

## **TREBALL FI DE GRAU**

**Títol: DISSENY D'UNA ORTESIS DE TURMELL PER LA DORSIFLEXIÓ EN PERSONES AMB PARAPARESIA ESPÀSTICA.**

**Document: Memòria i Annexos**

**Autor: Albert Nebot Beltran**

**Tutor: Dra. Inès Ferrer Real**  
**Departament: Enginyeria Mecànica i de Construcció Industrial**  
**Àrea: Enginyeria dels processos de fabricació**

**Convocatòria (mes/any): Setembre 2019**



# ÍNDIX

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Introducció</b> .....   | 9  |
| 1.1. Antecedents .....  | 9  |
| 1.1.1. Exposició del problema .....   | 10 |
| 1.2. Objectius .....  | 11 |
| 1.3. Requeriments i abast .....   | 11 |
| 1.3.1. Requeriments .....   | 11 |
| 1.3.2. Abast del projecte .....   | 11 |
| <b>2. Descripció General</b> .....  | 12 |
| 2.1. Conceptes previs .....   | 12 |
| 2.2. Anatomia de turmell .....  | 15 |
| 2.3. Moviments del peu .....  | 18 |
| 2.3.1. Eix transversal X (Dorsiflexió / Extensió) .....                         | 19 |
| 2.3.2. Eix longitudinal Y (Adducció/Abducció) .....                             | 20 |
| 2.3.3. Eix horitzontal Z (Pronació / Supinació) .....                           | 21 |
| <b>3. Estudi capacitatiu</b> .....  | 22 |
| 3.1. Zona afectada .....  | 22 |
| 3.2. Limitacions en la dorsiflexió .....  | 23 |
| <b>4. Tractaments utilitzats</b> .....  | 24 |
| 4.1. Tractaments fisioterapèutics.....  | 24 |
| 4.1.1. Exercicis de força.....  | 24 |
| 4.1.1.1. Sentadillas o squats.....  | 27 |
| 4.1.1.2. “Sentadillas” amb pilota medicinal .....                               | 28 |
| 4.1.1.3. Elevació de taló .....   | 29 |
| 4.1.2. Exercicis d’elasticitat .....  | 30 |
| 4.1.2.1. Estirament 1 bessó .....   | 31 |
| 4.1.2.2. Estirament 2 bessó .....   | 32 |
| <b>5. Anàlisi de mercat</b> .....   | 33 |
| 5.1. Bota Walker TD ROM Articulada Thuasne .....                                | 33 |
| 5.2. Turmellera VALFEET AIR Estabilitzadora .....                               | 34 |
| 5.3. Ortèsis Antiequino Rancho de los Amigos Antiequino TP-2102 de Orliman..... | 35 |
| 5.4. Boxia – Ortesi antiequino .....  | 36 |
| 5.5. Turmellera Nocturna per Fascitis Plantar Futuro de 3M .....                | 37 |
| 5.6. Avaluació de l’anàlisi de mercat .....                                     | 38 |
| <b>6. Requeriments i especificacions de disseny</b> .....                       | 39 |

|  |    |
|--|----|
| <b>7. Disseny</b> .....                          | 40 |
| 7.1. Concepte .....                              | 40 |
| 7.2. Principis de solució .....                  | 41 |
| 7.2.1. Sistema Hidràulic.....                    | 41 |
| 7.2.2. Sistema mecànic.....                      | 41 |
| 7.2.3. Sistema pneumàtic.....                    | 43 |
| <b>8. Disseny final</b> .....                    | 44 |
| 8.1. Elements del disseny final .....            | 46 |
| 8.1.1. Sola .....                                | 46 |
| 8.1.2. Sobresola .....                           | 47 |
| 8.1.3. Caixa .....                               | 48 |
| 8.1.4. Tapa caixa .....                          | 48 |
| 8.1.5. Cambra d'aire .....                       | 49 |
| 8.1.6. Conjunt Pistó .....                       | 50 |
| 8.1.6.1. Pistó.....                              | 51 |
| 8.1.6.2. Unió pistó tub.....                     | 52 |
| 8.1.6.3. Èmbol .....                             | 53 |
| 8.1.6.4. Tub plàstic .....                       | 53 |
| 8.1.6.5. Brida .....                             | 54 |
| 8.1.7. Rosca .....                               | 54 |
| 8.1.8. Sensor de pes .....                       | 55 |
| 8.1.9. Vàlvula d'aire, junta de goma i tap ..... | 55 |
| 8.1.10. Porta-piles .....                        | 56 |
| 8.1.11. Velcro .....                             | 57 |
| 8.2. Funcionament i lògica del sistema .....     | 58 |
| 8.3. Muntatge.....                               | 59 |
| 8.4. Manteniment de la ortesi .....              | 62 |
| 8.4.1. Revisar pressió de la cambra d'aire.....  | 62 |
| 8.4.2. Recanvi de piles.....                     | 62 |
| 8.4.3. Canviar el velcro .....                   | 62 |
| 8.4.4. Canvi de pes .....                        | 62 |
| <b>9. Parametrització</b> .....                  | 63 |
| <b>10. Resum de pressupost</b> .....             | 64 |
| <b>11. Conclusions</b> .....                     | 65 |
| <b>12. Llistat de documents</b> .....            | 66 |
| <b>13. Referències</b> .....                     | 67 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Annex de Càlculs</b> .....                   | 68 |
| A.1. Introducció .....                          | 69 |
| A.2. Elevació del peu .....                     | 69 |
| A.3. Disseny de la cambra d'aire .....          | 70 |
| A.4. Superfície d'aire impulsat pel pistó. .... | 72 |

## INDEX DE FIGURES

- Il·lustració 1 – Diferents tipus de ortesis
- Il·lustració 2 – Articulació turmell
- Il·lustració 3 – Juntes articulació
- Il·lustració 4 – Zona externa del peu
- Il·lustració 5 – Zona interna del peu
- Il·lustració 6 – Eixos del peu
- Il·lustració 7 – Flexió / Extensió del peu
- Il·lustració 8 – Adducció / Abducció del peu
- Il·lustració 9 – Pronació / Supinació del peu
- Il·lustració 10 – Músculs bessó
- Il·lustració 11 – Alternativa al taló
- Il·lustració 12 – Exercici de crossfitt
- Il·lustració 13 – Entrenament de powerlifting i strongman
- Il·lustració 14 – Entrenament de calistènia
- Il·lustració 15 – Exercici de squats
- Il·lustració 16 – Com fer una sentadilla
- Il·lustració 17 – Exercici 1 pilota medicinal
- Il·lustració 18 – Exercici 2 pilota medicinal
- Il·lustració 19 – Exercici elevació de taló
- Il·lustració 20 – Estirament 1 bessó
- Il·lustració 21 – Estirament 2 bessó
- Il·lustració 22 – Bota Walker TD ROM
- Il·lustració 23 – Turmellera VALFEET AIR
- Il·lustració 24 – Ortesis Antiequino Rancho de los Amigos Antiequino TP-2102
- Il·lustració 25 – Boxia – Ortesis antiequino
- Il·lustració 26 – Turmellera Nocturna per Fascitis Plantar Futuro de 3M
- Il·lustració 27 – Elevació tendó
- Il·lustració 28 – Sistema mecànic 1

- Il·lustració 29 – Sistema mecànic 2
- Il·lustració 30 – Conjunt sabata
- Il·lustració 31 – Sola
- Il·lustració 32 – Sobre-sola
- Il·lustració 33 – Caixa
- Il·lustració 34 – Tapa caixa
- Il·lustració 35 – Cambra d'aire
- Il·lustració 36 – Conjunt pistó
- Il·lustració 37 – Pistó
- Il·lustració 38 – Unió pistó tub
- Il·lustració 39 – Èmbol
- Il·lustració 40 – Tub plàstic
- Il·lustració 41 – Brida
- Il·lustració 42 – Rosca
- Il·lustració 43 – Sensor de pes
- Il·lustració 44 – Vàlvula d'aire
- Il·lustració 45 – Muntatge vàlvula
- Il·lustració 46 – Portapiles
- Il·lustració 47 – Velcro
- Il·lustració 48 – Muntatge pistó
- Il·lustració 49 – Muntatge
- Il·lustració 50 – Adidas Superstar
- Il·lustració 51 – Elevació taló
- Il·lustració 52 – Trigonometria taló
- Il·lustració 53 – Elevació cambra d'aire
- Il·lustració 54 – Força aplicada a la cambra
- Il·lustració 55 – Fitxa tècnica actuador lineal

## ÍNDEX DE TAULES

Taula 1 – Comparativa Benchmarking

Taula 2 – Resum de pressupost



# 1. Introducció

## 1.1. Antecedents

La tetraparèsia espàstica és una malaltia poc freqüent ( 2-4 casos per cada 100,000 persones) que consisteix en un model de paràlisi cerebral. Espasticitat significa rigidesa i les persones que tenen aquesta classe de paràlisi tenen dificultats per controlar algun o tots els seus músculs, que tenen tendència a estirar-se i perdre la força. Normalment són els músculs de les extremitats (braços i cames) o del cap. Aquesta malaltia engloba tant a persones que no poden controlar la funció motora de les extremitats com persones que experimenten paràlisi parcial d'alguna d'elles.

La tetraparèsia pot ser tan espàstica (rigidesa o tensió inusual dels músculs i tendons) com flàccida (els músculs es tornen inerts).

Hi han certes variacions de la malaltia, com seria la paràlisi completa de les quatre extremitats (tetraplegia o quadriplegia), la debilitat de les cames però no dels braços que s'anomena paraparèsia i la paràlisi completa de les cames que s'anomena paraplegia.

Síntomes:

- Debilitat muscular.
- Paràlisi de certes extremitats o parts de certes extremitats.
- Falta del control motriu.
- Reflexes tendinosos deficients o pobres.

Altres possibles efectes són:

- Pèrdua de control de la bufeta o dels intestins.
- Pèrdua de la funció sexual.
- Dificultat per respirar.

La debilitat muscular és produïda quan els impulsos nerviosos que passen per la medul·la espinal són interromputs parcialment. A causa d'això, els músculs connectats a aquests nervis no funcionen correctament.

Existeixen diverses causes possibles de la tetraparèsia; la majoria involucra algun tipus de compressió o dany nerviós, però en altres casos és símptoma de alguna afecció degenerativa:

- Tetraparèsia congènita: la afecció està present des del naixement. La paràlisi cerebral és la afecció congènita més comú de les causes de tetraparèsia.

- La degeneració neurològica pot causar la tetraparèsia espàstica.

- Traumatisme espinal que provoca un dany a la medul·la espinal, com els que causen la ruptura dels discs inter-vertebrals.
- Miopaties agudes.
- Mielitis transversa.
- Encefalitis que afecta al tronc encefàlic.
- Certes infeccions, com la poliomièlitis i el enterovirus.
- Síndrome de Guillian-Barré.
- Malalties de la unió neuromuscular, per exemple, el botulisme.

Abans de poder tractar la tetraparèsia (tractada per un neuròleg) cal identificar la causa subjacent i avaluar la extensió del dany nerviós. Després d'això, depenent de la causa, existeixen diversos tractaments:

- Extirpació quirúrgica dels discs espinals que comprimeixen els nervis.
- Cirurgia per resoldre altres causes de compressió de la medul·la espinal.
- Alliberació quirúrgica del tendó.
- Dispositius d'assistència de ajuda al moviment, com bastons, cadira de rodes...
- Fisioteràpia per endurir els músculs mentre els nervis es recuperen.

### 1.1.1. Exposició del problema

Tot i les variacions de la malaltia, el treball es centra en crear un disseny d'ortesis per a persones que pateixin paraparèsia espàstica (debilitat en les extremitats inferiors), més concretament en la cama esquerra.

Aquest disseny s'enfoca en la zona del turmell i del taló del peu esquerra. Es centra en aconseguir un disseny de ortesis que ajudi al portador a efectuar un moviment d'extensió (moviment d'estirament dels tendons i músculs del turmell) i de flexió (moviment de contracció dels tendons i músculs del turmell), dos moviments necessaris per poder caminar correctament.

Aquest disseny va dirigit a una persona real en particular, la qual té dificultats a l'hora de fer el moviment de dosiflexió (explicat properament) i consegüentment té certa dificultat a l'hora de caminar correctament.

Aquest problema ha estat present al llarg de la seva vida i ha desenvolupat mètodes per dissimular aquesta dificultat, fins al punt que a vegades és imperceptible.

Més endavant es parlarà amb més èmfasi sobre les limitacions del portador (capítol 6).

Tot i la varietat de productes i catàlegs existents al mercat amb diverses funcionalitats, no n'hi ha cap centrat amb aquest problema, ja que al ser un cas molt específic de una malaltia rara, no se l'hi ha donat prou èmfasi.

## 1.2. Objectius

L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar una ortesis passiva situada al turmell del portador que li permeti millorar el moviment del peu i l'ajudi com a suport a l'hora de caminar ja sigui absorbint l'esforç que suporta el tendó espàstic o limitant el moviment per tal que no es produeixi la espasticitat.

Tot i que el disseny pot ser adaptat per a tot tipus de pacients amb problemes similars, aquest disseny anirà dirigit a una persona concreta amb paraparèsia espàstica, amb l'objectiu de facilitar-li el moviment de caminar.

## 1.3. Requeriments i abast

El projecte va dirigit a una noia de 20 anys amb paraparèsia espàstica, ja acostumada a la malaltia.

El disseny de la ortesis està regit per les seves limitacions i seguint uns requeriments específics.

