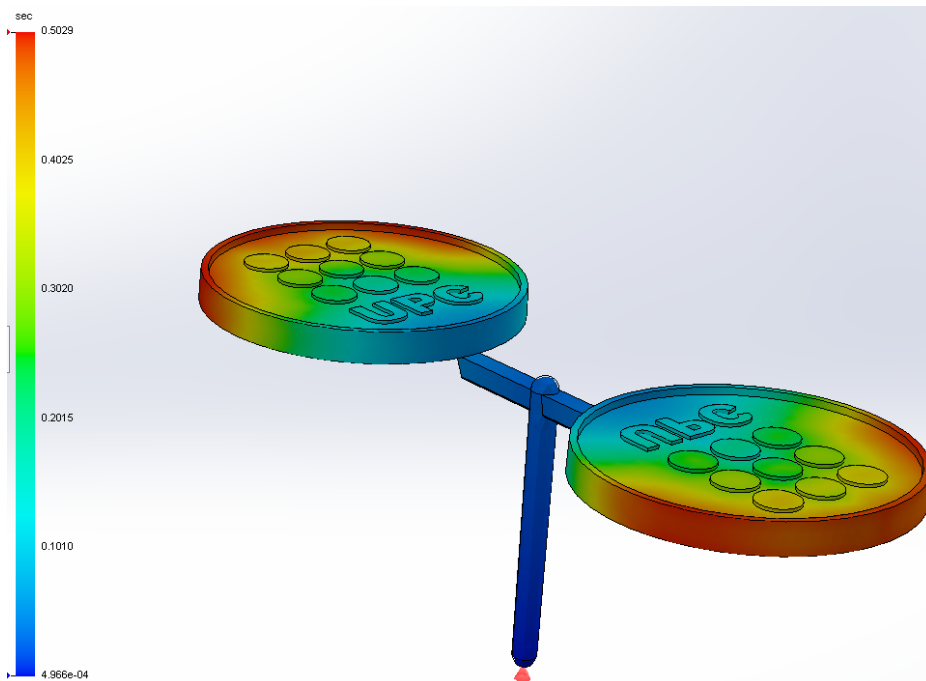


Figura 32. Temps que triga el polímer a arribar a cadascuna de les parts de la colada.

(Font: pròpia mitjançant Solidworks)

La temperatura en finalitzar la injecció es manté a no més de 10°C per sota de la temperatura inicial, a excepció d'un parell de zones, que es comentaran a continuació, per la qual cosa s'aconsegueix una injecció uniforme i sense degradació del plàstic.

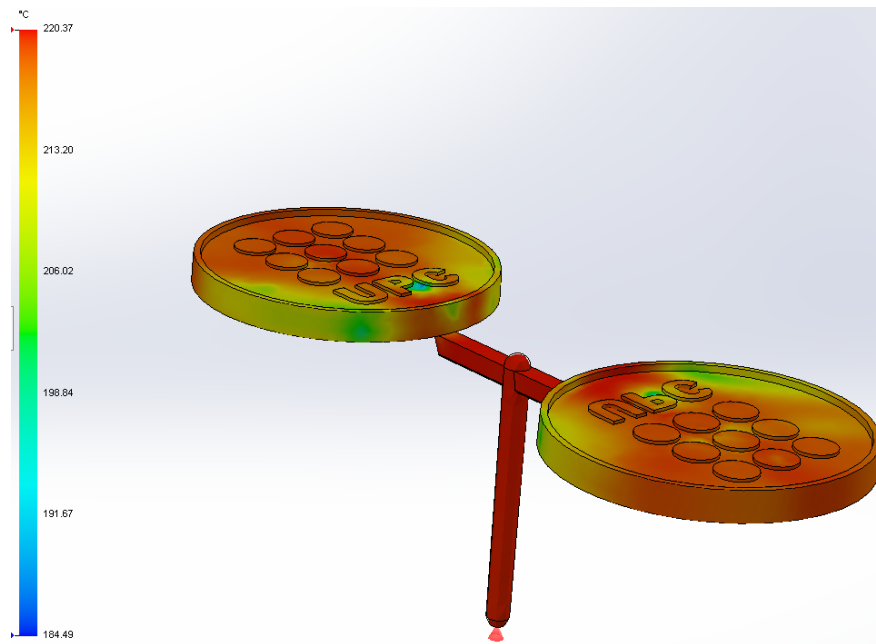


Figura 33. Temperatura del polímer al finalitzar la injecció. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

Es pot observar a la figura 34, que a les zones on hi ha un canvi brusca en el gruix de la peça, com en el dibuix central, trobem xuclets. Aquesta falta de material no és superior als 0.0325 mm en les dites zones i a la resta de la peça es troba en valors completament negligibles.

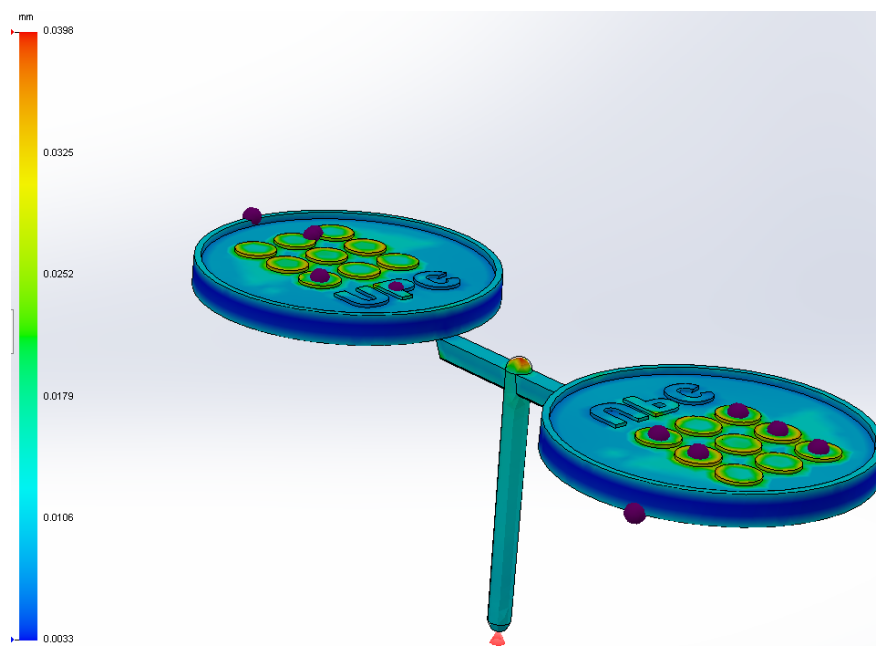


Figura 34. Xuclets i consegüents atrapaments d'aire. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

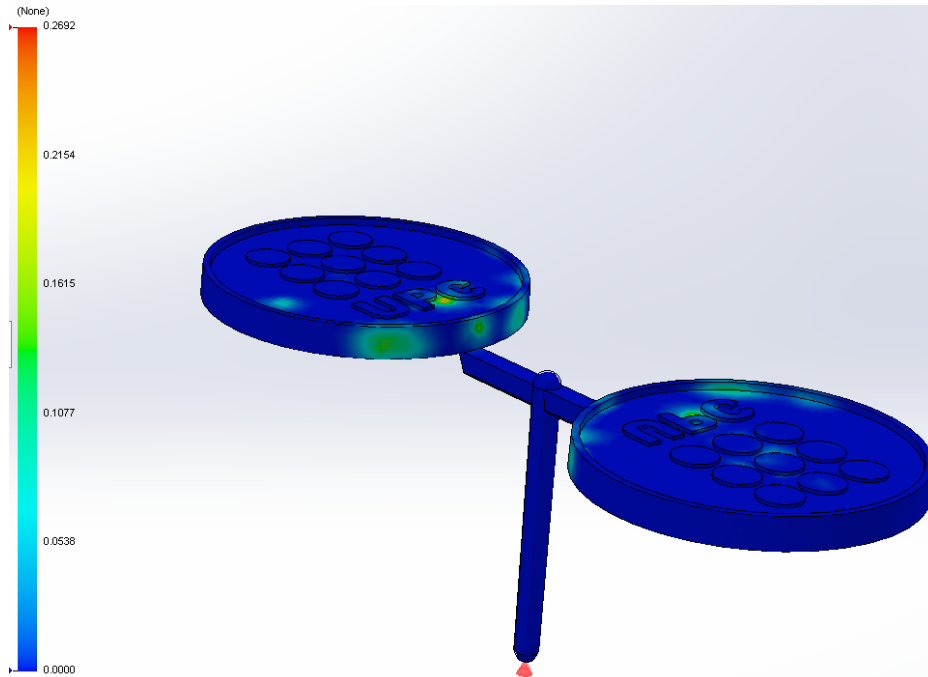


Figura 35. Fracció solidificada. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

Es pot observar com a les zones properes a les portes la temperatura al final de la injecció a baixat més de 20°C i per tant s'han creat fraccions solidificades en les parets. Això és a causa del fet que el polímer es solidifica a l'entrar en contacte amb una paret i a l'haver una diferència de temps més gran entre l'arribada del polímer a les zones marcades en verd a la figura 35 i el final de la injecció, així com una disminució més significativa de la temperatura, més quantitat de plàstic s'ha pogut solidificar en aquestes parets.

En conclusió la simulació ha sigut molt satisfactòria i tot i mostrar-se un parell de punts conflictius respecte a xuclets i solidificacions prematures, no són excessivament grans o problemàtics i podríem ser fàcilment remeiables amb un lleuger redisseny de la peça. D'altra banda, s'han obtingut uns valors de pressió d'injecció i força de tanca bastant per sota del que hipotèticament s'havia establert amb anterioritat. Això s'ha aconseguit en part per l'absència de parets molt primes i de geometries complexes o de recorreguts excessivament llargs, per la qual cosa per als càlculs del funcionament general de la màquina s'utilitzaran uns valors lleugerament per sobre dels obtinguts en aquesta simulació a mode de factor de seguretat.

