

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials (GETI)

Disseny i fabricació de fèrules per a gats amb impressió 3D

MEMÒRIA

Autor: Alba Mesa Garrido
Director: Emilio Angulo Navarro
Convocatòria: 06/2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



ETSEIB

Resum

El projecte consisteix en el procés de disseny de dues fèrules per a les potes d'un gat, una per a les potes davanteres i una altra per a les potes posteriors. El disseny s'ha realitzat tenint en compte que les fèrules es fabricaran mitjançant la impressió 3D, un sistema de fabricació en el que les restriccions respecte a la geometria de les peces són escasses.

Per començar, s'ha fet una petita introducció a la impressió 3D i els seus tipus. També s'han explicat els diferents tipus de fèrules per a animals domèstics i s'ha realitzat un estudi de mercat de les fèrules.

A continuació s'ha realitzat un petit estudi del sistema motriu d'un gat per tal de definir les diferents sol·licitacions que s'havien de tenir en compte a l'hora de realitzar el disseny de les fèrules.

Un cop definides les sol·licitacions s'ha realitzat un primer disseny de les fèrules mitjançant l'eina de disseny 3D *SolidWorks* i una comprovació de tensions basada en elements finits amb l'ajuda del programa *ANSYS Workbench*.

Els resultats obtinguts de les simulacions dels primers dissenys amb *ANSYS* han permès optimitzar el disseny per tal de reduir-ne el pes i permetre la realització de teràpia amb electroestimulació sense haver de retirar les fèrules. Un cop obtingut el disseny final se n'han realitzat les corresponents simulacions amb *ANSYS* per a comprovar la rigidesa i la integritat estructural de les fèrules.

Finalment, s'han penjat els fitxers del disseny final de les fèrules en una web de descàrrega lliure de fitxers per a impressió 3D i s'ha realitzat un prototip d'una de les fèrules.

Índex

1	Prefaci	7
1.1	Origen del projecte	7
1.2	Coneixements previs	7
2	Introducció	8
2.1	Objectius del projecte	8
2.2	Abast del projecte	8
2.3	Justificació	9
3	Estat de l'art	10
3.1	Tecnologies d'impressió 3D. Fabricació additiva	10
3.1.1	Modelatge per deposició fosa (FDM)	10
3.1.2	Làser	11
3.2	Multi Jet Fusion de HP	13
3.2.1	Altres tecnologies d'impressió	13
3.3	Tipus d'ortesi i la seva funció	16
3.3.1	Funció de les fèrules	17
3.3.2	Tipus de fèrules	17
3.4	Estudi de mercat	19
3.4.1	Ortocanis	19
3.4.2	OrtopediaMascotas	20
3.4.3	Walkin' Pets	20
3.4.4	Zoomadog	21
4	Especificacions bàsiques	22
5	Sistema motriu d'un gat	23
5.1	Anatomia de la pota davantera	23
5.2	Anatomia de la pota posterior	24
5.3	Cicle de marxa dels quadrúpedes	25
5.4	Estudi cinemàtic i dinàmic de la caminada	27
6	Sol·licitacions	29
6.1	Material	29
6.2	Forces	29
6.3	Geometria	30
7	Primer disseny de les fèrules	31
7.1	Model 3D	31
7.2	Primer disseny 3D de les fèrules	31
8	Simulacions amb mètodes numèrics del primer disseny	39
8.1	Engineering Data	39
8.2	Geometria i contactes	40
8.3	Mallat	41
8.4	Condicions de contorn	42
8.4.1	Suports	42
8.4.2	Càrregues	43

8.5	Resultats	46
8.5.1	Fèrula de la pota davantera	46
8.5.2	Fèrula de la pota posterior	48
9	Disseny final de les fèrules	51
10	Simulacions amb mètodes numèrics del disseny final	54
10.1	Resultats	54
10.1.1	Fèrula de la pota davantera	54
10.1.2	Fèrula de la pota posterior	57
11	Impressió 3D de les fèrules	61
11.1	Prototip imprès	63
12	Pressupost	65
12.1	Cost unitari	66
13	Impacte ambiental	69
14	Planificació	70
	Conclusions	72
	Agraïments	74
	Bibliografia	75

Índex de figures

1	Tecnologia FDM	10
2	Tecnologia SLA	11
3	Tecnologia SLS	12
4	Impressora Multi Jet Fusion de HP	13
5	Tecnologia LOM	14
6	Tecnologia Polyjet	15
7	Tecnologia Syringe Extrusion	15
8	Exemples d'ortosis d'Ortocanis	16
9	Fèrula de carp d'Ortocanis	17
10	Fèrula de tars d'Ortocanis	18
11	Fèrula de bota curta d'Ortocanis	18
12	Fèrula de pota davantera d'Ortocanis	18
13	Fèrula pota posterior d'Ortocanis	19
14	Fèrula de la pota posterior d'Ortocanis	19
15	Fèrula de la pota davantera d'OrtopediaMascotas	20
16	Fèrula de la pota davantera de Walkin'Pets	20
17	Fèrules de la pota davantera (esquerra) i de la pota posterior (dreta) de Zoomadog	21
18	Plans anatòmics d'un gat	23
19	Esquelet d'un gat	24
20	Gat caminant	25
21	Gat passejant	25
22	Gat trotant	26
23	Gat galopant lent	26
24	Gat galopant ràpid	27
25	Força vertical durant la caminada	27
26	Força horitzontal durant la caminada	28
27	Distribució de forces durant la caminada	28
28	Característiques dels materials utilitzats en la impressió FDM	29
29	Model 3D d'un gat	31
30	Superfície interior de la part superior de la fèrula	32
31	Superfície exterior de la part superior de la fèrula	32
32	Sòlids inicials de la part superior de la fèrula i superfície de tall	33
33	Superfícies de la part inferior de la fèrula	33
34	Sòlids inicials de la fèrula i superfície de tall	34
35	Sòlids inicials arrodonits, part extraïble en dos materials i superfície de tall	35
36	Ganxos d'unió de les dues parts de la fèrula	35
37	Forat per al velcro	36
38	Nansa per al velcro	37
39	Rebaixos en la peça extraïble per al velcro	37
40	Primer disseny 3D de les fèrules de la pota davantera (dreta) i de la posterior (esquerra)	38
41	Propietats del material establertes a la simulació	40
42	Superfícies de contacte de la part extraïble (vermell) i la part base (blau)	41
43	Mallat de la fèrula	41
44	Tensions equivalents en el punt d'estudi en el mallat de resolució 2	42
45	Fixació en l'eix Z de la superfície en contacte amb el terra	42
46	Fixació total d'un de la superfície en contacte amb el terra	43
47	Càrrega vertical aplicada pel gat durant la marxa	44

48	<i>Càrrega horitzontal aplicada pel gat durant la marxa</i>	44
49	<i>Càrrega aplicada a una nansa per la tira amb velcro</i>	45
50	<i>Càrrega aplicada a un rebaix per la tira amb velcro</i>	45
51	<i>Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota davantera</i>	46
52	<i>Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera</i>	47
53	<i>Deformació total de la fèrula de la pota davantera</i>	48
54	<i>Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota posterior</i>	48
55	<i>Zona de tensió màxima a la fèrula de la pota posterior</i>	49
56	<i>Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota posterior</i>	49
57	<i>Deformació total de la fèrula de la pota posterior</i>	50
58	<i>TPU antilliscant a la base de la fèrula</i>	51
59	<i>Disseny final de la fèrula de la pota davantera</i>	52
60	<i>Disseny final de la fèrula de la pota posterior</i>	53
61	<i>Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota davantera</i>	54
62	<i>Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera</i>	55
63	<i>Deformacions a la fèrula de la pota davantera</i>	56
64	<i>Estudi de la càrrega màxima aplicada a les nanses en la fèrula de la pota davantera</i>	56
65	<i>Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera quan s'aplica la càrrega màxima a les nanses</i>	57
66	<i>Zona de tensió màxima a la fèrula de la pota posterior</i>	58
67	<i>Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota posterior</i>	58
68	<i>Deformació total de la fèrula de la pota posterior</i>	59
69	<i>Estudi de la càrrega màxima aplicada a les nanses en la fèrula de la pota posterior</i>	59
70	<i>Deformació de la fèrula de la pota posterior quan s'aplica la càrrega màxima a les nanses</i>	60
71	<i>Impressora BCN3D Sigma R19</i>	61
72	<i>Peça base de la fèrula davantera en el BCN3D Cura</i>	62
73	<i>Parts de la fèrula de la pota posterior impreses en PLA</i>	63
74	<i>Parts de la fèrula de la pota posterior encaixades</i>	64
75	<i>Prototip de la fèrula de la pota posterior</i>	64
76	<i>Diagrama de Gantt del projecte</i>	71

Índex de taules

1	<i>Costos associats a la feina d'enginyeria</i>	65
2	<i>Costos del programari informàtic utilitzat</i>	65
3	<i>Costos totals del projecte</i>	66
4	<i>Costos de la peça base de la fèrula de la pota davantera</i>	67
5	<i>Costos de la fèrula de la pota davantera</i>	67
6	<i>Costos de la peça base de la fèrula de la pota posterior</i>	68
7	<i>Costos de la fèrula de la pota posterior</i>	68
8	<i>Planificació de les activitats del projecte</i>	70

1 Prefaci

1.1 Origen del projecte

Actualment hi ha una gran quantitat de projectes que integren la impressió 3D en la medicina, per exemple en la realització de fèrules, pròtesis, impressió de teixits, etc. Aquests projectes han demostrat que la impressió 3D és útil per a la medicina, per exemple per a reduir els costos de les ortesis. És per això que en aquest treball s'ha decidit aplicar les utilitats de la impressió 3D en l'àmbit de la veterinària, és a dir en la medicina dels animals. Concretament en la realització de fèrules per a les potes d'un gat.

En aquest projecte s'estudia la impressió 3D de fèrules, mètode de fabricació que acostuma a implicar una reducció del preu de les fèrules considerable en comparació amb les fèrules convencionals. Aquesta reducció del preu fa de les fèrules un producte més assequible per a tothom.

D'altra banda, la impressió 3D és una tecnologia de fabricació additiva que es troba força estesa a la societat avui en dia, moltes empreses disposen d'impressores 3D, hi ha espais on els clients poden anar a imprimir les seves pròpies peces, com si es tractés d'una copisteria, i fins i tot hi ha gent que té una impressora a casa seva. A causa d'aquesta expansió de la impressió 3D, aquesta permet l'adquisició de les fèrules sense haver d'anar a la botiga o esperar l'enviament, ja que, si l'amo de l'animal disposa d'una impressora 3D, pot imprimir-les ell mateix i obtenir un model funcional en poques hores sense haver de sortir de casa.

1.2 Coneixements previs

Per tal de dur a terme el treball són necessaris uns bons coneixements de l'eina de modelatge 3D *SolidWorks* per tal de realitzar els dissenys de les fèrules per a poder fer les posteriors simulacions i imprimir-les.

També són necessaris uns bons coneixements de l'eina de simulació *ANSYS*, per tal de poder realitzar les simulacions dels dissenys de les fèrules per a poder comprovar la seva funcionalitat i per a poder realitzar millores en els dissenys.

Finalment, un altre dels factors importants a conèixer és el funcionament de la impressió 3D. Això engloba el funcionament de les impressores 3D, com carregar les bobines de filament, com calibrar-la i les seves comandes bàsiques; i el funcionament del programa *BCN3D CURA*, que permet convertir els models 3D dissenyats en un format que la impressora reconegui i permet establir els paràmetres d'impressió adequats per a la impressió de les fèrules.

Tots aquests conceptes són necessaris per a la realització del treball sempre que estiguin complementats pels coneixements adquirits durant el grau.

2 Introducció

2.1 Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és realitzar el disseny d'unes fèrules per a gat, tenint en compte que aquestes seran fabricades mitjançant la impressió 3D. Aquest disseny es penjarà a una pàgina de descàrrega lliure de fitxers per a impressió 3D, com pot ser *Thingiverse*, d'aquesta manera l'usuari es podrà descarregar els fitxers de les fèrules i imprimir-les, reduint considerablement els costos de les fèrules per a gats i fent-les més assequibles per a tothom.

El disseny final obtingut en aquest treball s'ha considerat un primer pas per tal de validar la viabilitat de la utilització de la impressió 3D com a eina veterinària.

Per tal d'assolir l'objectiu anterior és necessari realitzar un disseny de les fèrules i un estudi dels esforços que aquestes han de suportar. Per tant, és necessària una familiarització amb el món del disseny amb *SolidWorks* i un cert control de l'*ANSYS*, l'eina de simulació que s'utilitzarà en aquest projecte.

Pel que fa al disseny, el principal objectiu és realitzar unes fèrules que no requereixin altres elements durant la rehabilitació del gat, per exemple embenats anteriors. També s'ha considerat important realitzar un disseny que no impliqui la retirada de la fèrula durant la dita rehabilitació.

2.2 Abast del projecte

En aquest projecte s'ha intentat aprofundir al màxim en el disseny de les fèrules per a gats. Degut a la magnitud de feina que comportaria el disseny complert i validat de les fèrules aquest treball s'ha centrat en els següents conceptes:

- Un estat de l'art on s'han presentat les diferents tecnologies d'impressió 3D, els diferents tipus de fèrules per a gats i on s'ha realitzat un estudi del mercat actual de les fèrules.
- Unes especificacions bàsiques que han de complir les fèrules dissenyades posteriorment.
- Un petit estudi del sistema motriu d'un gat, que inclou un estudi cinemàtic i dinàmic de la caminada del gat.
- Les sol·licitacions geomètriques, materials i de càrregues que s'han de tenir en compte a l'hora de realitzar el disseny de les fèrules per a gats.
- Un primer disseny 3D de les fèrules, amb la corresponent comprovació amb elements finits per tal d'observar les possibles millores a realitzar en el disseny.
- El disseny final de les fèrules un cop realitzades certes millores, amb la corresponent comprovació amb elements finits de la seva resistència mecànica.
- Un petit resum de la impressió 3D de les fèrules i l'exposició del prototip realitzat en aquest treball.

- Un diagrama de planificació de Gantt per representar la durada de les fases del projecte.
- Un pressupost amb la valoració econòmica del projecte.
- Un impacte ambiental del projecte.

D'altra banda, també és important conèixer aquells conceptes que no s'han dut a terme durant el projecte:

- No s'ha realitzat un prototip complet de les fèrules, és a dir la impressió de les fèrules amb els dos materials.
- No s'ha comprovat la funcionalitat i comoditat del prototip en un gat.
- Degut al punt anterior, no s'han pogut realitzar millores en el disseny, més enllà de les realitzades a nivell teòric.

2.3 Justificació

La motivació que ha impulsat aquest projecte ha estat l'interès de l'autora per la bioenginyeria i pel món de la impressió 3D, i la voluntat d'apropar aquests dos mons entre si i als usuaris.

Aquest interès per la impressió 3D neix arran de la realització de diferents projectes durant la carrera en els quals aquest sistema de fabricació ha estat present. Arran d'aquests projectes l'autora va sol·licitar una beca d'aprenentatge a l'aula d'impressió 3D de l'ETSEIB, l'aula RepRap. Aquesta beca li ha aportat un gran coneixement sobre el món de la impressió 3D i sobre les seves possibilitats.

L'interès per la bioenginyeria és més aviat acadèmic. És un camp de l'enginyeria que va ser tractat en una optativa de la carrera i que va despertar un interès en l'autora. Aquesta va voler realitzar un projecte relacionat amb aquest camp per tal d'adquirir nous coneixements al respecte i de decidir si volia seguir estudiant-lo en profunditat durant en màster.

Finalment, un dels conceptes més importants d'aquest projecte és el fet que els dissenys no estan realitzats per a ser comercialitzats sinó que s'han penjat a una web de descàrrega lliure. Això va estar impulsat pel fet que l'autora mateixa va haver d'adquirir una fèrula un temps enrere i va poder notar els preus, en la seva opinió, excessivament elevats d'aquests productes. A més a més, durant la carrera i durant la durada de la beca a l'aula RepRap ha fet ús de webs de descàrrega lliure per tal de realitzar diferents projectes i aquestes li van semblar unes eines molt importants.

3 Estat de l'art

3.1 Tecnologies d'impressió 3D. Fabricació additiva

Es coneix com a fabricació additiva aquell conjunt de tècniques en les quals, partint d'un model digital, únicament es diposita material a les zones on és necessari. Normalment el material és dipositat capa a capa fins a formar un objecte en tres dimensions. La fabricació additiva permet obtenir geometries molt complexes sense necessitat de requerir utilitatges com motlles o matrius per a l'obtenció de les peces, només es requereix el fitxer CAD de la peça, això fa que es tractin de processos molt flexibles. Es tracta d'un procés molt automatitzat mitjançant el qual es poden obtenir prototipus de manera ràpida, ajudant en gran manera tant al disseny del producte com del procés. D'altra banda, la resistència mecànica de les peces obtingudes és molt diferent de la que s'obtingria per altres mètodes de fabricació, normalment es tracta d'una resistència menor. A més a més, es tracta d'un procés lent que no és adequat per a llargues sèries.

3.1.1 Modelatge per deposició fosa (FDM)

Les màquines d'impressió 3D que utilitzen la tecnologia de modelatge per deposició fosa (FDM) construeixen objectes capa per capa, començant per la capa inferior, escalfant i extrusant filament termoplàstic. En primer lloc, el programari CAD general el model CAD en capes i calcula la forma en què l'extrusora de la impressora generaria cada capa. Un ordinador de la impressora 3D tradueix les dimensions d'un objecte en coordenades X, Y i Z i controla que l'embocadura i la base segueixin la ruta calculada durant la impressió. Quan la fina capa de plàstic s'uneix a la capa que hi ha a sota, es refreda i s'endureix. Un cop finalitzada la capa, es baixa la base per començar a construir la següent capa.

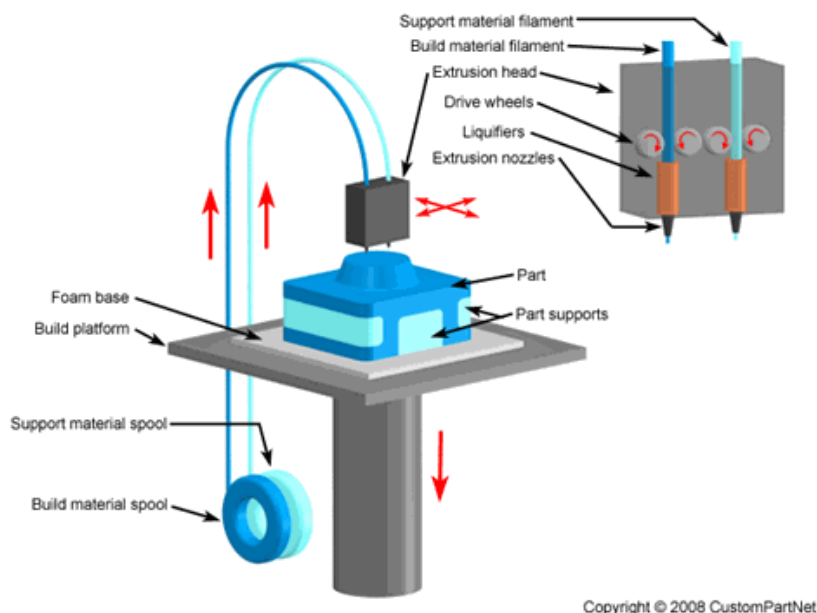


Figura 1: Tecnologia FDM
Font: CustomPartNet[1]

La tecnologia FDM va ser desenvolupada i implementada per Scott i Lisa Crump, fundadors de Stratasys Ltd., als anys vuitanta. A causa de la patent que protegeix aquesta tecnologia, altres empreses d'impressió 3D han adoptat tecnologies similars però amb noms diferents. La més coneguda, la que s'utilitza a l'aula d'impressió Rep-Rap, és la fabricació per fil fos (FFF); que basa el seu funcionament en un fil de material termoplàstic i en un extrusor que es mou en el pla XY i la base en l'eix vertical Z, de manera que el termoplàstic se solidifica immediatament sobre la capa anterior.

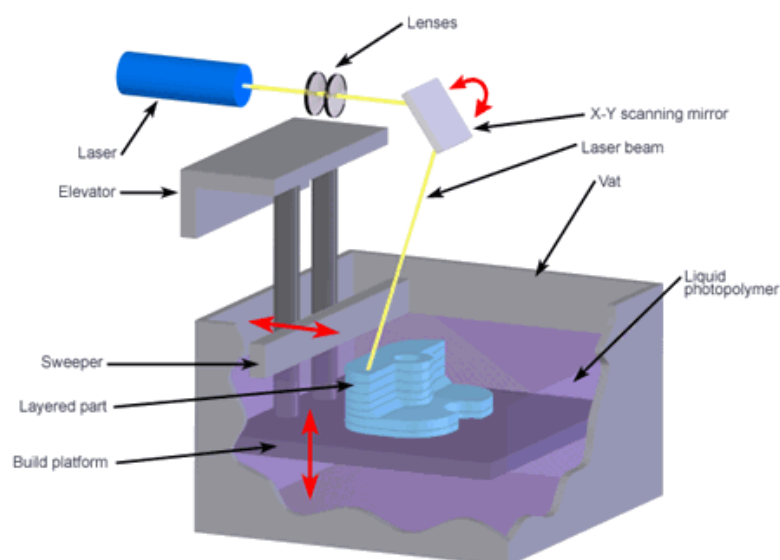
Un dels avantatges de la tecnologia FDM és que no només es poden imprimir prototipus funcionals, sinó també models conceptuals i productes finals, ja que es poden utilitzar termoplàstics molt accessibles i d'altres prestacions com per exemple el PLA i l'ABS. Un altre avantatge d'aquests materials és que possibiliten una producció de peces de diferents colors, textures, rigidesa i acabats a un cost molt reduït.

3.1.2 Làser

- Estereolitografia (SLA)

L'estereolitografia és la tecnologia de fabricació additiva més antiga i és considerada la "mare" de totes les tecnologies d'impressió 3D. Va ser desenvolupada per Charles Hull, cofundador de l'empresa 3DSystems, l'any 1986.

Funciona utilitzant un làser d'alta potència de llum ultraviolada per endurir la resina líquida que es troba en un dipòsit per crear la forma tridimensional desitjada, és a dir, el procés converteix líquids fotosensibles en plàstics sòlids en 3D capa per capa. Un cop acabada la peça, l'excés de resina, és a dir, la resina que no ha estat endurida pel làser, es queda al dipòsit i pot ser reutilitzada.



Copyright © 2008 CustomPartNet

Figura 2: Tecnologia SLA
Font: CustomPartNet[1]

Alguns dels avantatges de la utilització d'aquesta tècnica són que permet fer prototips ràpids amb alta precisió de tall i bon acabat superficial. L'estereolitografia és molt utilitzada en el desenvolupament de prototips però normalment no s'utilitza per a imprimir productes finals, ja que les peces presenten una menor resistència mecànica que les peces fetes amb altres tècniques d'impressió 3D. S'ha de tenir en compte que aquesta tècnica, igual que l'anterior explicada, requereix suports per tal de poder imprimir les parts voladives de les peces, aquests suports són extrets una vegada acabada la peça però poden implicar petites modificacions de l'acabat superficial d'aquesta.

- Sinteritzat Làser (SLS)

El sinteritzat làser és una tècnica molt similar a l'estereolitografia però utilitza material en pols en comptes de resina líquida i permet fer models i prototips amb molts més materials com materials compostos amb fibra i metalls. Va ser desenvolupada per Carl Deckard, un estudiant de la Universitat de Texas, i Joe Beaman, el seu professor, a la dècada dels 80.

Utilitza un làser d'alta potència per fondre partícules del material en pols capa per capa. La impressora estén una capa fina de pols i després un raig de làser escalfa les àrees que necessiten ser sinteritzades, un cop acabada la capa s'estén una nova capa de pols a sobre fins que s'obté un bloc de pols que conté els models impresos.

Aquesta tècnica permet imprimir models complexos i amb mobilitat, ja que no necessita suports per imprimir. A causa de la gran varietat de materials que es poden utilitzar i al bon comportament mecànic dels models obtinguts s'utilitza no només per desenvolupar prototips, sinó també per a imprimir productes finals. Les peces obtingudes mitjançant la tècnica SLS són més econòmiques que les obtingudes mitjançant l'estereolitografia però tenen un mal acabat superficial i una certa porositat.

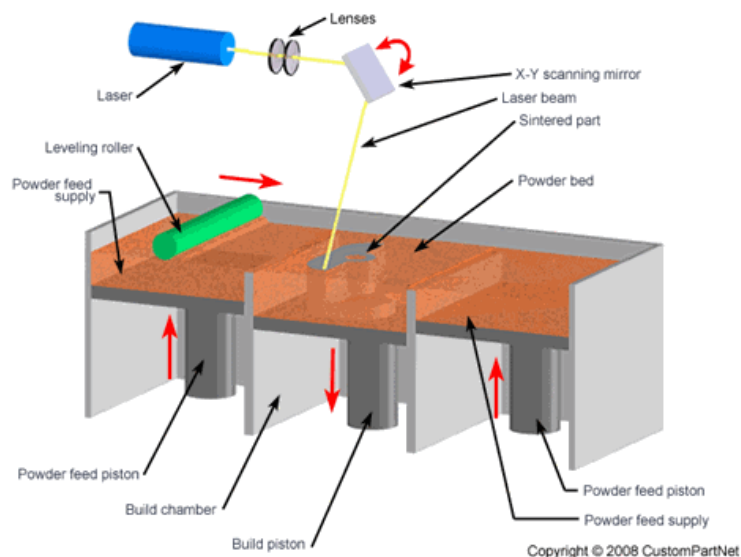


Figura 3: Tecnologia SLS

Font: CustomPartNet[1]

3.2 Multi Jet Fusion de HP

La HP Multi Jet Fusion 3D és una impressora 3D que fabrica peces amb una tecnologia d'impressió additiva gràcies a un procés de fusió d'agents múltiples.