### 1.3.1. Requeriments

- A) La ortesis ha de ser discreta
- B) Ha de donar suport als moviments esmentats en el capítol de estudi capacitatiu.
- C) Ha de complir les mesures per tal que a la portadora li resulti còmode.
- D) Ha de ser resistent i suportar forces accidentals (cops)

### 1.3.2. Abast del projecte

Inclou l'estudi de les capacitats personals de la portadora (estudi de causes i conseqüències de la mala mobilitat, incloent informació sobre mètodes de mesura i tractament), possibles solucions, anàlisi de mercat, elaboració de una ortesis que compleixi els requisits i un estudi de funcionalitat d'aquest disseny. Queda fora de l'abast la fabricació de la ortesis.

## 2. Descripció General

Primerament es fa una introducció del turmell i del vocabulari mèdic per tal de comprendre millor el contingut del projecte.

Ens centrarem els moviments que desenvolupa el turmell, així com en la seva anatomia (ossos, músculs tendons...), fisiologia i biomecànica.

L'objectiu d'aquest capítol és obtenir els coneixements bàsics per veure el funcionament de l'articulació.

### 2.1. Conceptes previs

Abans de centrar-se en els moviments del turmell cal definir correctament el concepte de mobilitat en el nostre àmbit.

Així doncs, definim la mobilitat com la capacitat o llibertat d'una articulació per desplaçar-se o rotar lliurement sense ser restringida dintre un rang de moviment determinat.

En aquest projecte es vol fer una ortesis que permeti la mobilitat amb el màxim rang possible de la articulació.

Una ortesis és un element tècnic auxiliar i terapèutic que reconstrueix, substitueix o corregeix les funcions lesionades i que està en contacte amb el cos (veure il·lustració 1).

És important remarcar que, a diferència de les pròtesis, les ortesis són externes al cos. No s'han de confondre amb els exosquelets, ja que aquests tenen l'objectiu augmentar les capacitats físiques de l'ésser humà.



*Il·lustració 1 - Diferents tipus de ortesis*

Podem classificar les ortesis en quatre tipus:

- **Segons les seves funcions:**
  - **Estabilitzadores o Immobilitzadores**

Mantenen una posició i impedeixen moviments no desitjats, de manera que s'utilitzen com a suport d'un segment paralitzat o per disminuir l'amplitud articular d'un segment inflammat i dolorós.

Es poden utilitzar en paràlisis flàccides o espàstiques.

El grau d'immobilització varia segons el tipo de ortesis utilitzada.

En l'àmbit de l'anatomia patològica són les de major utilitat.
  - **Funcionals**

També anomenades dinàmiques. Porten incorporat un element elàstic que permet mobilitzar un segment d'un membre paralitzat.
  - **Correctores**

Indicades per corregir una deformitat esquelètica. Són les més efectives si s'utilitzen durant el desenvolupament infantil.
  - **Protectores**

Mantenen la alineació de un membre lesionat.
- **Segons la extremitat a la qual està destinada:**
  - Extremitat superior (Braç, colze, mà).
  - Extremitat inferior (Peu, turmell, genoll, peu).
  - Dorso-lumbar (columna vertebral).
- **Segons el temps a utilitzar:**
  - **Temporals**

Són utilitzades per trastorns limitats de temps.
  - **Definitives**

Són utilitzades en dèficit o discapacitat permanent.

- **Segons les funcions:**

- **Actives**

Substitueixen de forma mecànica una funció muscular o lligamentosa.

Aquestes es divideixen en:

- Actives dinàmiques: Les quals s'encarreguen de substituir una funció muscular.
    - Actives estabilitzadores: Les quals s'encarreguen de substituir la funció dels músculs i/o lligaments.

- **Passives**

Estan destinades a mantenir un segment del sistema locomotor en una determinada posició, quan no pot mantenir-se per ell mateix.

Es divideixen en:

- Passives correctores: S'encarreguen de corregir alguna deformitat.
    - Passives posturals: La seva funció és mantenir un angle articular obtingut per altres medis (quirúrgics per exemple).

Les ortesis actives permeten ajudar als seus portadors en les tasques de rehabilitació guiant els moviments a través de moviments controlats i, així, reaprendre els patrons de motricitat i donar un suport al moviment amb pacients amb problemes físics.

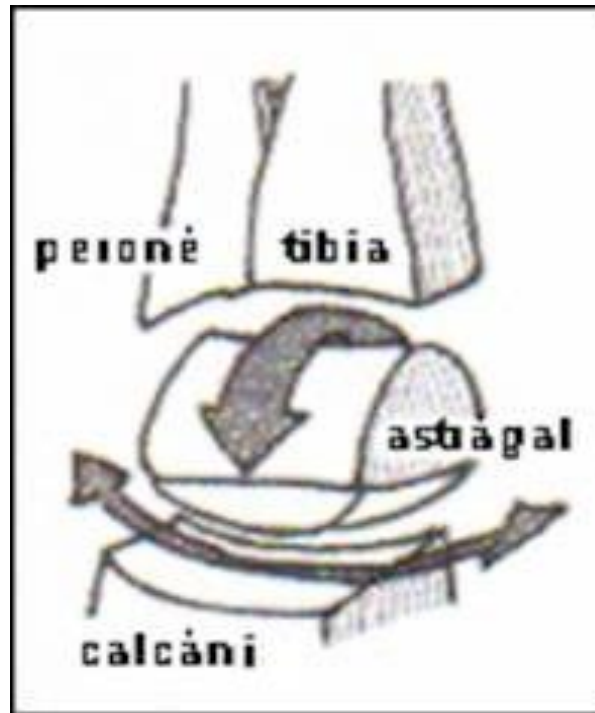
## 2.2. Anatomia de turmell

El turmell és l'articulació formada al punt d'unió del peu i la cama. Consta de tres ossos (tíbia, peroné i l'astràgal), tal i com s'observa en la il·lustració 2 i està dividit per:

- Una peça superior, formada per la tíbia i el peroné, que formen un bloc, el qual presenta un forat amb forma de segment cilíndric a la superfície inferior.
- Una peça inferior, constituïda per l'astràgal, que suporta la superfície cilíndrica inferior de la part superior (Il·lustració 3).



Il·lustració 2 - Articulació turmell



*Il·lustració 3 - Juntes articulació*

Les dues poden realitzar els moviments de flexió i d'extensió al voltant de l'eix comú.

El cilindre massís que formen, realment es correspon amb la tròclea astragalina que contacta amb la careta articular de la cara externa del mal·lèol medial (tíbia) i amb la careta articular de la cara interna de mal·lèol extern (peroné). L'articulació del turmell serveix d'unió entre el segment inferior de la cama i el peu. Constitueix una unitat funcional formada per la suma de dos articulacions morfològicament independents, la tibioperonea inferior i la tibioperonea astragalina

L'articulació tibioperonea astragalina és la principal del turmell i posa en contacte els segments inferiors de la tíbia i el peroné amb l'astràgal. Pertany al gènere de les articulacions en politja (sinovials). Està formada per les extremitats distals dels ossos de la cama, constituint la mortalla tibioperonea que s'articula amb l'astràgal. Per part de la tíbia intervé la cara inferior del mal·lèol tibial, per part del peroné la cara interna de mal·lèol peroneal, i per part de l'astràgal la seva cara superior. D'aquesta manera queda una articulació troclear formada per tres ossos: tíbia, peroné i astràgal.

L'articulació tibioperonea inferior posa en contacte els segments inferiors de la tíbia i el peroné. Està reforçada per dos lligaments, un anterior i un altre posterior. És una articulació de gran rellevància funcional que permet cert grau de separació entre la tíbia i el peroné durant els moviments de flexió i extensió del peu. A més fa possible el moviment de rotació del peroné.

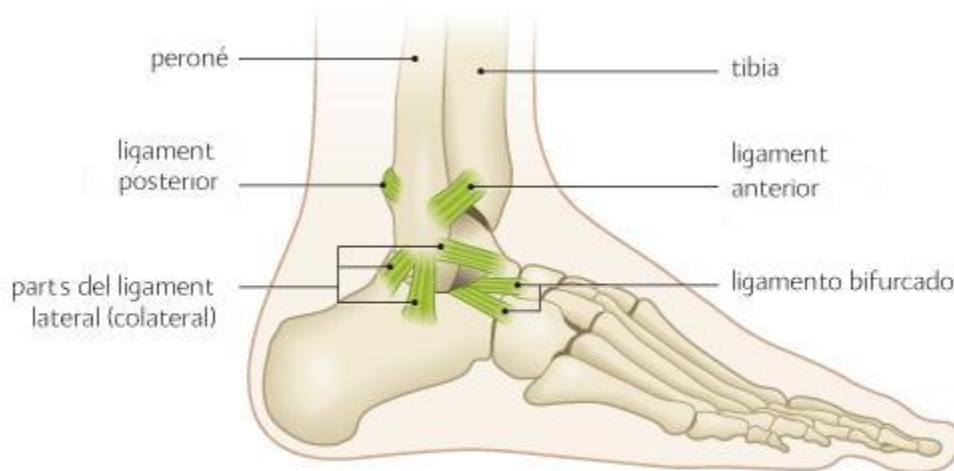
El calcàni i l'escafoides, tot i que no formen part del turmell, també contenen lligaments importants.



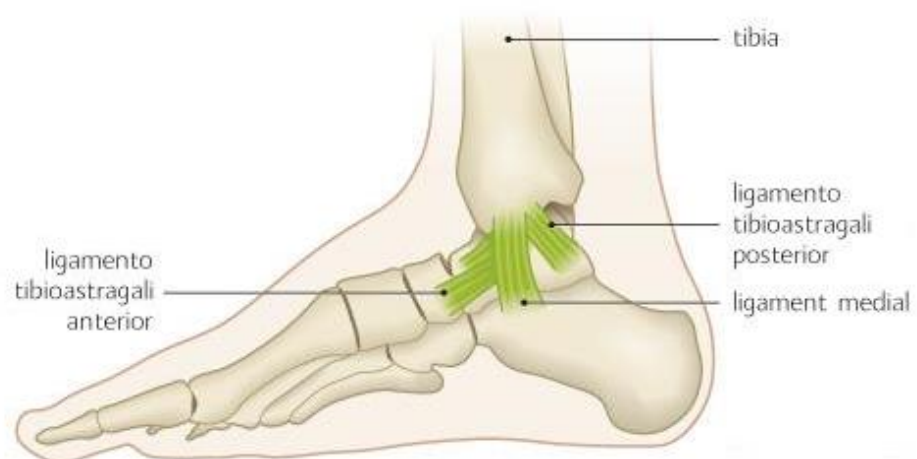
Els lligaments són una altra part important de l'articulació, ja que reforcen la càpsula sinovial (membrana encarregada de l'astaticitat dels ossos).

Els lligaments més importants són:

- El lligament deltoide o lligament lateral intern (il·lustració 4): Uneix l'astràgal i el calcani amb la tibia; es troba al costat interior del turmell.
- Els lligaments laterals externs (il·lustració 5): Formats per el peroneoastragalí anterior, el peroneoastragalí posterior i el lligament calcani fibular. Uneixen l'astràgal i el calcani amb el peroné; es troben al costat exterior del turmell



*Il·lustració 4 - Zona externa del peu*



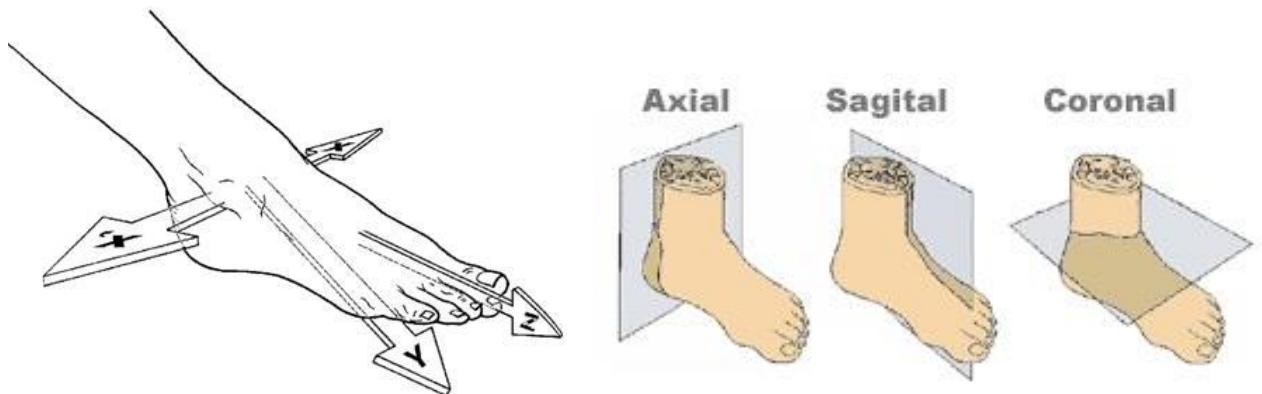
*Il·lustració 5 - Zona interna del peu*

En tots dos casos, els lligaments tenen tres vessants; des del mal·lèol tibial fins a l'escavoide, des del mal·lèol tibial fins a l'astràgal i des del mal·lèol tibial fins al sustentacular tali de calcani (apòfisi menor), també conegut com a deltoide per la forma a la lletra grega delta ( $\Delta$ ).

### 2.3. Moviments del peu

Tot i que l'objectiu és facilitar el moviment del peu, el treball es centrarà únicament amb la intersecció del retropeu (zona posterior del peu), ja que és la zona on cal buscar una solució per garantir el correcte moviment.

Es poden diferenciar diferents eixos (il·lustració 6):



*Il·lustració 6 - Eixos del peu*

- 1) A l'articulació tibioperonea-astragalina podem definir l'eix transversal X. En aquest eix es permet el moviment de flexió / extensió del peu, realitzats en el pla sagital.
- 2) A l'eix longitudinal de la cama podem definir l'eix Y, que permeten els moviments d'adducció i abducció del peu; els quals es realitzen en el pla transversal.
- 3) En el pla frontal, es realitzen els moviments de pronació i supinació (aixecar i abaixar el peu), situats en el pla horitzontal Z.