## 4.2 RESISTÈNCIA ESTRUCTURAL

A causa de la mida reduïda de la màquina la gran majoria de components estan sobredimensionats i no tindran cap mena de problema en suportar les càrregues a les quals estan sotmeses, ni tan sols a fatiga, com és el cas de les plaques del motlle, els eixos guia, els perfils de l'estructura, etc. És per això que aquest estudi se centrarà en una de les peces impreses en 3D que està sotmesa a la força de tanca del motlle, el suport dels rodaments dels cargols sense fi.

Sobre aquesta peça actuen les càrregues produïdes per la tanca a pressió de les dues meitats del motlle. A l'estar fixat radialment l'anell central dels rodaments als cargols sense fi la força de reacció que actua sobre la femella quan intenten mantenir les dues parts del motlle en contacte es transmet als rodaments que alhora es transmet d'aquests a la paret interior del suport on es recolzen com es mostra a la figura 36.

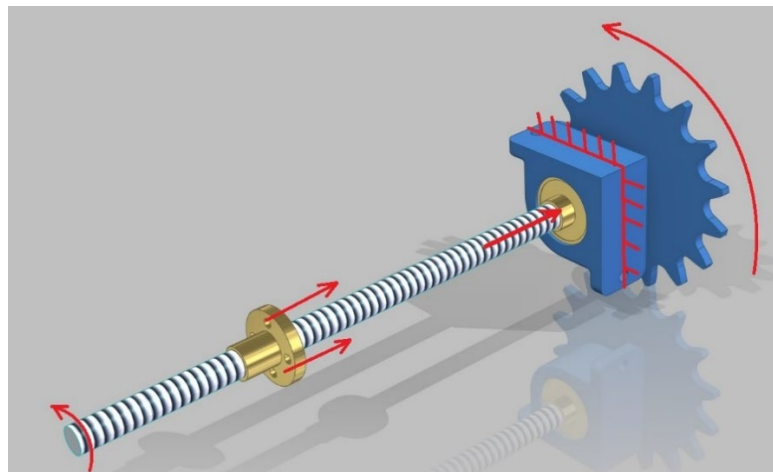


Figura 36. Distribució de càrregues que afecten la peça a estudiar. (Font: pròpia)

Es realitza un primer estudi d'esforços estàtic a l'aplicar la força de reacció sobre la peça per a després poder simular el comportament de la peça als cicles a fatiga d'aquest esforç.

A l'entorn de simulació es crea una fixació rígida als forats dels cargols, mentre que es defineixen les parets exteriors com a *rodillos deslizantes*, per simular el contacte amb les parets de les extrusions d'alumini sobre les que es recolzen, per últim s'aplica a la cara interior on s'insereix el rodament una força de 1000N, un valor 1,5 vegades més gran que l'obtingut a la simulació d'omplerta del motlle.

Un cop iniciada la simulació s'obté un valor màxim de deformació de 0,21 mm a la cara més allunyada de les fixacions i unes tensions de Von Mises d'entre 0,056 i 5,2 Mpa a la major part de la peça, amb uns pics a les arestes del forat on es col·len els cargols de fins a 30 Mpa com es pot observar a la figura 37.

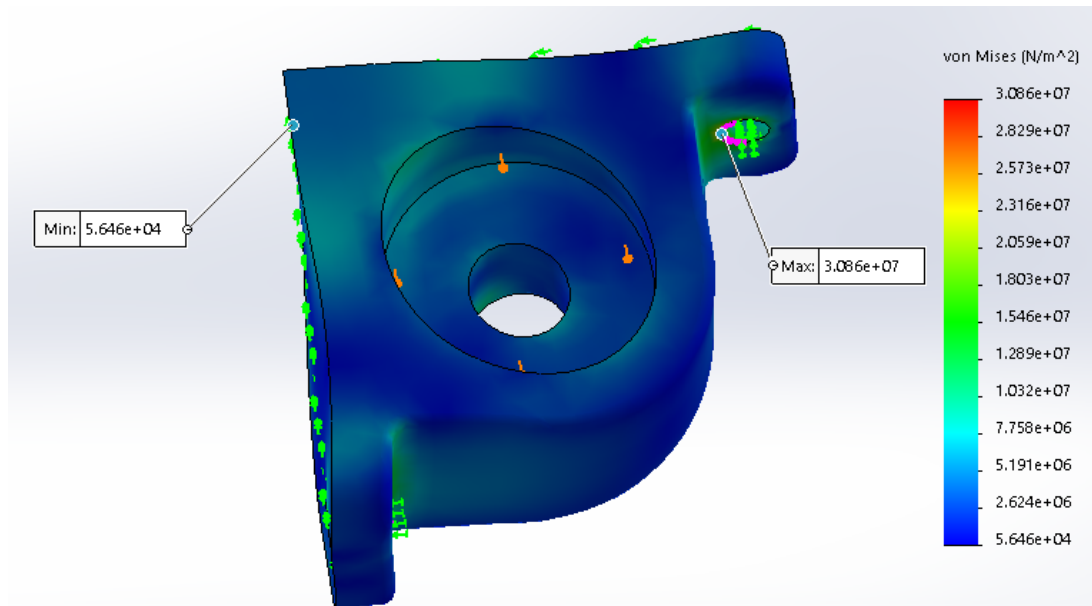
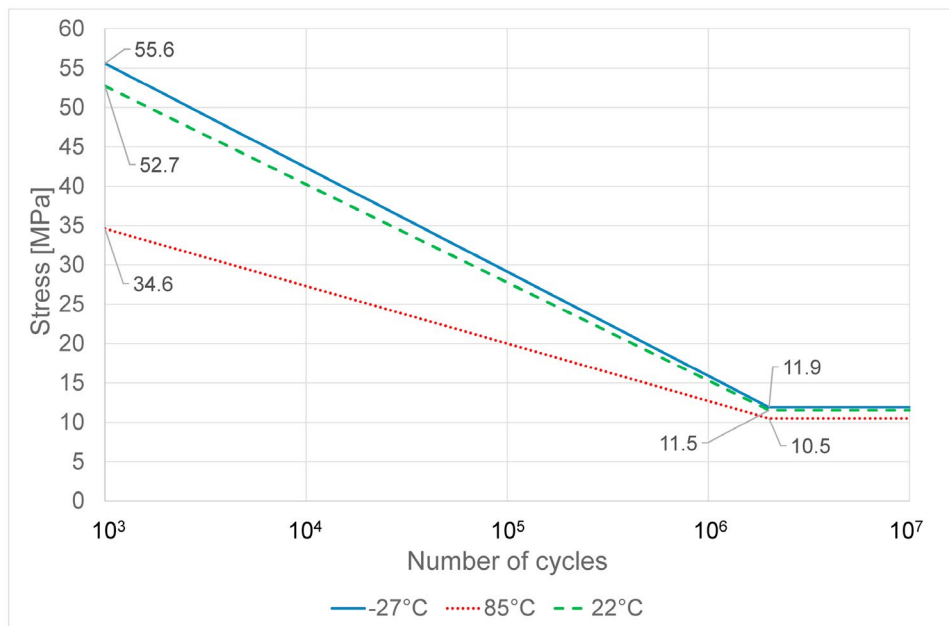


Figura 37. Tensions de von Mises en N/m<sup>2</sup>. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

Les tensions i deformacions descrites anteriorment suposen un factor de seguretat de 1.36 respecte al límit elàstic del material<sup>[13]</sup> pel que, en principi, la peça hauria de poder suportar aquest esforç sense majors complicacions. Per tant es procedeix a aplicar un estudi a fatiga a vida infinita, 10<sup>6</sup> cicles, amb una càrrega polsant, és a dir, que es carrega i descarrega la peça entre els 1000N de la força de tanca i els 0N en repòs.

Per a realitzar l'estudi s'utilitza el següent diagrama S-N per a l'ABS a 22°C<sup>[13]</sup>:



Gràfica 3. Diagrama S-N del 'ABS per a diferents temperatures de treball. (Font: MDPI AG)

S'importen les dades de càrrega, cicles i el diagrama S-N al software de simulació i s'inicia l'estudi a fatiga:

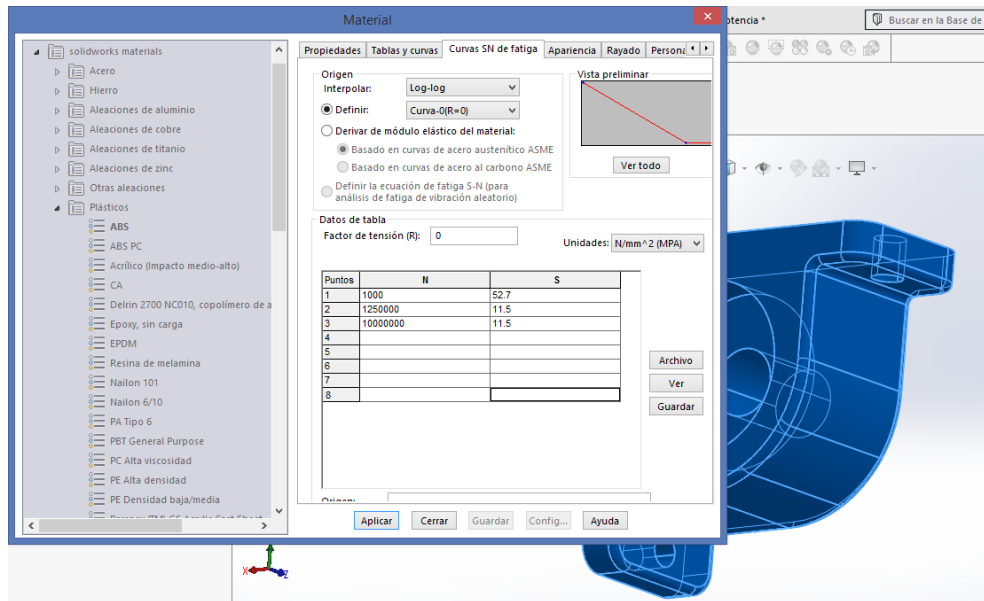


Figura 38. Creació del diagrama S-N per l'abs. (Font: pròpia)

L'estudi a fatiga ens crea dos tipus de resultats, per una banda el tant per cent de dany al qual contribueix cada zona (figura 39) i d'altre els cicles que resistiran cadascuna d'aquestes zones (figura 40).