Primer de tot, com en el cas del sinteritzat làser, la impressora estén una capa fina de plàstic en pols, en aquest cas de PA. Durant el procés d'impressió es van aplicant agents de fusió a les diferents capes de material per generar les peces desitjades, un procés que es fa a fi de fusionar partícules. En una segona fase, s'aplica un agent de detall que serveix per crear una superfície llisa i detallada. En una tercera fase, s'exposa l'àrea d'impressió a una font d'energia, que permetrà, mitjançant una reacció entre dos agents, que es detallin les vores de les peces de forma definida. Aquest és el procés que es completarà en cada capa d'impressió. De manera que, capa a capa, es va completant la impressió, fins a omplir la cubeta, amb la mida desitjada de les peces que conformen el disseny digital. El resultat serà una galleda compacte de PA, que contindrà les peces impreses en el seu interior i que caldrà dur a l'estació de processat. En aquesta estació de treball s'absorbeix la pols de la galleda de PA, per anar polint i traient a poc a poc les peces del seu interior.

A més aquesta tecnologia permet que es pugui guardar el material sobrant de cada impressió, per reutilitzar posteriorment, tenint un rendiment constant amb una taxa de renovació del material nou de tan sols el 20%.



Figura 4: Impressora Multi Jet Fusion de HP

Font: Axis[3]

Aquesta tecnologia permet obtenir productes finals i és considerablement més ràpida que les tecnologies explicades anteriorment, per tant, és una de les més utilitzades actualment per les empreses i els professionals.

3.2.1 Altres tecnologies d'impressió

Les quatre tecnologies citades anteriorment, tot i ser les més importants, no són les úniques que s'utilitzen. A continuació es definiran 5 altres tecnologies d'impressió 3D:

- Digital Light Processing (DLP)

El DLP és una variació del procés SLA on la principal diferència és la font de llum, que és diferent en els dos casos. El DLP consisteix a endurir ràpidament una resina líquida mitjançant una gran quantitat de llum, els productes obtinguts són robustos i tenen una gran resolució. Un avantatge del DLP enfront del SLA és que el primer utilitza menys material per a fer una producció detallada.

- Selective Laser Melting (SLM) i Electronic Beam Melting (EBM)

Aquestes dues tècniques són equivalents i es consideren una variació del SLS. La gran diferència entre aquests processos i el SLS és que aquestes primeres treballen a una temperatura molt més elevada i, per tant, el material adopta un estat més fluid. Això fa que es puguin utilitzar metalls com l'acer inoxidable, el titani, l'alumini, etc. i que el nivell de porositat de les peces sigui molt menor que en el cas del SLS. El SLM i l'EBM es diferencien en la font que utilitzen per fondre el material, el primer treballa amb la llum ultraviolada i el segon ho fa amb un feix d'electrons.

- Laminated Object Manufacturing (LOM)

Aquesta tecnologia consisteix a enganxar amb resina diverses capes de material mitjançant les altes temperatures i pressió, i anar-les tallant amb un làser fins a obtenir la peça desitjada. Els materials més utilitzats en aquest procés són el paper adhesiu, el plàstic i les làmines de metall.

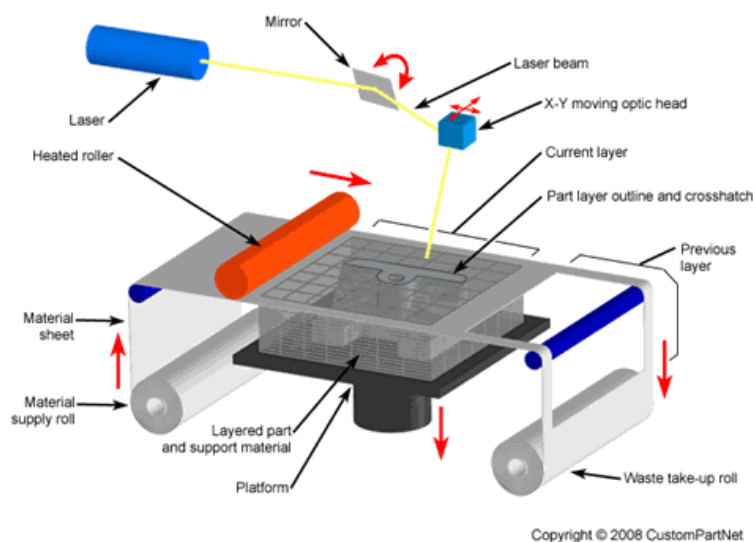


Figura 5: Tecnologia LOM

Font: CustomPartNet[1]

- PolyJet Photopolymer

La tecnologia PolyJet s'assembla a la impressió tradicional de tinta, s'expulsa un raig de resina en capes ultrafines que s'endureix mitjançant la llum ultraviolada. Aquest procés produeix un alt de nivell però la mida màxima d'impressió és reduïda.

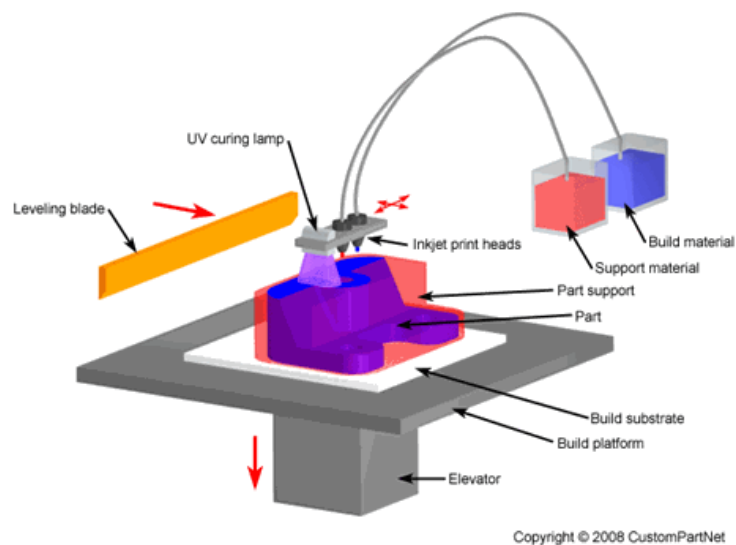


Figura 6: *Tecnologia Polyjet*
Font: *CustomPartNet[1]*

- Syringe Extrusion

Aquesta tecnologia utilitza materials en format cremós o viscós i utilitza un extrusor, com una xeringa, situant el material en la posició adequada. S'utilitza habitualment per produir peces comestibles amb materials com la xocolata.

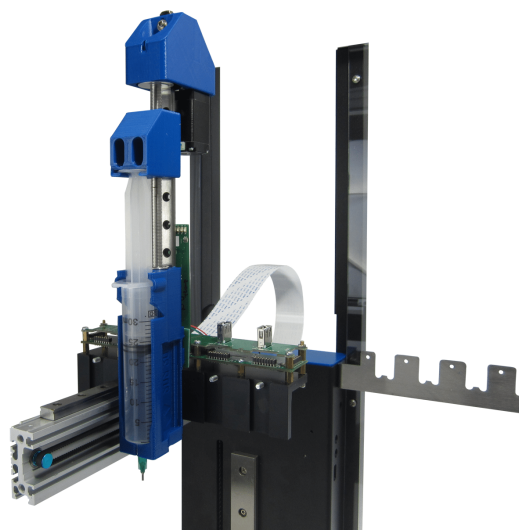


Figura 7: *Tecnologia Syringe Extrusion*
Font: *3D Printing Industry[2]*

3.3 Tipus d'ortesi i la seva funció

Una ortesi és un dispositiu extern aplicat a un segment corporal per donar suport, restringir, mobilitzar o immobilitzar estructures. Les ortesis són altament utilitzades en la medicina humana, són un tractament molt habitual per a un gran nombre de malalties i lesions. Recentment, aquests dispositius han començat a utilitzar-se també en la medicina veterinària.

A part de donar un suport físic ajudant al correcte posicionament del grup muscular, les ortesis augmenten la temperatura de treball de teixits i articulacions. Aquest augment de la temperatura de treball produeix efectes en els processos hemodinàmics, neuromusculars i metabòlics com l'alliberament dels vasodilatadors histamina i prostaglandina, augmentant el flux sanguini, l'augment de la conducció nerviosa i l'augment de la producció d'elastina, proteïna que aporta extensibilitat als teixits tous de col·lagen. També millora el metabolisme, augmentant el nombre de cèl·lules millorant les defenses de l'organisme, i redueix la síntesi de col·lagen, proteïna que fibrosa els teixits.

Tots aquests efectes produeixen un augment del llindar de dolor, ja que l'augment de l'activitat dels termoreceptors cutanis té efecte inhibitori; una acceleració del procés de curació de teixits, gràcies a l'augment de l'aportació de sang; un augment de la flexibilitat dels teixits i un augment de l'arc de mobilitat i rigidesa articular, gràcies a l'augment d'extensibilitat de teixits tous.



Figura 8: Exemples d'ortesis d'Ortocanis
Font: *Ortocanis*[4]

Les ortesis es diferencien principalment en dos grans tipus:

- Les més toves, que estan fetes amb materials flexibles i teixits especials i són utilitzades en casos d'artrosi, displàsia de maluc, lesions de lligaments, rehabilitació postoperatòria, debilitat o dolor en les articulacions que acaben generant un problema de mobilitat.
- Les més rígides, que s'utilitzen per a corregir problemes de propiocepció o el tractament de fractures en el cas de fèrules de membre anterior o posterior

Dels tipus d'ortesis mencionats anteriorment aquest estudi s'ha centrat en el disseny de les fèrules, és a dir, en ortesis rígides.

3.3.1 Funció de les fèrules

Les fèrules es poden utilitzar tant per a problemes ortopèdics, traumatològics o neurològics.

- En problemes ortopèdics

Malformacions i inestabilitats articulars de carp i tars són una de les indicacions de l'ús de fèrules en medicina veterinària que té millors resultats. La funció de la fèrula serà mantenir la posició del membre en la correcta alineació perquè pugui treballar correctament i suportar bé les càrregues.

- En problemes traumatològics

Poden ajudar en processos postquirúrgics i també ser utilitzades en tractaments conservadors. Ens poden ser de gran utilitat en ferides obertes que hem de curar de manera freqüent en membres que han de romandre immobilitzats. Les fèrules permeten una immobilització important que pot ser de "posar i treure", molt més efectiu, econòmic, higiènic i ràpid que els embenats complicats.

- En problemes neurològics

En els típics casos de dèficits propioceptius són la primera elecció, corregim la postura del membre en l'espai i permeten que l'animal recolzi la cara plantar o palmar dels dits de forma correcta.

3.3.2 Tipus de fèrules

A continuació s'explicaran els tipus de fèrules més habituals per a les potes dels gossos o, en aquest cas, dels gats. Aquests tipus de fèrules són els que comercialitzen actualment les ortopèdies [5] i, per tant, s'ha considerat que són els més habituals.

Hi ha cinc tipus de fèrules per a les extremitats davanteres i posteriors de l'animal en funció de les lesions o malalties que es vulguin tractar.

- Fèrula de carp

Aquesta fèrula aporta immobilització total de l'articulació del carp (canell), però sense impedir que l'animal perdi el contacte dels coixinets amb el terra, aportant comoditat. És indicada per a lesions tendinoses, lligamentoses i com a estabilització postquirúrgica. Permet un suport sense els problemes que comporten els embenats (dermatitis i laceracions) i a més permet tenir un control constant de l'extremitat de l'animal, ja que es pot posar i treure amb facilitat.



Figura 9: Fèrula de carp d'Ortocanis
Font: Ortocanis[5]

- Fèrula de tars

Aquesta fèrula aporta immobilització total de l'articulació del tars (turmell), però sense impedir que l'animal perdi el contacte dels coixinets amb el terra, aportant comoditat. És indicada per lesions tendinoses, lligamentoses i com estabilització postquirúrgica. Com en el cas de la fèrula de carp, permet un suport sense els problemes que comporten els embenats (dermatitis i laceracions) i a més permet tenir un control constant de l'extremitat de l'animal, ja que es pot posar i treure amb facilitat.



Figura 10: Fèrula de tars d'Ortocanis
Font: Ortocanis[5]

- Fèrula de bota curta

Aquesta fèrula en forma de bota dona suport a la part més baixa de l'extremitat posterior o davantera. Es perllonga per la zona de sota el peu per estabilitzar lesions dels dits i proporciona un suport per posicionar l'extremitat de forma correcta. Està especialment indicada per problemes de *knuckling*, així com altres processos neurològics i dèficits propioceptius de membres distals. Aquesta fèrula està modelada com les fèrules humanes, que són habituals en lesions de cama, tars, carp, metatars i metacarp. És molt útil quan hi ha problemes en metatars, metacarp, falanges o alguna lesió nerviosa.



Figura 11: Fèrula de bota curta d'Ortocanis

Font: Ortocanis[5]

- Fèrula pota davantera

Aquesta fèrula s'utilitza per al tractament de fractures i altres lesions en les parts distals del membre anterior. La fèrula està modelada com les fèrules humanes, que s'utilitzen normalment en lesions d'avantbraç, cap i mà. Es pot utilitzar en casos de dèficit neurològic, neurapràxies i altres problemes del plexe braquial i nervi radial per posicionar correctament l'extremitat. També es pot utilitzar en casos de fractures, fissures i fins i tot a lesions del teixit tou per donar suport i immobilitzar. S'ha de tenir en compte que la fèrula no pot sobrepassar l'alçada del colze.



Figura 12: Fèrula de pota davantera d'Ortocanis

Font: Ortocanis[5]

- Fèrula pota posterior

Aquesta fèrula s'utilitza per al tractament de fractures i altres lesions en les parts distals del membre posterior. La fèrula està modelada com les fèrules humanes, que s'utilitzen normalment en lesions o fractures de cama, tars i peu. És útil tant en problemes neurològics, per posicionar correctament l'extremitat; com en problemes traumatològics, per donar suport i immobilitzar.



Figura 13: Fèrula pota posterior d'Ortocanis
Font: Ortocanis[5]

Aquest estudi es centra en els dos últims tipus de fèrules, ja que són les més completes i engloben les altres fèrules esmentades.

3.4 Estudi de mercat

Actualment hi ha diverses empreses que es dediquen a la venda de fèrules per a gats. Normalment aquestes es troben a les botigues com a fèrules per a gossos que poden ser per a gats en la seva talla més petita. En general, les empreses que comercialitzen aquests productes no treballen amb la impressió 3D, ja que es tracta d'una tecnologia que encara està en procés de desenvolupament en el sector mèdic, sobretot per a animals.

En aquest apartat s'exposaran algunes empreses d'ortopèdia per a mascotes, en especial per a gossos i gats, i les característiques i preus de les seves fèrules, tant per a potes davanteres com per a posteriors. Primer s'estudiaran les dues principals ortopèdies per a mascotes al mercat espanyol i després dues ortopèdies més del mercat internacional.

3.4.1 Ortocanis

Ortocanis[5] és una empresa de Badalona que realitza i ven arnesos, suports i ortesis. Les fèrules estan modelades com les fèrules humanes, estan compostes de polipropilè per una major adaptació a l'extremitat i la cara interior està recoberta amb escuma de cèl·lula tancada. Les fèrules destinades per als gats, o gossos petits, són les de la talla XXS, realitzades per a animals amb un pes inferior als 4,5 kg.

La fèrula ortopèdica per a la pota davantera té un preu de 74,95 € i una longitud total de 14,6 cm. Mentre que la fèrula per a la pota posterior té un preu de 69,95 € i una llargada de 15,9 cm.



Figura 14: Fèrula de la pota posterior d'Ortocanis

Font: Ortocanis[5]

3.4.2 OrtopediaMascotas

OrtopediaMascotas[6] és una empresa de Múrcia especialitzada en productes ortopèdics per a mascotes, material de fisioteràpia i rehabilitació per a mascotes, cadires de rodes per a gossos i gats, distribució de productes de teràpies alternatives i accessoris per a mascotes. Les fèrules estan confeccionades de materials d'utilització comuna a les fèrules humanes com el polipropilè, el neoprè tèxtil i el cautxú d'alta durabilitat. Igual que en el cas anterior, la talla destinada a gats és la XXS, que és per a animals de menys de 4,5 kg.

Els preus i les longituds són molt similars als de les fèrules realitzades per l'empresa Ortocanis. La fèrula per a la pota davantera té un preu de 73,50 € i una longitud de 14 cm i la de la pota posterior costa 65,50 €. La longitud d'aquesta última no es troba especificada a la pàgina web.



Figura 15: Fèrula de la pota davantera d'OrtopediaMascotas
Font: OrtopediaMascotas[6]

3.4.3 Walkin' Pets

La companyia Walkin'Pets[7] pertany a l'empresa Handicapped-Pets.com i tenen la seva oficina a Amherst, una ciutat de New Hampshire, Estats Units. Aquesta empresa està especialitzada en productes per al cuidat de mascotes envellides, lesionades o amb necessitats especials. Les seves fèrules estan fetes de plàstic dur amb un folre d'escuma suau i un coixí antilliscant a la part inferior. Per a gats es recomana la talla més petita, la talla XXS, o una talla superior (XS) en cas que es vulgui afegir una espuma adequada a mida de la fèrula per tal de donar a aquesta un ajustament més personalitzat per proporcionar més confort a la mascota.

La longitud i la forma de les fèrules és pràcticament igual a les mencionades anteriorment, 14,6 cm la longitud de la fèrula de la pota davantera i 15,9 cm la de la pota posterior. En aquest cas, però, el preu de les fèrules és notablement inferior a les anteriors. La fèrula de la pota davantera té un preu de 41,67 \$, uns 38,40 €, i la de la pota posterior té el mateix preu. En aquest cas s'hauria de tenir en compte que, tot i que les fèrules són més econòmiques,



Figura 16: Fèrula de la pota davantera de Walkin'Pets

Font: Walkin'Pets[7]

el preu final podria ser igual o superior als anteriors a causa dels costos de transport fins a la península.

3.4.4 Zoomadog

Zoomadog[8] és una botiga en línia de rehabilitació i salut de gossos del Regne Unit. La seva gamma de productes cobreix els aspectes de la mobilitat del gos, la salut conjunta i el suport postoperatori. Alguns d'aquests productes són les fèrules, suports de cames, arnesos i cadires de rodes. Igual que en els casos anteriors, la talla recomanada per a gats és la XXS, la talla més petita.

La longitud de les dues fèrules, la de la pota davantera i la de la pota posterior, és la mateixa que en el cas anterior però el preu és superior. La fèrula de la pota davantera costa £67,99, uns 77 €, i la fèrula de la pota posterior té el mateix preu.



Figura 17: Fèrules de la pota davantera (esquerra) i de la pota posterior (dreta) de Zoomadog
Font: Zoomadog[8]

4 Especificacions bàsiques

Una vegada estudiat l'estat de l'art en el camp de la impressió 3D i dels tipus de fèrules per a gats s'han determinat certes especificacions que s'han de tenir en compte a l'hora de realitzar el disseny de les fèrules.

Primer de tot, a l'estudi de mercat s'ha pogut observar que les empreses comercialitzen tant fèrules per a les potes davanteres com fèrules per a les potes posteriors ja que totes dues són necessàries en funció de la lesió de l'animal i aquestes no són iguals. Per tant, s'ha decidit realitzar un disseny d'una fèrula per a la pota davantera i un altre disseny d'una fèrula

També s'ha pogut observar que la majoria de fèrules tenen un material tou al seu interior per tal d'evitar molèsties al gat durant la seva utilització. És per això que s'ha decidit que els dissenys han de contemplar el fet de la utilització de dos materials, un exterior prou dur per tal de resistir les càrregues aplicades a la fèrula i un interior tou per tal d'evitar molèsties en el gat i garantir la comoditat de les fèrules.

Tenint en compte els conceptes esmentats anteriorment, s'ha determinat que el pes de la fèrula ha de ser prou reduït per tal de garantir la comoditat del gat durant la seva utilització, uns 35 grams. També s'ha de tenir en compte que el gruix de la fèrula no ha de ser excessiu ja que sinó aquesta podria causar molèsties al gat o, fins i tot, ferides degut al fregament. S'ha estimat que el gruix de la fèrula hauria de ser inferior a 5 mm.

5 Sistema motriu d'un gat

Hi ha tres plans anatòmics en el cos d'un gat: el pla mitjà, el dorsal i el transversal. El pla mitjà divideix el gat longitudinalment en la meitat dreta i la meitat esquerra. El pla dorsal separa la meitat superior i la meitat inferior del gat. Finalment, el pla transversal interseca la línia mitjana del tors del gat que separa les extremitats anteriors i les posteriors.

A més a més, la comunitat veterinària utilitza els termes cranial/caudal i dorsal/ventral per descriure la posició relativa dels elements de l'anatomia del gat. Cranial indica que l'element és al voltant del cap mentre que caudal indica que es troba al voltant de la cua. El terme dorsal s'utilitza quan es descriuen elements que estan a la part superior del cos i el terme ventral s'utilitza quan els elements estan a la part inferior. En general, l'anatomia de les extremitats felines és bastant homòloga a les humanes. Molts dels mateixos ossos que es troben als felins es reflecteixen en l'estructura esquelètica humana.

L'esquelet dels gats és molt similars a l'esquelet dels gossos, ja que tots dos animals són animals domèstics carnívors.

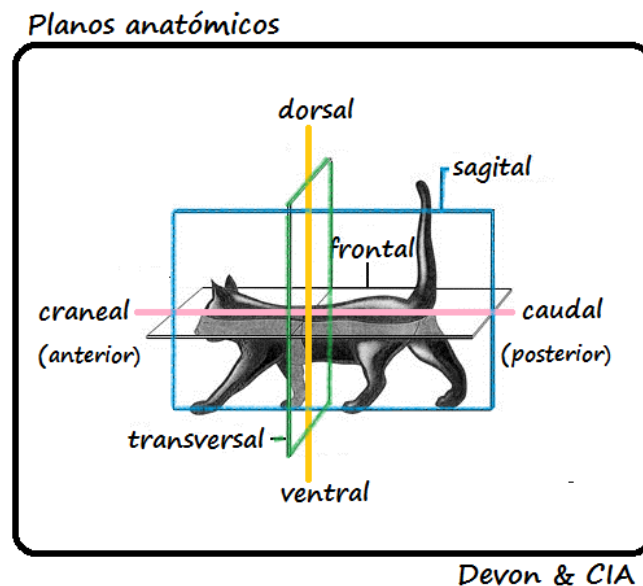


Figura 18: *Plans anatòmics d'un gat*

Font: *Pinterest*[9]

5.1 Anatomia de la pota davantera

Els ossos de l'extremitat anterior es poden dividir en tres grups: l'extremitat superior (estilopodi), extremitat inferior (zigopodi) i pota (autopodi).

L'extremitat superior està formada per l'húmer, que es connecta amb l'escàpula per formar l'articulació de l'espatlla i es connecta amb el radi i el cúbit per formar el colze. L'húmer es divideix en 4 parts: el cap, el coll, el cos i el còndil. El cap i el coll es troben a l'extrem proximal de l'os mentre que el còndil està situat a l'extrem distal. Aquestes estructures estan separades pel cos

de l'húmer. Aquestes porcions de l'os són responsables de les interaccions articulars.

L'extrem inferior està format pel radi i el cúbit, també anomenat ulna. El cúbit és el més llarg dels dos ossos i és l'os més llarg del cos felí. El radi és el més curt dels dos ossos i és el principal os que suporta el pes de l'avantguarda.

La pota es divideix en carp (canell), metacarp i falanges. El carp és compost de set ossos disposats en dues files transversals, la fila proximal o antebraquial i la fila distal o metacarpiana. Distals del carp hi ha els cinc ossos metacarpians en una sola fila. En els gats el tercer i quart metacarpians són els més llargs i forts mentre que el primer és molt reduït.

Finalment, cada os metacarpia es connecta distalment amb les falanges o els dits dels peus. Hi ha quatre falanges totalment desenvolupades i una rudimentària, la corresponent al primer metacarpia. Cadascuna de les falanges completament desenvolupades està formada per una falange proximal, una mitjana i una distal, també anomenada os unguiculat.