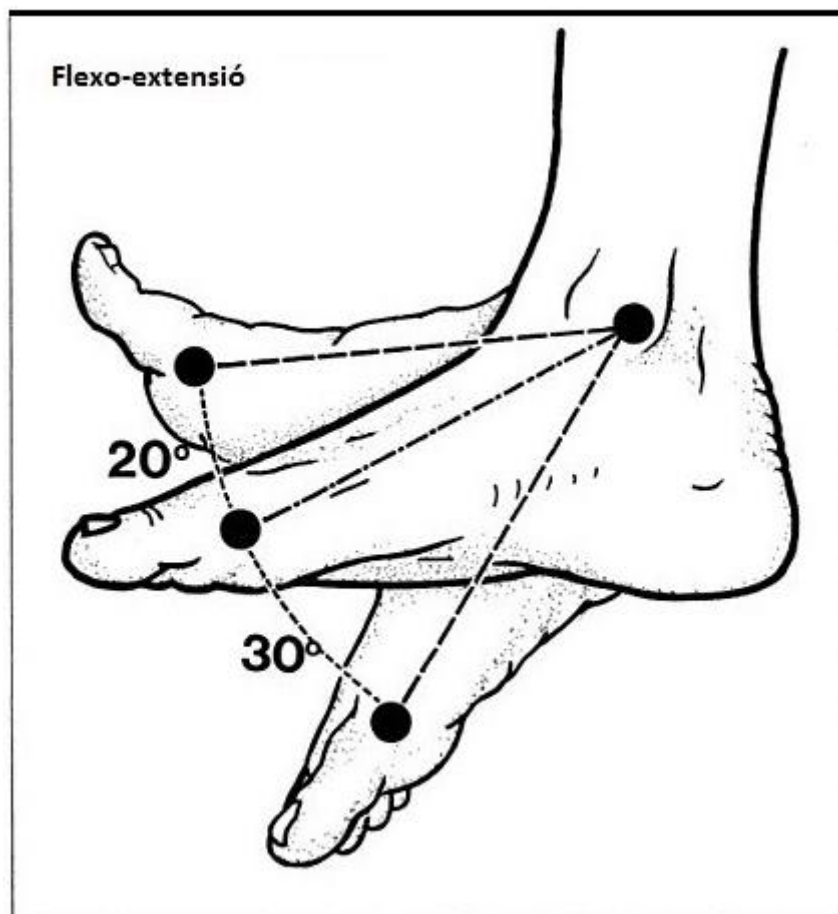
### 2.3.1. Eix transversal X (Dorsiflexió / Extensió)

Aplicant l'articulació tibioperonea-astragalina, consisteix en l'extensió del turmell i suposa una rotació respecte l'eix X.

Quan la planta del peu és perpendicular a l'eix longitudinal (Y) de la cama, es considerat com a origen del moviment.

La dorsiflexió (moviment de flexió o flexió dorsal) és el moviment que redueix l'angle entre el peu i la cama, és a dir, els dits del peu s'acosten a la espinilla (veure il·lustració 7). Una restricció d'aquesta mobilitat afectarà les altres articulacions responsables de la flexoextensió, com són genolls, malucs i la columna vertebral.

Per altra banda, el moviment invers (moviment que augmenta l'angle entre el peu i la cama) s'anomena extensió o flexió plantar.



*Il·lustració 7 - Flexió / Extensió del peu*

Cal remarcar que, a causa de que les cares laterals de l'astràgal no són simètriques, la geometria de les superfícies articulars (recorregut que té una articulació) no són simètriques, i això provoca una rotació del peu durant el moviment de flexió.

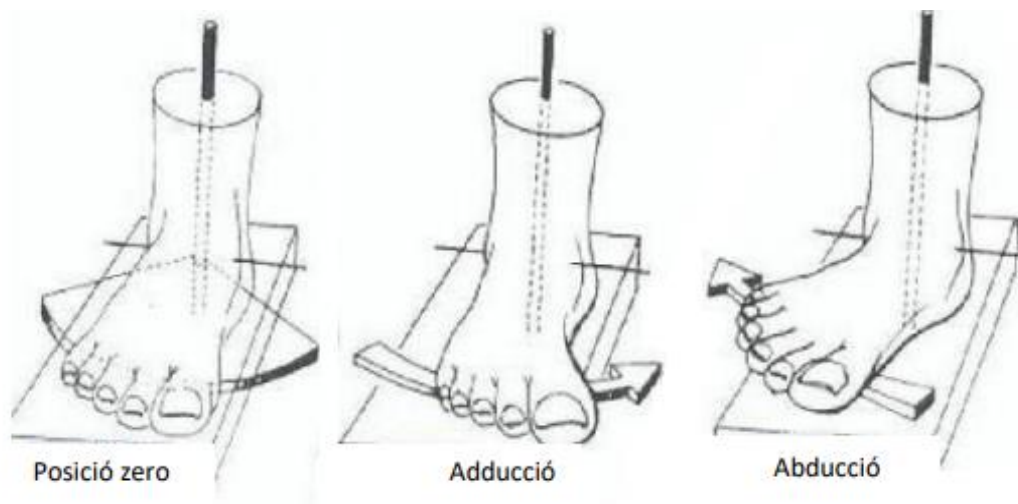
Tampoc hi ha simetria en la forma del astràgal ja que és més llarga per la part posterior que per la frontal i provoca un major grau d'extensió que de flexió ( $34.3 \pm 12.6^\circ / 30 \pm 12.6^\circ$ ).

L'estabilitat també varia segons la posició del peu; quan el peu forma un angle de  $90^\circ$  amb la tibia (posició de flexió dorsal i posició neutra) l'estabilitat és major, mentre que durant la flexió plantar és menor.

Això es pot veure fàcilment en quan una persona camina amb talons (peu en flexió plantar, la seva estabilitat és menor, i a més, els lligaments i músculs estan sotmesos a tensions més elevades. Freqüentment aquesta posició sol estar implicada a possibles esquinços de turmell.

### 2.3.2. Eix longitudinal Y (Adducció/Abducció)

Aquest moviment és realitzat quan la punta del peu gira sobre l'eix pla; adducció quan la rotació és cap a dintre i abducció cap a fora (veure il·lustració 8).

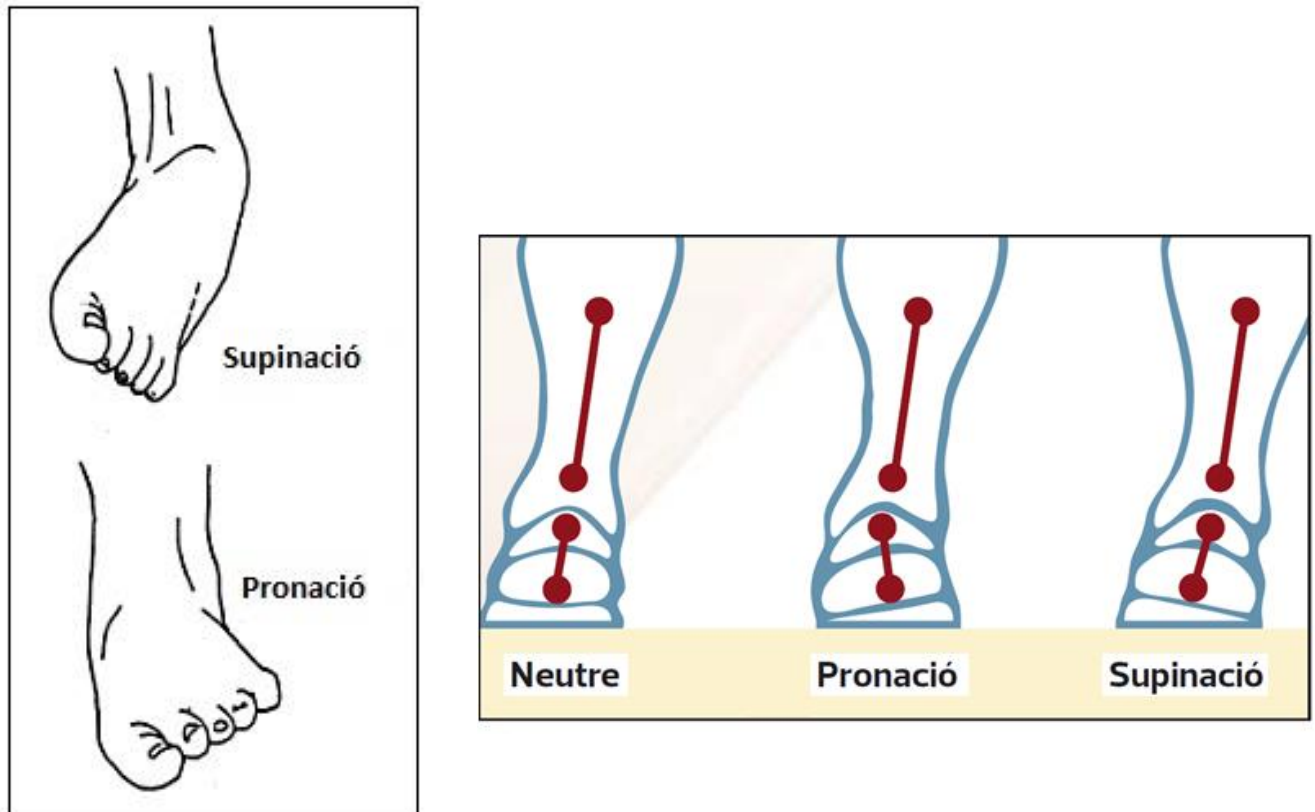


Il·lustració 8 - Adducció / Abducció del peu

Aquest moviment és possible gràcies a l'articulació mediotarsiana o articulació de Chopart i, l'astràgal, el calcani i l'escafoide en la part interna del peu i el calcani i el cuboide a la part externa. També és ajudat pels moviments de rotació del genoll que permeten una amplitud de  $35$  a  $45^\circ$ .

### 2.3.3. Eix horitzontal Z (Pronació / Supinació)

La pronació consisteix en la rotació de la planta del peu cap a l'interior respecte l'eix Z, mentre que la rotació cap a l'exterior s'anomena supinació (Veure figura 9).



Il·lustració 9 - Pronació / Supinació del peu

Aquest moviment es pot dur a terme a causa de la formació d'una articulació formada per les articulacions subastragalina i mediotarsiana.

Els moviments de pronació i supinació no es poden realitzar de manera independent.

El moviment d'inversió consisteix en el moviment de adducció juntament amb la supinació i una extensió. Si no hi ha una extensió del peu, s'anomena varus.

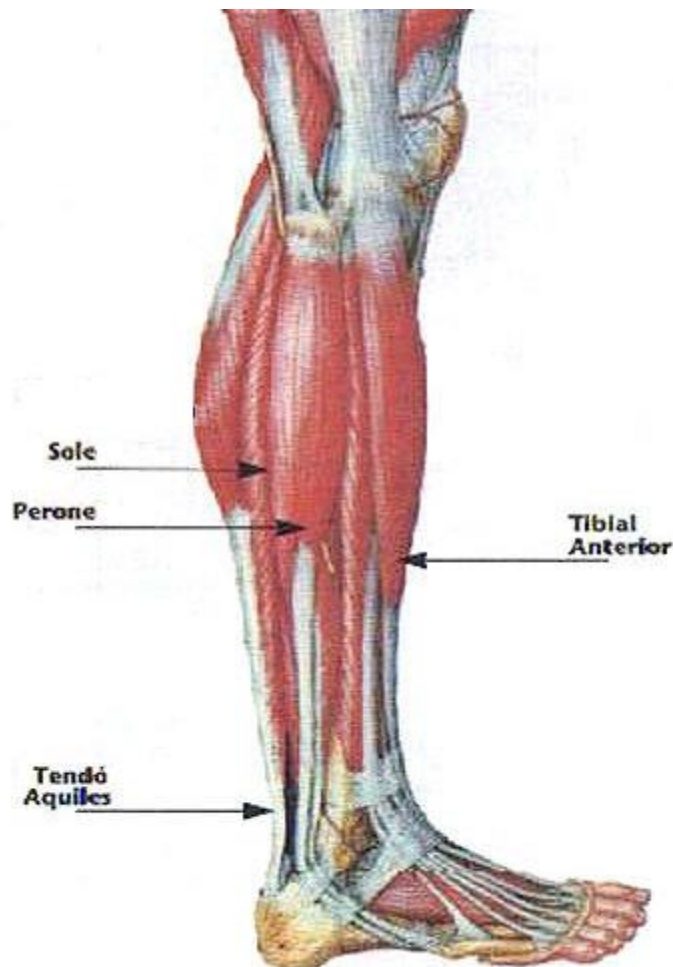
Si l'adducció és acompanyada amb un moviment de pronació i una flexió s'anomena eversió i, si no hi ha el moviment de flexió, valgus.

### 3. Estudi capacitatiu

En aquest capítol s'estudiarà la persona que pateix la malaltia i s'analitzarà quines són les seves limitacions, per tal de desenvolupar una ortesis que satisfaci les seves necessitats.

#### 3.1. Zona afectada

Tot i que la malaltia pot produir espasticitat o rigidesa a diferents parts del cos, en aquest cas només està present en la part inferior del bessó (múscul gastrocnemi), concretament al sole (il·lustració 10).



*Il·lustració 10 - Músculs bessó*

La persona afectada pateix espasmes (contraccions) en determinats moviments que provoquen una disminució considerable a la força del múscul i desencadenen la fallada del moviment, caient al terra o havent de recolzar-se amb algun objecte extern.