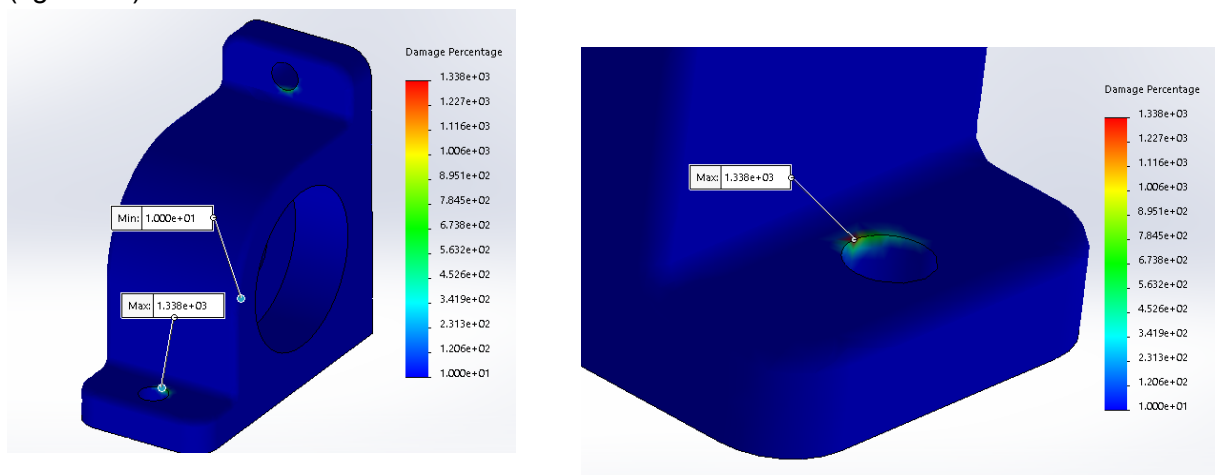
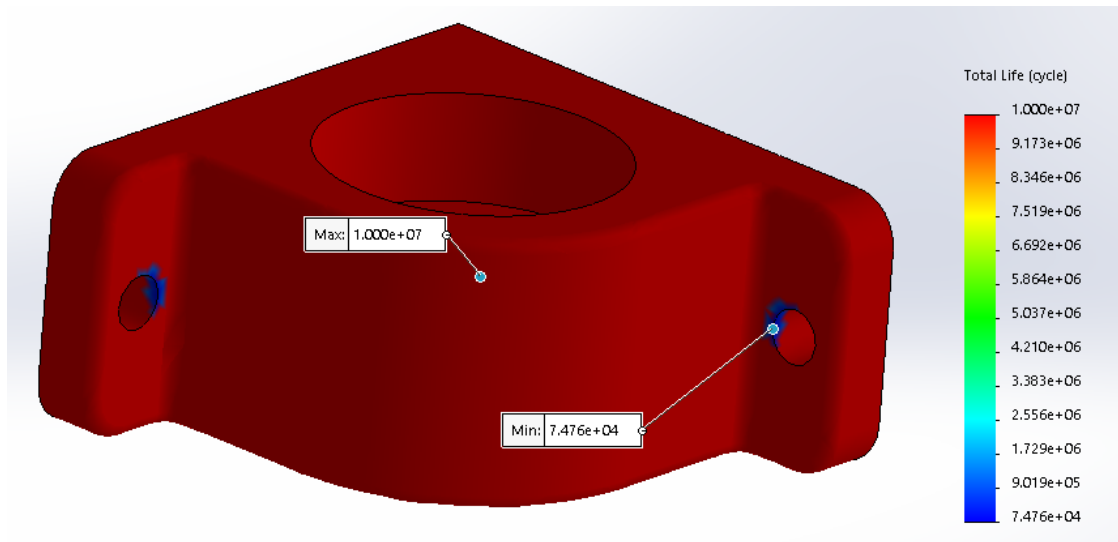


Figura 39. Dany percentual al qual contribueix cada part de la peça. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)

Com es pot observar les tensions que veiem en gran part de la zona a l'estudi estàtic no creen cap dany a la peça a fatiga, perquè els seus valors estan per sota de la línia límit de fatiga d'11,5 Mpa. Llavors són només les tensions creades a la unió cargolada que creen un dany significatiu a fatiga com per a produir una falla a la llarga.



**Figura 40. Nombre de cicles abans de la fallada. (Font: pròpia mitjançant Solidworks)**

Comprovem a la figura 40 que pràcticament tota la peça aguanta més de  $10^6$  cicles, és a dir que tenen una vida infinita, i com ja podíem veure a la imatge anterior són els forats de les fixacions els que fallaran abans per fatiga després de 74.760 cicles.

En conclusió la peça és capaç de mantenir la seva integritat amb els esforços que se li apliquen durant 75 mil cicles, segurament fins i tot més degut als factors de seguretat aplicats i a què no totes les geometries a injectar necessitaran unes forces de tanca tan elevades. La falla es produiria només a la fixació amb l'estructura, de manera que si se li mecanitzessin uns xamfrans i s'introduís una volandera entre el cargol i la peça per distribuir aquest esforç en una àrea més gran, es podria augmentar la vida d'aquesta significativament.



## 5 CÀLCULS JUSTIFICATIUS

En aquest apartat es poden visualitzar els càlculs realitzats per a assegurar el correcte funcionament del prototip així com dels diferents components escollits.

### 5.2 MOMENT DEL CARGOL INJECTOR

Per a escollir el motor adequat per a moure el pistó injector és necessari saber quin moment ha de crear aquest per a obtenir la pressió requerida a dintre del tub injector. En aquest cas es suposa que no és requeriran més de 15 MPa per a omplir la configuració de motlle més gran, aproximadament tres cops més que l'obtingut a la simulació de l'apartat anterior, a part es menyspreen les forces degudes al pes dels components.

Per tant, mitjançant la pressió i la secció del tub podem trobar la força d'injecció requerida:

$$P = F/S \rightarrow F_{max} = 15MPa * (5^2mm * \pi) = 1200N$$

Un cop obtinguda la força d'avanç podem traduir-la al moment de gir necessari per al nostre cargol i femella:

$$Mt = Mr + Mf = F * \frac{dp}{2} * tg(\lambda + \theta) + \frac{F * \mu v * df}{2}$$

On:

- $dp = d_{rosca} - \frac{P}{2} = 8mm - \frac{2}{2} = 7mm$
- $\lambda = arctg\left(\frac{P}{\pi * dp}\right) = arctg\left(\frac{2}{7\pi}\right) = 5.29^\circ$
- $\theta = arctg(\mu r) = arctg(0.15) = 5.14^\circ$  ( $\mu r = coeficient de fricció de la rosca$ )<sup>[14]</sup>
- $df = 14.5mm = diàmetre de fricció entre la femella i el casquillo$
- $\mu v = 0.04 = coeficient de fricció entre la femella i el casquillo$ <sup>[15]</sup>

Per tant el moment necessari al cargol serà:

$$1200N * \frac{7mm}{2mm} * tg(5.29^\circ + 5.14^\circ) + \frac{1200N * 0.04 * 14.5}{2} = 1121Nmm = 1.15Nm$$

### 5.3 POTÈNCIA ELÈCTRICA

La potència elèctrica de la màquina serà subministrada per la font d'alimentació, llavors per tal d'aconseguir la font idònia em de calcular la potència que consumiran els diferents components:

- Anells calefactables =  $2 * 70W^{[16]} = 140W$
- Motors Nema 23 =  $2 * 4.2A * 12V^{[17]} = 100W$
- Pantalla i ventiladors = 10W
- Motor Nema 17 =  $0.75A * 12V^{[18]} = 9W$

Tot això ens suma un consum total de **260W** al màxim de la capacitat dels components, que queden totalment coberts amb la font de 360W que porta instal·lada el prototip.

### 5.4 REQUERIMENTS PER A LA PLASTIFICACIÓ

Per a aconseguir la plastificació total del material abans de que entri al tub injector ha de restar en moviment un cert temps. És per això que s'han de coordinar les revolucions de la broca, i per tant l'avanç del polímer, amb el temps necessari de residència. Tot i així aquests càlculs només són una aproximació bàsica per a tenir un punt de partida a l'experimentació on s'obtidran els valors exactes.

#### 5.4.1 TEMPS DE RESIDÈNCIA

El material que més s'utilitzarà és el PLA, el qual té un punt de fusió de 160°C i una capacitat calorífica de 1800J/kg\*K<sup>[11]</sup>.