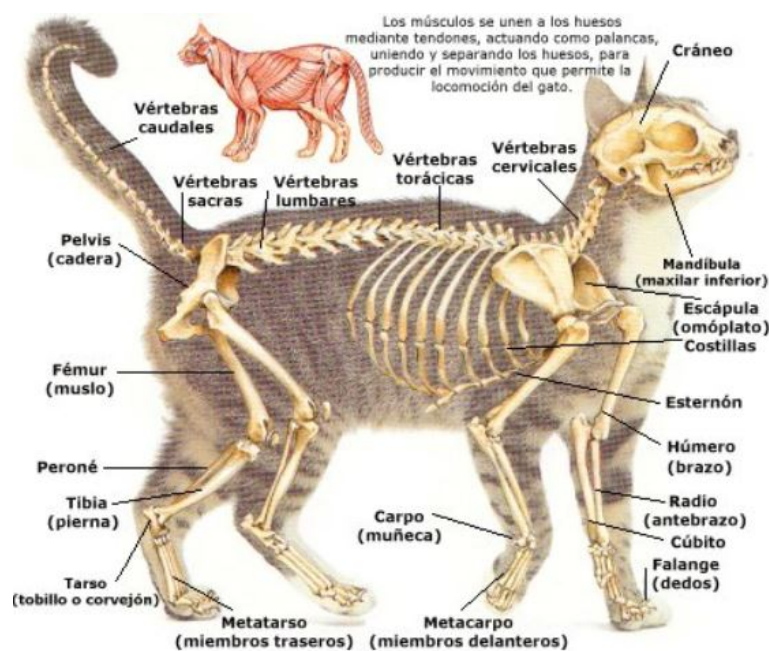


Figura 19: Esquelet d'un gat
Font: Pinterest[10]

5.2 Anatomia de la pota posterior

Els ossos de l'extremitat posterior es poden dividir en quatre grups; la cuixa, la ròtula, la cama i el peu.

La cuixa està formada pel fèmur, que és l'os més fort de tots els ossos llargs. El fèmur es divideix en tres parts: el cap, el cos i els còndils lateral i medial. El cap es troba a l'extrem proximal de l'os i forma part de l'articulació de la cintura mentre que els còndils es troben a l'extrem distal i formen part de l'articulació del genoll, juntament amb la ròtula.

La cama està formada per la tibia i el peroné. El peroné s'adossa lateralment a la tibia i se situa gairebé totalment paral·lel a ella. El peroné té el llarg de la tibia però el seu desenvolupament és molt més dèbil, per tant, tot el pes del cos és suportat exclusivament per la tibia i, en conseqüència, el desenvolupament de l'estructura de les seves parets és més gran.

El peu està format pel basipodi amb els set ossos tarsians, el metapodi amb els ossos metatarsians i l'acropodi amb els ossos dels dits. Entre els ossos tarsians destaquen l'astràgal i el calcani. L'esquelet del metatars i el dels dits del peu, en termes generals, es corresponen amb els del membre anterior tot i que hi ha certes diferències. En comparació amb els ossos de la mà, els ossos del metatars són més fins i més llargs i l'estructura de les seves parets està més desenvolupada.

5.3 Cicle de marxa dels quadrúpedes

La locomoció implica l'activitat harmònica de tot l'animal dependent especialment de l'acció coordinada dels músculs, els ossos i el sistema nerviós. La marxa normal és una sèrie de moviments rítmics alterns de les extremitats que permeten el moviment cap endavant a través del canvi de centre de gravetat (CG).

En els gats es poden diferenciar quatre tipus de marxa: caminar, passejar, trotar i galopar

- Caminar

La caminada és una marxa de quatre pulsacions, cosa que significa que cadascuna de les potes del gat contacta amb el terra en un moment diferent durant el pas. Durant qualsevol fase d'aquesta marxa hi ha, com a mínim, dos peus en contacte amb el terra. En una caminada lenta, com ara la caminada amb fre, normalment hi ha tres i, de vegades, quatre peus en contacte. La caminada ràpida té dos o tres peus en contacte amb el terra a la vegada. La caminada es descriu com a simètrica, perquè les extremitats de l'esquerra repeteixen la posició de la dreta, una mitja punta més endavant. La velocitat d'avanç és d'aproximadament 0,9 m/s; tanmateix, una caminada ràpida gairebé duplicarà la taxa.

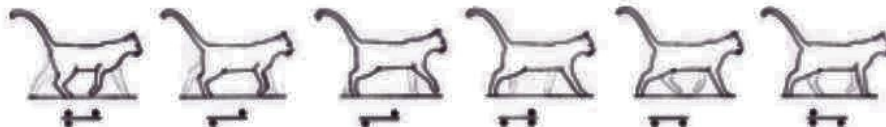


Figura 20: Gat caminant
Font: Veterian Key[11]

- Passejar

El passeig és una altra marxa de quatre pulsacions utilitzada pel gat. Ha estat referida per diversos termes, inclosos el ritme lent i la marxa corrent. El patró de peu és el mateix que per a la caminada, però el temps de la col·locació de les extremitats difereix. A aquesta marxa, el gat té l'aspecte de moure les extremitats d'un costat del cos cap endavant gairebé al mateix temps.

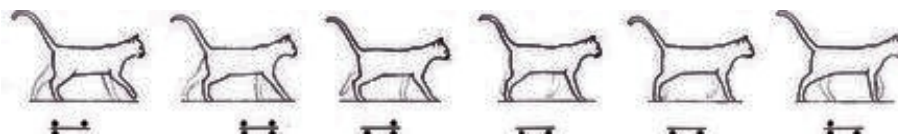


Figura 21: Gat passejant

- Trotar

Per viatjar llargues distàncies a una velocitat justa, s'utilitza amb més freqüència el trot. Aquesta marxa de dos ritmes és menys esgotadora que altres trets, perquè hi ha menys moviment corporal sobre el centre de gravetat. Una característica afegida, com a resultat del canvi de gravetat constant, és que la marxa proporciona més estabilitat de peu. Es tracta d'una marxa simètrica. A velocitats normals o ràpides, un parell de potes contralaterals impulsen el cos cap endavant, deixant un breu interval suspès quan no hi ha extremitats que recolzen el cos. Aleshores, apareix un parell d'extremitats alternes i s'aparta per completar el cicle. A un ritme lent de velocitat, l'etapa de suspensió no es produeix, perquè la tercera i la quarta pota contacten amb el terra abans que la primera i la segona surtin.

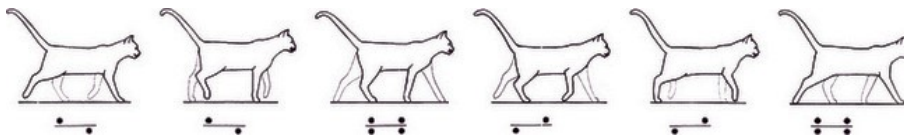


Figura 22: Gat trotant

- Galopar

Quan es necessita velocitat per perseguir preses o escapar enemics, s'utilitza el galop. Aquesta marxa asimètrica de quatre pulsacions té diverses variacions, segons la velocitat necessària i l'individu que la realitzi. A ritme lent (una marxa que també s'anomena canter), hi ha com a mínim una pota a terra en tot moment o fins a tres durant determinades fases. A mesura que les potes caudals toquen el terra, el peu que contacta amb el terra es col·loca per darrere de l'altre. El mateix posicionament es produeix quan les potes cranials aterren. El peu que cau per davant i per davant de la seva contrapartida pot ser denominat peu de plom, i si es tractés de la capçalera dreta i del revers dret, es pot dir que el gat té el plom dret al davant i el plom dret darrere.

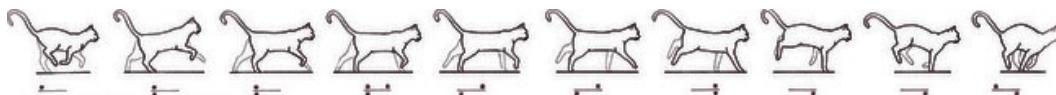


Figura 23: Gat galopant lent

Quan la seva velocitat augmenta, el gat té una fase de suspensió després de l'empenta amb les extremitats pèlviques. A gran velocitat, es produeix una segona fase de suspensió després de l'empenta de les extremitats toràciques. Aproximadament el 80% d'un pas es realitza en vol prolongat, gairebé un 20% en contacte terrestre previ i una quantitat molt mínima de temps de terra per a les extremitats pèlviques. Generalment, a velocitats més ràpides, el gat es dirigirà amb peus oposats, front i posterior, per permetre la superació com a resultat de la gran flexió de la part posterior. Les velocitats més ràpides requereixen més energia per obtenir la fase de suspensió i per tant rarament es mantenen durant distàncies prolongades.

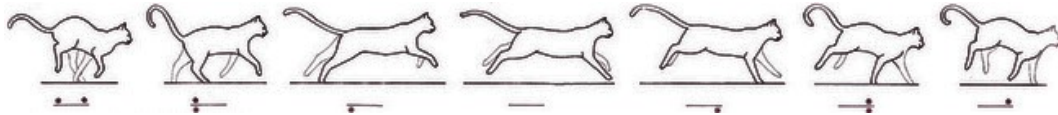


Figura 24: Gat galopant ràpid

5.4 Estudi cinemàtic i dinàmic de la caminada

L'anàlisi de la marxa es fa mitjançant l'estàtica i la dinàmica. La dinàmica s'utilitza per obtenir informació com desplaçaments, canvi d'angles articulars, velocitats i acceleració dels segments del cos en moviment. L'estàtica utilitza forces de reacció terrestre que es mesuren per determinar les forces a les articulacions del subjecte. Les fèrules estan destinades a la rehabilitació de fractures en les potes del gat i, per tant, s'ha considerat que la marxa que utilitzarà el gat durant aquest procés és la caminada. Per tant, és aquest tipus de marxa el que s'ha estudiat en aquest apartat.

Al voltant del 60% de la càrrega del pes corporal és portada per les extremitats toràciques, principalment perquè el centre de gravetat és més proper a elles. A mesura que el gat passi de quatre potes a terra a tres, la majoria de pes serà recolzat en la parella d'extremitats contraposades en diagonal. El centre de gravetat també es desplaça cap a aquestes extremitats, acabant dins d'una àrea triangular determinada per les tres extremitats de suport.

Les forces verticals i horitzontals s'associen a la caminada, amb l'empenta vertical oscil·lant entre un màxim d'aproximadament 4.000 g a un mínim d'aproximadament 2600 g dues vegades durant cada cicle complet. A velocitat normal, l'empenta vertical màxima es realitza durant la fase de suport de tres peus, i l'empenta mínima es produeix quan només hi ha dues potes a terra. Durant l'empenta vertical màxima es produeix una acceleració ascendent del centre de massa del cos que va seguida d'un interval en què el centre de masses s'accelera negativament, moment en el qual es produeix l'empenta mínima.

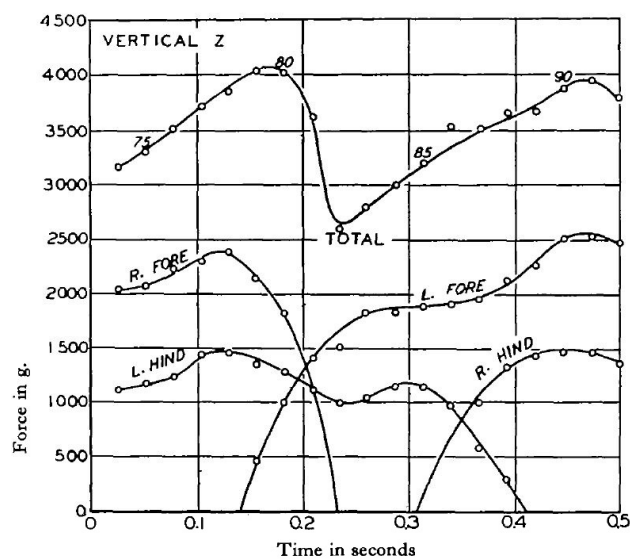


Figura 25: Força vertical durant la caminada

Font: Manter[12]

Les forces horitzontals individuals són més grans per a les extremitats toràciques que per a les contraparts de les extremitats pèlviques. Tant el període de propulsió endavant com el de propulsió retardant negativa, quan es torna a avançar a una posició cranial, proporcionen valors calculats més grans que els valors corresponents per a les extremitats pèlviques. A causa de l'orientació vertical de les extremitats anteriors, però, la força longitudinal neta és un petit impuls cap endavant, molt menor que per als membres del darrere. La força horitzontal produïda per la resistència de fricció entre el peu i el terra és negativa, en una direcció oposada a la progressió de l'animal, durant la primera part d'un pas. Més endavant es produeix un impuls d'avanç a mesura que l'extremitat exerceix una empenta enrere contra el terra, provocant una reacció horitzontal positiva. L'impuls donat al cos equival al producte de la força externa i al temps durant el qual actua. Com que la força externa horitzontal que actua sobre una sola extremitat és negativa durant una part del pas i positiva durant una altra, es pot considerar que l'impuls horitzontal consta de porcions negatives (retard) i positives (cap endavant).

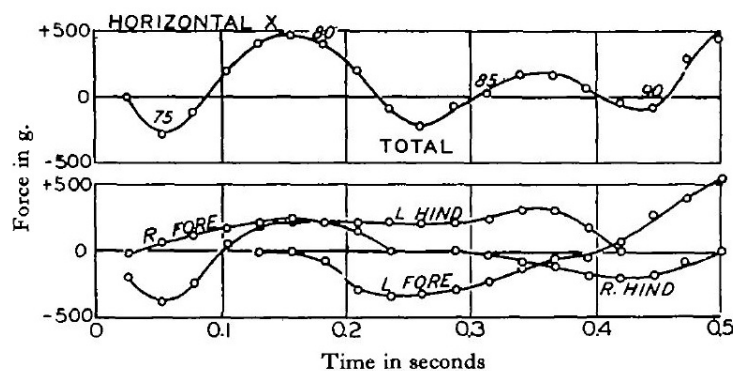


Figura 26: Força horitzontal durant la caminada
Font: Manter[12]

En el moviment cap endavant, la funció principal de les extremitats toràciques és produir l'acceleració ascendent del cos, i la de les extremitats pèlviques és avançar cap endavant. Els canvis de força associats a cada extremitat són consistents per a aquell animal, però difereixen entre els individus.

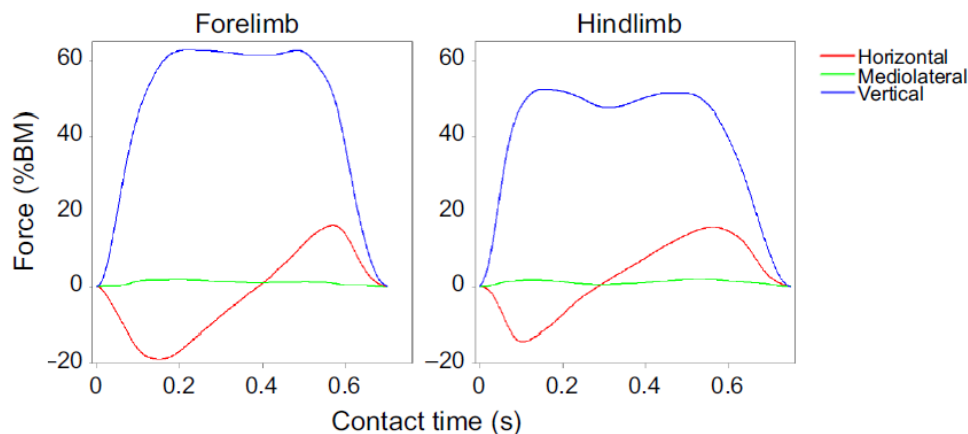


Figura 27: Distribució de forces durant la caminada
Font: Granatosky & Company[13]

6 Sol·licitacions

6.1 Material

Un factor a tenir en compte a l'hora de dissenyar la fèrula és la comoditat del gat. La fèrula no només ha de ser capaç d'aguantar unes forces específiques sinó que s'ha d'adaptar a la forma de la pota del gat i ha d'evitar que aquest pateixi mal o molèsties quan la porti posada, ja sigui per la pressió que la fèrula pugui aplicar sobre l'animal o pel frec d'aquesta amb la pota. Per tal d'evitar les molèsties causades pel frec, s'ha decidit realitzar la part interior de la fèrula, la que està en contacte amb la pota de l'animal, d'un plàstic més tou i flexible, com és el TPU. Aquesta decisió implica la necessitat d'utilitzar la tècnica d'impressió 3D FDM (o FFF) descrita a l'apartat 3.1.1. El FDM permet realitzar impressions de peces amb dos extrusors, és a dir, amb dos materials diferents a la vegada. S'ha de tenir en compte que aquesta tècnica no és la que aconsegueix les millors resistències mecàniques, per això s'haurà de combinar el TPU amb un material que presenti unes bones propietats mecàniques, com pot ser l'ABS.

●●● HIGH ●●○ MEDIUM ●○○ LOW

	MECHANICAL RESISTANCE	TERMICAL RESISTANCE	POSSIBILITY OF POSTPROCESSING	FLEXIBILITY	COLOR RANGE	PRICE	ALIMENTATION COMPATIBILITY	NOZZLE	PRINTING EASINESS
PLA	●●○	●○○	●○○	●○○	●●●	●○○	●●● (Colorfil)	0.4mm	●●●
ABS	●●●	●●●	●●●	●○○	●●○	●○○	●○○	0.4mm	●●○
FILAFLEX	●●○	●●○	●○○	●●●	●●●	●●○	●○○	0.6mm	●○○
XT COLORFABB	●●●	●●●	●●○	●○○	●●○	●●○	●○○	0.6mm	●●○
COLORFABB SPECIALS	●○○	●○○	●●●	●○○	●○○	●●●	●○○	0.6mm	●○○
NYLON	●●●	●●●	●●○	●●○	●○○	●●○	●○○	0.4mm	●●○

Figura 28: Característiques dels materials utilitzats en la impressió FDM

Font: Sistemes de Fabricació (UPC)[14]

6.2 Forces

A l'apartat 5.4 s'ha realitzat un estudi cinemàtic i dinàmic de la marxa dels gats per tal de poder determinar les sol·licitacions que s'han de tenir en compte a l'hora de realitzar els dissenys de les fèrules. En aquest treball s'ha decidit utilitzar un factor de seguretat igual a 4 per assegurar la resistència i la durabilitat de la fèrula, per tant, la fèrula haurà de ser capaç de suportar les forces trobades a l'estudi de la marxa multiplicades per quatre.

La fèrula de la pota davantera ha de poder suportar verticalment, com a mínim, el 60% del pes

del gat. Per tal d'establir un marge de seguretat la fèrula davantera haurà de ser capaç de suportar 4 vegades el 60% del pes del gat, és a dir, ha de poder suportar el 240% del pes de l'animal. Pel que fa a la fèrula de la pota posterior, aquesta ha de poder suportar verticalment el 40% del pes del gat, que un cop aplicat el factor de seguretat s'estableix com el 160% del pes.

Totes dues potes suporten una força horitzontal de $\pm 20\%$ el pes del gat, és a dir, les potes suporten forces negatives i positives. Tenint en compte el factor de seguretat, totes dues fèrules hauran de ser capaces de suportar $\pm 80\%$ del pes de l'animal.

La massa ideal d'un gat es troba entre 2 i 4,5 kg, en funció de la raça d'aquest. En aquest estudi s'ha decidit agafar com a referència un gat amb una massa de 4,5 kg, això permet determinar les forces que han de ser capaces de suportar les fèrules. Un cop establerta aquesta condició s'ha establert que la fèrula de la pota davantera ha de poder suportar verticalment 105,95 N i la de la pota posterior 70,63 N. Totes dues fèrules han de poder suportar una força horitzontal de $\pm 35,12$ N. En aquest estudi només es tindrà en compte la direcció negativa de la força horitzontal, és a dir, la força que s'aplica contra l'estructura de la fèrula.

6.3 Geometria

Per tal de poder graduar les pressions que apliquen les fèrules sobre les potes s'ha decidit realitzar les fèrules mitjançant dues parts. La primera part, la base, té una forma similar a les fèrules vistes a l'Estudi de mercat, és a dir, envolta la part de darrere de la pota i es perllonga per la zona de sota el peu. La segona part s'ha anomenat extraïble i envolta la pota per davant. Aquesta segona part no inclou el peu, és a dir, arriba fins al canell o turmell, en funció de si es tracta de la pota davantera o la posterior.

S'ha plantejat realitzar la fèrula en dues parts per tal d'evitar la immobilització de la pota mitjançant embenats o guix a l'inici del procés de recuperació. En el cas de la fèrula a dissenyar el procediment seria el següent: s'immobilitza la pota mitjançant les dues parts de la fèrula a l'inici del procés de recuperació, quan la pota es troba més dèbil i no pot suportar altes pressions, i després, quan la pota pot suportar pressions més altes, es deixa d'utilitzar la part extraïble i s'immobilitza la pota només amb la base. D'aquesta manera, la utilització de la fèrula completa substituiria l'embenat inicial, ja que es tracta d'un recobriment sencer de la pota amb l'alleujament de pressions sobre aquesta que això implica.

Per poder unir les dues parts de la fèrula s'ha decidit utilitzar un grup de tres tires de velcro. Aquesta solució també permet unir la base de la fèrula a la pota del gat en cas d'utilitzar-la sola. S'ha decidit utilitzar aquest mètode d'unió, ja que és fàcil d'utilitzar i permet regular la força amb la qual s'estreny la fèrula, de fet és l'utilitzat en moltes fèrules per a humans. A més a més, com es tracta de tires planes amb un cert gruix permet una certa distribució de les pressions, de forma que aquestes no es concentren en un sol punt de la pota.

La unió de les parts de la fèrula mitjançant les tires de velcro no assegura que el desplaçament relatiu d'una part respecte a l'altre sigui nul, ja que les parts podrien introduir-se una dins de l'altre o podrien lliscar verticalment en direccions contràries. Per evitar aquests desplaçaments s'ha decidit introduir uns petits ganxos en el disseny que restringeixin el moviment relatiu de les parts de la fèrula un cop aquestes siguin encaixades.

7 Primer disseny de les fèrules

7.1 Model 3D

Per tal de poder realitzar els dissenys 3D de les fèrules és necessari un model 3D d'un gat a partir del qual poder treballar. En un principi es va plantejar l'opció de realitzar un escaneig 3D d'un gat per tal d'obtenir un model d'un cas real per a la realització de les fèrules. Aquesta opció va ser descartada, ja que, per tal de realitzar l'escaneig, era necessari sedar el gat d'estudi i, en conseqüència, era necessari realitzar tot aquest procés amb la col·laboració d'un veterinari. Per tant, tot i la possibilitat d'utilitzar un escàner 3D de la Fundació CIM UPC, es va decidir intentar trobar un model 3D per altres mètodes en comptes de realitzar el sofisticat procés mencionat anteriorment.

Finalment, es va decidir buscar a pàgines webs de fitxers 3D lliures un model 3D d'un gat a partir del qual poder treballar. Es va trobar un model que semblava adequat a la pàgina Free3D[15].

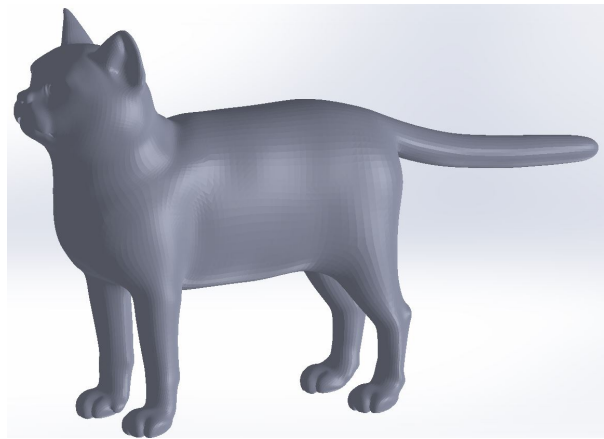


Figura 29: Model 3D d'un gat
Font: *Elaboració pròpia*

Aquest model es va importar com a superfície en el programari de CAD que s'utilitzaria posteriorment per realitzar els dissenys, el programa SolidWorks, i es van realitzar una sèrie de mesures que es van comparar amb valors coneguts a partir de l'estudi anatòmic del gat per tal de comprovar que el model era correcte. Mitjançant aquestes comparacions s'ha determinat que el model està a una escala 1/10. Un cop solucionat aquest problema s'ha arribat a la conclusió que és un bon model sobre el qual realitzar el disseny de les fèrules. Per tal que aquest model es pogués considerar realment fiable seria necessari realitzar una comprovació de la geometria mitjançant l'escaneig d'un gat o mitjançant la realització de diverses mesures en l'animal. Aquesta comprovació final no s'ha pogut dur a terme però igualment s'ha acceptat com a bo el model obtingut de la web.

7.2 Primer disseny 3D de les fèrules

El disseny de les dues fèrules, tant de la pota davantera com de la pota posterior, s'ha realitzat seguint aproximadament els mateixos passos. Per tant, s'explicarà el procés del disseny d'una de les fèrules, la de la pota posterior, i aquest serà extrapolable a l'altra.

Primer de tot s'ha realitzat una superfície al voltant de la pota, des de la part superior del peu fins a l'alça corresponent a la llargada de la fèrula. Aquesta superfície s'ha realitzat mitjançant l'eina *Boundary Surface*. S'han definit diferents perfils de la pota en diferents plans, tant horitzontals com verticals, i aquests han sigut utilitzats per definir la superfície esmentada, com es pot veure a la Figura 30. S'han definit una gran quantitat de perfils a causa de la necessitat que la part interior tingui la forma exacta de la pota per a la comoditat del gat.