A causa de la persistència de la malaltia, ha desenvolupat mecanismes per tal d'evitar aquesta contracció i la pèrdua de la força a la cama i ha après a caminar sense que hi hagi contacte entre el taló del peu i el terra.

Per tal de substituir la funció del talo a l'hora de absorbir l'impacte del terra, camina utilitzant només la punta del peu (veure imatge 11).



*Il·lustració 11 - Alternativa al talo*

Això fa que, tot i poder caminar correctament i sense necessitat d'objectes externs, tingui una mecànica poc habitual a l'hora de fer el pas, que podria desencadenar desviacions a la columna i problemes fisiològics a llarg termini.

També té certs problemes a l'hora de fer altres activitats com anar en bicicleta, saltar i practicar qualsevol esport que requereixi un esforç que hagi de suportar la zona inferior de la cama esquerra.

Menys freqüentment pateix atacs espàstics de curta durada tot i tenir la cama en repòs, els quals desapareixen en poc temps sols, o fent petits estiraments de bessó.

### 3.2. Limitacions en la dorsiflexió

Encara que l'espasticitat apareix en moments de repòs i altres activitats, el treball es centrarà únicament en la millora de la dorsiflexió del peu al caminar, ja que és la causa de aparició més freqüent i és el que genera més molèsties ja que durant el dia ha de fer llargs trams caminant i una solució del problema durant aquests trajectes li suposaria una gran avantatge.

## 4. Tractaments utilitzats

Tot i que ha aconseguit acostumar-se a les limitacions que li ocasiona la malaltia, porta molt de temps fent tractament per tal de frenar o disminuir els efectes de la paraparèsia.

Es poden diferenciar dos tipus de tractaments; els mèdics, els quals estan supervisats per personal qualificat i que impliquen intervencions quirúrgiques o mèdiques i els físics que són supervisats per fisioterapeutes i, tot i no tenir una millora tan clara, poden ajudar a millorar l'elasticitat del múscul o a la recuperació després dels tractaments mèdics.

En aquest treball només s'exposaran els tractaments fisioterapeutics.

### 4.1. Tractaments fisioterapeutics

Una alternativa amb menys risc són els exercicis i estiraments de la zona afectada. Aquests poden substituir els tractaments mèdics (poc recomanable) o complementar-los. Els exercicis proposats poden ajudar en gran part a disminuir les limitacions del moviment.

Els exercicis desenvolupats per la millora no són tan efectius com poden ser els tractaments mèdics però poden practicar-se en major mesura i, al llarg del temps, aconseguir una millora en l'elasticitat i força del múscul.

L'individu ha assistit a un fisioterapeuta amb regularitat el llarg de la seva vida, el qual l'ha ajudat a guanyar elasticitat i força a la zona afectada.

És important remarcar que aquesta pràctica ha d'executar-se amb regularitat, ja que en cas de deixar d'entrenar, el múscul perd tots els beneficis que havia guanyat.

Es poden diferenciar els exercicis en dos tipus; els exercicis de força i els estiraments.

#### 4.1.1. Exercicis de força

L'objectiu dels exercicis és millorar el rendiment físic del múscul. Els exercicis de força busquen la hipertròfia del múscul (creixement muscular) sotmetent-lo a càrregues (poden ser el propi pes de la persona o càrregues externes com peses) i realitzant varies repeticions.

Amb això s'aconsegueix microfractures al múscul que, amb una bona alimentació, el cos recompensa augmentant-lo així de tamany i alhora augmentant la càrrega màxima que pot suportar.

És important no confondre el entrenar amb pes amb quedar-se "com un culturista", ja que les dones generen deu vegades menys testosterona que els homes (hormona encarregada del creixement muscular), i arribar als cossos exposats en revistes de culturisme és impossible sense la aportació externa de més hormones.



Existeixen diferents entrenaments de força, els quals tenen diferents objectius:

- Hipertròfia muscular màxima: Entrenament amb la màxima càrrega possible i poques repeticions. L'objectiu és crear les màximes microfractures al múscul possibles per obtenir una hipertròfia màxima i augmentar de volum. El treball és anaeròbic (sense requeriment d'oxigen). És l'entrenament dels culturistes.
- Crossfitt (veure il·lustració 12): L'objectiu original d'aquest entrenament / esport era aconseguir el cos perfecte (relació entre la força, l'equilibri i l'agilitat). Els exercicis consisteixen en treballar amb un pes moderat a altes intensitats (en aquest cas es treballa de forma aeròbica, a diferència del anterior). Els exercicis solen ser dominades, pes mort...



*Il·lustració 12 - Exercici de crossfitt*

- Powerlifting / Strongman (veure il·lustració 13): Tot i no ser la mateixa disciplina, tan el powerlifting com els strongmans tenen com a objectiu l'aixecament del màxim pes possible. No es solen fer més de 1 o 2 repeticions de cada exercici, i requereix una tècnica bona ja que pot provocar greus lesions a causa de les grans tensions que han de suportar els músculs a causa dels pesos utilitzats. La principal diferència és que els strongmans són més grossos i grassos que els powerlifters ja que la seva dieta té com a objectiu guanyar pes ja sigui en forma de múscul o de grassa. Els exercicis són únicament pes mort, "sentadilla" i press de banca.



*Il·lustració 13- Entrenament de powerlifting (esquerra) i strongman (dreta)*

- Calistènia (veure il·lustració 14): Tot i no ser exactament una disciplina de força, la calistènia té com a objectiu aguantar el màxim temps possible en tensió el múscul. Són exercicis on el múscul es troba en tensió (normalment penjat de una barra) i es fan moviments espectaculars. Existeixen moviments dinàmics (on l'atleta fa piruetes mentre esta penjat a la barra) i moviments estàtics (on es demostra una gran força pujant sobre la barra amb l'única força dels braços i dorsals).



*Il·lustració 14- Entrenament de calistènia*

També existeixen més modalitats menys practicades.

En el nostre cas la persona afectada practica exercicis amb poc pes a llargues repeticions per millorar el rendiment, de manera que el múscul s'acostumi a treballar amb tensió.

Això és perquè en el cas de treballar amb grans pesos, el múscul podria contraure's de cop (atac espàstic) i provocar lesions.

Seguidament s'explicaran algun dels exercicis proposats per tal de millorar el rendiment de força del múscul afectat.

#### 4.1.1.1. Sentadillas o squats

La sentadilla és un exercici compost de cos complet on treballen principalment els músculs de les cuixes, el maluc i els glutis, els quàdriceps i els isquiotibials a més de reforçar els ossos, lligaments i insercions dels tendons de tot el tren inferior.

Els esquats es consideren un exercici fonamental per augmentar la força i mida de les cames, així com la força dels abdominals. Sovint es fan squats per millorar l'estabilitat de l'esquena, les cuixes i el maluc. Des d'un punt de vista isomètric, l'esquena, els abdominals, els músculs del tronc, els músculs costals, les espatlles i els braços tenen un paper fonamental en l'exercici i, per tant, també es beneficien quan l'esquat es duu a terme amb la forma adequada.

Aquest exercici és extremadament útil en el nostre cas, ja que enforteix indirectament els músculs dels bessons i els lligaments del turmell sense suposar una tensió elevada en la zona dèbil.

Es poden fer amb pes o sense, depenent dels objectius a assolir tal com mostra la il·lustració 15.



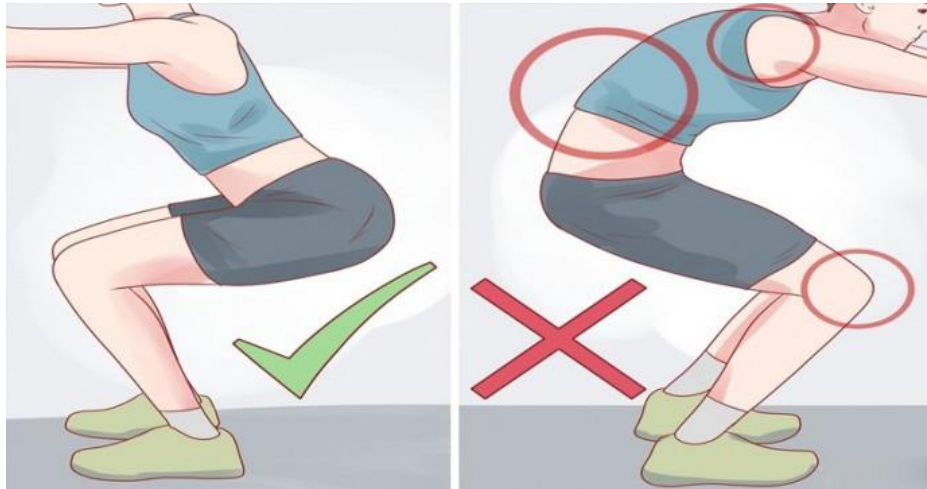
*Il·lustració 15- Exercici de squats*

És molt important realitzar una bona tècnica a l'hora de realitzar l'exercici; cal subjectar una barra amb pes amb les mans (si es fa servir) situada a sobre el trapezi, darrera el coll.

El moviment consisteix en flexionar els turmells, genolls i el maluc baixant el cos però sense perdre la verticalitat fins que les cames formin un angle aproximadament de 90° (il·lustració 16).

Un cop a la posició més baixa cal pujar lentament fins a tornar a la posició inicial.

Una mala execució del exercici pot provocar lesions, normalment als genolls.



*Il·lustració 16- Com fer una sentadilla*

#### 4.1.1.2. “Sentadillas” amb pilota medicinal

Un altre exercici molt beneficiós és el de fer “sentadillas” amb pilotes medicinals (veure il·lustració 17). Una pilota medicinal és una pilota que pesa (1 kg, 2Kg, 5Kg...).

Gràcies a aquest element es poden fer una gran varietat d'exercicis els quals poden ajudar a enfortir la zona del turmell.

Es parlarà de dos exercicis que es poden fer, però existeix un gran nombre de variants de l'exercici que treballen el múscul de igual manera.

El primer consisteix en situar-se amb les cames i genolls plegats (com en la posició inferior de les “sentadillas”) subjectant la pilota medicinal amb les mans. Seguidament cal aixecar-se de manera explosiva (ràpida) llençant la pilota verticalment cap amunt.



*Il·lustració 17- Exercici 1 pilota medicinal*

Aleshores cal recollir la pilota i situar-se altre cop en la posició inicial.

Aquest exercici es treballa de manera molt similar a les sentadillas o squats i és un bon complement per variar els exercicis i que no suposin molt avorrits per el que els executa.

El segon exercici consisteix en subjectar la pilota estan de peu. Seguidament cal deixar la pilota al terra doblant les cames i sense arquejar l'esquena.

Sense deixar anar la pilota cal fer una flexió sobre d'ella i aixecar-se explosivament fent un salt amb la pilota a les mans (veure figura 18).



*Il·lustració 18- Exercici 2 pilota medicinal*

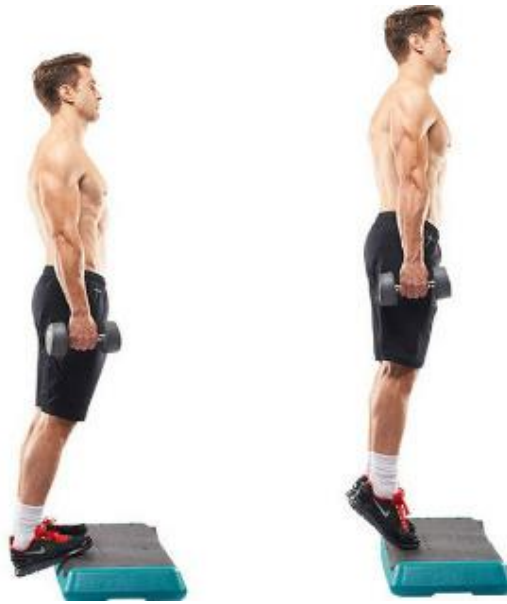
En aquest exercici es treballa també el fons (capacitat de resistir el cansament) de la persona ja que és un exercici aeròbic molt complet.

#### 4.1.1.3. Elevació de taló

Aquest exercici està centrat únicament amb els bessons ja que cap altre múscul hi intervé.

Cal situar-se amb la part davantera del peu (punta) sobre un element que formi un escaló. Partirem d'una posició on el taló està mes avall que la punta. Seguidament cal aixecar el taló amunt procurant sempre que el tendó no s'estiri mes del que li és permès. Finalment es torna a la posició inicial (veure figura 19).

Aquest exercici es pot fer amb pes o sense i fins i tot existeixen màquines per fer aquest exercici amb més comoditat.



*Il·lustració 19- Exercici elevació de taló*

Existeixen una àmplia gama de exercicis en els quals el turmell i músculs de la vora estan implicats i poden ser molt beneficiosos.

A més, els exercicis proposats tenen moltes variants que poden ser interessants a l'hora de practicar-los.

#### 4.1.2. Exercicis d'elasticitat

Per altre banda existeixen exercicis que no tenen com a objectiu millorar la capacitat de aixecar pes del múscul, sinó que es pretén millorar l'allargament que pot tenir. Aquests exercicis s'anomenen estiraments.

L'estirament fa referència a la pràctica d'exercicis suaus i mantinguts per preparar els músculs per a un major esforç i per augmentar el rang de moviment en les articulacions.

Te diversos beneficis:

- Augmenta la flexibilitat dels músculs.
- Disminueix la quantitat d'àcid làctic en els músculs.
- Redueix la probabilitat de lesions.
- Millora la coordinació de músculs agonistes-antagonistes.
- Prevé l'enduriment muscular després de l'exercici.
- Redueix la tensió muscular.
- Facilita els moviments.