Amb aquests dos valors es pot obtenir el calor necessari per a incrementar la temperatura dels, calculats al següent apartat, 3,5g de polímer que entren al tub plastificador amb cada revolució, des dels 20°C de temperatura ambient als 200°C de la temperatura d'injecció.

$$Q = mc * (Tf - To) = 0.0035kg * \frac{1800J}{kg * K} * (200 - 20) = \mathbf{1134 J}$$

Per obtenir llavors aquests 1134J mitjançant els 70W dels anells calefactables s'haurà d'aplicar calor durant el següent temps:

$$1134J = 70W * Xs \rightarrow \frac{1134J}{70W} = \mathbf{16.2s}$$

## 5.4.2 VOLUM DE PLASTIFICACIÓ I RPM DE LA BROCA

Amb cada revolució completa de la broca s'omple un dels seus flancs, els quals si interpretem com un toroide de 16 mm de diàmetre exterior i 4 mm d'interior amb una alçada de 15 mm ens dona que tenen un volum aproximat de  $2.8 \text{ cm}^3$ , que multiplicats per la densitat del PLA de  $1.241 \text{ gr/cm}^3$  ens donen **3.5gr de material per revolució**. Al igual que s'omple el flanc superior amb cada revolució també es diposita la mateixa quantitat de plàstic fos per la part inferior al tub injector. Es de suposar que amb un cert percentatge de gir es dipositarà la quantitat proporcional de material.

S'ha de tenir en compte que la broca té 4 flancs a dintre del tub plastificador que s'hauran d'omplir abans de poder dipositar el material a la zona d'injecció. Si a això li sumem els aproximadament 16s que triga el material a fondre, segons els càlculs anterior, obtenim que la broca ha de girar a 4 rev/16s, és a dir,  $0.25 \text{ rev/s}$  o **15 rpm**.

## 5.5 FORÇA DE TANCA

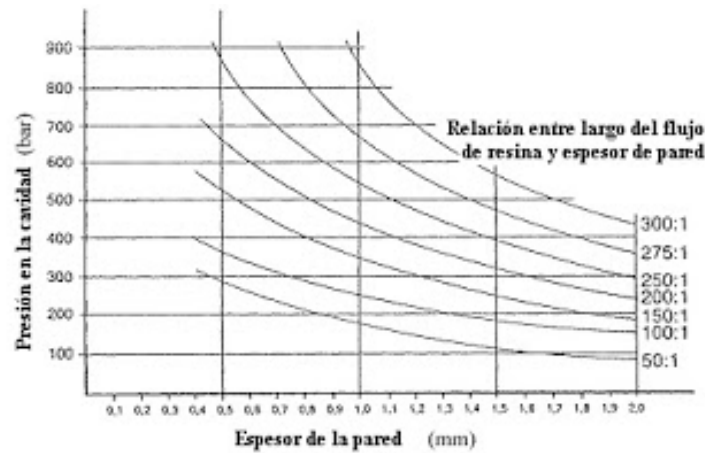
El mecanisme de tanca ha de ser capaç de mantenir les dues meitats del motllo unides a alta pressió durant l'omplerta d'aquest perquè el menor desajust o obertura entre elles pot causar una peça defectuosa o fins i tot la fuga de material calent a alta pressió.

És per això que es necessari calcular quina pressió tindrem a la cavitat i quin parell haurà de tenir el motor per a contrarestar-la.

### 5.5.1 PRESSIÓ A LA CAVITAT

La pressió al interior del motlle derivada de la injecció depèn de la geometria de la peça injectada i del material utilitzat. En aquest cas es suposarà que s'injecta una peça de la major mida possible en Poliestirè de baixa densitat, doncs té unes propietats semblants al PLA.

- Dimensions de la peça:  $60 \times 30 \text{ mm}$  → Àrea projectada=  $A_p = 1800 \text{ mm}^2$
- Recorregut màxim del material:  $20 \text{ mm}$  abeurador +  $60 \text{ mm}$  peça=  $80 \text{ mm}$ .
- Pressió màxima disponible:  $15 \text{ MPa}$ .
- Relació de flux:  $50:1$  →  $80 \text{ mm}$  de recorregut i  $1.6 \text{ mm}$  d'espessor de les parets.
  - Pressió de la cavitat=  $P_i = 100 \text{ bar} = 100 \text{ kg/cm}^2$  → Obtingut de la gràfica 1<sup>[19]</sup>.



- Correcció de viscositat:  $100 \text{ kg/cm}^2 * 1.2 \text{ (PEBD)} = 120 \text{ kg/cm}^2$
- Força de tanca =  $P_i * A_p = 120 \text{ kg/cm}^2 * 18 \text{ cm}^2 = 2.130 \text{ kgf} = \mathbf{21.000N}$

### 5.5.2 PARELL MOTOR

Al igual que amb el cargol injector un cop obtinguda la força d'avanç requerida haurem d'aplicar les equacions de moments de cargols per calcular el moment necessari que ha de traslladar el motor.

Al utilitzar la mateixa configuració de cargols i femelles els valors a l'equació seran els mateixos que en el cas anterior i només canviarà el valor de la força, que serà de 21.000N dividida entre els dos cargols, per tant 10.500N cadascun. La diferència és que en aquest cas no trobem cap fricció de volanderes o casquillos i per tant el segon terme de l'equació és eliminat.

$$M_t = M_r = F * \frac{dp}{2} * tg(\lambda + \theta)$$

$$10.500N * \frac{7mm}{2mm} * tg(5,29^\circ + 5,14^\circ) = 6.765Nmm = \mathbf{6.75Nm}$$

D'aquest 6.75 Nm, el motor n'haurà de proporcionar el doble perquè disposem de dos cargols, però degut a la relació de 2:1 entre els plats i el pinyó del motor només necessitarem d'un motor amb un parell de **7 Nm**.

## 6 FABRICACIÓ DEL PROTOTIP

Un cop realitzat tot el disseny de la màquina en 3D i fets els càlculs i simulacions que assegurin el seu funcionament és quan es comença a construir el prototip.

A causa de la situació sociosanitària provocada per la Covid-19 tot el muntatge i fabricació del prototip es porta a terme a un pis d'estudiant on tant l'espai com els recursos són escassos, per això un dels objectius del projecte era evitar en la mesura del possible la necessitat d'utilitzar maquinària professional o geometries complexes.

Les eines utilitzades són:

- **Trepant de mà:** per a realitzar els forats tant a l'estructura com a les platines i plaques de metall.
- **Serra manual:** per a tallar les extrusions d'alumini a mida.
- **Llimes per metall:** per a rectificar qualsevol tall o forat.
- **Claus Allen:** de diferents mides per a fixar els cargols.
- **Tenalles:** per a ajudar amb la fixació dels components.
- **Kit de rosques:** per a rosca els orificis dels diferents components.
- **Impressora 3D:** per a crear gran part de les peces utilitzades. Model Creality Ender 5.

La construcció comença per tallar tots els perfils d'alumini a les mides corresponents mitjançant la serra manual i una guia impresa en 3D per a realitzar els talls tan rectes com sigui possible. Un cop tallats es llimen els extrems per eliminar qualsevol rebava i assegurar la rectitud del tall perquè tinguin un bon contacte i les unions siguin en angle recte.

Els perfils s'uneixen formant un quadrat mitjançant les esquadres i les carcasses dels rodaments a les cantonades interiors d'aquest per a formar l'extrem de la màquina on trobem els plats. A cadascuna de les cantonades se'ls hi fa un forat per a passar un cargol M6 i així poder fixar perpendicularment al quadrat els 4 perfils que delimiten la zona del motlle, com es pot veure a la figura 41.



Figura 41. Estructura posterior. (Font: pròpia)

En aquest moment ja es poden tallar a mida tant els cargols sense fi com les vares de les guies lineals i muntar les fixacions d'aquestes i els plats als extrems dels cargols.

Seguidament es construeix la paret on es muntarà la placa fixa i es colla als 4 perfils horitzontals també a través de forats i cargols M6, doncs la força de tanca de la màquina intenta separar aquestes dues parts i només amb les esquadres no es mantindrien unides.

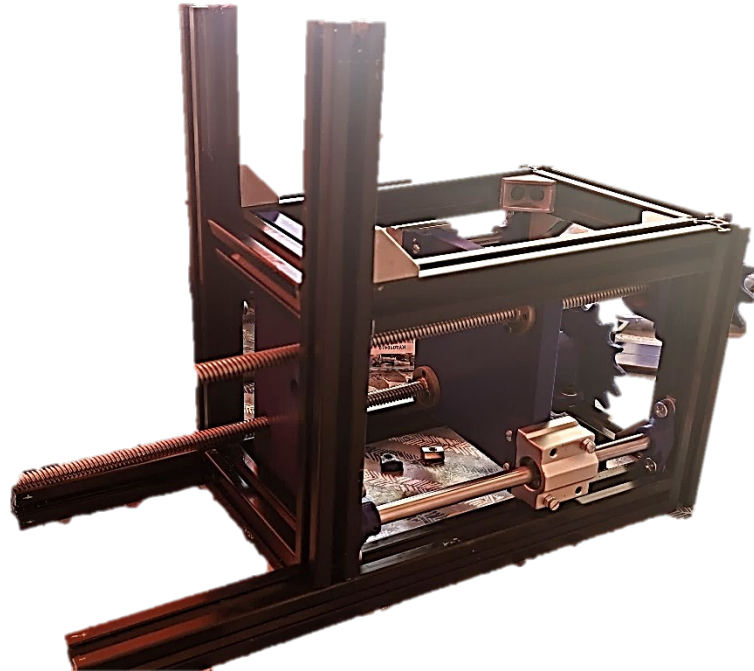


Figura 42. Estructura del subconjunt de tancament. (Font: pròpia)

En aquest punt es pot assegurar que tots els components del subconjunt motlle i de les guies lineals encaixen i es mouen sense friccions. Primer es preparen tots els components, s'insereixen els rodaments lineals Iguus a dintre de la seva carcassa i es fixen amb dues anelles Seeger als extrems, llavors es collen per la part de sota de la carcassa les fixacions per a la placa mòbil mitjançant 4 cargols M3 i les seves respectives femelles, seguidament es tallen i perforen les plaques mòbil i fixa seguint una plantilla impresa en 3D per a marcar amb exactitud la localització de les dites operacions i es collen les femelles de llautó als seus forats corresponents de la placa mòbil. A continuació es procedeix al muntatge; la placa fixa es colla amb 2 cargols a la part superior i dos a la part inferior als perfils de l'estructura mitjançant femelles en T, es posen llavors les vares guia amb els rodaments lineals, s'insereix la placa mòbil a les seves fixacions i es passen els cargols sense fi amb els plats als extrems a través dels rodaments de les cantonades de l'estructura, així com de les femelles fixades a la placa mòbil fins als forats a la placa fixa. Si en aquest punt es troba algun mal encaix es poden moure les fixacions tant de les guies com dels cargols sense fi mitjançant les femelles en T a dintre dels perfils d'alumini fins que tots els components es desplacin amb facilitat i mantinguin un bon ajust entre ells.