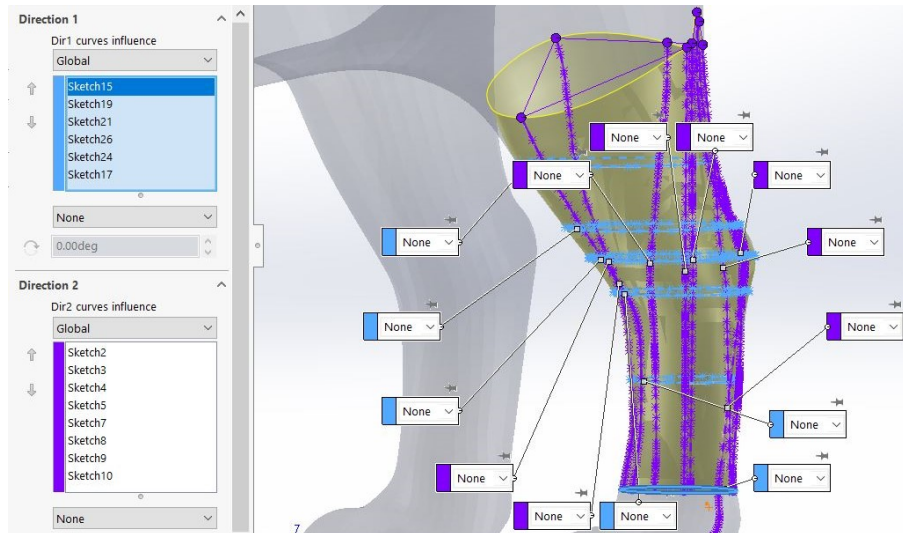


Figura 30: Superfície interior de la part superior de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

Mitjançant l'eina *Boundary Surface* s'ha realitzat també una nova superfície al voltant de la superfície inicial, a una distància aproximada de 3,5 mm, definint d'aquesta manera el gruix de la fèrula. Aquesta nova superfície no és tan detallada com l'anterior, és a dir no consta de tants perfils per a definir-la. Això és degut al fet que és la superfície que constitueix la part exterior de la fèrula i no cal que aquesta part tingui la forma exacta de la pota.

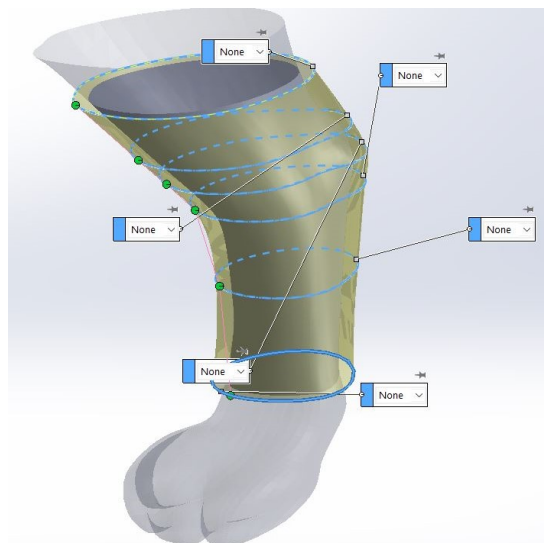


Figura 31: Superfície exterior de la part superior de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

A continuació s'han tancat les obertures entre les dues superfícies mitjançant l'eina *Surface Fill* i després s'ha utilitzat l'eina *Surface Knit* per tal de crear un sòlid a partir de les quatre superfícies. Aquest sòlid ha sigut partit en les dues parts de la fèrula, la part extraïble al davant i la part base al darrere. Aquesta partició s'ha dut a terme mitjançant una superfície extrudida anteriorment a partir d'un perfil aproximadament vertical, tenint en compte una certa curvatura, utilitzant l'eina *Split*.

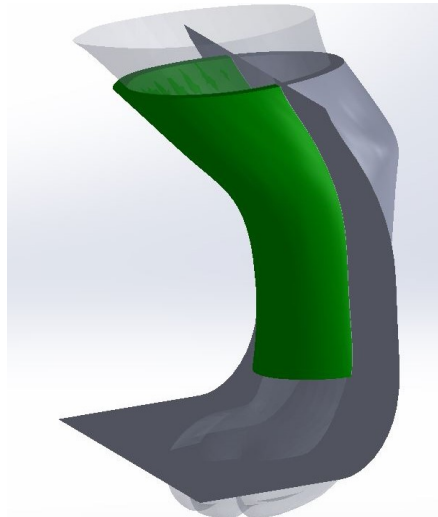


Figura 32: Sòlids inicials de la part superior de la fèrula i superfície de tall
Font: Elaboració pròpia

Després s'ha repetit el procediment anterior per la part inferior de la fèrula. Primer s'ha realitzat una superfície en contacte amb la pota i després una altra a uns 3,5 mm de distància. S'ha de tenir en compte que en aquest cas les superfícies no envolten totalment el peu de l'animal sinó que es centra en la part de la planta de la pota. Un altre factor a considerar és que la part de la planta de la pota, la que està en contacte amb el terra, s'ha dissenyat de forma que els dits del gat reposin sobre una superfície plana.

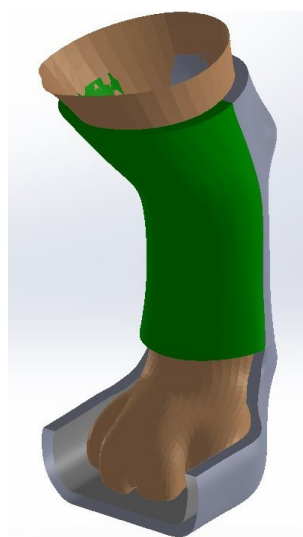


Figura 33: Superfícies de la part inferior de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

Un cop obtingudes les superfícies s'han retallat mitjançant l'eina *Surface Trim* i la superfície extrudida mencionada anteriorment i després s'han creat noves superfícies per tancar els espais oberts i, a partir de totes aquestes superfícies, s'ha creat un sòlid. Aquest sòlid s'ha unit al sòlid posterior de la part superior, el que es trobava pintat el gris a la Figura 32 mitjançant l'eina *Combine*. Després s'ha extrudit una nova superfície per tal de tallar les parts sobrants de la part inferior, com es pot observar a la Figura 34.

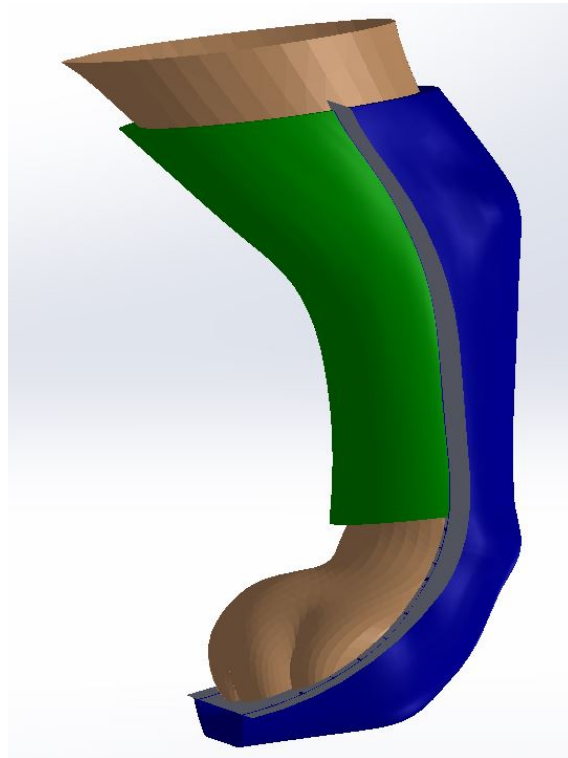


Figura 34: Sòlids inicials de la fèrula i superfície de tall

Font: Elaboració pròpia

Un cop realitzades totes les operacions anteriors s'han obtingut els dos sòlids inicials de la fèrula. Aquests dos sòlids es podrien considerar les prepeces a partir de les quals, mitjançant operacions posteriors, s'obtidran les dues parts de la fèrula.

La primera de les operacions realitzades a les prepeces ha sigut l'arrodoniment de tots els angles rectes que aquestes presentaven per tal d'evitar possibles molèsties en el gat i, tenint en compte que les fèrules es realitzaran mitjançant la impressió 3D, per aconseguir un millor acabat final de les peces. Aquesta operació s'ha realitzat mitjançant l'eina *Fillet*.

Després s'ha seguit el procediment explicat anteriorment per tal de crear una nova superfície, amb l'eina *Boundary Surface*, a una distància aproximada d'1 mm de la superfície interior. Com es pot observar a la Figura 35 aquesta superfície s'ha creat només en la meitat corresponent a la part extraïble de la fèrula i s'ha utilitzat per partir el sòlid davant en dos sòlids diferents, l'interior corresponent a la part impresa amb TPU (en gris fosc) i l'exterior corresponent a la part impresa amb ABS (en verd).

A continuació s'ha repetit el procediment anterior amb la part base de la fèrula fins a obtenir quatre sòlids, els sòlids dels dos materials de la part de davant i els sòlids dels dos materials de la part de darrere.

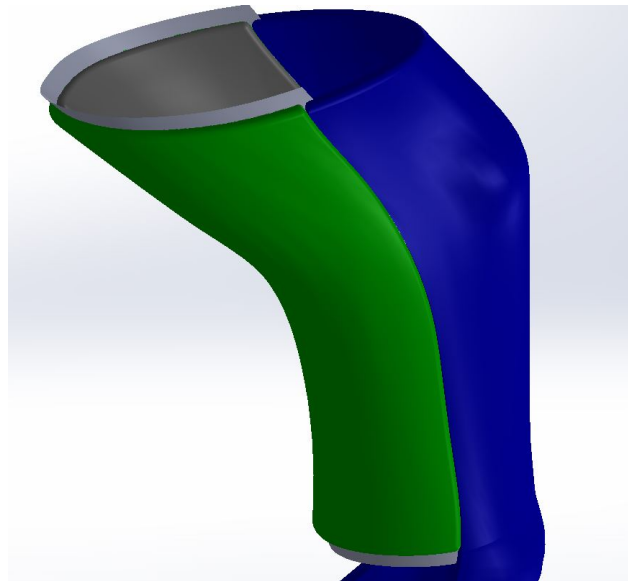


Figura 35: Sòlids inicials arrodonits, part extraïble en dos materials i superfície de tall
Font: Elaboració pròpia

S'ha de tenir en compte que l'arrodoniment dels angles rectes s'ha de realitzar abans de tallar els sòlids en dos de nous per tal de que no s'arrodoneixi la vora d'unió entre els dos materials sinó que ho facin les vores exteriors de la fèrula. En canvi, el tall de la fèrula en les seves dues parts s'ha fet abans del procés d'arrodoniment de les vores de contacte de les dues parts ja que es tracta de dues peces diferenciades i la part base es pot utilitzar sola i, per tant, necessita tenir totes les vores arrodonides per tal d'evitar provocar molèsties o fins i tot ferides al gat.

Com s'ha explicat a l'Apartat 6.3 són necessaris uns petits ganxos per delimitar el moviment d'una part de la fèrula respecte a l'altre quan aquestes estan col·locades juntes. Aquests petits ganxos s'han realitzat mitjançant les eines *Boss Extrude*, *Sweep* i *Loft* en funció de la complicació, o irregularitat, de la part de la fèrula a la qual havien d'anar units els ganxos. Inicialment es van realitzar tots mitjançant l'extrusió però després es va comprovar que amb aquest mètode no tots els ganxos quedaven ben units a la fèrula, per tant s'han realitzat els ganxos amb problemes d'unió mitjançant les altres dues eines esmentades.

A causa de la poca distància entre els ganxos de les dues parts de la fèrula, en realitzar-los el programa *SolidWorks* els interpretava com un sol sòlid i unia totes les parts de la fèrula. Per evitar-ho s'ha desseleccionat la casella *Merge result* a l'hora de dur a terme les operacions i després s'han unit els ganxos als seus respectius sòlids mitjançant l'eina *Combine*.

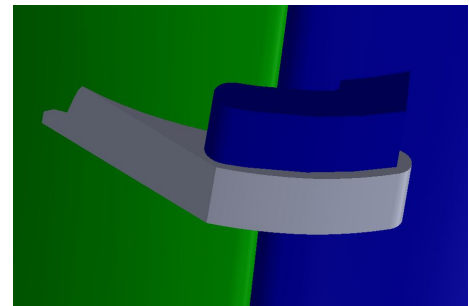


Figura 36: Ganxos d'unió de les dues parts de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

A la Figura 36 es pot observar que el ganxo de la part de darrere és més curt que el de la part de davant. Això és degut al fet que la part base de la fèrula es pot utilitzar sola i interessa que els ganxos siguin prou petits per evitar el seu trencament en aquest cas. També es tracta d'un recurs estètic, no "queda bé" que els ganxos sobresurtin molt de la fèrula quan només s'utilitza

la part de darrere. A la Figura també es pot observar que el ganxo de la part extraïble està en gris mentre que el de la part base està en blau, igual que la resta de la peça. Això és degut al fet que el ganxo de la part de darrere ja ha estat unit a la peça mitjançant l'eina *Combine* i en el de la part de davant encara no s'ha realitzat aquesta operació.

A l'Apartat 6.3 també s'ha esmentat la necessitat de fixar les dues parts de la fèrula per evitar que es separin quan s'utilitzin a la vegada. Per tal d'unir-les s'ha plantejat utilitzar cintes amb velcro que s'han de fixar a la part base de la fèrula, per poder utilitzar-les també per lligar només aquesta part a la pota del gat.

Prenent com a referència les sabates dels nens petits primer es va plantejar realitzar uns forats a la part de darrer de la fèrula per on fer passar el velcro per lligar la peça. Els forats es van fer mitjançant l'eina *Cut Extrude* orientant-los el més paral·lel possible al perfil de la pota del gat per tal que la unió es realitzés de la manera més còmoda per al gat i la força de les tires amb velcro s'apliqués a tota la superfície de contacte i no només en certs punts.

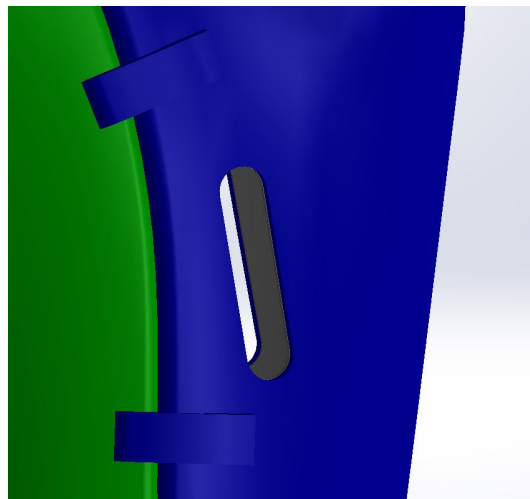


Figura 37: Forat per al velcro
Font: Elaboració pròpia

Un cop fets els forats es va arribar a la conclusió que aquest mètode d'unió no era el més adequat, ja que la tira amb velcro hauria de passar per la part interior de la fèrula, de forma que es trobaria a pressió contra la pota del gat i això provocaria un fregament de la tira amb la pota que podria provocar ferides en el gat. A més a més, també es va advertir que el disseny dels forats no permetia lligar les dues parts de la fèrula, ja que hi hauria part de la tira que es trobaria a l'interior de la part base i es necessitava tota la tira amb velcro a l'exterior de la part extraïble, i per tant també a l'exterior de la peça base, per tal de poder fixar-la.

Finalment s'han dissenyat unes petites nanses a la peça base de la fèrula a les que lligar les tires amb velcro sense que aquest hagi d'estar en contacte amb la pota del gat. Aquestes nanses s'han realitzat mitjançant l'eina *Sweep* mantenint l'orientació dels forats dissenyats anteriorment, és a dir, amb la superfície plana, on realitzarà la força la tira, paral·lela al perfil de la pota. Aquest nou disseny dona solució als dos problemes esmentats anteriorment, tira amb velcro ja no passa per l'interior de la fèrula i, per tant, no hi ha problemes de fregament amb la pota ni problemes en la localització d'aquest per a lligar les dues parts de la fèrula.

Les nanses s'han dissenyat tenint en compte que és necessari un cert gruix de les parets d'aquestes per a evitar trencaments a l'hora d'aplicar la força. L'alçada del forat de les nanses també ha

sigut un factor a tenir en compte. L'alçada ha de ser petita per tal d'evitar l'aparició de moments de gran magnitud i, en conseqüència, evitar trencaments i per evitar parts sortints de la fèrula que puguin ser colpejades a l'hora de fer-la servir. Tot això tenint en compte que l'alçada del forat ha de ser suficientment gran perquè la tira amb velcro pugui lliscar al seu interior.

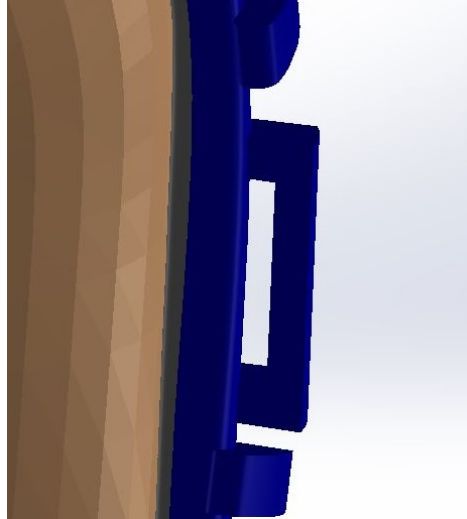


Figura 38: Nansa per al velcro
Font: Elaboració pròpia

Un altre problema que s'ha plantejat a l'hora de pensar en la unió de les parts de la fèrula mitjançant les tires de velcro és que les tires poden lliscar sobre la peça de davant, fet que podria provocar una distribució de forces no desitjada sobre la fèrula i sobre la pota del gat. Per tal d'evitar aquest lliscament s'han fet uns petits rebaixos sobre la part frontal de la peça extraïble seguint la direcció de les tires, com es pot observar a la Figura 39. Aquests rebaixos s'han dut a terme mitjançant l'eina *Cut Extrude* perquè la posició del velcro quedi fixada per les parets dels rebaixos i les tires no puguin lliscar per la peça de davant.

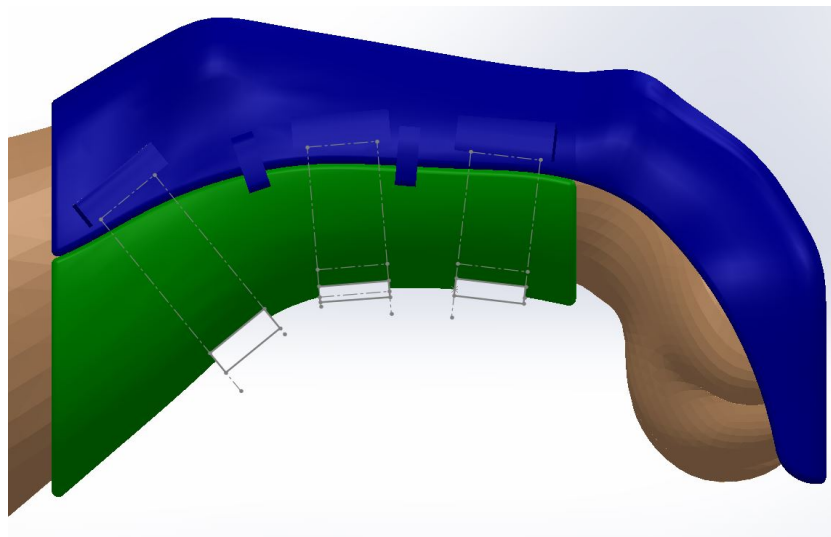


Figura 39: Rebaixos en la peça extraïble per al velcro
Font: Elaboració pròpia

Finalment, mitjançant l'eina *Fillet* s'han arrodonit tots els angles rectes generats a la fèrula per les noves operacions. En general aquest arrodoniment s'ha realitzat per evitar possibles molèsties al gat i per obtenir un millor acabat superficial a l'hora d'imprimir la peça en 3D. En el cas de les nanses, però, aquest arrodoniment també és un factor important per evitar la concentració de forces en els punts d'unió de les nanses amb la peça, que inicialment formaven un angle recte, i obtenir una millor distribució de les forces a les nanses i, en conseqüència, reduir el risc de trencament.

A la següent Figura es pot observar el resultat final del primer disseny 3D de les fèrules. S'ha de tenir en compte que tot i que les figures mostrades durant l'explicació de la realització disseny siguin només de la pota posterior, aquesta mateixa metodologia ha sigut la seguida a l'hora de realitzar el disseny 3D de la fèrula de la pota davantera, obtenint així dissenys molt similars per a les dues potes.

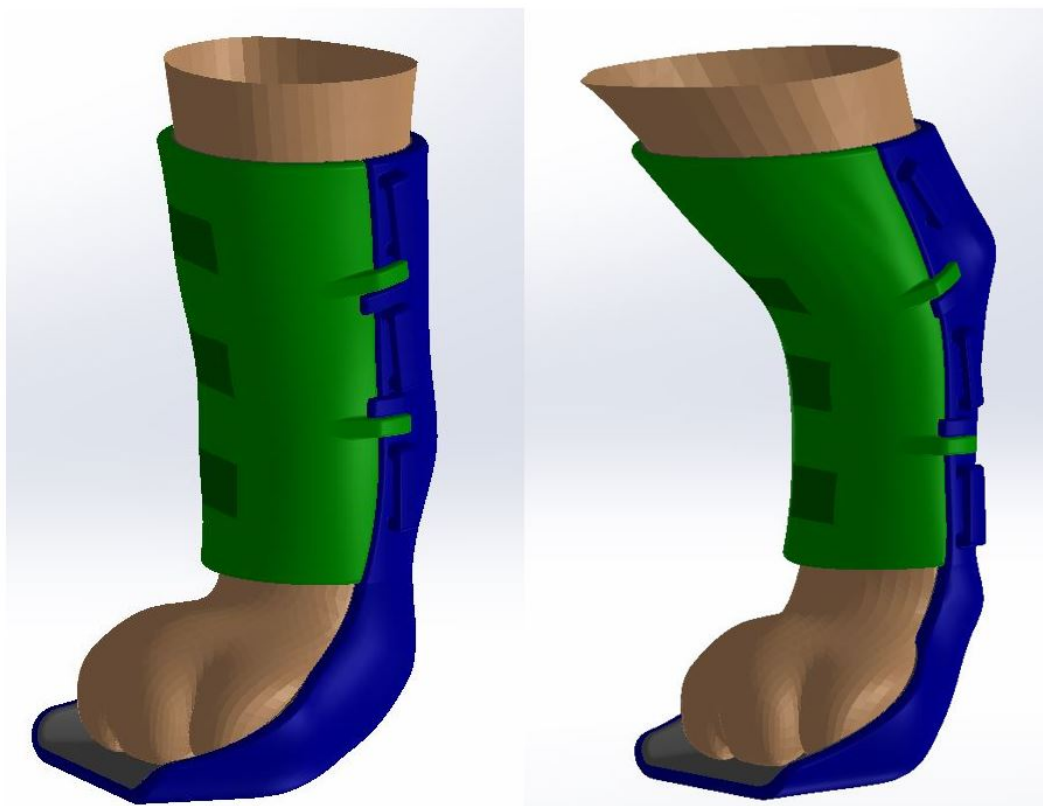


Figura 40: Primer disseny 3D de les fèrules de la pota davantera (dreta) i de la posterior (esquerra)

Font: Elaboració pròpia

Un cop acabat tot el procés del disseny 3D s'han guardat els diferents cossos de les fèrules en fitxers diferents mitjançant l'eina *Save Bodies* per tal de poder treballar amb ells en les simulacions amb mètodes numèrics i per simplificar la impressió. Tenir les parts guardades en diferents fitxers permet definir la impressió amb dos materials i permet imprimir la base i la part extraïble per separat.

8 Simulacions amb mètodes numèrics del primer disseny

Les simulacions amb mètodes numèrics de les fèrules s'han realitzat mitjançant l'estudi *Static Structural* del software ANSYS Workbench. Dins d'aquest estudi s'observen diferents apartats a emplenar abans de poder realitzar la simulació. Com en el cas del disseny 3D, la metodologia seguida a l'hora de realitzar la simulació és la mateixa en la fèrula de la pota davantera i en la de la pota posterior, de manera que només s'explicarà el procediment per a una de les fèrules. En aquest cas s'ha decidit explicar la metodologia seguida en la fèrula de la pota davantera, ja que és aquesta la que ha de suportar una força major durant el cicle de marxa del gat.

8.1 Engineering Data

A l'apartat *Engineering Data* s'indiquen en les característiques del material amb el qual es faran les peces d'estudi. En aquest treball s'ha decidit realitzar un estudi del comportament mecànic de les fèrules per tant s'hauran d'especificar les propietats mecàniques del material amb el qual s'imprimiran les fèrules. Com s'ha explicat a l'apartat 6.3 les fèrules seran impreses amb dos materials diferents, el TPU per la part interior i l'ABS per la part exterior. Per tal de simplificar l'estudi només es tindran en compte les parts impreses amb ABS, ja que és el material amb millors propietats mecàniques.

La base de dades de l'*Engineering Data* de l'ANSYS Workbench inclou el termoplàstic ABS amb les seves propietats mecàniques. Aquestes dades no serien les correctes per a aquest estudi, ja que en aplicar-les en la simulació s'estaria considerant que els sòlids són macisos. Aquesta consideració no seria correcta en el cas de la impressió 3D, ja que habitualment les impressions es realitzen amb una densitat interior dels sòlids inferior al 100%. Per aquesta raó s'han hagut de buscar les propietats mecàniques del material en funció de la densitat interior de la peça amb la qual es realitza la impressió.