Existeixen dos tipus d'estirament:

- Estiraments estàtics: Consisteix en forçar el múscul per tal que progressivament augmenti el seu rang de moviment. El seu procediment és el següent; s'estira el múscul fins al màxim rang que li permeti. A partir del límit permès pel múscul s'estirarà aproximadament un centímetre més fins a sentir una tensió moderada i es sostindrà aquesta posició entre 10 i 15 segons si no se sent dolor. De nou, la tensió haurà de disminuir; en cas contrari cal relaxar la postura. Si la tensió de l'estirament augmenta i l'estirament es manté o causa dolor, vol dir que s'està estirant en excés.
- Estiraments dinàmics: L'estirament dinàmic consisteix en forçar lleument el múscul alhora que aquest està en moviment. Els resultats no són tan òptims com en els estiraments estàtics, però el risc de lesió es menor. Son molt utilitzats en escalfaments abans de practicar algun esport.

En el nostre cas ens centrarem ens els estiraments estàtics i posarem algun exemple de estirament beneficiós per millorar l'elasticitat del bessó i, així, augmentar el rang de moviment del peu.

#### 4.1.2.1. Estirament 1 bessó

L'exercici es realitza assentat amb una cama estirada i l'altre flexionada cap enrere.

Cal avançar el cos i allargar les mans per tal de tocar-se la punta del peu.

Si no és possible arribar-hi, cal forçar lleugerament el cos per tal de arribar més lluny o demanar ajuda a un company perquè t'apliqui una força per l'esquena.

En cas que es pugui arribar a la punta del peu, cal utilitzar-la de reforç per tal de empènyer el cos mes endavant (veure figura 20 ).

Recordar que l'objectiu dels estiraments és forçar el múscul perquè augmenti el seu rang progressivament.



*Il·lustració 20 - Estirament 1 bessó*

#### 4.1.2.2. Estirament 2 bessó

En aquest exercici es requereix una paret on recolzar-se. Cal posar els dos braços a la paret i avançar la cama que no volem que treballi. La cama a treballar continuarà totalment estirada cap endarrere i haurem d'avançar el cos fins que notem que el bessó està suportant un esforç de tracció. En aquell moment cal mantenir el dolor o forçar-lo una mica més si el dolor és molt lleu (veure il·lustració 21).



*Il·lustració 21 - Estirament 2 bessó*

De la mateixa manera que en els exercicis de força, existeixen una àmplia gamma de estiraments que són beneficiosos per ajudar a millorar les limitacions presentades per la malaltia.



## 5. Anàlisi de mercat

Per tal d'elaborar un disseny útil i funcional cal primer analitzar els models que estan presents en el mercat.

En aquest estudi de mercat s'abarcaran les ortèsis més importants i més utilitzades; al ser una ortesi tan personalitzada en el nostre cas, només s'agafaran les idees mes rellevants que puguin resultar útils. Diferenciant en cada cas si es tracta de una òrtesis activa o passiva

### 5.1. Bota Walker TD ROM Articulada Thuasne

Es tracta d'una ortesi de la casa Walker, tot i que hi ha diferents marques que desenvolupen productes similars (il·lustració 22).

El seu ús està destinat a la recuperació del turmell en cas de esgínc o trencament. Permet al portador caminar mantenint una àmplia estabilitat gràcies a la seva amplada i a la forma de la sola. També permet graduar el diàmetre interior (forat del peu) per tal de que sigui adaptable a qualsevol persona. Té una alçada total de 36 cm.

És una ortesi passiva, ja que inmovilitza el turmell en una posició fixe. Tot i això, aquest model incorpora un sistema que permet fixar l'angle del peu en diverses posicions.

El seu rang de gir va entre els 0° (90° entre la cama i el peu) i 30° (en sentit antihorari).

Aquesta bota no permet el contacte amb l'aigua, ja que pot malmetre el seu estat; en cas de haver-la de rentar, cal primer separar les parts metàliques de les tèxtils.



## 5.2. Turmellera VALFEET AIR Estabilitzadora

Aquest model es tracta d'una ortesis activa (un model relativament nou) de la marca VALFEET (il·lustració 23).

La diferència amb altres ortesis actives és que té la opció de utilitzar-se com a ortesis pasiva ja que compta amb un sistema de bloqueig de la flexo-extensió utilitzant els cargols de bloqueig o fixació.

Està destinada a la recuperació funcional, immobilització post-lesió, inestabilitat, fascitis plantar i prevenció de lesions durant l'esport ja que permet una total mobilitat de flexo-extensió tot i tenir un efecte de suport i estabilització lateral del turmell.

Està composta per dues vàlvules termoplàstiques mal·leolars articulades amb el suport plantar i un sistema de forratge inflable al voltant dels mal·leols per tal de poder tenir una millor adaptació individual i millor estabilitat.

Existeixen diferents models depenent de la talla a utilitzar.



Il·lustració 23 - Turmellera VALFEET AIR

### 5.3. Ortèsis Antiequino Rancho de los Amigos Antiequino TP-2102 de Orliman

Potser una de les òrtesis més lleugeres i simples del mercat, Orliman presenta un model fet de polipropilè d'alta densitat injectat (il·lustració 24).

Aquest disseny permet una elasticitat al tendó d'Aquiles permetent uns moviments de flexió plantar dorsal mentre es camina, evitant així la caiguda del peu en les fases de balanceig (manté el peu a 90°).

Aquest model permet petites adaptacions i modificacions aplicant calor mitjançant una pistola d'aire calent.

També manté una correcció postural durant la fase de repòs.

Està enfocada a persones amb una limitada dorsiflexió del peu, hemiplegies, retraccions del tendó d'Aquiles, lesions del nervi ciàtric popliti extern ...

També es ven en diferents talles depenent del tamany de la cama del client i algunes marques les fabriquen d'altres materials com fibra de carboni.



*Il·lustració 24 - Ortèsis Antiequino Rancho de los Amigos Antiequino TP-2102*

#### 5.4. Boxia – Ortesi antiequino

De la mateixa marca que el model anterior, Boxia és un disseny discret, comfortable, flexible i que no ocupa espai al calçat, essent així fàcil d'adaptar. Està fabricat totalment amb teixits i elastòmers (il·lustració 25).

Està dirigit a persones amb paràlisis flàcides i equinisme.

És un producte que té com a objectiu ser comfortable i estètic, fins al punt que pugui confondre's amb un complement més de la manera de vestir-se sense perdre la seva funcionalitat.

Està compost per dues parts; una cingla supramaleolar per sobre dels metatarsals i un suport d'unió, antirelliscant, per fixar la llengüeta i els cordons de les sabates mitjançant un anclatge tipo ganxo. Les dues parts s'uneixen mitjançant un cable elàstic per la tracció, regulable (major o menor flexió).

El dispositiu eleva el taló, permetent la flexió plantar immediatament després de la fase d'enlairament.

Evita el risc d'ensopegades amb elements comuns, com catifes, vorades...



*Il·lustració 25 - Boxia – Ortesi antiequino*

### 5.5. Turmellera Nocturna per Fascitis Plantar Futuro de 3M

Turmellera dissenyada específicament per donar un major suport al peu, arc plantar i taló de nit (il·lustració 26).

Disminueix la inflamació i la tensió de la inserció de la fàscia mentre dorms. Manté la posició recomanada del peu per al tractament nocturn.

Existeixen al mercat una molt àmplia varietat del producte, els quals tracten diversos casos específics, però tots estan dissenyats per tal de treballar durant el son, mantenint la posició desitjada del peu.



*Il·lustració 26 - Turmellera Nocturna per Fascitis Plantar Futuro de 3M*

## 5.6. Avaluació de l'anàlisi de mercat

De les ortesis analitzades anteriorment es farà una comparativa analitzant quins són els avantatges / inconvenients i que proporcionen o solucionen.

Aquesta taula proporciona idees per tal de desenvolupar el disseny final del nostre producte, enfocat a tractar el problema descrit en el treball.

Taula 1 – Comparativa Benchmarking

| Model  | Acció   | Ajustable                                     | Utilització |
|--|---|---|-------------|
| Bota Walker TD ROM   | Passiva   | Fins 30°                                      | Post-lesió  |
| Turmellera VALFEET AIR                                     | Passiva   | 180° (cal cargolar-la a la posició desitjada) | Post-lesió  |
| Ortesis Antiequino Rancho de los Amigos Antiequino TP-2102 | Activa (amb certa mobilitat depenent de la flexibilitat del material) | NO  | Diària      |
| Boxia – Ortesis antiequino                                 | Activa  | NO  | Diària      |
| Turmellera Fascitis Plantar Futuro de 3M                   | Passiva   | NO  | Nocturna    |

Es pot veure que la majoria d'ortesis estudiades són del tipus passiu, destinades a la recuperació o a la millora de la posició del peu durant la nit.

Les ortesis de tipus actiu no són ajustables ja que permeten la mobilitat del turmell.

En aquest punt es començarà a dissenyar una ortesi de tipus activa que doni suport al moviment de dorsiflexió mentre es camina.

## 6. Requeriments i especificacions de disseny

Un cop analitzades les principals ortesis disponibles al mercat cal definir clarament els requisits que ha de complir el disseny per garantir-ne la utilitat.

Molts dels problemes que la persona pateix ja han estat descrits anteriorment, per tant, caldrà fer un resum de les limitacions que cal suplir durant el disseny:

- 1) La persona afectada pateix Paraparèsia espàstica i no pot controlar la resposta del tendó quan aquest està suportant esforç.
- 2) Pateix atacs d'espasmatisme en moments puntuals, encara que el tendó no estigui sota tensió.
- 3) L'elasticitat de la zona del turmell és quasi nul·la, tot i treballar-la amb exercicis per tal de millorar-la.
- 4) A causa de la limitació del rang del tendó, no pot caminar correctament, havent de buscar sistemes per compensar aquesta limitació.

Per tal de facilitar el dia a dia de la persona afectada, s'elaborarà un disseny d'una ortesi de turmell, per tal de donar suport al caminar, més concretament durant la dorsiflexió (moment on el tendó està suportant força a tracció).

Els requeriments de disseny del projecte són:

- Eliminar parcial o totalment la tensió produïda per la tracció del tendó.
- Permetre el moviment d'extensió del peu en l'eix X.
- Permetre completament el moviment d'adducció i abducció en l'eix Y.
- Permetre completament el moviment de pronació i supinació en l'eix Z.
- Evitar materials que puguin ocasionar al·lèrgies o que siguin massa rígids i puguin provocar molèsties.
- Garantir la comoditat del portador.
- Lleugeresa (Pes inferior a 5 Kg).
- Adaptabilitat anatòmica.
- Comoditat a l'hora de caminar.
- Volum disminuït, evitar grans envergadures.
- Possibilitat de rentat del producte.
- Complir la normativa vigent.

## 7. Disseny

Tenint present els requisits mencionats en el capítol anterior, es pot començar a proposar un disseny que satisfaci les necessitats esmentades.

### 7.1. Concepte

Cal doncs, un sistema que permeti la dorsiflexió del peu.

Fisiològicament, la possibilitat d'estirar el tendó és nul·la, per això cal buscar un sistema que permeti que la persona pugui recolzar el peu sense haver de estirar el tendó.

Això dona una clara idea del que ens cal aconseguir: si el peu no arriba al terra, cal que el terra arribi al peu (veure il·lustració 27).



*Il·lustració 27 – Elevació tendó*



## 7.2. Principis de solució

Després d'analitzar les opcions disponibles i extreure idees dels productes ja existents al mercat, s'han reduït els dissenys a tres.

Les tres opcions tenen el mateix objectiu; aixecar la sola del peu per tal de suplir la funció desenvolupada pel tendó.

### 7.2.1. Sistema Hidràulic

El mecanisme funciona a través de fluid.

Una bomba de petites dimensions bombeja el líquid que activa un pistó hidràulic. Aquest és l'encarregat d'aixecar la sola fins al taló.

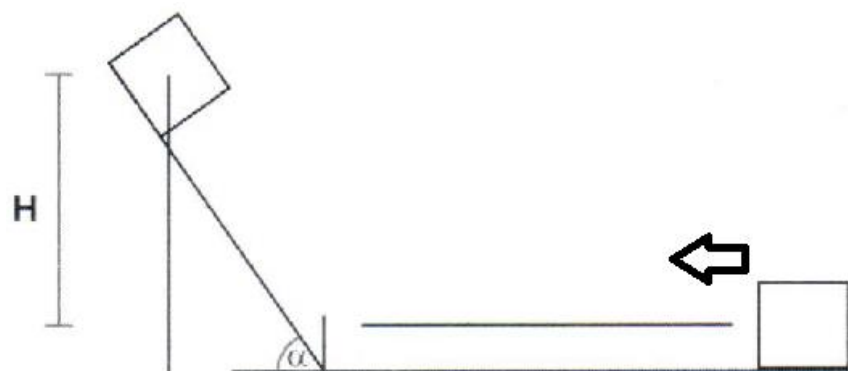
Aquest disseny va ser ràpidament descartat a causa de la complexitat de coordinar els moviments del pistó i de la persona, per la dificultat de trobar els elements necessaris amb unes dimensions tan reduïdes i pel perill d'una fuga de fluid dins la sabata.

### 7.2.2. Sistema mecànic

El principi d'aquest disseny es basa en transformar el moviment angular d'un motor en moviment lineal del taló de la sabata.

D'aquí es poden diferenciar dues versions:

- 1) El motor està acoblat a un actuator lineal (pistó elèctric) el qual està en posició horitzontal (veure il·lustració 28). Aquest impulsa un carro a través d'una guia en forma corba que transforma aquest moviment horitzontal en vertical (angular).