Amb els perfils que falten es tanca la torre d'injecció creant un altre quadrat unit per esquadres i fixant-lo a la part superior amb les dues columnes restants. Finalment es fixen les potes per a acabar l'estructura.

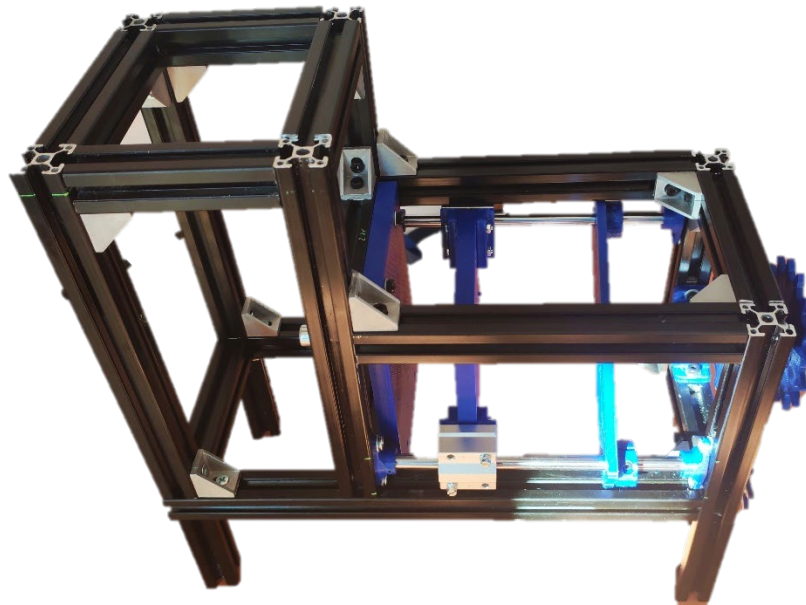


Figura 43. Estructura completa. (Font: pròpia)

Amb l'estructura finalitzada es poden muntar ja la resta de components. Per acabar el subconjunt del motlle es passen els 3 pins a través de la primera placa ejectora i es col·loca la segona just a darrere d'aquesta, llavors es passen 4 cargols amb les seves respectives molles i es collen a la placa mòbil. Finalment es rosca l'interior del topall i es cargola a la seva placa per a seguidament introduir aquesta en diagonal entre les dues vares guies, fixant-la a la distància requerida estrenyent les dues meitats de les mordasses al voltant de la vara guia.

Un cop muntat al bloc ejector es pot seguir amb el bloc injector, començant per preparar els tubs ja tallats a mida. A l'injector se li llima l'osca per on entrarà el material i es rosca a M12 l'extrem per a poder collar la boquilla amb un reductor, fet a partir d'una secció de cargol M12 amb un orifici al centre roscat a M6. En canvi al tub plastificador només se l'ha de llimar un dels extrems per a coincidir la seva geometria amb l'orifici de la tolva i que no es creï resistència a l'entrada del material. Amb els tubs ja preparats es poden inserir a la junta de coure en T, el plastificador pel forat vertical i l'injector travessant els dos horitzontals fins que el seu orifici coincideixi amb el vertical. Finalment s'aplica un poc de massilla refractària per dintre de la junta fixant el tub injector perquè no es pugui desplaçar i que la geometria d'entrada del material sigui més suau i no tingui espais on quedar acumulat i degradar-se.



Llavors s'insereix l'extrem superior del tub plastificador l'orifici de la tolva i s'amorra la boquilla a l'embocadura roscada a la placa fixa, la qual s'ha fet perforant un cargol M6 amb una broca d'1.8 mm i creant un rebaix cònic al cap mitjançant una broca amb la punta modificada amb la mateixa inclinació que la cara exterior de la boquilla. Per a mantenir tot aquest conjunt a la seva posició es tallen dues platines d'alumini a mida amb forats centrals, en una del diàmetre exterior del tub i en l'altre de 8 mm. Seguidament s'introdueix l'extrem del tub injector pel forat de la primera platina per a fixar-la a la cara interior de les columnes de l'estructura, mentre que la segona platina es fixa a la cara exterior fent pressió contra l'extrem del tub.

Després d'això es crea el pistó injector a partir d'un massís rodó de bronze, el qual es talla a mida i se li trepa un petit orifici a un dels extrems per a roscar-lo i fixar el cargol sense fi que li donarà el moviment. El cargol s'insereix a dintre del tub injector i només falta muntar la carcassa protectora amb els seus rodaments, al lateral més gran s'encaixa un rodament 6004zz al qual se li insereix la protusió central de la politja, la qual a la cara contrària té collada una femella de llautó, i a l'altre un rodament lineal Igu. Llavors es passa el cargol pel centre dels rodaments i la politja i es fixa tota la carcassa a la platina anterior.

Per acabar es talla la punta de la broca per a aconseguir la longitud necessària i es lima una cara plana l'extrem on se subjecta perquè encaixi amb la politja. S'insereix la broca a dintre del tub plastificador de manera que sobresurtin uns centímetres dels seus flancs l'interior de la tolva perquè pugui recollir el material.

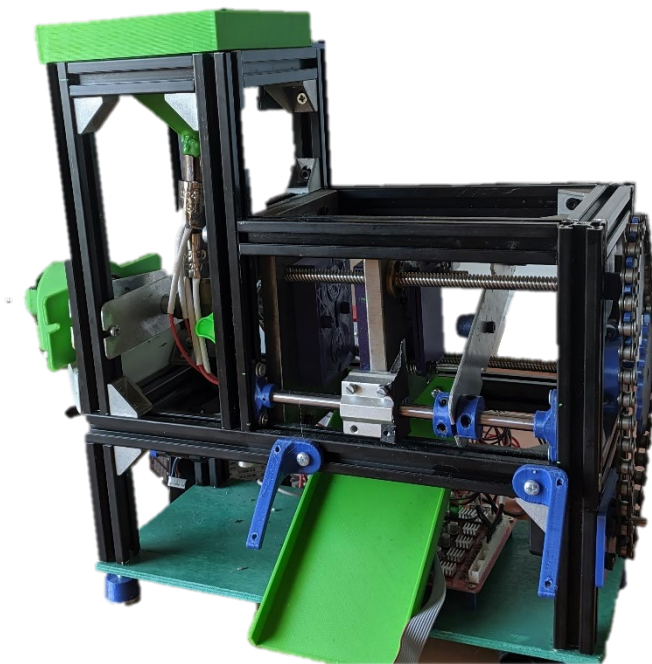


Figura 44. Muntatge de tots els components mecànics. (Font: pròpia)



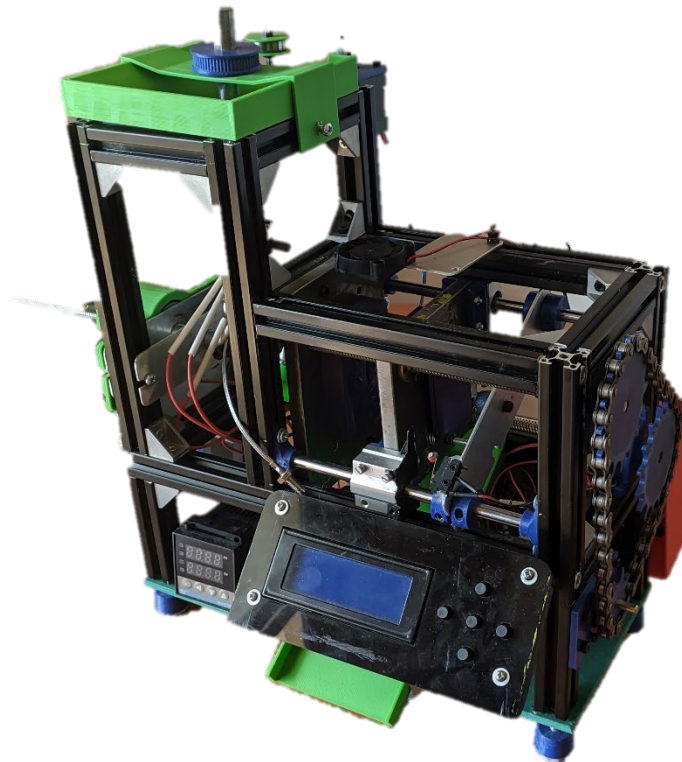
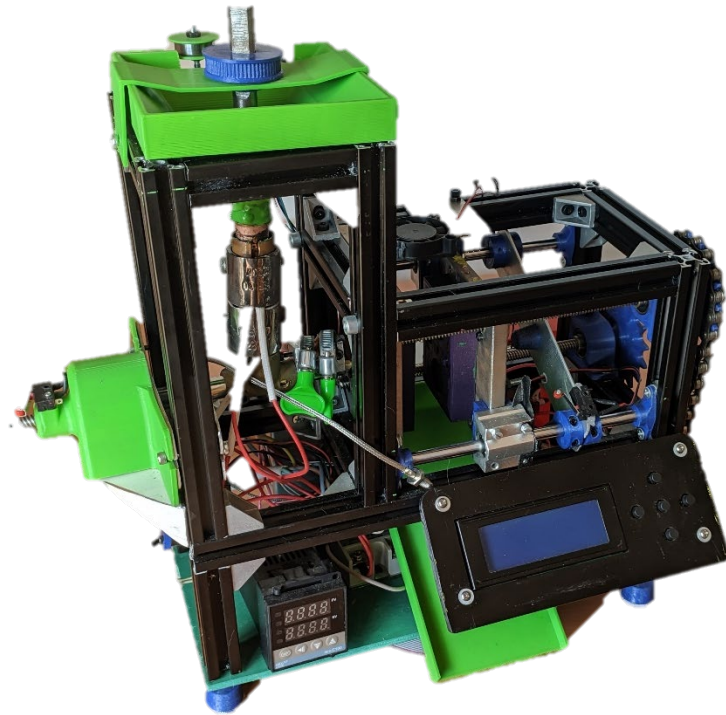
Amb això ja estan tots els components mecànics col·locats i fixats i només falta muntar els components elèctrics i fer el cablejat.