Inicialment es volien determinar les propietats mecàniques del material experimentalment, és a dir, mitjançant provetes impreses amb les mateixes condicions d'impressió amb les que s'imprimarien les fèrules. Això no ha estat possible i s'ha decidit extreure les propietats mecàniques d'un estudi ja fet [16].

A l'estudi es van determinar les propietats mecàniques de provetes impreses en 3D amb ABS en relació amb tres variables: l'alçada de capa, l'angle de trama i la densitat de la trama. Les propietats mecàniques estudiades que s'han modificat a la simulació són la resistència a la tracció, el mòdul elàstic i la resistència a la fluència. A l'article s'arriba a la conclusió que el factor que més influeix en les propietats mecàniques de la peça és la densitat de la trama (*Infill*), excepte en el cas de la resistència a la fluència, ja que s'arriba a la conclusió que cap variable influeix en aquesta propietat. Com que l'angle de la trama i l'alçada de la capa no són variables que siguin determinants per les propietats mecàniques es trien les condicions més properes a les condicions d'impressió, és a dir, l'alçada de capa de valor més petit (0,35 mm), ja que habitualment s'utilitza una alçada de capa de 0,15 mm, i l'angle de trama de 45°. Per tal d'estalviar material i reduir el temps d'impressió s'ha decidit establir la densitat de la trama en el valor més petit dels tres estudiats, és a dir en un 40%. Aquestes variables corresponen a la proveta número 3. D'aquesta proveta es poden observar les dades experimentals i les prediccions realitzades un cop obtingudes totes les dades. S'ha decidit realitzar la simulació amb les dades extreures de les prediccions per tal de no utilitzar les dades obtingudes de l'experimentació d'una sola proveta.

Per tant, s'ha realitzat l'estudi amb les següents propietats mecàniques:

- Resistència a tracció: 27,29 MPa
- Mòdul elàstic: 629,11 MPa
- Resistència a la fluència: 14,10 MPa

El valor de la resta de propietats ha sigut l'establert per la base de dades de l'ANSYS. A la Figura 41 s'observen les propietats del material establertes durant la simulació.

Properties of Outline Row 3: ABS plastic				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	1040	kg m ⁻³	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
4	Coefficient of Thermal Expansion	9,54E-05	C ⁻¹	
5	Isotropic Elasticity			
6	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
7	Young's Modulus	6,2911E+08	Pa	
8	Poisson's Ratio	0,399		
9	Bulk Modulus	1,0381E+09	Pa	
10	Shear Modulus	2,2484E+08	Pa	
11	Tensile Yield Strength	1,4099E+07	Pa	
12	Tensile Ultimate Strength	2,7285E+07	Pa	
13	Isotropic Thermal Conductivity	0,258	J m ⁻¹ s ⁻¹ C ⁻¹	
14	Specific Heat, C _p	1720	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
15	Isotropic Resistivity	9,95E+13	ohm m	

Figura 41: Propietats del material establertes a la simulació
Font: Elaboració pròpia

8.2 Geometria i contactes

Per tal de definir la geometria d'estudi a la simulació s'ha utilitzat l'eina *SpaceClaim* de l'ANSYS Workbench, on s'han importat els fitxers de les dues peces impreses amb ABS per tal de crear un assemblatge. Aquest assemblatge està format per la part extraïble impresa en ABS i la part base impresa en ABS en la seva posició de funcionament, és a dir unides.

Per tal de mantenir aquesta unió de les parts durant la simulació és necessari definir un contacte entre les parts. Aquest contacte està definit a les superfícies indicades a la Figura 42, és a dir tant a les superfícies d'unió 'vertical' com a les superfícies dels ganxos que es troben en contacte. L'ANSYS Workbench consta de diferents opcions de contactes: *BondedBonded*, *No separation*, *Frictionless*, *Rough* i *Frictional*. En aquest cas s'ha definit el contacte com a *Frictional*, ja que aquest permet que les dues superfícies que es troben en contacte es separin i permet un lliscament entre elles amb una resistència definida pel coeficient de fricció. El coeficient de fricció entre les dues peces impreses depèn del seu acabat superficial i de la bobina de material que s'utilitzi, ja que, tot i ser el mateix material, no totes les bobines tenen exactament la mateixa composició. Degut a la complexitat a l'hora de definir el coeficient de fricció s'ha realitzat una estimació extreta d'un estudi realitzat l'any 2014 [17]. Per tal de simplificar la definició del coeficient s'ha realitzat la mitjana de les dades extretes dels experiments on s'aplicava més força. D'aquesta manera, el coeficient de fricció establert a la simulació ha sigut $\mu = 0,389$.

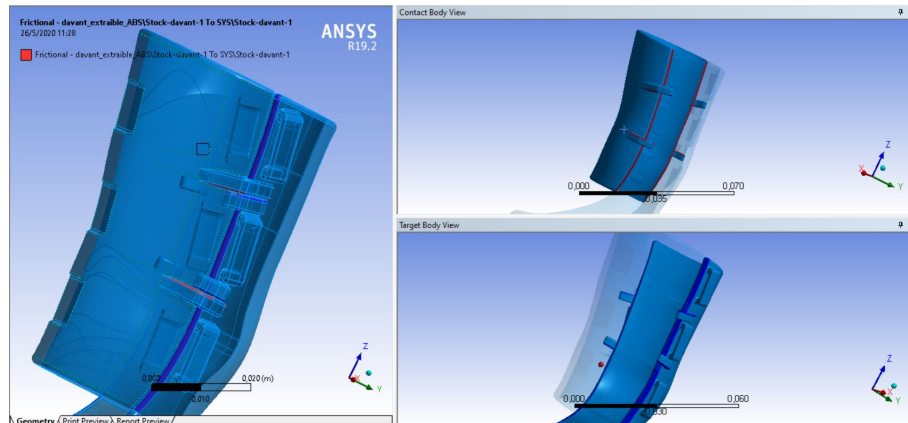


Figura 42: Superfícies de contacte de la part extraïble (vermell) i la part base (blau)
Font: Elaboració pròpia

8.3 Mallat

A causa de la complexitat de la geometria de les fèrules s'ha decidit utilitzar l'opció del mallat automàtic de l'ANSYS Workbench. Aquesta opció realitza el refinament de la malla en les zones on es presenta una geometria més complexa, és a dir, on hi ha més curvatures i més detalls. Si s'hagués realitzat el mallat de manera manual, primer s'hauria d'haver definit una mida dels elements per a tota la fèrula i després s'haurien d'haver refinat una a una totes les zones amb una geometria crítica. Mitjançant el mallat automàtic s'estalvia molt de temps en tot el procés del refinament i també s'assegura que totes les zones conflictives han estat refinades. Aquest mallat automàtic genera elements tetraèdrics.

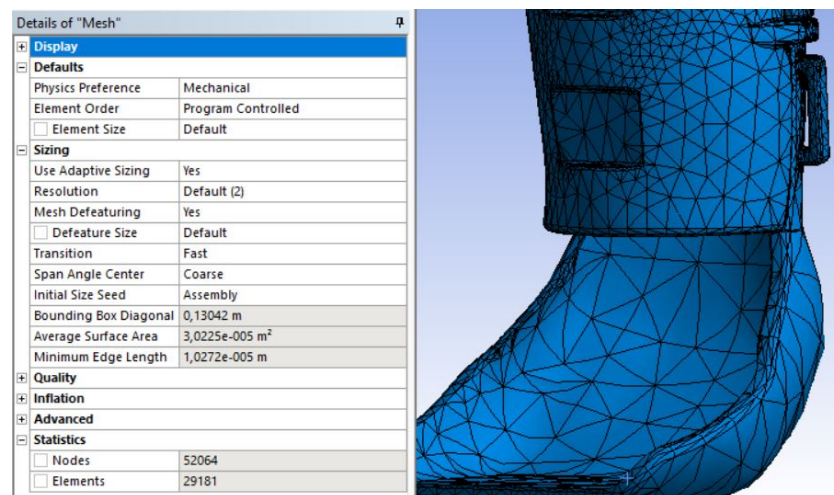


Figura 43: Mallat de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

Per tal d'assegurar que els resultats obtinguts són correctes s'ha decidit realitzar un estudi de convergència del mallat. Aquest estudi permet establir a partir de quina mida dels elements els resultats estudiats no varien, de manera que s'aconsegueix determinar la mida necessària dels elements per obtenir uns resultats fiables amb el mínim nombre d'elements. En aquest cas,

en comptes de definir diferents mides dels elements per comparar els mallats, es realitzaran mallats amb diferents resolucions. A la Figura 43 es pot observar que el mallat que realitza l'ANSYS per defecte té una resolució igual a 2. Com més s'augmenta aquest nombre més petits es fan els elements del mallat i, per tant, més augmenta el nombre d'elements en aquest mallat. Per poder realitzar l'estudi de convergència s'ha decidit comparar els resultats obtinguts de les tensions equivalents en un punt concret de la fèrula, ja que el punt de tensions màximes pot no ser el mateix en tots els mallats. A la Figura 44 s'observa valor de les tensions equivalents en el punt d'estudi en el mallat de resolució 2. A l'Apartat 8.5 s'exposa, entre altres, el resultat de l'estudi de convergència del mallat.

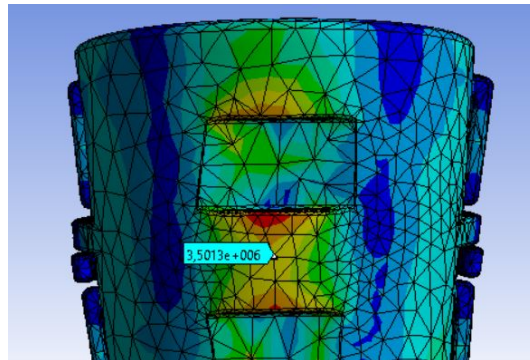


Figura 44: Tensions equivalents en el punt d'estudi en el mallat de resolució 2
Font: Elaboració pròpia

8.4 Condicions de contorn

8.4.1 Suports

Per tal de simular el funcionament de la fèrula s'ha de tenir en compte el contacte d'aquesta amb el terra. Aquest contacte es defineix mitjançant dos suports:

- *Displacement*

Mitjançant aquest suport es fixa el moviment en l'eix Z de la part de la fèrula que es troba en contacte amb el terra quan el gat està utilitzant-la. És a dir, es fixa la part plana del peu de la fèrula en Z però es permeten els moviments en el pla XY.

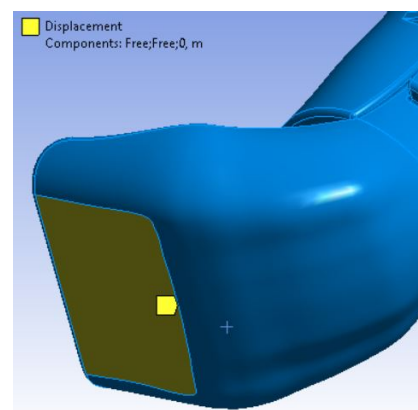


Figura 45: Fixació en l'eix Z de la superfície en contacte amb el terra

Font: Elaboració pròpia

- *Fixed Support*

Aquest suport fixa totalment la superfície en contacte amb el terra de l'element seleccionat, és a dir, no permet el moviment de la superfície en cap dels tres eixos. Aquesta fixació és necessària a l'hora de realitzar la simulació, ja que en cas contrari l'entorn no estaria suficientment definit i apareixeria un error en la simulació. S'ha de tenir en compte que s'ha fixat una sola superfície per tal d'evitar el falsejament de les condicions de contorn. D'aquesta manera es té en compte que és possible el moviment en el pla de la resta d'elements en contacte amb el terra degut, per exemple, a les forces de fricció.

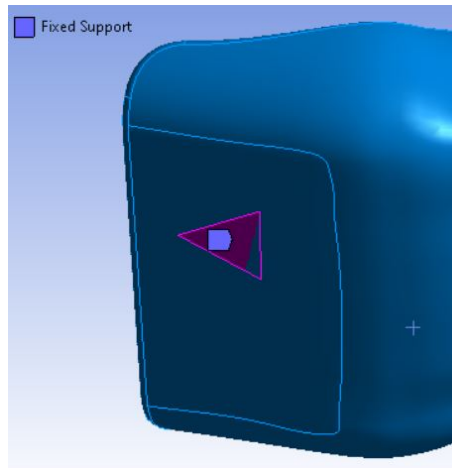


Figura 46: Fixació total d'un de la superfície en contacte amb el terra
Font: Elaboració pròpia

8.4.2 Càrregues

Un cop definits els suports s'han definit les càrregues que s'apliquen a la fèrula, tant la força que fa la pota del gat sobre la base com les forces que apliquen les tires amb velcro quan es lliga la fèrula. En aquest apartat s'han dut a terme algunes simplificacions per tal de facilitar l'estudi.

Com s'ha explicat anteriorment, la simulació s'ha dut a terme només de les parts de la fèrula impreses amb ABS. Per tal de simplificar l'estudi s'ha considerat que les forces determinades a l'Apartat 6.2 s'apliquen directament sobre la peça d'ABS. En la vida real la part de la fèrula impresa amb TPU absorbiria part d'aquestes forces de manera que les forces que s'apliquen sobre la part d'ABS serien lleugerament inferiors.

També s'ha de tenir en compte que en aquest estudi s'han aplicat la força vertical màxima i la força horitzontal màxima a la vegada. Aquesta situació extrema no s'observa a l'estudi de la marxa, d'aquesta manera s'assegura la resistència de la fèrula en situacions límit i es simplifica l'aplicació de les forces.

Finalment, s'ha considerat que la força aplicada per una tira amb velcro en el pla del rebaix en el qual s'encaixa és igual a la suma de les forces aplicades a les nanses on es lliga aquesta tira. Les forces aplicades a les nanses s'han considerat totes iguals, per tant la força aplicada en el pla del rebaix s'ha definit igual al doble de la força aplicada en una nansa.

Per tal d'assegurar una bona distribució de les forces en les diferents superfícies en les quals

s'apliquen s'ha decidit definir totes les càrregues com a pressions, és a dir dividint la força aplicada en cada cas entre l'àrea de la superfície en la qual s'aplica la força. A continuació s'explica cada una de les càrregues que s'han aplicat a la fèrula per tal de simular la seva resistència:

- Càrrega vertical

La força vertical aplicada pel gat durant la marxa en la pota davantera és de 105,95 N. Aquesta força s'ha aplicat mitjançant una pressió a les superfícies que s'observen a la Figura 47. S'han definit aquestes superfícies d'aplicació, ja que es tracta de les superfícies més perpendiculars a la força, és a dir on aquesta té més influència. En el cas de la fèrula de la pota posterior s'ha aplicat una força vertical de 70,63 N en unes superfícies definides de la mateixa manera que a la de la pota davantera.

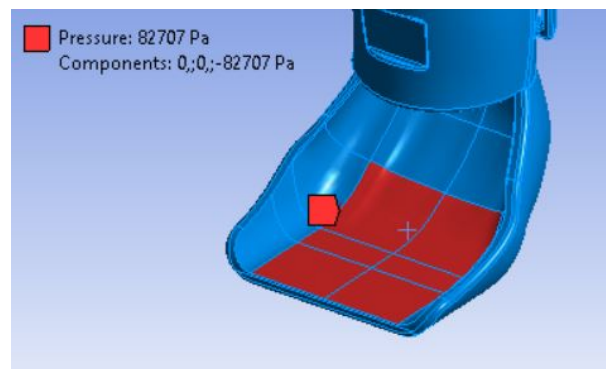


Figura 47: Càrrega vertical aplicada pel gat durant la marxa
Font: Elaboració pròpia

- Càrrega horitzontal

La força horitzontal aplicada pel gat durant la marxa és la mateixa en totes dues potes 35,12 N. Aquesta força s'ha aplicat mitjançant una pressió a les superfícies que s'observen a la Figura 48, és a dir a les mateixes superfícies en les quals s'havia aplicat la força vertical i a les superfícies més o menys verticals de la part del peu de la fèrula. En aquest cas la força no s'ha aplicat només a les superfícies perpendiculars a aquesta, ja que s'ha de tenir en compte aquesta força és la trobada en l'estudi de la força que aplica la pota contra el terra, és a dir a les superfícies horitzontals.

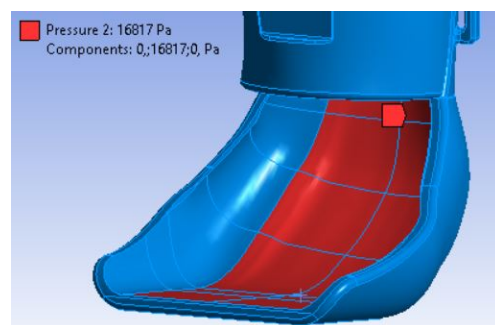


Figura 48: Càrrega horitzontal aplicada pel gat durant la marxa

Font: Elaboració pròpia

A l'Apartat 6.2 s'havia determinat que la força horitzontal és aplicada tant cap endavant com cap enredera. A la simulació només s'ha tingut en compte la força aplicada contra l'estructura de la fèrula, com es pot observar a la Figura 48.

- Càrrega a les nanses

Inicialment es volia determinar la força aplicada per les tires de velcro sobre les nanses de la fèrula de forma experimental. Aquest experiment no es va poder dur a terme i, per tant, el valor d'aquesta força ha passat a ser una incògnita. Per tal de poder realitzar la simulació s'ha establert de forma aleatòria que la força aplicada a cada una de les nanses és igual a 10 N. Com aquesta primera simulació és orientativa per tal de veure com és la distribució de les forces a la fèrula un cop aplicades les condicions de contorn, s'ha considerat adient definir un valor aleatori de la força. Posteriorment, a la simulació del disseny final, s'aplicaran diferents forces a les nanses fins a obtenir la força màxima que pot aplicar la tira amb velcro sobre la fèrula sense que aquesta es trenqui.

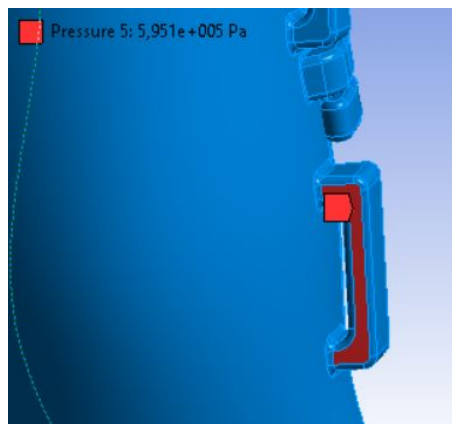


Figura 49: Càrrega aplicada a una nansa per la tira amb velcro
Font: Elaboració pròpia

- Càrrega als rebaixos

Com s'ha comentat anteriorment, s'ha decidit aplicar una força sobre els rebaixos de valor el doble que l'aplicada a una nansa. És a dir, s'ha aplicat una força de 20 N a cada rebaix. Igual que en el cas de les nanses a la simulació del disseny final aquesta força s'anirà augmentant linealment amb l'augment de la força aplicada sobre les nanses fins a obtenir la força màxima que pot suportar la fèrula.

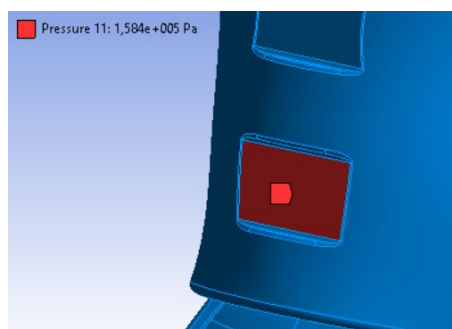


Figura 50: Càrrega aplicada a un rebaix per la tira amb velcro
Font: Elaboració pròpia

8.5 Resultats

Com s'ha explicat anteriorment, el procediment seguit per realitzar la simulació ha sigut el mateix en l'estudi de la fèrula de la pota davantera i en el de la fèrula de la pota posterior. A continuació s'exposen els resultats obtinguts de totes dues simulacions.

Primer de tot és necessari indicar el resultat de l'estudi de convergència del mallat, ja que els resultats de la simulació de cada fèrula que es comentaran després són els obtinguts amb el mallat òptim. Els resultats de les simulacions en els quals s'ha centrat aquest estudi són les tensions equivalents de Von-Mises a les quals estan sotmeses les fèrules un cop aplicades les càrregues i la deformació que pateixen aquestes. L'estudi de les tensions equivalents de Von-Mises és necessari per poder determinar quines zones de les fèrules pateixen més durant el seu funcionament i per determinar si aquestes poden suportar els esforços sense arribar a trencar-se. S'ha considerat adient realitzar també un estudi de la deformació de la fèrula per observar el seu comportament un cop aplicades les càrregues, ja que si la deformació fos molt gran, la fèrula no compliria la seva utilitat.

8.5.1 Fèrula de la pota davantera

- Estudi de convergència del mallat

S'ha realitzat l'estudi de convergència amb mallats des de resolució 2 fins a resolució 7 i a totes aquestes simulacions s'ha determinat la tensió equivalent en el mateix punt. Per tal de poder comparar els resultats s'ha realitzat la següent gràfica:

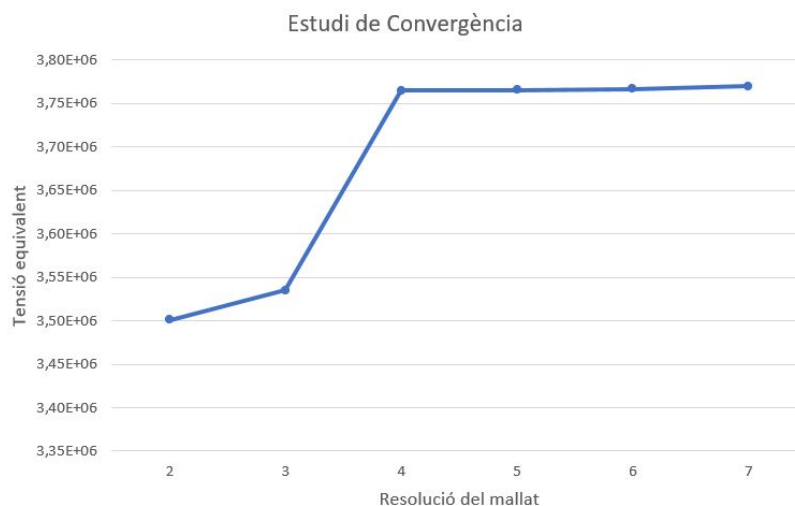


Figura 51: *Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota davantera*

Font: *Elaboració pròpia*

A la gràfica s'observa que la tensió equivalent s'estabilitza a partir del mallat amb resolució 4, amb una àrea mitjana de les superfícies exteriors dels elements de $0,30 \text{ cm}^2$. Per tant, aquest és el mallat amb el qual s'han realitzat les simulacions de les quals s'obtenen els resultats desitjats.

- Tensió equivalent

La tensió màxima que ha de suportar la fèrula en aquest cas és de 5,21 MPa, un valor considerablement més petit que la resistència a tracció de la peça. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades es troben multiplicades per quatre, és de 20,96. Això indica que la fèrula pot suportar sense dificultat les càrregues que se li apliquen durant el seu funcionament.

Pel que fa al disseny final de la fèrula, el valor de la tensió màxima permet realitzar forats a la fèrula per tal de reduir el seu pes, ja que dista considerablement de trencar-se. Tot i que la tensió màxima té un valor relativament petit s'ha decidit no realitzar forats en les zones on les tensions són més altes. A la Figura 52 es poden observar quines són aquestes zones crítiques, aquelles que estan marcades amb color groc, taronja o vermell.

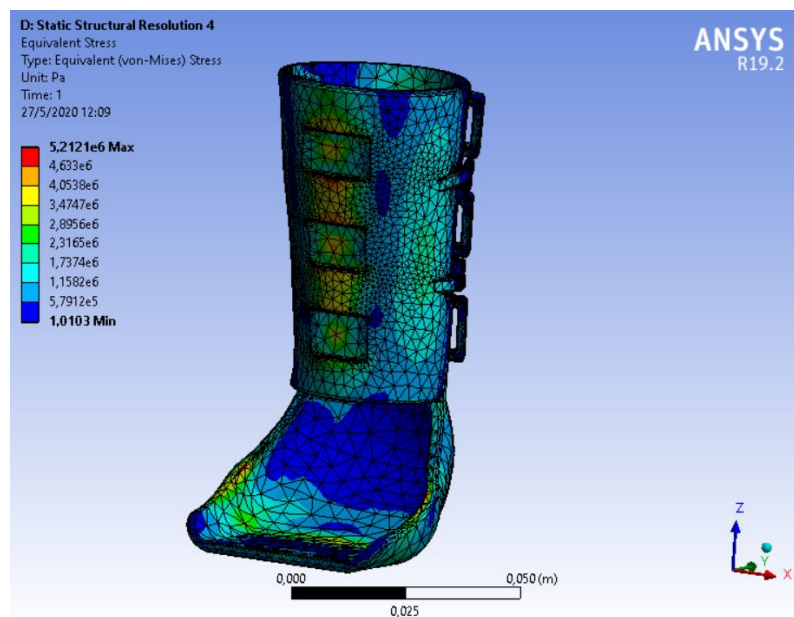


Figura 52: Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera

Font: Elaboració pròpia

En resum, la fèrula de la pota davantera suporta correctament les càrregues aplicades, ja que la tensió màxima que s'observa a la simulació és relativament petita, i permet modificacions en el disseny com forats en els laterals de la peça extraïble i a la part superior de la peça base, tota aquella que no envolta el peu.