*Il·lustració 28 – sistema mecànic 1*

El problema d'aquesta opció continua essent la dificultat d'aconseguir els elements necessaris amb les dimensions requerides.

- 2) El motor no està acoblat a un actuator lineal, sinó que fa girar una rosca. Aquesta rosca gira dins una altre rosca (una de les dues fixe i l'altre mòbil) on la rosca mòbil puja i baixa, elevant i descendint el taló (veure il·lustració 29).

També es descarta aquesta opció a causa de la poca rapidesa que té el sistema de pujar i baixar el taló; amb motors petits la velocitat de gir no és suficient i els motors amb velocitat suficient són massa grans.



*Il·lustració 29 – Sistema mecànic 2*

### 7.2.3. Sistema pneumàtic

Es decideix finalment per un sistema on el moviment és produït de manera pneumàtica.

En realitat, el sistema no és pneumàticament pur, ja que la pressió és produïda per un motor de corrent contínua acoblat a un pistó (actuador lineal).

Aquest sistema permet controlar amb suficient precisió el moviment del taló en cada situació mitjançant un controlador.

La intenció és fer un circuit tancat d'aire que infla i desinfla una cambra d'aire que elevi el taló.

Tot i tenir una idea clara a priori, cal remarcar la dificultat a l'hora de trobar elements que tinguin una mida apta pel disseny.

Al següent capítol es desenvoluparà amb més detall la proposta escollida.

## 8. Disseny final

Un cop escollit el sistema utilitzat i després de diverses proves es procedeix a desenvolupar el que ha estat el disseny final (il·lustració 30).

Cal tenir en compte que el disseny ha de ser personalitzat; aquest està pensat per una talla 38 de peu (EU), per unes sabates Adidas superstars per dona.

S'ha optat, també, per un disseny simple i minimalista, intentant fer-lo el menys visible possible. Les següents imatges mostren el sistema adaptat a les sabates mencionades.



*Il·lustració 30 – Conjunt sabata*



*Il·lustració 31 – Conjunt sola*

## 8.1. Elements del disseny final

Aquest disseny compte amb peces mecanitzades i de compra (cargols, arandeles, detectors...).

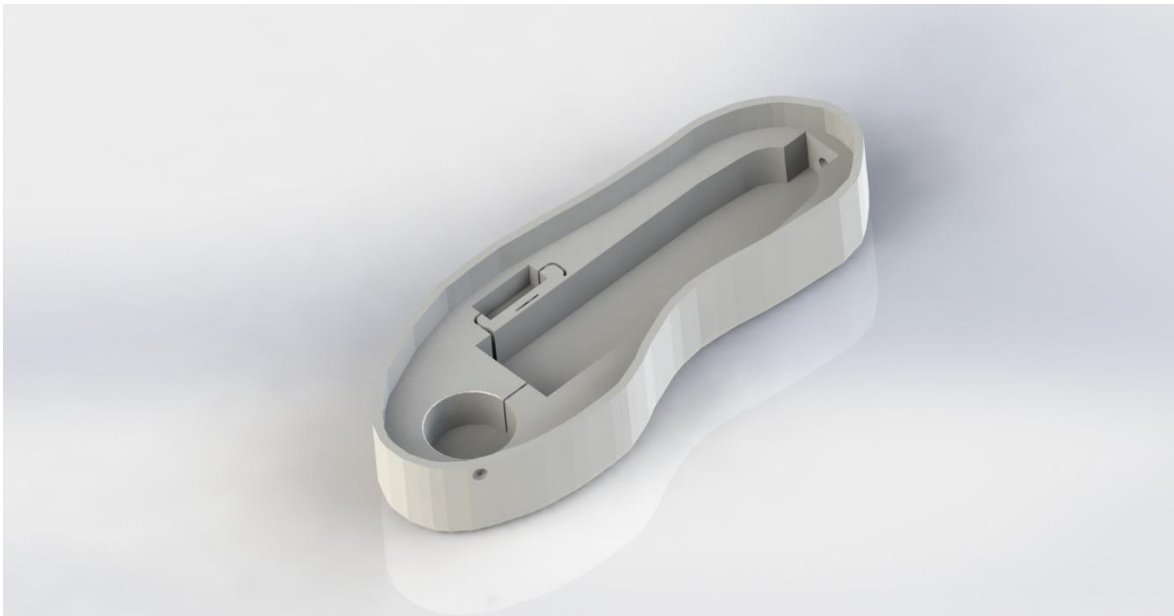
Es farà un resum de cada un dels elements utilitzats:

### 8.1.1. Sola

El principal element del disseny és la sola. Representa el xassís de tota l'estructura ja que fixa la majoria d'elements interns i alhora és elàstica i permet la flexió durant el moviment del portador.

Està feta de goma termoplàstica (TR) mitjançant elements de addició de material. Utilitzem aquest tipus de fabricació per la complexitat de la forma de la sola; fabricar-la d'alguna altre manera resultaria més costos.

La forma de la sola és adaptable a cada sabata i talla, permetent una "customització" completa per part del portador.



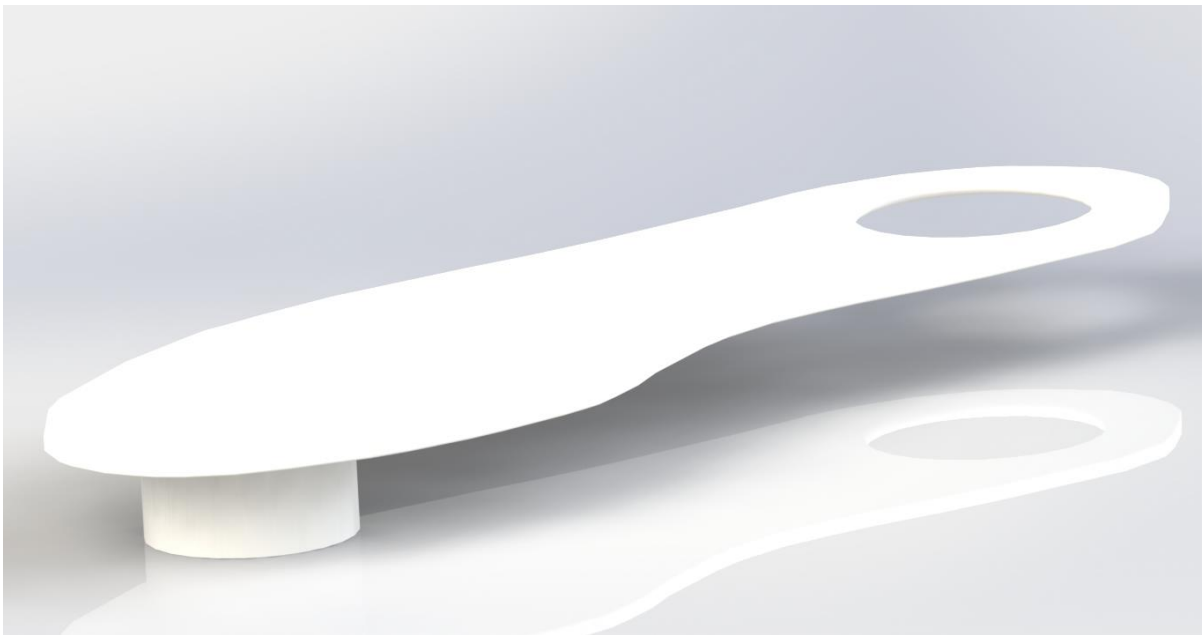
*Il·lustració 31 - Sola*

### 8.1.2. Sobresola

És l'element que cobreix la sola i la separa de la sabata. Esta feta de goma termoplàstica mitjançant els mateixos processos de fabricació que la sola.

La seva funció és cobrir els elements de dins la sola per evitar que estiguin en contacte amb la humitat i/o brutícia.

A més, al ser de goma, permet que, un cop fixada, garanteixi la quasi total impermeabilitat. Tot i això cal remarcar que aquest sistema no està pensat per ser introduït dins l'aigua.



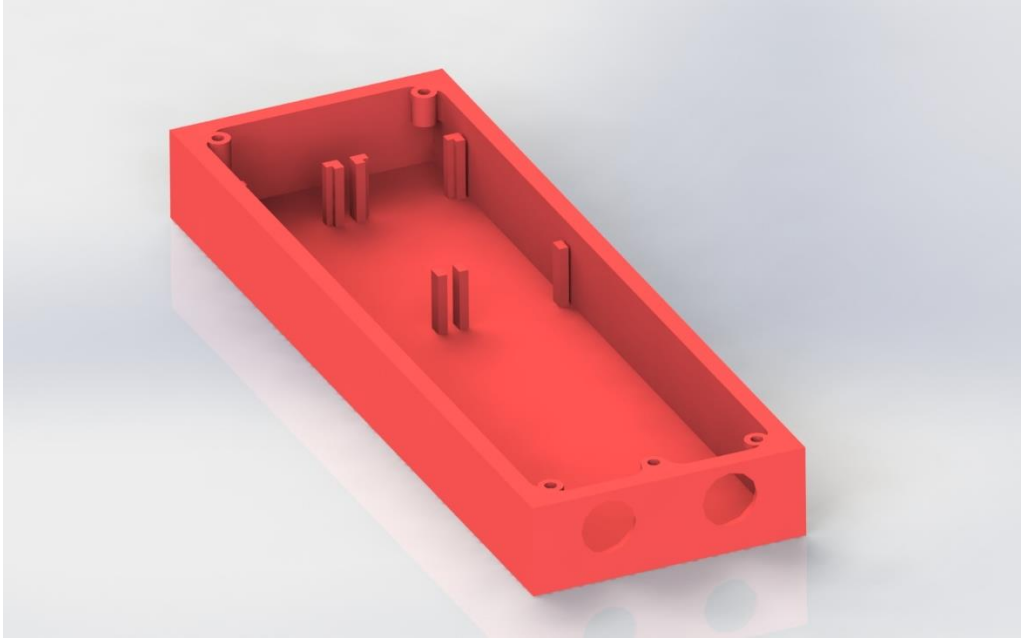
*Il·lustració 32 – Sobre-sola*

El rodó sortint que té a la punta serveix per facilitar l'acoblament entre sola i sobresola.

### 8.1.3. Caixa

Element format mitjançant una impressora 3D amb filament termoplàstic ABS.

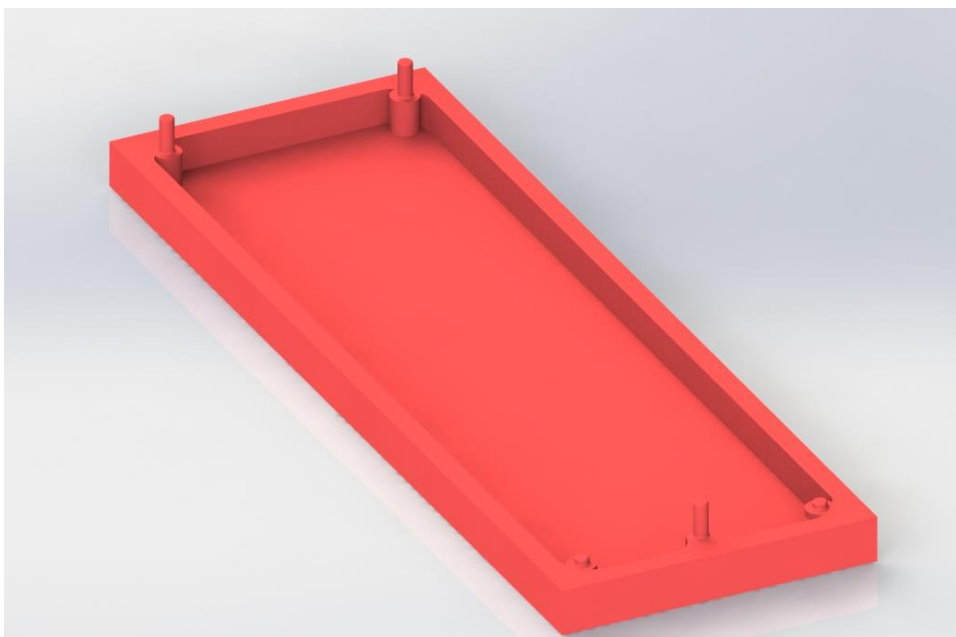
La seva funció és cobrir i fixar els dos pistons que contindrà al seu interior.



*Il·lustració 33 - Caixa*

### 8.1.4. Tapa caixa

Fet de la mateixa manera i del mateix material que la caixa (impressora 3D amb ABS), l'objectiu de la tapa és tancar l'obertura de la caixa, per on s'han introduït els pistons, per tal d'evitar que entri humitat /o brutícia.