Es comença per la font d'alimentació a la qual se li instal·la, amb una carcassa feta en impressora 3D, un interruptor d'encesa amb un endoll per a connectar el cable d'alimentació. Després es treuen els dos cables que proporcionaran energia a tota la màquina i es colla la font en horitzontal a la part de darrere, al perfil d'extrusió més llarg, amb dos cargols.

Mitjançant les potes reguladores es fixa una planxa de fusta a la part inferior de la màquina per a poder collar-hi allí la placa controladora amb unes columnes separadores de plàstic i es realitzen llavors totes les connexions i cablejat de la resta de components. Es comencen fixant els motors en la seva posició mitjançant unes plaques que disposen d'un forat central perquè surti l'eix de transmissió, 4 forats per a fixar-se al motor i 2 més per a fixar-se a l'estructura amb dues femelles en T. A continuació es munten els jocs de politges o rodes transmissores amb les seves corresponents corretges, les quals gràcies al mètode de fixació del motor poden ser tensades movent aquests lliurement a través de l'eix del perfil al qual estan fixats.

Es collen seguidament els finals de carrera en les seves posicions amb dos cargols així com el ventilador a la part superior de la placa mòbil. A continuació es fixen dos braços impresos en 3D a les subjeccions de la pantalla i es collen al perfil de la part davantera de la màquina, oposat a la font d'alimentació.

Finalment només queda muntar les resistències i els termistors. A causa de l'alta potència necessària per a les resistències de banda aquestes es connecten en sèrie a un controlador PID que obté el corrent directe del subministri. Les resistències simplement llisquen per sobre del tub plastificador i es fixen a aquest amb les seves pròpies brides, el termistor queda encaixat entre ambdós anells en contacte amb el tub. En canvi la resistència de la boquilla està feta a partir d'un capçal d'alumini d'impressora 3D, que incorpora el cartutx i el termistor, el qual ha sigut modificat per a encaixar amb el diàmetre del tub injector i fixar-se a aquest amb una altra brida metàl·lica.



**Figura 45. Muntatge complet. (Font: pròpia)**

I amb això la fabricació del prototip es dona per conclosa.

## 7 PROCÉS EXPERIMENTAL

Finalitzada la construcció del prototip es procedeix a realitzar una sèrie de proves funcionals amb per a comprovar que tots els components compleixen els requeriments pels quals han sigut dissenyats, així com assegurar el funcionament general de la màquina i la validesa dels càlculs realitzats.

La primera comprovació abans de l'experimentació és programar els passos dels motors perquè s'ajustin amb els valors de desplaçament que s'indiquen per pantalla. Al mateix temps que s'assegura la correcta connexió i funcionament de tots els components electrònics, així com la seva interacció amb la resta de components mecànics, de manera que no hi hagi cap interferència ni desajust en el moviment.

### 7.1 PLASTIFICACIÓ I DOSIFICACIÓ DEL MATERIAL

El primer pas en el funcionament d'una màquina d'injecció és la fosa del material, és per això que partint de la base del calculat en l'apartat 5.5.2 d'aquesta memòria es procedeix a comprovar que el material a injectar es fon a dintre del tub plastificador abans d'arribar al tub injector alhora que es calcula la correlació entre les revolucions de la broca i la dosificació de material fos.

Aquest procediment es portarà a terme de la següent manera:

1. Preescalfament del tub a la temperatura desitjada d'injecció.
2. Càrrega de la tolva amb el gramatge exacte per a omplir els 4 flancs de la broca.
3. Plastificació del material segons les revolucions i temps de l'apartat 5.5.2.
4. Recompte de gramatge a la sortida de la plastificació per revolució i de l'estat d'aquest.
5. Repetició del cicle amb modificacions controlades del temps de residència o temperatura del tub segons resultats.
6. Elaboració d'una taula i gràfics amb els resultats per a la selecció dels paràmetres més adients.

Per iniciar el procés s'escalfa el conjunt a 200°C i es carrega la tolva amb 3,5gr de PLA en forma de pellets de 4mm de longitud. El problema és que a l'entrar al tub plastificador els pellets es fonen i es queden adherits a la superfície del tub i de la broca, sense descendir a l'interior del tub injector.

Un cop netejat, és prova un segon intent amb un gramatge superior, amb la intenció que, en tenir més massa a sobre que també intenta descendir, el plàstic ja fos sigui empès cap a sota.

Aquest cop sí que s'aconsegueix fer arribar el material fos a la zona d'injecció però en una quantitat molt més reduïda de l'esperat. Segons els càlculs, idealment, un cop omplert el tub plastificador amb cada revolució de la broca s'haurien de dipositar 3,5gr de material fos al tub injector. Després de 6 revolucions completes només es recullen uns 2gr de material, el qual es troba en un estat quasi sòlid al reposar contra les parets del tub inferior, doncs, com es pot apreciar a la següent imatge, és la zona més freda del conjunt al no trobar-se cap resistència en contacte amb les seves parets.

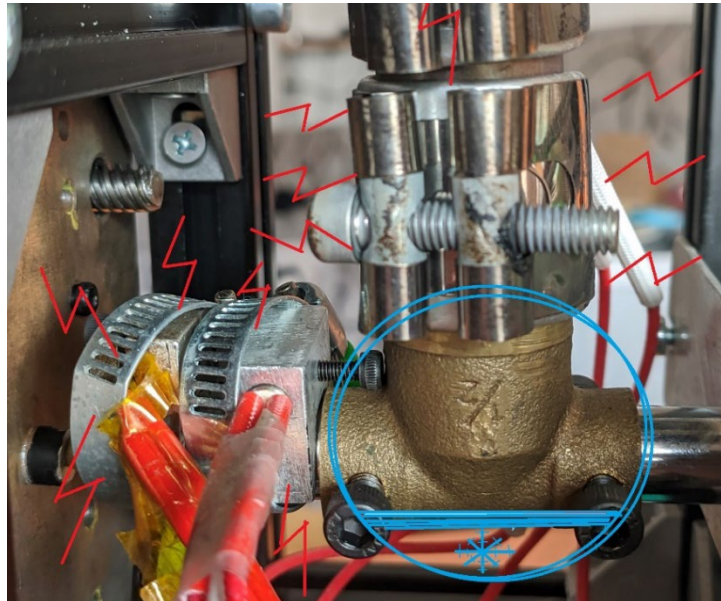


Figura 26. Zona freda al subconjunt d'injecció. (Font: pròpia)

Es realitzen ajustos de temperatura, augmentant-la lleugerament fins als 220°C, però, tot i aconseguir que el material dipositat mantingui un estat plastos se segueixen obtenint una quantitat insuficient per moltes revolucions que es realitzin a la broca, per la qual cosa es considera que el mecanisme no és l'adient i que necessita un redisseny.

## 7.2 INJECCIÓ, EMMOTLLAMENT I EJECCIÓ

Amb aquest procediment es pretenia determinar el temps necessari de compactació del pistó, de manteniment de la força de tanca i de refredament, per a obtenir una injecció precisa i una correcta ejecció de les peces.

De manera similar al procediment anterior es comptabilitzarien tots els temps, realitzat petites modificacions en els seus valors, així com en el de material dipositat, per a poder crear una gràfica des d'on poder seleccionar els millors paràmetres.

A causa del mal funcionament del mecanisme de plastificació es decideix introduir directament els pellets a la zona calenta del tub injector, de manera que, tot i sofrir una lleugera degradació de les capes en contacte amb la superfície calenta, es pugui obtenir material fos al davant del pistó per a comprovar el funcionament de la resta de mecanismes.

Encara així sorgeix un segon problema, aquest cop de toleràncies en la fabricació. Per culpa del mal ajust entre el diàmetre del pistó i el diàmetre del tub, el material fuga entre aquests dos components al fer avançar el primer. Aquesta petita capa de plàstic entre ambdós frena quasi per complet l'avanç del pistó i el motor no és capaç d'assolir la seva posició final.



Figura 47. Restes de polímer al tub injector en retirar el pistó. (Font: pròpia)

### 7.3 AUTOMATITZACIÓ

Finalment, encara que no hagin funcionat els mecanismes de plastificació i d'injecció, la màquina és capaç de realitzar tots els seus moviments si no es diposita material, per tant es procedeix a programar de forma simultània o encavalcada els moviments dels motors de manera que es repeteixin ordenadament per a poder reduir el temps de cicle total i aconseguir un funcionament autònom i fiable de la injectora.