- Deformació

A la Figura 53 es pot observar que la deformació màxima de la fèrula es produeix a la seva part superior, en especial a la de la peça extraïble. El valor de la deformació màxima de la fèrula de la pota davantera és de 3,55 mm. S'ha de tenir en compte que aquest desplaçament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. Aquest valor s'ha considerat prou petit per a garantir el bon funcionament de la fèrula.

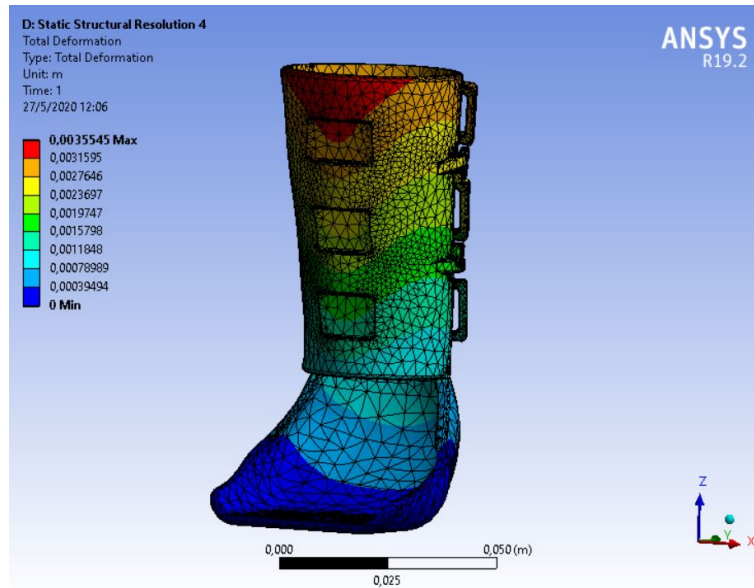


Figura 53: Deformació total de la fèrula de la pota davantera
 Font: Elaboració pròpia

8.5.2 Fèrula de la pota posterior

- Estudi de convergència del mallat

En aquest cas, s’ha realitzat l’estudi de convergència amb mallats des de resolució 2 fins a resolució 6. Igual que a l’estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota davantera, a totes aquestes simulacions s’ha determinat la tensió equivalent en el mateix punt. Per tal de poder comparar els resultats s’ha realitzat la següent gràfica:

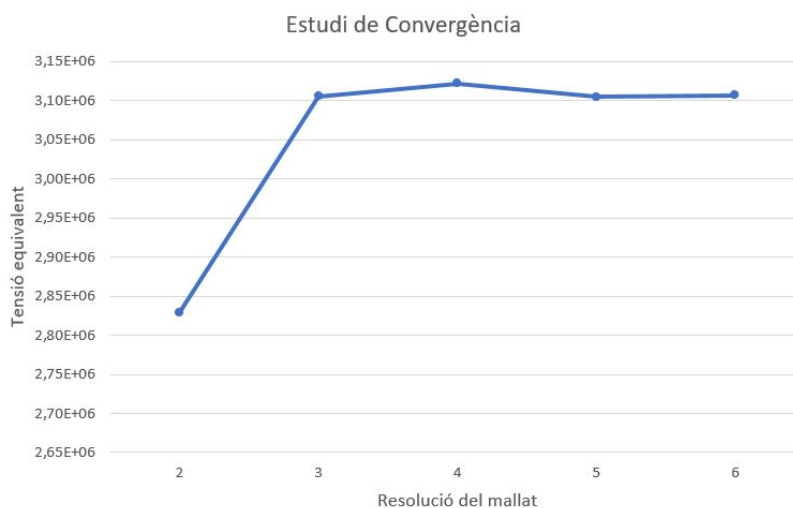


Figura 54: Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota posterior
 Font: Elaboració pròpia

A la gràfica s'observa que la tensió equivalent s'estabilitza a partir del mallat amb resolució 3, amb una àrea mitjana de les superfícies exteriors dels elements de $0,38 \text{ cm}^2$. Per tant, aquest és el mallat amb el qual s'han realitzat les simulacions de les quals s'obtenen els resultats desitjats.

- Tensió equivalent

La tensió màxima que ha de suportar la fèrula en aquest cas és de $6,77 \text{ MPa}$. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades es troben multiplicades per quatre, és de $16,12$. Tot i ser més gran que la tensió màxima de la fèrula de la pota davantera segueix sent un valor considerablement més petit que la resistència a tracció de la peça. Això indica que la fèrula pot suportar sense dificultat les càrregues que se li apliquen durant el seu funcionament. Anteriorment s'havia comentat que la fèrula que més tensions patiria seria la de la pota davantera, ja que la càrrega que hi aplica el gat durant la marxa és superior. Aquesta conclusió sembla incongruent amb els resultats, ja que la tensió màxima és superior en la fèrula de la pota posterior, però s'ha de tenir en compte que la tensió màxima és aplicada en un sol punt de la fèrula i que la mitjana de les tensions és inferior a la de les tensions en la fèrula de la pota davantera: $0,702 \text{ MPa}$ de mitjana a la davantera i $0,678 \text{ MPa}$ a la posterior. A la Figura 55 s'observa la zona en el que la tensió és màxima a la fèrula de la pota posterior. Aquesta zona és un dels punts d'unió d'una de les nanses amb la peça base, això s'haurà de tenir en compte a l'hora de definir la càrrega màxima que es pot aplicar a les nanses. A la Figura també s'observa que els punts del voltant d'aquesta zona tenen una tensió considerablement inferior.

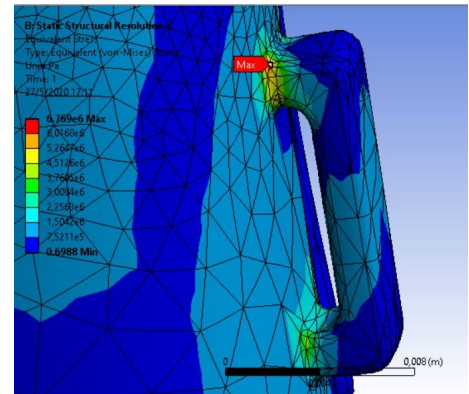


Figura 55: Zona de tensió màxima a la fèrula de la pota posterior

Font: Elaboració pròpia

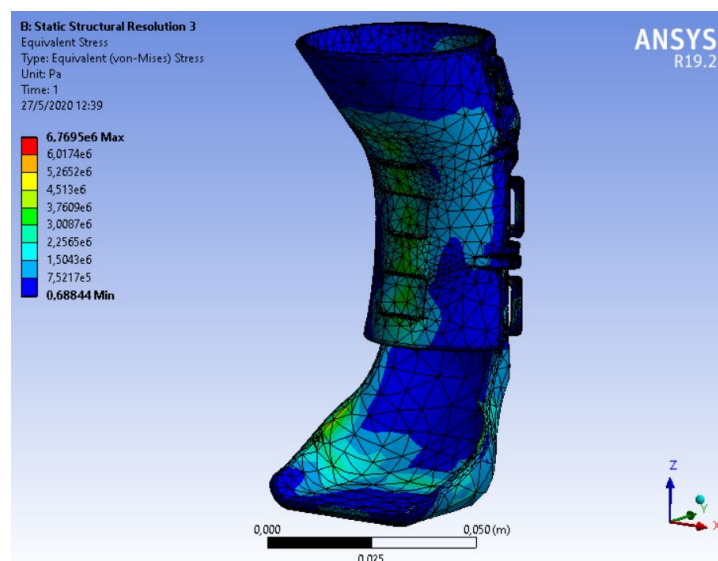


Figura 56: Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota posterior

Font: Elaboració pròpia

Pel que fa al disseny final de la fèrula, es poden arribar a les mateixes conclusions que a la simulació de la fèrula de la pota davantera. El valor de la tensió màxima permet realitzar forats a la fèrula per tal de reduir el seu pes, ja que dista considerablement de trencar-se. Tot i que la tensió màxima té un valor relativament petit s'ha decidit no realitzar forats en les zones on les tensions són més altes. A la Figura 56 es poden observar quines són aquestes zones crítiques, aquelles que estan marcades amb color verd.

En resum, la fèrula de la pota posterior suporta correctament les càrregues aplicades, ja que la tensió màxima que s'observa a la simulació és relativament petita, i permet modificacions en el disseny com forats en els laterals de la peça extraïble i a la seva part superior, i a la part superior de la peça base, tota aquella que no envolta el peu.

- Deformació

A la Figura 57 es pot observar que la deformació màxima de la fèrula es produeix a la seva part superior, en especial a la de la peça extraïble. El valor de la deformació màxima de la fèrula de la pota posterior és de 2,89 mm. Com en el cas anterior, s'ha de tenir en compte que aquest desplaçament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. Aquest valor s'ha considerat prou petit per a garantir el bon funcionament de la fèrula.

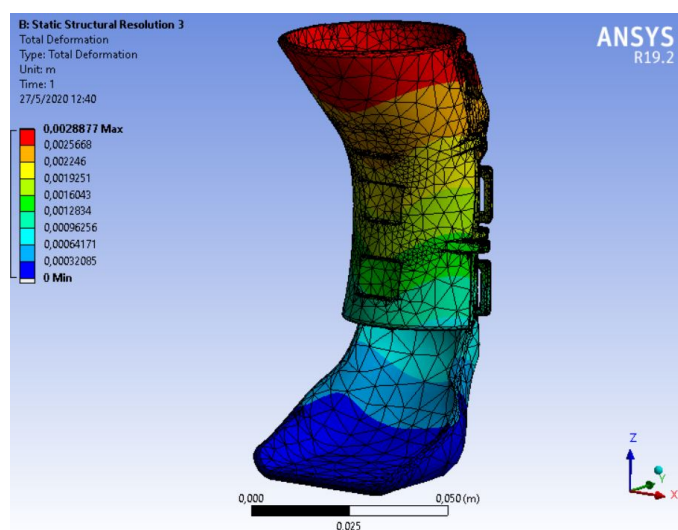


Figura 57: Deformació total de la fèrula de la pota posterior
Font: Elaboració pròpia

9 Disseny final de les fèrules

Un cop obtinguts els resultats de les simulacions dels primers dissenys de les fèrules s'han realitzat alguns canvis en els dissenys per tal de millorar-los.

El primer canvi no ve derivat de les simulacions sinó d'un error observat en el primer disseny. En aquest primer disseny no s'havia contemplat el fet que l'ABS que està en contacte amb el terra pot lliscar en funció del material d'aquest. Per tal d'evitar aquest lliscament s'ha decidit afegir algunes superfícies de TPU a la base de la peça. Com el TPU és un tipus de goma s'ha considerat que complirà l'efecte antilliscant desitjat, d'aquesta manera es pot seguir imprimint la peça base de la fèrula en una sola impressora FDM utilitzant els dos extrusors, cada extrusor per un material.

S'ha decidit introduir el TPU no només com a element d'utilitat sinó també com a element estètic. És per això que s'ha realitzat un *Sketch* amb la forma de la petjada d'un gat. Per tal d'evitar el despenjament del TPU de la base de la peça d'ABS s'ha realitzat un petit retall a la peça base amb la forma de la petjada mitjançant l'eina *Boss Extrude* de manera que les superfícies de TPU sobresurten una mica de la base de la fèrula, d'aquesta manera es preveu el possible desgast en el TPU a causa de la fricció amb el terra.

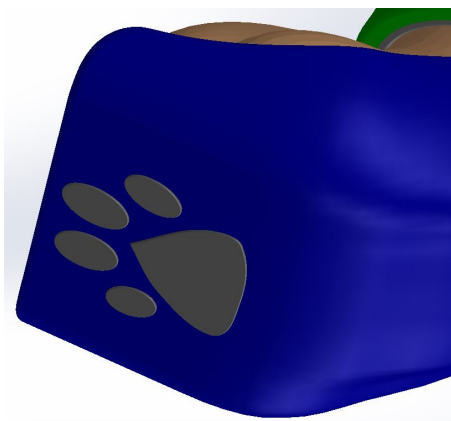


Figura 58: TPU antilliscant a la base de la fèrula
Font: Elaboració pròpia

L'altre canvi dut a terme al disseny de les fèrules ha sigut la realització de diferents forats a les peces de les fèrules per tal de reduir el pes d'aquestes. Aquests forats també poden ser útils per a poder realitzar teràpia amb electroestimulació sense haver de retirar les fèrules. A causa de la complexitat de la geometria de les fèrules i a la seva mida reduïda s'ha decidit realitzar uns quants petits forats en comptes de realitzar menys forats però més grans. D'aquesta manera l'estructura i la funció de la fèrula es segueixen mantenint tot i els forats. Pel que fa a la teràpia amb electroestimulació no hi ha cap problema en la mida dels forats, ja que els elèctrodes amb els que es realitza la teràpia es poden retallar, de manera que s'adapten a la mida de cada forat. També s'ha decidit no realitzar forats a la part inferior de la peça base, ja que és en aquesta part en la qual el gat aplica la força durant la marxa i l'aplicació de la dita força sobre una superfície amb forats podria resultar incòmoda per a l'animal.

Un cop realitzats tots els forats s'han arrodonit tots els angles rectes, provocats per l'aparició dels forats, tant a l'interior com a l'exterior de la fèrula.

A les Figures 59 i 60 es pot observar el disseny final de les fèrules, tenint en compte que totes dues fèrules tenen també la part de TPU antilliscant mostrada a la Figura 58.

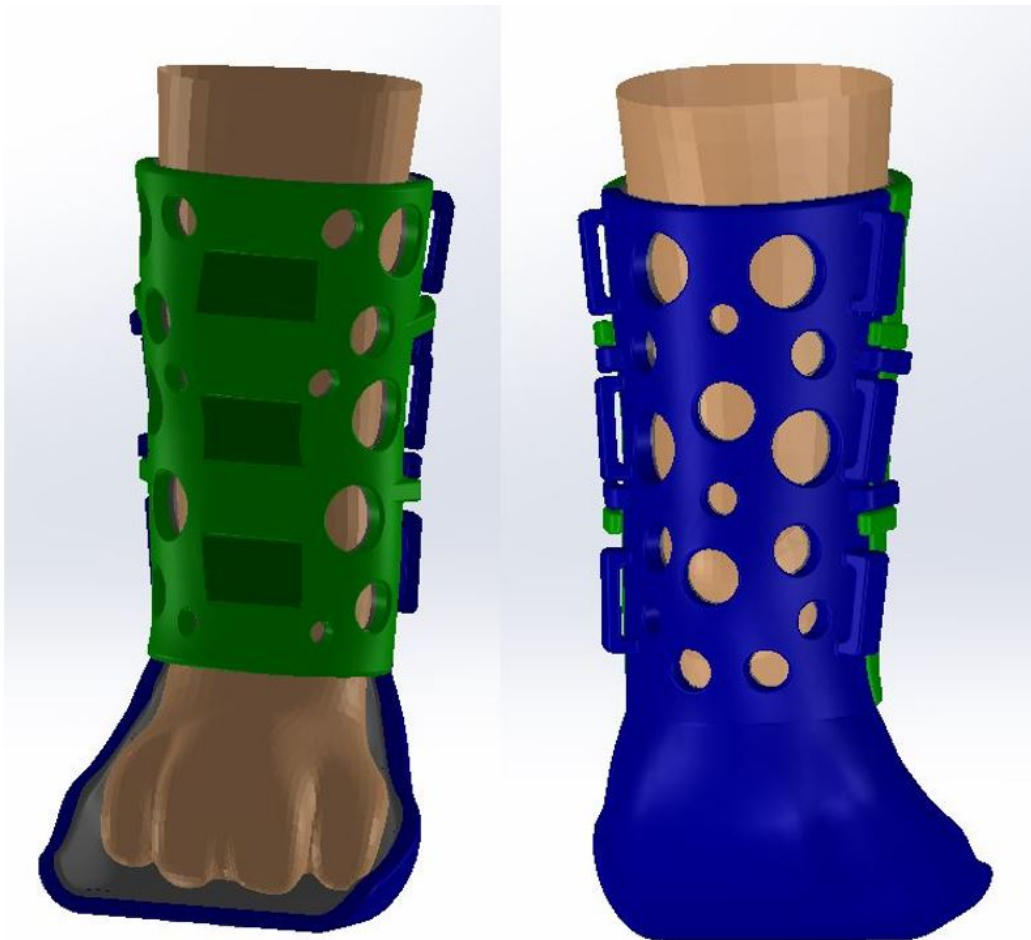


Figura 59: Disseny final de la fèrula de la pota davantera
Font: Elaboració pròpia

S'ha de tenir en compte que en aquests dissenys els forats s'han realitzat amb forma circular i sense seguir cap patró concret. Aquests forats circulars afegixen un factor estètic a la fèrula, però es podrien haver realitzat seguint altres dissenys com per exemple un patró lineal amb els forats triangulars. Per tal de decidir el patró i la forma dels forats adequada, seria necessari imprimir diferents prototips de cada disseny i determinar quin d'aquests és més còmode per al gat i quin permet reduir més el pes de la fèrula mantenint la seva funcionalitat. Aquest últim pas no s'ha pogut dur a terme i, per tant, s'ha determinat com a disseny final el dels forats circulars.

Per tal de definir l'estalvi de material un cop realitzats els forats s'ha indicat la densitat del TPU i de l'ABS al *SolidWorks* i s'ha definit el material de cada peça. D'aquesta manera el programa realitza automàticament el càlcul de la massa de les peces i es poden comparar els dos dissenys. S'ha de tenir en compte que aquest càlcul es realitza tenint en compte que les peces són massisses. Aquesta consideració pot donar lloc a certs errors però aquests s'han considerat negligibles per tal de simplificar el càlcul.

Com a densitat de l'ABS s'ha utilitzat la definida automàticament per la base de dades de

l'ANSYS, és a dir 1040 kg/m^3 . En canvi, la densitat el TPU s'ha extret de la base de dades del propi SolidWorks, on s'indica una densitat de $1225,2 \text{ kg/m}^3$.

Mitjançant el mètode explicat s'ha determinat que la massa del primer disseny de la fèrula de la pota davantera era de 44,46 g i la massa del disseny final és de 39,98 g, per tant s'han estalviat 4,48 g, és a dir un 11,21% de la massa. Pel que fa a la fèrula de la pota posterior aquest estalvi ha estat de 7,18 g, un 18,01% de la massa, ja que la fèrula del primer disseny tenia una massa de 47,04 g i la massa del disseny final és de 39,86 g.

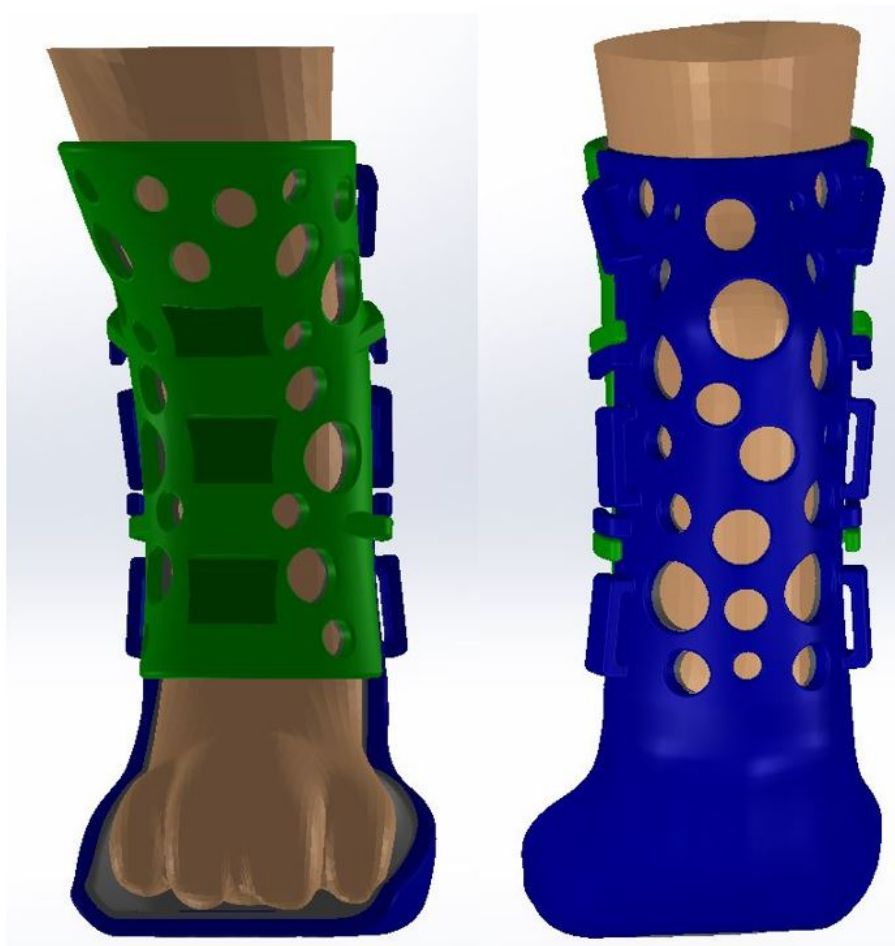


Figura 60: Disseny final de la fèrula de la pota posterior

Font: Elaboració pròpia

10 Simulacions amb mètodes numèrics del disseny final

El procediment seguit per realitzar les simulacions del disseny final de les fèrules ha sigut el mateix que s'ha explicat a l'Apartat 8, per tant no es tornarà a explicar el procediment sencer en aquest apartat sinó que s'explicaran aquells passos que hagin estat diferents i els resultats obtinguts.

En aquestes noves simulacions, en les que la superfície de contacte té els forats pel TPU antilliscant, s'ha observat que si es fixava només un dels elements de la base, apareixien punts singulars que complicaven la interpretació dels resultats. És per això que en aquest cas s'ha fixat tota la superfície de contacte amb el terra en els tres eixos, en comptes de fixar-la en l'eix Z i fixar completament un sol element.

Tot i haver-hi canvis en el disseny, les superfícies en les quals s'apliquen les càrregues no han variat la seva àrea, per tant l'aplicació de les càrregues no ha canviat ni de localització ni de valor.

En aquest apartat es durà a terme, a part dels estudis realitzats a les simulacions del primer disseny, l'estudi de la càrrega màxima que es pot aplicar a les càrregues. És a dir, un cop obtinguts els resultats amb els 10 N de càrrega a cada nansa per a poder-los comparar amb els resultats del primer disseny, s'anirà augmentant de manera lineal la càrrega aplicada a les nanses i als rebaixos fins que la tensió màxima a la fèrula sigui similar a resistència a tracció de l'ABS.

10.1 Resultats

10.1.1 Fèrula de la pota davantera

- Estudi de convergència

S'ha realitzat l'estudi de convergència amb mallats des de resolució 2 fins a resolució 7 i a totes aquestes simulacions s'ha determinat la tensió equivalent en el mateix punt.

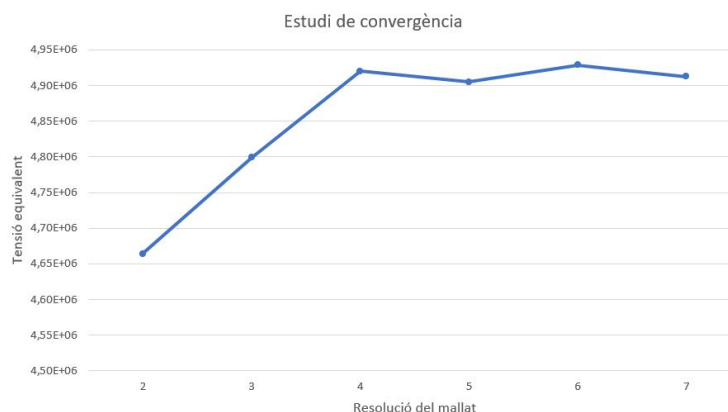


Figura 61: *Estudi de convergència del mallat de la fèrula de la pota davantera*

Font: *Elaboració pròpia*

A la gràfica s'observa que la tensió equivalent s'estabilitza a partir del mallat amb resolució 4, amb una àrea mitjana de les superfícies exteriors dels elements de $0,26 \text{ cm}^2$. Per tant, aquest és el mallat amb el qual s'han realitzat les simulacions de les quals s'obtenen els resultats desitjats.

- Tensió equivalent

La tensió màxima que ha de suportar la fèrula en aquest cas és de 6,6 MPa, un valor considerablement més petit que la resistència a tracció de la peça. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades es troben multiplicades per quatre, és de 16,54. Això indica que la fèrula pot suportar sense dificultat les càrregues que se li apliquen durant el seu funcionament.