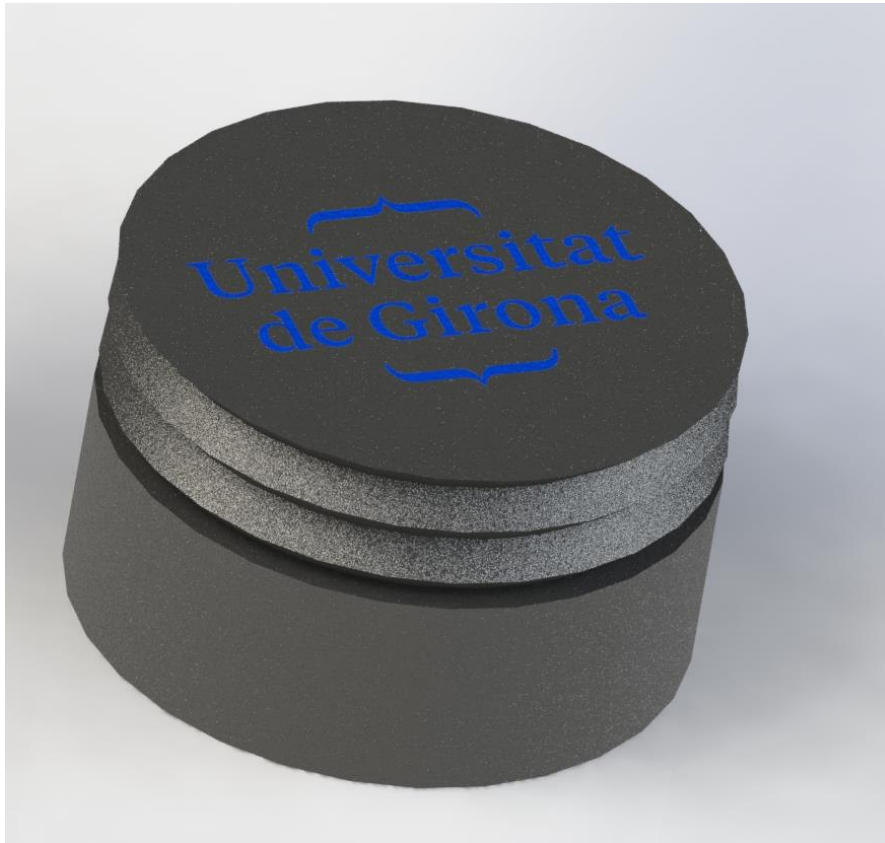
*Il·lustració 34 – Tapa caixa*



### 8.1.5. Cambra d'aire

Consisteix en una cambra d'aire amb una funció semblant a la de una bicicleta.

Està feta de cautxú de butil. La seva curiosa forma, la qual comparteix semblança amb la caixa d'un acordió, permet que el seu moviment al inflar-se sigui pràcticament vertical. Així, la seva funció és la de elevar i fer baixar el taló del portador.



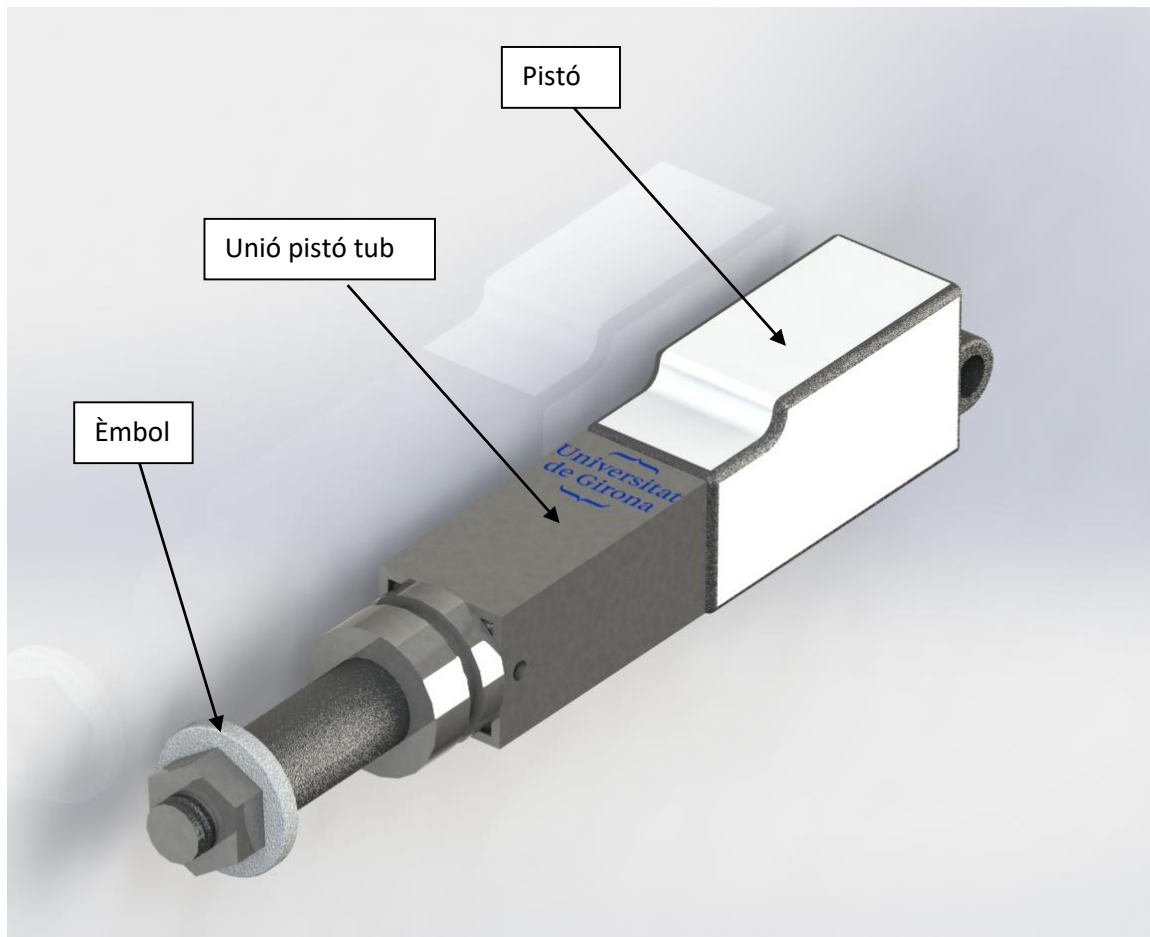
*Il·lustració 35 – Cambra d'aire*

Es considera un bon lloc on posar la marca del fabricant (aquest cas el logo de la UdG) ja que estèticament dóna sensació de qualitat.

### 8.1.6. Conjunt Pistó

Per tal d'inflar i desinflar la cambra d'aire, necessitem un injector d'aire.

Aquest conjunt té la funció d'una xeringa; al moment de començar el moviment del portador, emplenarà la cambra d'aire elevat el taló del peu i facilitant el moviment.



Il·lustració 36 – Conjunt pistó

Aquest conjunt està format per diverses peces :

### 8.1.6.1. Pistó

Miniature Linear Motion Series · L12



*Il·lustració 37- Pistó*

Aquest actuador lineal està format per un motor de corrent continua, el qual, mitjançant engranatges, transforma el seu moviment rotatiu en moviment lineal.

Existeixen diversos models amb diferent parell motor i velocitat de gir.

Seguint els càlculs exposats a l'annex de càlculs s'ha escollit el model 50:1 de 30mm de carrera.

Això ens garanteix una força de 22N i una velocitat d'avanç de 25mm/s ( 1 segon i poc per fer la cursa completa).

El retrocés del pistó el farà el propi pes del portador.

### 8.1.6.2. Unió pistó tub

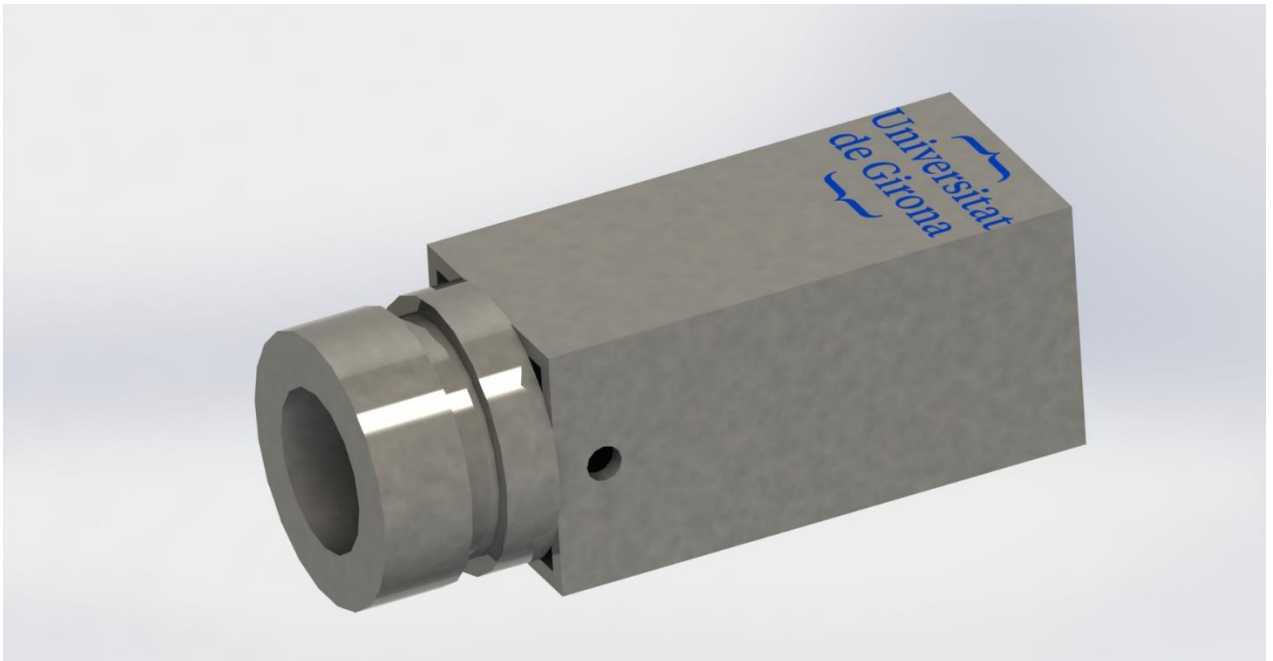
Aquest pistó és l'encarregat de transmetre aire a la cambra, però per fer-ho necessita un tub per on circuli l'aire.

Per tal que el pistó pugui empènyer l'aire a través del tub cal garantir l'estanqueïtat .

L'element unió pistó tub, està format per un tub quadrat de 14mm exterior i 12mm interior soldat amb un tub rodó de diàmetre 13 ext. i 9 int.

Al voltant d'aquest tub hi ha soldats dos retalls de tub de diàmetre 15mm.

La funció d'aquest element és tancar l'aire que surt des de la punta del pistó fins al tub (que també està unit a l'element) evitant així fugues d'aire.



*Il·lustració 38 – Unió pistó tub*

Aquest és l'únic element mecanitzat ja que requereix soldadura i un forat de diàmetre 2mm per on un cargol fixarà el pistó.

### 8.1.6.3. Èmbol

Rodó massís amb un forat al centre per on passa l'eix del tub.

El seu diàmetre coincideix amb el del tub i la seva funció és generar una força en tota la secció del tub per tal de impulsar l'aire cap a la cambra.



*Il·lustració 39 - Èmbol*

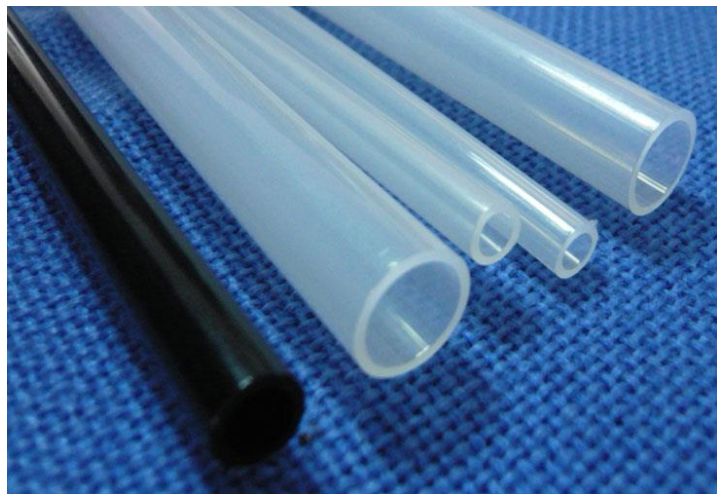
L'èmbol queda fixat al tub mitjançant una femella de INOX M-6 collada a la punta roscada de l'eix del pistó.

### 8.1.6.4. Tub plàstic

Tub flexible de material plàstic PAN (Tub pneumàtic).

El diàmetre del tub decreix al llarg de la seva longitud.

Connecta el pistó amb la cambra.



*Il·lustració 40 – Tub plàstic*

### 8.1.6.5. Brida

Brida que te com a funció segellar la unió entre el pistó i el tub, tot garantint l'estanqueïtat.



*Il·lustració 41 - Brida*

### 8.1.7. Rosca

Rosca instal·lada a la sabata mitjançant un petit forat.

Aquesta rosca s'obre com un taco dintre la sabata mitjançant un cargol i fixe el conjunt de la sola amb la sabata.



*Il·lustració 42 - Rosca*

### 8.1.8. Sensor de pes

Sensor de pes RP-C18.3-ST ultrafí i de baix consum.

Té una lectura ràpida del pes i s'utilitza per saber el moment exacte en que es vol iniciar el moviment (començar a caminar).



*Il·lustració 43 – Sensor de pes*

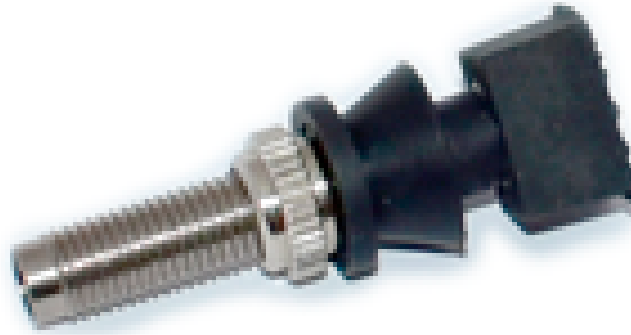
### 8.1.9. Vàlvula d'aire, junta de goma i tap

Amb el temps la cambra d'aire pot perdre pressió. Per compensar-ho, s'ha instal·lat una vàlvula d'aire (com la d'una bicicleta) que permet inflar de nou la cambra amb una manxa domèstica.