L'automatització es programa en llenguatge G-CODE<sup>[20]</sup>, l'utilitzat en el control de màquines de CNC i fabricació additiva, degut a que el software de control es basa en un programari per a impressores 3D. S'han de controlar els moviments dels 3 motors pas a pas (X, Y i Z), la temperatura de les resistències i la velocitat del ventilador. El procés dissenyat, el codi del qual es pot consultar en els annexos d'aquesta memòria, segueix les següents accions:

1. Preheat: Escalfa les resistències del tub i de la boquilla fins a la temperatura desitjada.
2. Home-all: Mou els motors a les posicions inicials fins a activar els finals de carrera. El motlle s'obre completament fins a activar la placa ejectora (motor Z=0), el pistó avança fins a tocar amb la boquilla (motor X=0), la broca fa 4 revolucions completes en sentit antihorari (motor Y=0).
3. Broca gira en sentit horari sense fi (Y=max a 15rpm); el motlle es tanca (Z=max);
4. El pistó es retracta (X=max); La broca gir en sentit antihorari (Y=-10).

5. Pistó avança ( $X=0$ ); La broca torna a girar en sentit horari carregant la nova colada;
6. El pistó es manté a 0 bloquejant el retorn del material; El ventilador s'engega ( $V=255$ );
7. Delay; Es mantenen les posicions fins a la solidificació de la peça;
8. Motlle s'obre i activa els ejectors ( $Z=0$ ;  $Z=3$ ;  $Z=0$ ); Els pins sobresurten dos cops i la peça és expulsada;
9. Es torna al pas 3.

Seguint aquesta distribució de les accions el temps de cicle queda determinat només pel temps de compactació, de refredament i d'ejecció perquè la resta de processos es produeixen de manera simultània mentre succeeixen aquests.

El codi ha de ser modificat segons els requeriments de cada peça; quantitat de material per colada, distància d'obertura del motlle, temps de refredament... Un cop establerts aquests paràmetres es carrega en una targeta microSD que s'insereix a la placa base i és llegida pel sistema, d'aquesta manera es pot seleccionar des de la pantalla controladora i posar-se en marxa.

## 8 PRESSUPOST

Aquest apartat tracta els costos del treball realitzat durant el projecte, tant de recerca com de disseny i fabricació del prototip.

Es troben tres parts diferents a analitzar, per una banda el cost del treball com a enginyer per a obtenir el disseny final del prototip, per altra el cost de la compra de les peces necessàries i finalment el cost generat per les hores dedicades a la fabricació i muntatge d'aquest. Totes aquestes hores han sigut comptabilitzades a 30€/h segons el sou mitjà d'un enginyer recent titulat a Espanya.

No s'han considerat en cap apartat les despeses generades per l'obtenció de llicències, equips informàtics o eines utilitzades durant la fabricació, doncs es consideren com a bens propis ja amortitzats o de caràcter gratuït com en el cas de les llicències educatives.

Les parts esmentades amb anterioritat es troben recollides dintre del *Pressupost d'execució material*, sobre el que finalment es calcula el *Pressupost base de licitació*. Les definicions i valors dels quals es troben recollits dintre de l'Article 131 del REIAL DECRET 1098/2001 publicat al BOE número 257 del 26 d'octubre de 2001<sup>[21]</sup> i que es pot consultar als annexos d'aquesta memòria.

Treballs d'enginyeria		
Concepte	Hores	Cost total (€)
Recerca		
·Estudi de la tecnologia de les IMM	80	2.400
·Referents/precedents	60	1.800
Disseny preeliminar	180	5.400
Càlculs	40	1.200
Prototipatge	140	4.200
Experimentació	60	1.800
Modelat 3D	120	3.600
Renderitzats, simulacions i plànols	120	3.600
	<b>800</b>	<b>24.000</b>

Taula 1. Hores i cost dels treballs d'enginyeria. (Font: pròpia)



Elements normalitzats			
Concepte	Unitats	P.V.P (€/u)	Cost total (€)
Cargols			
·Cargols 12.9 (M3, M4, M6, M8)	172	0,05	8,08
·Femelles T-Slot	104	0,50	52,00
Extrusions alumini 500mm	7	7,50	52,5
Rodaments KFL08	2	3,99	7,98
Esquadres de fosa d'alumini	36	0,60	21,6
Kit politja i corretja GT2	3	6,47	19,41
Cargola sense fi i femella	3	6,08	18,24
Vareta acer 8x500mm	1	8,89	8,89
Cadena bicicleta	1	13,75	13,75
Platina alumini 40x1000x3 mm	1	15,97	15,97
Placa acer 300x100x10	1	6,99	6,99
Tub acer 12x300 mm	1	13,69	13,69
Tub coure 20x300 mm	1	3,93	3,93
Massís de bronze 100x10	1	3,52	3,52
Junta en T	1	1,84	1,84
Broca fusta 16x180 mm	1	12,99	12,99
Motor Nema 17	1	17,99	17,99
Motors nema 23	2	49,50	99,00
Font d'alimentació	1	22,52	22,52
Placa controladora MKS	1	28,99	28,99
Finals de carrera	3	0,56	1,69
Pantalla LCD	1	14,99	14,99
Ventilador	1	5,99	5,99
Resistències de banda	2	3,07	6,14
Controlador PID	1	25,69	25,69
Rodament lineal igus	3	3,17	9,51
Rodament 6004zz	1	2,79	2,79
Final de carrera	2	0,86	1,72
Molles	4	0,46	1,84
Boquilla llautó	1	0,65	0,65
			<b>500,90</b>

Taula 2. Unitats, preu unitari i cost total dels components normalitzats inclosos al prototip. (Font: pròpia)



<b>Cost de fabricació</b>			
<b>Concepte</b>	<b>Unitats</b>	<b>P.V.P</b>	<b>Cost total (€)</b>
Impressió 3D			
·Màquina (Creality Ender 5)	1	250	250,00
·Material (kg)	1,56	24,90	38,84
·Tractament de les peces (h)	12	30	360,00
Talls i forats a les plaques de metall (h)	8	30	240,00
Talls i rosques als perfils d'alumini (h)	4	30	120,00
Muntatge (h)	4	30	120,00
Software (h)	14	30	420,00
			<b>1.548,84</b>

Taula 3. Cost total de fabricació desglossat en processos. (Font: pròpia)

<b>Pressupost d'execució material</b>		<b>26.049,74</b>
Despeses generals	13%	3.308,47
Partida de benefici industrial	6%	1.526,98
<b>Pressupost base de licitació</b>		<b>4.835,45</b>
I.V.A.	21%	5.344,45
<b>PRESSUPOST TOTAL</b>		<b>35.629,64</b>

Taula 4. Pressupost total del projecte a partir dels valors de les taules anteriors. (Font: pròpia)

Tal i com consta a la Taula 4 el pressupost total del projecte, així com la fabricació del prototip, és de **35.629.64 €**.

## 9. PROPOSTA DE MILLORA

El projecte té dues opcions diferents de millora, una com a concepte i l'altre de cara als components i mecanismes dissenyats pel prototip.

Per començar, la màquina està encarada a ser una solució per a poder fabricar petites peces mitjançant injecció individualment i de forma econòmica, és a dir una forma perquè makers o centres d'ensenyament puguin tenir la tecnologia de l'emmotllament per injecció a l'abast. La màquina dissenyada està molt bé com a projecte perquè suposa grans reptes d'automatització, interacció entre components mecànics i càlculs de parametrització, però es podria haver aconseguit injectar peces de forma domèstica de manera molt més senzilla si s'hagués prescindit de l'automatització de la màquina i dels motors com a elements actuadors. A causa de la reduïda demanda de peces que tindrien els hipotètics usuaris de la màquina es podria haver optat per una injecció manual, en la que es disposés d'una palanca que fos accionada per l'usuari per a crear la pressió necessària per a injectar el material a dintre d'un motlle. De forma semblant al mecanisme d'un trepant de banc, es podria crear un aparell de fes moure's verticalment el pistó per a inserir-se a un tub plastificador, semblant al dissenyat en aquest projecte, que estigués amorrat a un motlle que es podria tancar i obrir simplement amb un cargol de banc o similar. S'augmentaria el temps de cicle perquè tot el procés passaria per l'accionament manual, però es podria disminuir sobre manera la despesa econòmica i el manteniment així com augmentar la fiabilitat a l'eliminar desplaçaments entre els components i els elements de distribució.

Centrant-se ara en el prototip creat trobem dos aspectes a millorar per a poder obtenir peces injectades i tres parts que, tot i no ser obligatòries, augmentarien la confiabilitat i durabilitat de la màquina.

Per una part trobem les millores per a aconseguir el funcionament del prototip. El primer a millorar és l'encaix entre el pistó i el diàmetre intern del tub injector. Com que no es disposa de la maquinària per a rectificar els diàmetres d'ambdós components s'ha confiat en la tolerància general dels components prefabricats utilitzats, que encara que serveixen per a comprovar els moviments i interaccions al prototip, ja s'ha observat que no són funcionals en absolut. Per tant de cara a una possible comercialització del producte s'hauria de millorar aquest contacte per evitar els problemes de fuga de material al cargol sense fi o desgast pel fregament dels metalls.

L'altre aspecte funcional a millorar és la broca plastificadora. La broca utilitzada té una superfície de contacte amb el tub molt ampla, fet que provoca que a l'introduir-se una mínima quantitat de material fos entre ambdues superfícies la broca quedi bloquejada a causa de la fricció. A part l'angle dels flancs és massa obtús i aquests tenen un acabat superficial molt bast, donant lloc a retencions o acumulacions de plàstic provocant una dosificació al tub injector molt pobre o fins i tot nul·la. La solució seria crear una broca a partir d'una vareta i un platina soldada en espiral, com es mostra a la figura 48. D'aquesta manera es podria utilitzar un angle més adient, la superfície de contacte amb el tub es reduiria notablement i l'acabat superficial de la platina es podria polir el necessari per a aconseguir fer fluir el polímer o fins i tot aplicar-li algun acabat antiadherent.