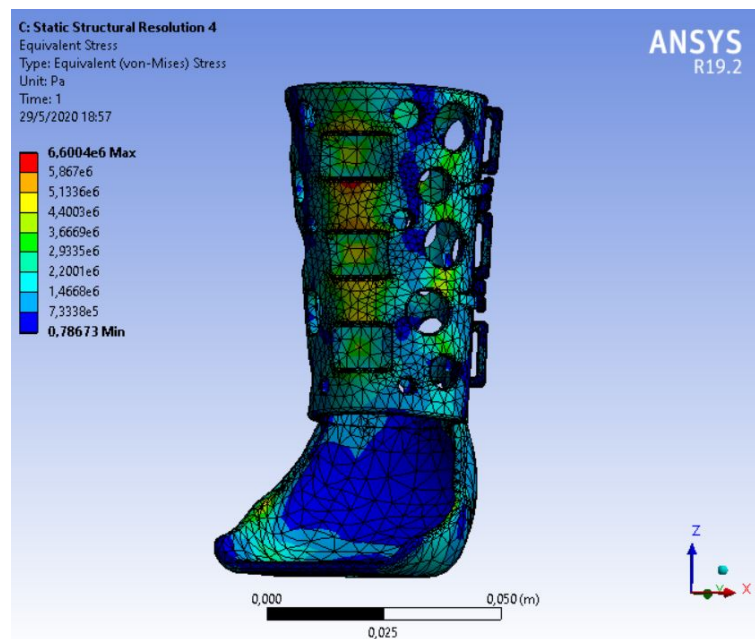


Figura 62: Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera
Font: Elaboració pròpia

- Deformació

A la Figura 63 es pot observar que la deformació màxima de la fèrula es produeix a la seva part superior, en especial a la de la peça extraïble. El valor de la deformació màxima de la fèrula de la pota davantera és de 3,54 mm. S'ha de tenir en compte que aquest desplaçament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. Aquest valor s'ha considerat prou petit per a garantir el bon funcionament de la fèrula.

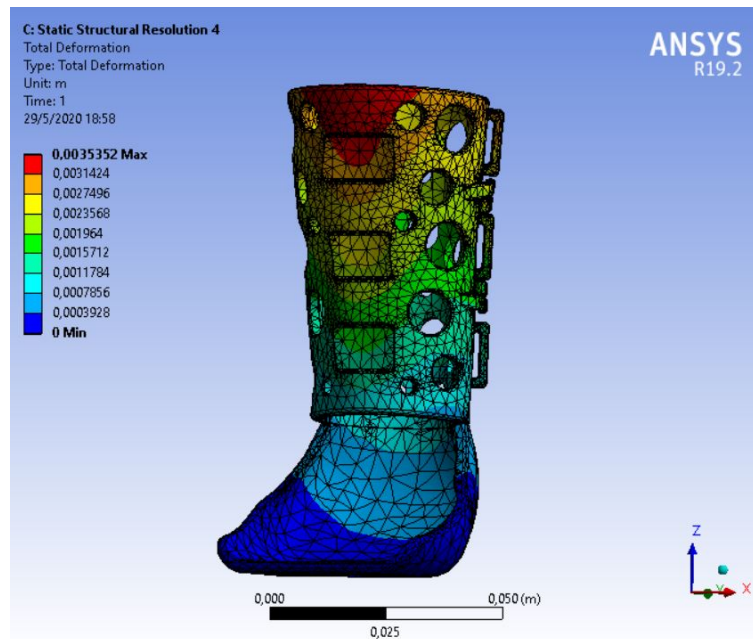


Figura 63: Deformacions a la fèrula de la pota davantera
Font: Elaboració pròpia

- Càrrega màxima a les nanses

Un cop realitzats els estudis anteriors s'ha anat augmentant la força aplicada a cada nansa i als corresponents rebaixos fins a arribar a la tensió de ruptura de la fèrula, és a dir fins que la tensió màxima ha tingut un valor de 27,29 MPa aproximadament. Per determinar la càrrega màxima s'ha realitzat la següent gràfica, on s'observa que la tensió màxima a la fèrula augmenta linealment amb la força aplicada a les nanses i els rebaixos.

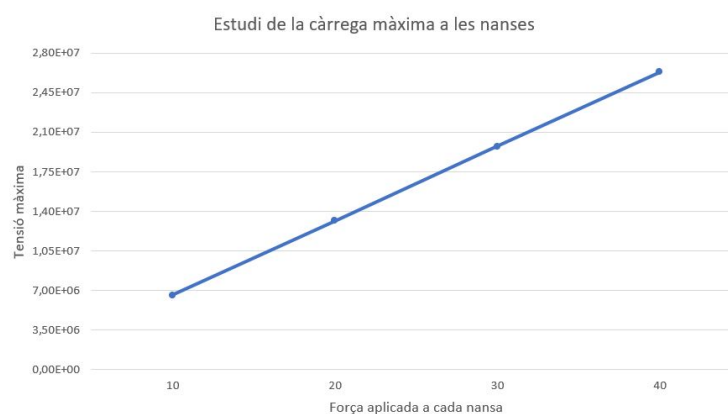


Figura 64: Estudi de la càrrega màxima aplicada a les nanses en la fèrula de la pota davantera
Font: Elaboració pròpia

La força aplicada a cada nansa s'ha anat augmentant de 10 en 10 fins arribar als 40 N. En aquesta simulació la tensió màxima té un valor de 26,325 MPa i la deformació màxima és de 7,84 mm. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades

es troben multiplicades per quatre, és de 4,15. En un principi pot semblar que la deformació és massa elevada i podria provocar molèsties al gat però s'ha de tenir en compte que aquest desplaçament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. En aquest cas la tensió màxima ha deixat d'estar situada a al voltant dels rebaixos i s'ha situat a un dels forats de la part extraïble de la fèrula, la part indicada a la Figura 70. Pel que respecta a la deformació màxima aquesta segueix estant situada a la part superior de la peça extraïble, com a la Figura 63.

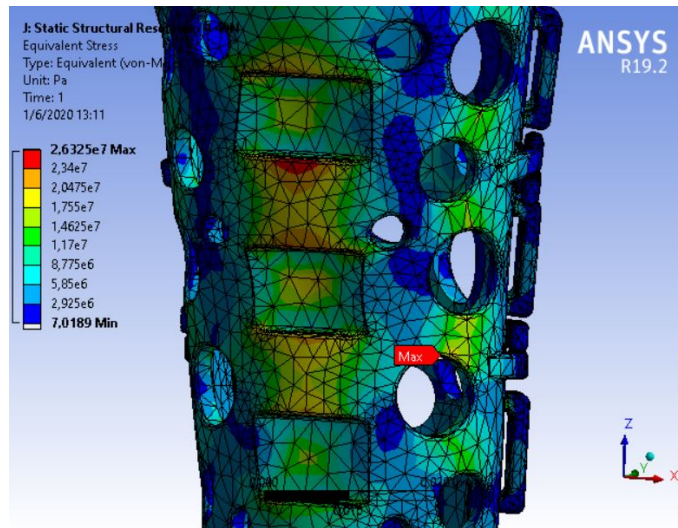


Figura 65: Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota davantera quan s'aplica la càrrega màxima a les nanses

Font: Elaboració pròpia

10.1.2 Fèrula de la pota posterior

- Estudi de convergència

En aquest cas només ha calgut realitzar dues simulacions, una amb una resolució de mallat de 2 i l'altre amb una resolució de 3. Un cop realitzades les dues simulacions s'ha observat que el valor de la tensió en un punt determinat de la fèrula era pràcticament igual en tots dos casos, 4,8158 MPa en el cas de la resolució 2 i 4,816 MPa en el de resolució 3, amb una àrea mitjana de les superfícies exteriors dels elements de $0,30 \text{ cm}^2$. Per tant, s'ha considerat idoni realitzar l'estudi amb el mallat de menys resolució.

- Tensió equivalent

La tensió màxima que ha de suportar la fèrula en aquest cas és de 7,14 MPa, un valor considerablement més petit que la resistència a tracció de la peça. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades es troben multiplicades per quatre, és de 15,29. Això indica que la fèrula pot suportar sense dificultat les càrregues que se li apliquen durant el seu funcionament.

Igual que a l'estudi del primer disseny de la fèrula de la pota davantera, la tensió màxima es troba en un dels punts d'unió d'una de les nanses amb la peça base, com es pot observar a la Figura 66. A la Figura també s'observa que els punts del voltant d'aquesta zona tenen una tensió considerablement inferior, per tant es podria considerar un punt singular.

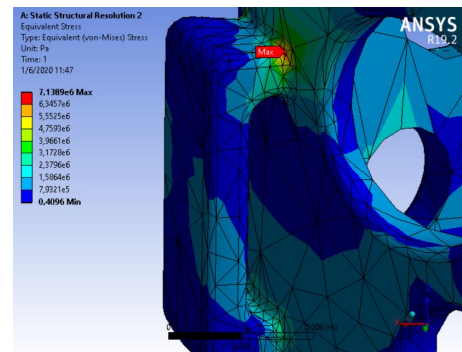


Figura 66: Zona de tensió màxima a la fèrula de la pota posterior

Font: Elaboració pròpia

A la Figura 67 es pot observar la distribució general de les tensions a la fèrula de la pota posterior. A causa de la modificació de l'escala de colors pel punt singular de tensió màxima, no s'observa, tot i existir, massa diferència de tensions a la part extraïble de la fèrula.

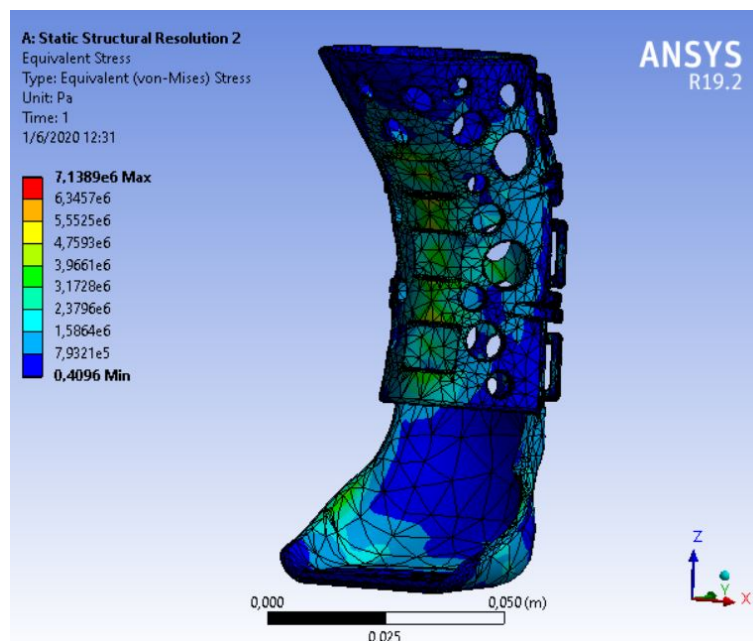


Figura 67: Tensions equivalents de Von-Mises a la fèrula de la pota posterior

Font: Elaboració pròpia

- Deformació

A la Figura 68 es pot observar que la deformació màxima de la fèrula es produeix a la seva part superior, en especial a la de la peça extraïble. El valor de la deformació màxima de la fèrula de la pota davantera és de 2,56 mm. S'ha de tenir en compte que aquest despla-

çament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. Aquest valor s'ha considerat prou petit per a garantir el bon funcionament de la fèrula.

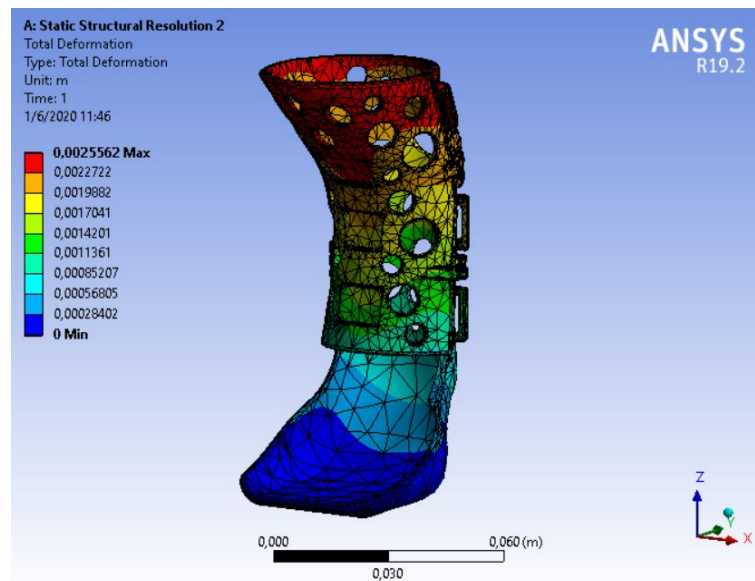


Figura 68: Deformació total de la fèrula de la pota posterior
 Font: Elaboració pròpia

- Càrrega màxima a les nanses

Un cop realitzats els estudis anteriors s'ha anat augmentant la força aplicada a cada nansa i als corresponents rebaixos fins a arribar a la tensió de ruptura de la fèrula, és a dir fins que la tensió màxima ha tingut un valor de 27,29 MPa aproximadament. Per determinar la càrrega màxima s'ha realitzat la següent gràfica, on s'observa que la tensió màxima a la fèrula augmenta linealment amb la força aplicada a les nanses i els rebaixos.

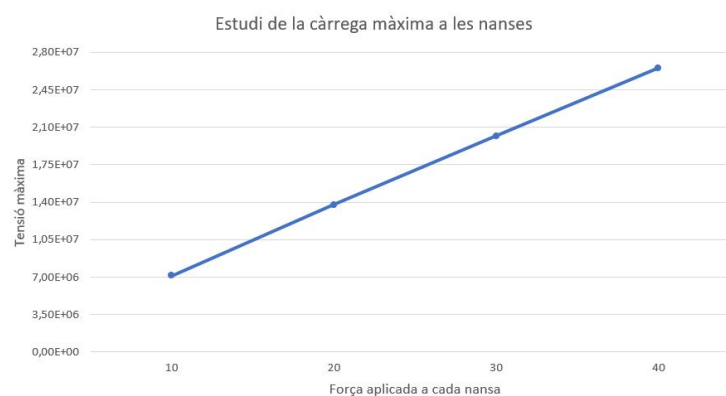


Figura 69: Estudi de la càrrega màxima aplicada a les nanses en la fèrula de la pota posterior
 Font: Elaboració pròpia

La força aplicada a cada nansa s'ha anat augmentant de 10 en 10 fins a arribar als 40 N. En aquesta simulació la tensió màxima té un valor de 26,54 MPa i la deformació màxima és de

4,75 mm. El factor de seguretat en aquest cas, tenint en compte que les forces aplicades es troben multiplicades per quatre, és de 4,11. S'ha de tenir en compte que el desplaçament és l'obtingut a l'assaig aplicant unes forces 4 vegades més grans que les aplicades pel gat durant la marxa, per tant la deformació real tindria un valor força inferior. En aquest cas la deformació màxima ha deixat d'estar situada a la zona superior de la fèrula i s'ha situat a la zona dels rebaixos, la part en vermell de la Figura 70. Pel que respecta a la tensió màxima aquesta segueix estant situada al punt d'unió de la nansa amb la peça base, com a la Figura 66.

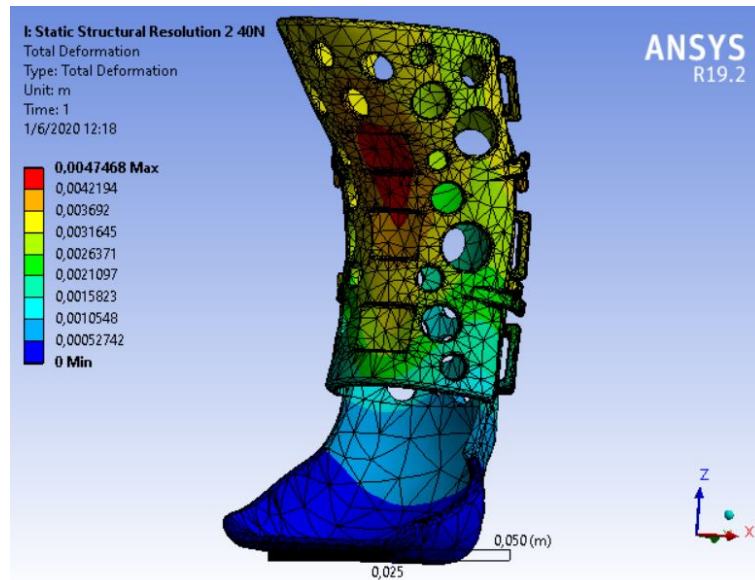


Figura 70: Deformació de la fèrula de la pota posterior quan s'aplica la càrrega màxima a les nanses
Font: Elaboració pròpia

11 Impressió 3D de les fèrules

Per tal de poder imprimir les fèrules amb els dos materials diferents s'han guardat les diferents parts d'aquestes en diferents fitxers. Aquests fitxers han estat guardats en format STL, el format d'arxius més usual en els softwares d'impressió 3D. Cada fèrula consta de quatre fitxers diferents:

- Part d'ABS de la peça extraïble
- Part de TPU de la peça extraïble
- Part d'ABS de la peça base
- Part de TPU de la peça base

En l'últim arxiu s'han desat totes les parts a imprimir amb TPU, és a dir l'interior de la fèrula i la petjada antilliscant. S'ha realitzat d'aquesta manera per tal de simplificar la definició de l'extrusor a utilitzar durant la impressió.

Existeixen diferents softwares per a preparar la peça per a ser impresa. Aquests softwares tenen com a funció principal generar les diferents capes que s'han de fabricar tot i que també serveixen per fixar les condicions d'impressió, generar suports i generar el gcode (el programa de control numèric). En aquest estudi s'ha utilitzat el software BCN3D Cura, ja que el prototip s'ha imprès mitjançant una impressora de BCN3D i aquest software de programari lliure inclou les característiques i els drivers adequats per a la programació i el manteniment d'aquestes impressores.



Figura 71: Impressora BCN3D Sigma R19
Font: BCN3D[18]

Les condicions d'impressió recomanades són les condicions establertes automàticament pel programa un cop indicats el material amb els que treballa cada extrusor, ABS en un i TPU en l'altre. Els únics paràmetres que s'han modificat han sigut l'*Infill*, que s'ha augmentat fins al

40% en l'ABS, i l'activació de la generació de suports. S'ha establert una alçada de capa general per tota la peça de 0,15 mm però aquest valor es podria reduir per tal d'obtenir un millor acabat, tenint en compte que això faria augmentar el temps d'impressió. S'ha de tenir en compte que alguns paràmetres d'impressió són diferents per a cada extrusor, ja que els paràmetres depenen del material amb el qual es treballa. Tots dos extrusors treballen amb una velocitat de desplaçament de 150 mm/s però la velocitat d'impressió és diferent en els dos casos, 50 mm/s per l'ABS i 25 mm/s pel TPU.

Per tal d'evitar la generació de suports a la part interior de la peça base es recomana imprimir-la estirada, com es pot observar a la Figura 72. D'aquesta manera, a part d'evitar els suports a l'interior que podrien generar acabats no desitjats a la part de la peça que ha d'estar en contacte amb l'animal, també s'aconsegueix una reducció del temps d'impressió i un estalvi de material. La peça extraïble es pot imprimir de peu, ja que no es generen suports a l'interior de la peça en aquesta posició però es recomana imprimir-la estirada, com la peça base, per tal de reduir el temps d'impressió i estalviar material.

Imprimint les peces en aquesta posició tots els suports són generats a l'exterior de les parts d'ABS. Els suports poden generar un mal acabat, ja que poden deixar marques a la peça però amb un tractament posterior es pot aconseguir un bon acabat. En cas que no es dugui a terme aquest tractament posterior, les peces, tot i no tenir l'acabat desitjat, segueixen sent útils, ja que aquest mal acabat no implica una molèstia pel gat.

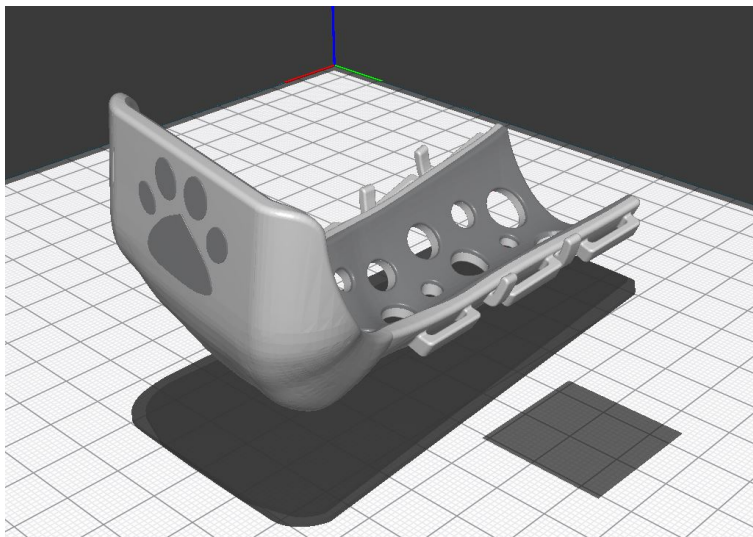


Figura 72: Peça base de la fèrula davantera en el BCN3D Cura
Font: Elaboració pròpia

A la Figura anterior es pot observar que la peça base es troba en dos colors, això és degut al fet que s'han definit els diferents materials a utilitzar al programa. Les parts negres corresponen a les parts impreses en TPU i la part blanca correspon a la part impresa en ABS.

Els fitxers STL per imprimir les peces es poden trobar a la web *Thingiverse*[19], on hi ha models 3D de descàrrega lliure. En aquesta web s'han especificat les condicions d'impressió explicades anteriorment i s'han penjat imatges per indicar la millor posició de les peces per imprimir-les. D'aquesta manera, un cop llegides les indicacions, qualsevol persona que disposi d'una impressora 3D FDM ha de poder ser capaç d'imprimir les fèrules per al seu gat.

En el cas de no disposar d'una impressora amb dos extrusors es recomana imprimir les parts en ABS i substituir les parts de TPU per l'alternativa més còmoda per l'usuari, sempre que es tracti d'un material tou que es pugui adaptar a la pota del gat, per exemple neoprè o altres gomes. Pel que fa a la part del TPU antilliscant, es podria substituir aquest material per un altre prou rugós per complir la funció antilliscant, com pot ser la silicona.

11.1 Prototip imprès

Inicialment es volia imprimir una de les fèrules amb l'ABS i el TPU, és a dir com s'imprimiria la peça final. Finalment no ha sigut possible realitzar aquesta impressió i s'ha imprès amb PLA, un material amb una resistència mecànica menor, un prototip de les parts que s'havien d'imprimir amb ABS de la fèrula.

S'ha decidit realitzar el prototip de la fèrula de la pota posterior, ja que la geometria d'aquesta fèrula és més complexa que la de la fèrula de la pota davantera i se n'ha volgut comprovar la dificultat d'impressió i si era viable extreure tots els suports necessaris per a imprimir la complexa geometria sense fer malbé les peces.



Figura 73: Parts de la fèrula de la pota posterior impreses en PLA

Font: Elaboració pròpia

Un cop impreses les parts s'ha comprovat si aquestes encaixaven entre elles correctament o si era necessari modificar el disseny, cosa que no ha estat necessària perquè les parts han encaixat bé.



Figura 74: *Parts de la fèrula de la pota posterior encaixades*
Font: *Elaboració pròpia*

Finalment s'han realitzat unes cintes amb velcro i s'han col·locat a la fèrula per tal de comprovar la viabilitat del mètode d'unió.



Figura 75: *Prototip de la fèrula de la pota posterior*
Font: *Elaboració pròpia*

12 Pressupost

En aquest apartat s'ha fet una estimació econòmica dels principals aspectes del projecte.

Per una banda es tindran en compte els costos a causa de les hores de feina que ha comportat realitzar-lo i, per l'altre, els relacionats amb les llicències dels programes informàtics utilitzats per dur a terme totes les tasques necessàries.

S'ha estimat que la càrrega de treball del projecte ha estat d'unes 300 hores de feina, que són aproximadament les hores a les quals equivalen els 12 crèdits ECTS dels quals consta el treball de fi de grau del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials.

Per dur a terme aquesta estimació, s'han dividit les 300 hores de feina comentades anteriorment en els diversos tipus de tasques realitzades durant el projecte i s'han consultat els costos associats a cadascuna d'aquestes.

S'ha fet una aproximació de les hores dedicades a cada tasca i s'han calculat els costos de cada una i el cost total associat a la feina d'enginyeria.

Tasques	Hores dedicades	Cost per hora	Cost total
Recerca d'informació	65 h	30 €/h	1950 €
Disseny 3D	100 h	35 €/h	3500 €
Simulacions amb ANSYS	80 h	100 €/h	8000 €
Redacció	55 h	25 €/h	1375 €
TOTAL	300 h	-	14825 €

Taula 1: Costos associats a la feina d'enginyeria

Font: Elaboració pròpia

A més, durant aquest projecte s'ha fet ús d'alguns programes informàtics per dur a terme el disseny i les simulacions.

S'han consultat els seus costos i s'ha calculat el seu preu per hora suposant les hores que s'utilitza cadascun dels programes. S'ha estimat que el SolidWorks s'utilitza unes 1000 hores l'any i que l'ANSYS s'utilitza unes 500 hores l'any.

Els programes utilitzats amb els corresponents costos associats a les diverses llicències són les següents:

Programa	Cost llicència	Cost per hora	Cost total
SolidWorks	5200 €/any	5,2 €/h	520 €
ANSYS Workbench	26500 €/any	53 €/h	4240 €
TOTAL	-	-	4760 €

Taula 2: Costos del programari informàtic utilitzat

Font: Elaboració pròpia

Cadascun d'aquests programes ha anat vinculat a una de les tasques del treball. Per tant, s'ha multiplicat el preu per hora del programa per les hores dedicades a cada tasca.

La tasca de disseny 3D correspon al programa SolidWorks i la simulació per elements finits s'ha realitzat amb ANSYS Workbench.

Pel que fa a la redacció, aquesta memòria s'ha dut a terme mitjançant l'eina LaTeX, que és gratuïta.

D'altra banda, també s'han de tenir en compte el cost del prototip, és a dir els costos de la impressió 3D del prototip i del seu muntatge. La impressió del prototip ha costat 21,23 € i les cintes amb velcro han costat, aproximadament, un euro. S'ha de tenir en compte que per tal de treure els suports de les peces impreses i realitzar el muntatge del prototip han estat necessàries dues hores de feina amb un preu de 30 €/h. Per tant, el cost total del prototip ha estat, aproximadament, de 82 €.

Finalment, es calculen els costos totals del projecte.

Cost enginyeria	14825 €
Cost programes informàtics	4760 €
Cost prototip	82 €
Cost total	19667 €

Taula 3: *Costos totals del projecte*
Font: *Elaboració pròpia*

12.1 Cost unitari

A continuació s'ha calculat, de manera aproximada, el cost unitari de cada fèrula per tal de comprovar si el preu és inferior al de les fèrules que hi ha actualment al mercat. Aquest càlcul es centra en especial en el preu dels materials necessaris per obtenir una fèrula completa. S'ha decidit realitzar el càlcul del cost unitari d'aquesta manera perquè, com s'ha comentat abans, els fitxers de les fèrules es poden obtenir de manera gratuïta i, per tant, l'únic cost constant en les diferents opcions d'obtenció de la fèrula és el cost dels materials.

Primer de tot s'ha buscat el preu d'una impressora amb doble extrusor i s'ha dividit aquest preu en el nombre d'hores funcionals d'una impressora 3D per tal de determinar la part del cost que correspon a la impressió de les fèrules. S'ha estimat que una impressora 3D d'escriptori, de les que pot tenir un usuari a casa seva, té una vida útil de unes 2000 hores. Per tal de determinar el cost de la impressora s'ha buscat una impressora amb doble extrusor a les pàgines web de compra habitual i s'ha determinat que el preu d'una econòmica impressora d'aquest tipus pot ser de uns 350 € [20]. Un cop determinat el preu de la impressora s'ha estimat que el cost per hora d'aquesta és de 0,18 €/h.

Per tal de determinar el cost dels materials impresos s'ha buscat el preu de les bobines dels filaments necessaris per imprimir les fèrules a la web de *Smart Materials 3D*, una empresa que es dedica al disseny, desenvolupament i fabricació de filament per a impressió 3D.

El preu d'una bobina de 750 g d'ABS és de 16,80 € [22], independentment del color. És a dir, cada gram d'ABS imprès costa aproximadament 0,02 €.

En aquesta empresa no es venen bobines de TPU però sí que hi ha bobines de FLEX, un material amb les mateixes propietats flexibles que el TPU. Per tal de fer el càlcul dels costos s'ha tingut en compte el preu per gram del FLEX per a les parts impreses en TPU. Una bobina de 750 g de FLEX costa 26,50 € [23], per tant cada gram imprès costa aproximadament 0,04 €.

Pel que fa al preu de les tires amb velcro s'ha estipulat un preu aproximat d'1 € el conjunt de les

tres tires corresponents a cada fèrula. És a dir, s'ha considerat que cada tira amb velcro té un cost aproximat de 0,33 €.

En aquest apartat s'ha decidit calcular el cost unitari de cada fèrula i de la peça base de cada fèrula per separat, ja que la peça base pot ser utilitzada individualment i, per tant, pot ser interessant conèixer el seu preu individual. Per aquest últim càlcul s'ha de tenir en compte que el cost de les tires amb velcro s'ha d'incloure en el cost de la peça base, ja que són necessàries per subjectar la fèrula.

- Fèrula de la pota davantera

A la Taula 4 es poden observar els costos dels materials referits a la peça base de la fèrula de la pota davantera.

	Cost unitari	Unitats	Cost total
ABS	0,0224 €/g	38 g	0,85 €
TPU	0,0353 €/g	21 g	0,74 €
Tires amb velcro	0,33 €/tira	3 tires	1 €
Impressora 3D	0,175 €/h	7 h	1,23 €
Cost peça base	-	-	3,82 €

Taula 4: Costos de la peça base de la fèrula de la pota davantera

Font: Elaboració pròpia

A la Taula 5 es pot observar que el cost dels materials corresponents a la fèrula de la pota davantera és considerablement menor al cost de les fèrules del mercat.

	Cost unitari	Unitats	Cost total
ABS	0,0224 €/g	52 g	1,16 €
TPU	0,0353 €/g	26 g	0,92 €
Tires amb velcro	0,33 €/tira	3 tires	1 €
Impressora 3D	0,175 €/h	17,67 h	3,09 €
Cost fèrula davantera	-	-	6,17 €

Taula 5: Costos de la fèrula de la pota davantera

Font: Elaboració pròpia

En el cas de no disposar d'una impressora o de requerir un expert per tal de muntar les fèrules, el preu de la fèrula de la pota davantera podria augmentar fins a uns 40 € ja que es requereix d'una hora de feina per tal de treure els suports i muntar les tires de velcro.

- Fèrula de la pota posterior

A la Taula 6 es poden observar els costos dels materials referits a la peça base de la fèrula de la pota posterior.

	Cost unitari	Unitats	Cost total
ABS	0,0224 €/g	38 g	0,85 €
TPU	0,0353 €/g	22 g	0,78 €
Tires amb velcro	0,33 €/tira	3 tires	1 €
Impressora 3D	0,175 €/h	9,15 h	1,60 €
Cost peça base	-	-	4,23 €

Taula 6: *Costos de la peça base de la fèrula de la pota posterior*
 Font: *Elaboració pròpia*

A la Taula 7 es pot observar que el cost dels materials corresponents a la fèrula de la pota posterior és considerablement menor al cost de les fèrules del mercat.

	Cost unitari	Unitats	Cost total
ABS	0,0224 €/g	54 g	1,21 €
TPU	0,0353 €/g	27 g	0,95 €
Tires amb velcro	0,33 €/tira	3 tires	1 €
Impressora 3D	0,175 €/h	20 h	3,50 €
Cost fèrula posterior	-	-	6,57 €

Taula 7: *Costos de la fèrula de la pota posterior*
 Font: *Elaboració pròpia*

En el cas de no disposar d'una impressora o de requerir un expert per tal de muntar les fèrules, el preu de la fèrula de la pota posterior podria augmentar fins a uns 40 € ja que es requereix d'una hora de feina per tal de treure els suports i muntar les tires de velcro.

13 Impacte ambiental

Una part molt important d'un projecte és l'impacte ambiental que aquest comporta, per tant, cal tenir en compte quin és l'efecte de la realització i utilització de les fèrules sobre el medi ambient.

Les fèrules estan fetes majoritàriament de TPU i ABS que són dos termoplàstics reciclables. Per tant un cop acabada la vida útil de les fèrules aquestes es poden reciclar pràcticament senceres, ja que els únics elements no reciclables de les fèrules són les tires amb velcro. Això fa que l'impacte ambiental de les fèrules sigui bastant reduït. Tot i això, s'ha de tenir en compte que durant la realització de les fèrules es produeix un impacte ambiental a causa del consum elèctric de la impressora 3D i al desgast dels seus components electrònics.

També s'ha considerat important l'impacte ambiental a causa del material utilitzat en les impressions fallides, ja que habitualment és necessari realitzar la impressió més d'una vegada a causa d'errors sorgits durant la impressió. Per tal de reduir l'impacte ambiental provocat per aquest material descartat s'han desenvolupat projectes com *Filastruder*[21], que utilitzen petites porcions (boletes) d'ABS imprès per tal de conformar filament per a poder tornar-lo a imprimir.

Tot i això, un dels grans avantatges de la fabricació additiva és que no es necessiten motlles per a realitzar les peces. Aquest detall és un factor molt important a tenir en compte a l'hora d'avaluar l'impacte ambiental de les fèrules ja que l'estalvi de la utilització dels motlles, i en conseqüència de la seva fabricació, implica una reducció considerable de l'impacte ambiental de la fabricació de les fèrules en comparació amb altres tecnologies de fabricació.

14 Planificació

Per tal de poder organitzar el treball en el període de temps establert per la universitat, un quadrimestre, s'ha realitzat una planificació de les activitats a desenvolupar. Per cada una de les activitats se n'ha estimat una data d'inici i el temps que es pot trigar a desenvolupar-les, tenint en compte el gruix de treball de cada una i la seva complexitat.

Cada tasca s'ha dividit, igual que en la memòria del treball, en diferents subtasques. A la següent Taula es poden observar les tasques en majúscules i negreta i les subtasques de cada una de les tasques a sota d'elles i en minúscules.

Activitat	Data d'inici	Durada en dies	Data de finalització
ESTAT DE L'ART	10/2/2020	12	22/2/2020
Tècniques d'impressió 3D	10/2/2020	5	15/2/2020
Tipus de fèrules	13/2/2020	5	18/2/2020
Estudi de mercat	18/2/2020	4	15/2/2020
SISTEMA MOTRIU D'UN GAT	20/2/2020	20	11/3/2020
Anatomia de les potes	20/2/2020	7	27/2/2020
Estudi de la marxa	26/2/2020	14	11/3/2020
SOL·LICITACIONS	2/3/2020	12	14/3/2020
Forces	2/3/2020	4	6/3/2020
Geometria i Materials	6/3/2020	8	14/3/2020
DISSENY DETALLAT	15/3/2020	70	24/5/2020
Primer disseny	15/3/2020	50	4/5/2020
Disseny final	4/5/2020	20	24/5/2020
PROVES	5/4/2020	63	7/6/2020
Simulació amb mètodes numèrics	5/4/2020	55	30/5/2020
Prototip	31/5/2020	7	7/6/2020
IMPACTE AMBIENTAL	5/6/2020	3	8/6/2020
PRESSUPOST	7/6/2020	3	10/6/2020
REDACTAT MEMÒRIA	15/2/2020	121	15/6/2020

Taula 8: Planificació de les activitats del projecte

Font: Elaboració pròpia

A la Taula 8 es pot observar que el redactat de la memòria s'ha anat desenvolupant des del principi del projecte, ja que s'ha anat plasman tota la informació i resultats obtinguts en el desenvolupament de la resta de tasques.

Per tal de representar aquesta planificació d'una manera més visual, es pot fer ús del diagrama de Gantt, com es pot observar a la Figura 76.

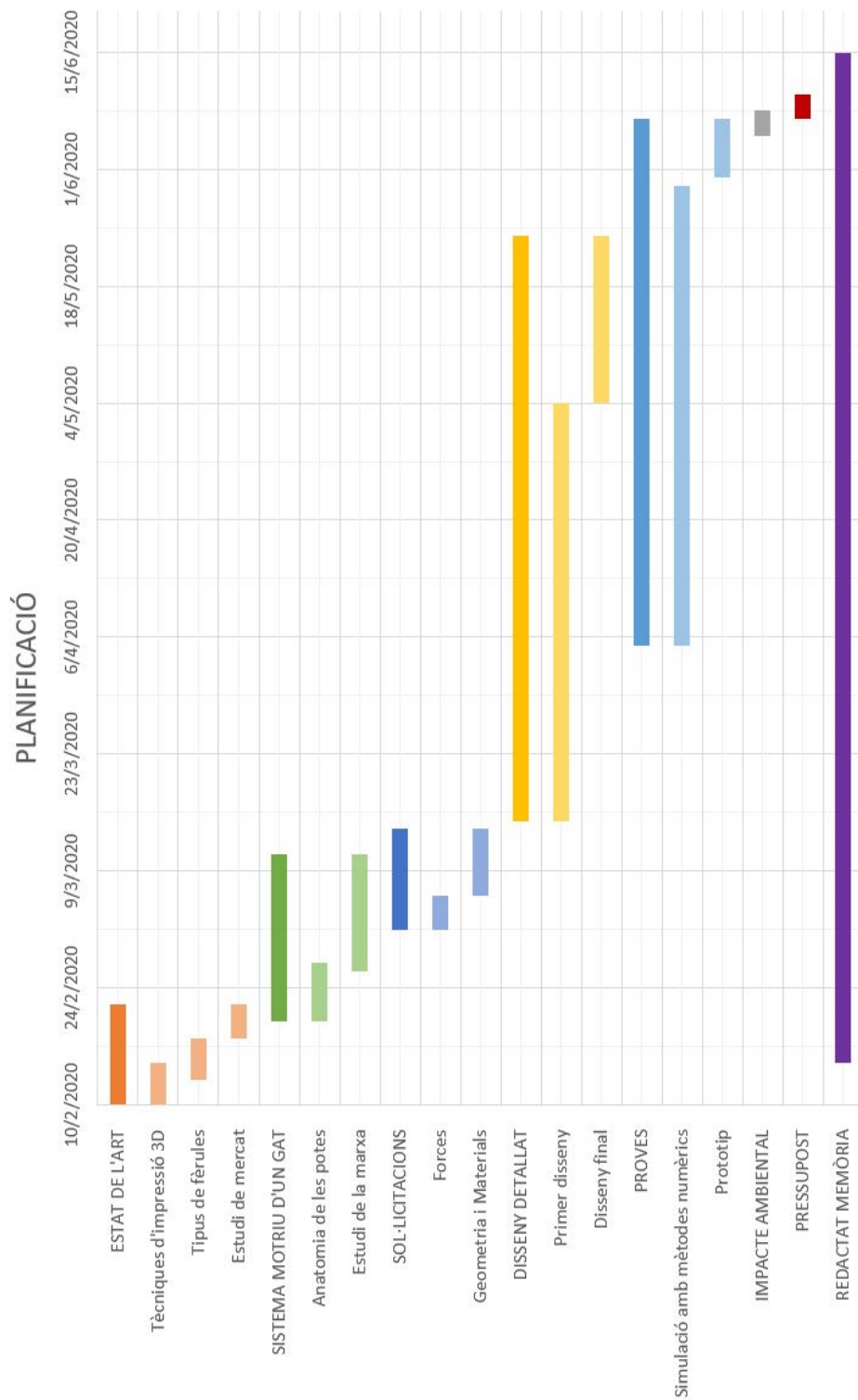


Figura 76: Diagrama de Gantt del projecte
 Font: Elaboració pròpia

Conclusions

En aquest apartat s'ha comprovat si s'han complert els objectius plantejats a l'inici del projecte i que es podria dur a terme un cop acabat aquest projecte per tal de millorar el disseny de les fèrules.

El principal objectiu d'aquest projecte era realitzar el disseny d'unes fèrules per a gat, tenint en compte que aquestes seran fabricades mitjançant la impressió 3D. Aquest objectiu ha estat assolit satisfactòriament, ja que s'ha pogut comprovar mitjançant les simulacions que les fèrules impreses en 3D en les condicions estipulades són capaces de suportar les càrregues aplicades i, per tant, són útils a l'hora d'immobilitzar les potes d'un gat.

Els punts més problemàtics del treball han estat el disseny 3D i les simulacions. Això és degut al fet que, tot i haver treballat amb els programes durant la carrera, a l'inici del projecte no es tenien els coneixements ni l'habilitat necessaris per a desenvolupar-lo i aquests es van haver d'anar adquirint durant la realització del treball. Per tant, es van haver de fer moltes proves a mesura que s'adquirien coneixements, tant dels dissenys com de les simulacions, fins a aconseguir els resultats desitjats.

Pel que fa al disseny, s'han assolit satisfactòriament els dos objectius plantejats- El primer objectiu era realitzar unes fèrules que no requereixin altres elements durant la rehabilitació del gat. Per tal d'assolir-lo s'ha realitzat un disseny que permet regular la pressió de la fèrula sobre la pota del gat mitjançant una part extraïble, de manera que no és necessari un embenat a l'inici de la lesió.

D'altra banda, també es volia realitzar un disseny que no impliqués la retirada de la fèrula durant el procés de rehabilitació del gat. Això s'ha aconseguit mitjançant la creació de forats a les fèrules, que serveixen tant per alleugerir el pes d'aquestes com per la realització de la teràpia d'electroestimulació.

Per tal de fer de les fèrules un producte més assequible per a tothom s'han penjat els fitxers STL per imprimir-les a la pàgina *Thingiverse*, de manera que es poden adquirir gratuïtament i l'amo del gat les pot imprimir ell mateix.

Com s'ha pogut observar, això, conjuntament amb la utilització de la impressió 3D, permet reduir el preu de les fèrules de manera considerable i, per tant, contribueix a fer-les més accessibles per a tothom.

També s'ha de tenir en compte que aquest projecte ha proporcionat un coneixement ampli en molts aspectes que anteriorment es desconeixien i ha permès comprendre millor el funcionament de les fèrules per a animals de companyia, en aquest cas per a gats. Durant el projecte s'han adquirit nous coneixements però també s'han reforçat els coneixements adquirits durant el grau, com el disseny amb *SolidWorks*, la realització de simulacions amb *ANSYS* i els coneixements en resistència de materials. Es vol destacar que s'han après diferents nocions en el disseny i l'elaboració de prototips que s'espera que siguin útils pròximament en el món laboral.

Finalment es pot concloure que, tot i haver assolit els objectius plantejats a l'inici del projecte, seria necessari realitzar certes comprovacions abans de donar el projecte per tancat.

A continuació s'esmenten alguns dels passos a seguir en un futur per tal de millorar el projecte:

- Realitzar un escanejat 3D d'un gat per tal d'utilitzar un model fiable sobre el qual dur a terme el disseny de les fèrules. En cas de no poder realitzar l'escanejat s'hauria de comprovar que el model 3D del gat utilitzat per realitzar el disseny de les fèrules és correcte.
- Realitzar diferents prototips amb diferents dissenys dels forats per tal de comprovar quin d'aquests dissenys és el més còmode per al gat.
- Comprovar experimentalment que la força necessària per a lligar les fèrules és inferior a la màxima aplicable a les nanses del disseny, ja que, en cas contrari, aquest s'hauria de modificar.
- Comprovar que el TPU és el material adequat per tal de garantir la comoditat del gat i per evitar molèsties i fins i tot ferides a causa del fregament. En cas contrari s'hauria de buscar una altra goma o, fins i tot, un altre tipus de material, que garanteixi dita comoditat.
- Comprovar la funcionalitat de les fèrules utilitzant-les en un cas real, és a dir durant la rehabilitació de la lesió en una pota d'un gat.

Agraïments

M'agradaria expressar el meu agraïment al meu tutor Emilio Angulo pel seu suport i dedicació durant el desenvolupament d'aquest treball i per haver-me orientat tant a l'inici del projecte com en els moments de dificultat i de dubtes.

M'agradaria agrair a l'Ignasi, tècnic d'*Ortocanis*, l'orientació oferta, en especial a l'inici del projecte, i la seva ajuda durant el desenvolupament del treball.

També m'agradaria agrair als meus amics tot el suport que m'han donat durant el grau i durant el desenvolupament del projecte, ja sigui ajudant-me a resoldre els diferents dubtes que han anat sortint o alegrant-se enfront dels bons resultats aconseguits.

Finalment, voldria expressar el meu màxim agraïment a la meua família per haver-hi estat sempre, per preocupar-se, alegrar-se i patir amb mi en el transcurs d'aquests anys i, en especial, per no haver perdut la il·lusió per aquest projecte fins i tot quan semblava que s'acabava el món.

Bibliografia

- [1] CUSTOMPARTNET, *Additive Fabrication*
Consultat: 10 de febrer de 2020 Disponible a: <https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [2] 3D PRINTING INDUSTRY, *Bioprinting & more possible with Hyrel 3D'S new line of Syringe print heads*
Consultat: 13 de febrer de 2020 Disponible a: <https://3dprintingindustry.com/news/bioprinting-more-possible-with-hyrel-3ds-new-line-of-syringe-print-heads-65968/>
- [3] AXIS, *MULTI JET FUSION ¿QUÉ ES?*
Consultat: 18 de juny de 2020 Disponible a: <http://www.axishello.com/es/multi-jet-fusion-que-es/>
- [4] ORTOCANIS, *¿Qué son y cómo funcionan las ortesis?*
Consultat: 21 de maig de 2020 Disponible a: <https://www.ortocanis.com/es/content/135-ayudas-ortopedicas-para-perros-con-artrosis>
- [5] ORTOCANIS,
Consultat: 21 de febrer de 2020 Disponible a: <https://www.ortocanis.com/es/>
- [6] ORTOPEDIAMASCOTAS,
Consultat: 21 de febrer de 2020 Disponible a: <https://www.ortopediamascotas.com/>
- [7] HANDICAPPEDPETS, *Walkin' Pets*
Consultat: 12 de maig de 2020 Disponible a: <https://www.handicappedpets.com/>
- [8] ZOOMADOG,
Consultat: 12 de maig de 2020 Disponible a: <https://zoomadog.co.uk/>
- [9] PINTEREST , *Planos anatómicos*
Consultat: 15 de febrer de 2020 Disponible a: <https://www.pinterest.es/pin/302867143662347565/>
- [10] PINTEREST , *Anatomia del gato. El esqueleto*
Consultat: 15 de febrer de 2020 Disponible a: <https://www.pinterest.es/pin/343469909077037584/>
- [11] VETERINARIAN KEY, *Feline Locomotive Behavior*
Consultat: 26 de febrer de 2020, Disponible a: <https://veteriankey.com/feline-locomotive-behavior/>
- [12] MANter, J. T., *The dynamics of quadrupedal walking*, Department of Zoology, Columbia University and Department of Anatomy, University of South Dakota, Abril 1938.
Consultat: 24 de febrer de 2020
- [13] GRANATOSKY, M. C., FITZSIMONS, A., ZEININGER, A., SCHMITT, D., *Mechanisms for the functional differentiation of the propulsive and braking roles of the forelimbs and hindlimbs during quadrupedal*

walking in primates and felines, The Company of Biologists Ltd, Journal of Experimental Biology, 2018.

Consultat: 4 de març de 2020

- [14] SISTEMAS DE FABRICACIÓN, *Guión de la práctica 5: Impresión 3D*, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Mecànica

Consultat: 8 de maig de 2020

- [15] FREE3D, *Cat V1 modelo 3d*

Consultat: 4 de març de 2020, Disponible a: <https://free3d.com/3d-model/cat-v1--522281.html>

- [16] SAMYKANO, M., SELVAMANI, S. K., KADIRGAMA, K., NGUI, W. K., KANAGARAJ, G. SUDHAKAR, K., *Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019.

Consultat: 20 de març de 2020

- [17] GURRALA, P. K., REGALLA, S. P., *Friction and wear behavior of ABS polymer parts made by fused deposition modeling (FDM)*, International Conference on Advances in Tribology, 2014.

Consultat: 20 de maig de 2020

- [18] BCN3D, *BCN3D SIGMA R19*

Consultat: 15 de juny de 2020 Disponible a: <https://www.bcn3d.com/ca/bcn3d-sigma-r19/>

- [19] THINGIVERSE, *Cat splints*

Consultat: 7 de juny de 2020 Disponible a: <https://www.thingiverse.com/thing:4433786>

- [20] ALIEXPRESS, *Kit de 2 extrusoras y boquillas dobles Tenlog 3D Hands con soporte de Motor de extrusión, desmontaje rápido para reemplazar los Kits de boquillas*

Consultat: 18 de juny de 2020 Disponible a: https://es.aliexpress.com/item/10000000888210.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7ca4c95a0QVYM3&algo_pvid=b3837bcd-f50b-485c-9898-154f56a5b043&algo_expid=b3837bcd-f50b-485c-9898-154f56a5b043-0&btsid=0b0a187915925762587201551e79d3&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

- [21] FILASTRUDER,

Consultat: 3 de juny de 2020 Disponible a: <https://www.filastruder.com/>

- [22] SMART MATERIALS 3D, *ABS*

Consultat: 9 de juny de 2020 Disponible a: https://www.smartmaterials3d.com/abs-filamento#/2-tamano-m_750g/25-color-natural/26-diametro-175_mm

- [23] SMART MATERIALS 3D, *FLEX*

Consultat: 9 de juny de 2020 Disponible a: https://www.smartmaterials3d.com/abs-filamento#/2-tamano-m_750g/25-color-natural/26-diametro-175_mm

Bibliografia complementària

VIVANCOS-CALVET, J., BUJ-CORRAL, I., COSTA-HERRERO, L., GOMÀ-AYATS, J.R.,, *Sistemas de Fabricación*, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament d'Enginyeria Mecànica, p. 327-337.

Consultat: 10 de febrer de 2020

3D PRINTING FROM SCRATCH, *Types of 3D printers or 3D printing technologies overview*

Consultat: 12 de febrer de 2020 Disponible a: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/>

ORTOPEDIA CANINA, *Para que sirven las férulas en los perros*

Consultat: 21 de maig de 2020 Disponible a: <https://ortopedia-canina.es/para-que-sirven-las-ferulas-en-los-perros/>

BACHMAN, N., LASSO, M., OLAODE, O., WALFIELD, E., AL ZUHAIIRI, M., *Design of a Prosthesis for Canines with Front Limb Deformities*, Worcester Polytechnic Institute, Abril 2017.

Consultat: 14 de febrer de 2020

KÖNIG, H. E., LIEBICH, H.-G., *Anatomía de los animales domésticos. Tomo 1: Aparato locomotor*, Editorial Médica Panamericana, 2008.

Consultat: 19 de febrer de 2020