Figura 48. Referent de millora per la broca. (Font: Harborfreight.com)

Amb aquestes dues millores és de suposar que s'aconseguiria una distribució de material al tub injector més ràpida, eficaç i controlada, que sumat amb un bon segell entre el pistó i el tub, evitarien la solidificació prematura del polímer i per tant una correcta injecció.

Finalment les parts no tan apressants, però que així i tot són susceptibles a millora són:

La distribució per cadena de la força de tanca del motlle. Els plats i el pinyó que transmeten aquesta força, mitjançant la cadena, del motor als cargols sense fi són de plàstic imprès en 3D, que tot i estar impresos en la direcció de perímetres més avantatjosa i que contribueixen a reduir el soroll i el manteniment de la màquina, poden acabar fallant-li les dents si es sotmeten a forces de tanca molt elevades. És per això que es planteja una solució molt senzilla, però més costosa, intercanviar tot el sistema de distribució per una distribució per politges i corretja del tipus GT2 com el que trobem en la resta de motors però d'una amplada superior, és a dir passar dels 6mm de corretja als 9 o fins i tot 12mm. Una altra opció seria utilitzar rodes dentades prefabricades en acer amb cadenes específiques per a la seva transmissió, però augmentaria significativament el cost.

Una altra part a millorar són les unions de l'estructura. Les esquadres utilitzades van molt bé perquè permeten una unió senzilla, assegurant la perpendicularitat dels perfils i sense dependre de poder realitzar forats en localitzacions exactes. Encara així no són mètodes d'unió molt fiables en cas que s'exerceixin forces addicionals en segons quina direcció sobre els perfils i per això, en algunes zones, s'han hagut d'utilitzar altres mètodes, com cargols travessats, per a garantir la unió d'alguns perfils. A més a més les esquadres s'han de col·locar a la part interior de la unió, fet que fa que puguin interferir amb la fixació d'altres elements. Es proposa llavors la utilització, addicionalment, de platines d'alumini en forma de L als laterals dels perfils que es fixin mitjançant cargols i femelles en T a l'estructura de manera que impedeixin el gir dels perfils i augmentin la rigidesa de la unió.

Finalment l'últim aspecte que necessita una millora és el software o programari de control. Per aquest prototip es reutilitzen els components electrònics d'una impressora 3D, per tant era molt més senzill i ràpid controlar les accions d'aquest mitjançant llenguatge G-Code com si encara és tractes d'una impressora i simplement modificar els passos dels motors i el PID de les resistències per ajustar-se a la nova màquina. Però com que no es disposa d'un programa que creï automàticament un codi per a produir cada peça no hi ha altra solució que escriure a mà els moviments de cada motor i els canvis de temperatura a realitzar. És per això que disposar d'un software i un programari propi que convertís automàticament les diferents peces que es volen injectar a llenguatge màquina seria molt adient de cara a la comercialització de la injectora i facilitaria la seva utilització.

## CONCLUSIONS

Per a finalitzar el present document es detallen les reflexions sorgides al llarg del desenvolupament del projecte, des de la fase de disseny inicial fins a obtenir un prototip complet amb el que poder comparar les expectatives obtingudes, fruit dels càlculs i simulacions realitzats, amb l'experimentació real.

Degut a les mancances en quant a eines i maquinaria de fabricació disponible les toleràncies i geometries obtingudes distaven de ser les més adients per al correcte funcionament del procés d'emmotllament per injecció i per tant no s'ha aconseguit produir cap peça ni comprovar el comportament del motlle i el mecanisme ejector en presència de material fos. Encara així, si que s'ha aconseguit crear un prototip compacte, senzill i econòmic, com dictaven els objectius inicials, en el que es poden fer tots els moviments necessaris per a poder injectar peces de forma automàtica i que, amb uns pocs ajustos en els components esmentats a l'apartat anterior, possiblement s'aconseguiria fer-lo funcionar, i per tant podria ser replicat i modificat sense majors complicacions, per altres persones amb coneixements tècnics que comparteixin l'esperit *maker* o *DIY*.

El disseny ha evolucionat força des de la seva primera projecció en forma d'esbossos fins al modelat complet de tots els components i els seu assemblatge en CAD, tot i que, sempre ha mantingut les premisses bàsiques que es van formular després de la recerca de referents i que es van prendre com la manera més senzilla i alhora funcional d'afrontar el prototip a dissenyar. La posterior fabricació, després de comprovar una correcte interacció entre els components al CAD, ha servit per a tenir una major consciència sobre el funcionament dels elements mecànics i els requeriments que ha de complir un disseny, en termes de rigidesa, toleràncies, moviments, etc. D'aquesta manera s'ha pogut anar realimentant el disseny amb cada iteració per a millorar-lo i facilitar tant la fabricació, com el muntatge de la màquina.

En quant a la parametrització del comportament real dels mecanismes i l'elecció de la millor configuració d'elements, com els motors o les resistències calefactores, han sigut necessaris gran quantitat de càlculs i simulacions mitjançant elements finits. Tot i així, degut a la complexitat de geometries o quantitat de variables a tenir en compte, aquests només han suposat en gran part un punt de partida més o menys aproximat per a poder realitzar posteriorment els assajos experimentals amb els que s'ha confirmat de forma concisa el comportament del plàstic en interacció amb els mecanismes dissenyats.

No crec que el disseny al que s'ha arribat sigui el definitiu doncs hi ha gran espai per a la millora o conceptes que es podrien haver enfocat des d'una altre perspectiva des d'un principi si es pretengués comercialitzar el producte en un futur. Tot i així, si crec que si ha sigut un gran repte i projecte en el que s'han reflectit gran part de les competències pròpies del grau i que m'ha servit sobretot a mi personalment per a millorar la meva capacitat per a desenvolupar dissenys i productes més reals i propers a la industrialització d'aquí endavant.

## AGRAÏMENTS

Als meus pares, sense l'esforç dels quals no hauria tingut l'oportunitat d'arribar fins aquí.  
A la família Fargas Gonzalez, per la seva hospitalitat i ajuda en la creació d'aquest projecte.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Osswald, Tim. A. Turng, Lih-Sheng. Gramann, Paul J. (2002). Injection Molding Handbook (2002). Hanser Gardner.
- [2] Sinotech (Consultat 09/2020). Injection molded parts. A Sinotech. [sinotech.com/resources/tutorials/injection-molded-parts/](https://sinotech.com/resources/tutorials/injection-molded-parts/)
- [3] Sodick (Consultat 09/2020). V-line® System. A Sodick. [www.sodick.co.jp/en/tech/v\\_line.html](http://www.sodick.co.jp/en/tech/v_line.html)
- [4] Engel Global (Consultat 10/2020). E-motion. A EngelGlobal. [www.engelglobal.com/en/uk/high-performance-injection-moulding-machine-e-motion.html](http://www.engelglobal.com/en/uk/high-performance-injection-moulding-machine-e-motion.html)
- [5] Nissei Plastic (Consultat 10/2020). Nex-III Series. A NisseiPlastic. [www.nisseiplastic.com/en/products/pr\\_nex3.php?id=12](http://www.nisseiplastic.com/en/products/pr_nex3.php?id=12)
- [6] Husky (Consultat 10/2020). Systems solutions. A Husky Injection Molding Systems. [www.husky.co/en/solutions/systems/](http://www.husky.co/en/solutions/systems/)
- [7] Babyplast (Consultat 10/2020). BabyPlast 10/12 Standard. A BabyPlast. [www.babyplast.com/es/products/babyplast-10-12-standard-3/](http://www.babyplast.com/es/products/babyplast-10-12-standard-3/)
- [8] Moiron (Consultat 10/2020). M1 Desktop injection molding machine. A Moiron mini Machine. [www.moirons.com/product/diyixilie/97.html](http://www.moirons.com/product/diyixilie/97.html)
- [9] APSX (Consultat 10/2020). Aps-X PIM Plastic injection machine. A APSX Advanced Production Systems. [www.apsx.com/desktop-injection-molding-machine](http://www.apsx.com/desktop-injection-molding-machine)
- [10] StrataSys (Consultat 10/2020). Polyjet Technology. A StrataSys. [www.stratasys.com/polyjet-technology](http://www.stratasys.com/polyjet-technology)
- [11] Rogers, Tony (2015). Polylactic Acid (PLA). A Creative mechanisms. [www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes](http://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes)



- [12] Fernandez, Mariano (2011). Nylon (PA66). A Tecnología de los plásticos. [tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/nylon.html](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/nylon.html)
- [13] Mura, A., Ricci, A., & Canavese, G. (2018). Investigation of Fatigue Behavior of ABS and PC-ABS Polymers at Different Temperatures. *Materials*, 11(10), 1818. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ma11101818>
- [14] Engineering ToolBox, (2004). *Friction and Friction Coefficients*. A [https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)
- [15] D. Fuller, Dudley (Consultat 12/2020). Coeficients of friction. A Massachussets Institute of Technology. <https://web.mit.edu> › references-fall › aip
- [16] Fernandez, Mariano (2012). Fuerza de cierre. A Tecnología de los plásticos. [tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/08/fuerza-de-cierre-clamping-force.html](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/08/fuerza-de-cierre-clamping-force.html)
- [17] Marlin (Consultat 02/2021). G-code index. A Marlin firmware. <https://marlinfw.org/meta/gcode/>
- [18] Artículo 131 del REIAL DECRET 1098/2001. BOE, número 257, del 26 d'octubre de 2001.