*Il·lustració 44 – Vàlvula d'aire*

Aquesta vàlvula porta una sèrie de juntes de goma i una femella per evitar fugues, muntant-se de la següent manera (il·lustració 45):



*Il·lustració 45 – Montatge vàlvula*

A la punta de la vàlvula porta un tap per no malmetre la vàlvula amb el temps.

#### 8.1.10. Porta piles

Al porta piles és on hi han les bateries (en aquest cas piles) que generen l'energia que alimentarà tot el sistema.



*Il·lustració 46 – Porta-piles*



### 8.1.11. Velcro

Tira de velcro enganxada al taló de la sabata i de la sola, fent així el tercer punt d'unió entre la sabata i la sola i impedit-ne el moviment.



*Il·lustració 47 - Velcro*

Per tal de unir els diferents elements, s'utilitzaran cargols i femelles de mètric 2 x 10mm, de mètric 8 X 10mm i juntes de goma de diàmetre 13mm.

També caldrà acoblar un microxip o placa Arduino per tal de controlar el correcte funcionament de totes les parts del disseny.

La programació del sistema no està inclosa en aquest projecte, però es farà un breu resum de la lògica que caldrà seguir.

## 8.2. Funcionament i lògica del sistema

El sistema parteix de la posició de repòs.

En aquest instant es sap que està en repòs perquè la totalitat (o quasi) del pes de la persona recau sobre el sensor de pes situat en el taló de la sabata, mentre que el que és captat pel sensor de la punta és gairebé nul.

És important determinar una tolerància dintre els dos sensors ja que el pes mai serà 0.

Un cop el pes del taló decreixi i el de la punta creixi de manera significativa, el sistema determinarà que el portador es posa en marxa i activarà l'actuador lineal per tal d'inflar la cambra d'aire.

Aquesta cambra d'aire servirà d'ajuda per aixecar el taló, ja que és on tenim la dificultat a l'hora de caminar.

Un cop el portador recolzi el taló al terra la cambra es desinflarà i el pistó tornarà a la posició inicial a causa del propi pes del portador.

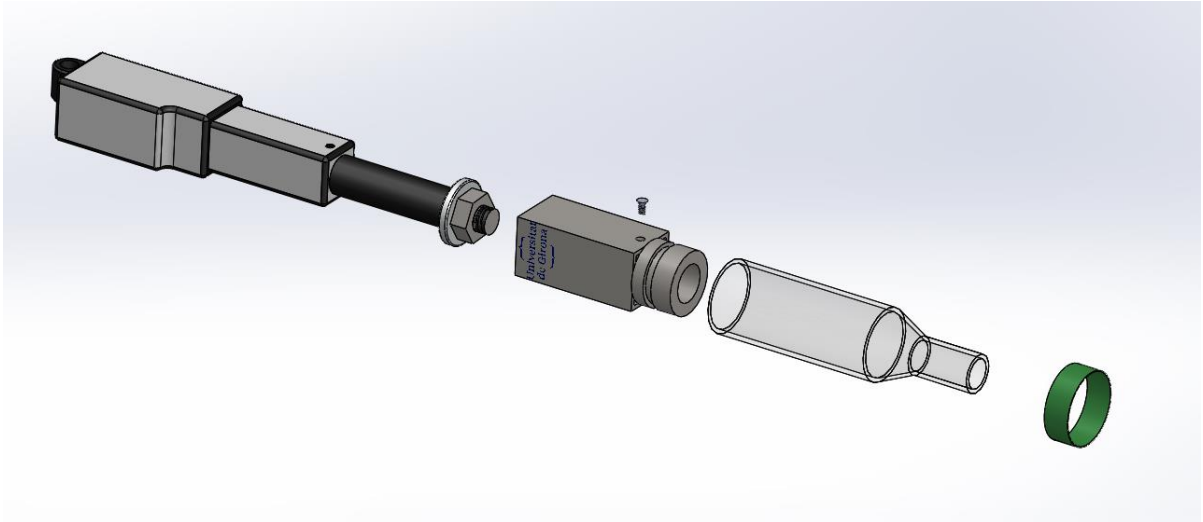
El conjunt d'accions que s'han produït es considera com un cicle.

Aquest cicle es repetirà indefinidament fins que el portador decideixi parar-ho.

### 8.3. Muntatge

Realment hi ha poca complicació a l'hora de realitzar el muntatge de la ortesi.

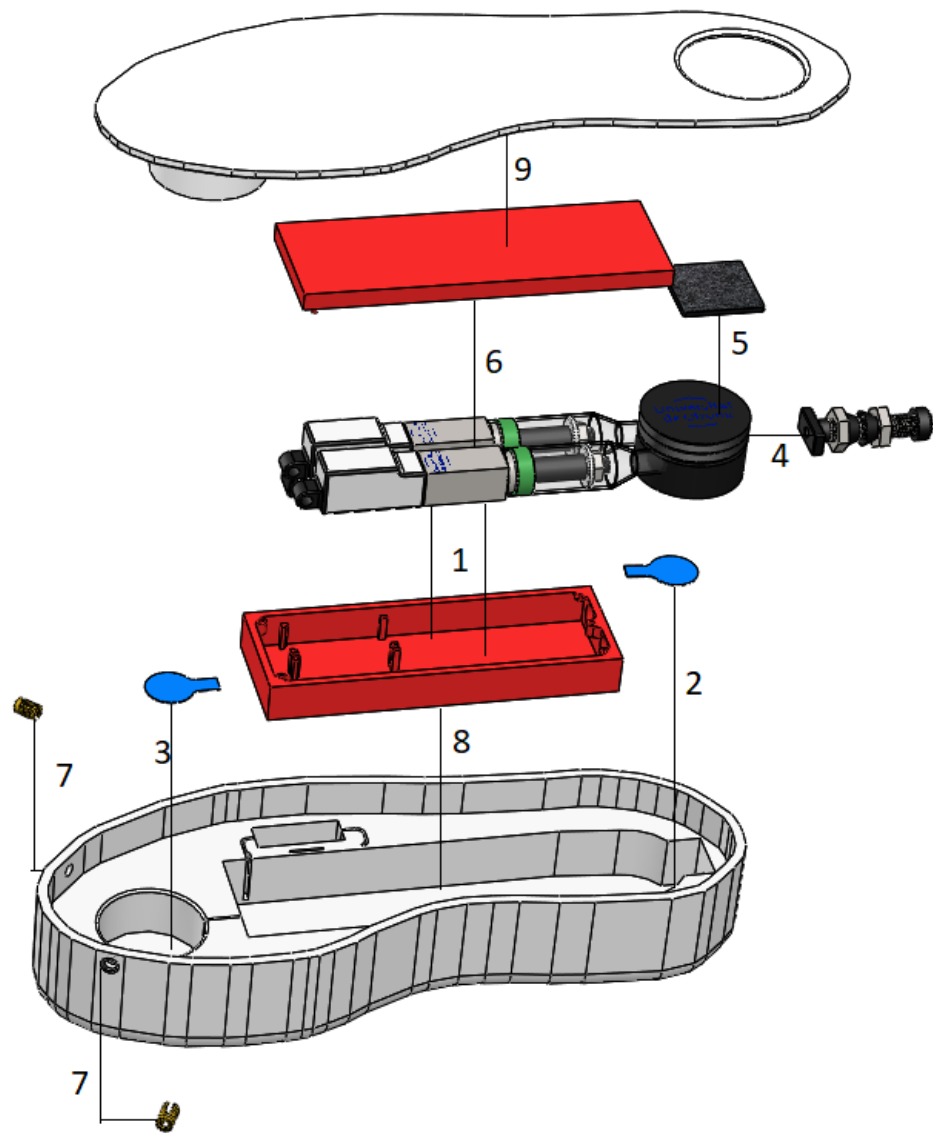
Primerament es procedirà a muntar el conjunt del pistó (il·lustració 48).



*Il·lustració 48 – Muntatge pistó*

- 1- Unir el pistó i la unió pistó tub mitjançant el cargol.
- 2- A la punta roscada de l'eix del pistó introduir l'èmbol i la rosca.
- 3- Introduir el conjunt al tub.
- 4- Tancar el tub amb la brida per evitar fugues d'aire.

Un cop el conjunt del pistó està muntat es procedirà a fer l'assemblatge (il·lustració 49).



Il·lustració 49 - Muntatge

- 1- Introduir els pistons muntats dins la caixa, assegurant-se que el tub passa pels forats de la caixa.
- 2- Situar el sensor de pes del taló sobre la sola.
- 3- Situar el sensor de pes de la punta sobre la sola.
- 4- Introduir el sistema de vàlvula d'inflar a la cambra d'aire.
- 5- Situar el velcro sobre la cambra d'aire.
- 6- Tapar la caixa amb la tapa.
- 7- Posar les rosques (fer forats a les sabates).
- 8- Posar la caixa sencera dins la sola.
- 9- Posar la sobresola, deixant totes les peces a l'interior.

Finalment caldrà situar la sola sota la sabata i ja estarà llest per dur a terme el seu funcionament.

## 8.4. Manteniment de la ortesi

Tot i que el disseny està pensat per utilitzar-se durant un llarg termini, cal fer revisions periòdicament per evitar possibles averies que provocarien un mal funcionament.

### 8.4.1. Revisar pressió de la cambra d'aire

De la mateixa manera que les rodes d'una bicicleta, la cambra d'aire pot perdre pressió al llarg del temps.

Es recomana reinflar la cambra a través de la vàlvula un cop cada 2/3 mesos per garantir el bon funcionament.

### 8.4.2. Recanvi de piles

El sistema funciona amb una pila alcalina de 12 volts.

En el moment que el sistema comenci a perdre precisió o no funcioni correctament a causa de elements elèctrics o electrònics cal canviar la pila.

### 8.4.3. Canviar el velcro

Al llarg del seu ús, la part adhesiva del velcro pot perdre efectivitat.

Quan el velcro comenci a desenganxar-se, cal canviar-lo. Es pot utilitzar velcro convencional.

### 8.4.4. Canvi de pes

En cas de canvis significatius de pes del portador, cal re-calibrar la sabata.

## 9. Parametrització

Com ja ha estat mencionat, aquest sistema i projecte ha estat enfocat a una persona física concreta.

No obstant, aquest model és adaptable a qualsevol talla de peu i de sabata.

És important remarcar que la producció amb intenció de venda del producte no ha d'estar enfocada a la venda en massa, sinó en venda enfocada a un nínxol petit de la població, que haurà de pagar una quantitat elevada de diners per fer el prototip a mida.

Això és a causa de la dificultat de fer un model per a cada sabata i talla de peu; existeixen diverses talles de peu i milers de soles de sabata diferents a les que cal acoblar el sistema.

Aquest sistema ha estat dissenyat per unes sabates Adidas Superstar de talla 38 (veure il·lustració 50).



*Il·lustració 50 – Adidas Superstar*

## 10. Resum de pressupost

| CONJUNT                 | COST            |
|-------------------------|-----------------|
| FABRICACIÓ              | 328.15 €        |
| INSTAL·LACIÓ            | 60 €            |
| TOTAL SENSE IVA         | 388.15 €        |
| IMPOST INDIRECTE 15%    | 58.22 €         |
| SUBTOTAL                | 446.37 €        |
| IVA 21%                 | 93.73 €         |
| <b>PRESSUPOST FINAL</b> | <b>540.10 €</b> |

Taula 2 - Resum de pressupost

El cost total del projecte és de **cinc-cents quaranta euros amb deu cèntims**.



## 11. Conclusions

Un cop finalitzat el projecte, i amb tot el camí recorregut cal plantejar-se la primera pregunta: realment el disseny funciona?

Cal ser realistes i no negar els problemes que segur sortiran en el moment de la fabricació; possibles fuites de aire, problemes de rigidesa...

No obstant, podem considerar aquest projecte com un avanç cap a la possible ajuda a moltes persones que pateixen problemes o malalties que afecten a la mobilitat quotidiana i, en cas que algun dia es vulgui desenvolupar més aquest projecte trobar una solució per aquesta persona que pateix la malaltia, descrita en aquest treball.

Per altra banda, cal advertir que la possible comercialització del producte és arriscada; com s'ha dit al començament del projecte, la proporció de persones que pateixen aquesta malaltia es molt petita (2/4 de cada 100.000), i no tindran el mateix número de peu.

Una possibilitat seria buscar una marca de sabates que volgués produir en sèrie les seves sabates amb el mecanisme integrat.

També hem de veure si realment s'ha complert el que es proposava;

- Eliminar parcial o totalment la tensió produïda per la tracció del tendó.
- Permetre el moviment d'extensió del peu en l'eix X.
- Permetre completament el moviment d'adducció i abducció en l'eix Y.
- Permetre completament el moviment de pronació i supinació en l'eix Z.
- Evitar materials que puguin ocasionar al·lèrgies o que siguin massa rígids i puguin provocar molèsties.
- Garantir la comoditat del portador.
- Lleugeresa (Pes inferior a 5 Kg).
- Adaptabilitat anatòmica.
- Comoditat a l'hora de caminar.
- Volum disminuït, evitar grans envergadures.
- Possibilitat de rentat del producte.

No podem assegurar el compliment de tots els requisits un cop el sistema estigui físicament muntat, però de forma teòrica (en la qual hem realitzat el treball) compleix sense problema tots els requeriments proposats al capítol 6.

Finalment i com a desig personal, m'agradaria que algun estudiant agafés com a proposta la continuació d'aquest treball.

Queda pendent la construcció física del sistema, la programació d'aquest (fet amb Arduino o amb microprocessadors) i revisar que compleixi la normativa vigent.

## **12. Llistat de documents**

El projecte consta dels següents documents:

Document 1: Memòria i Annexes

Document 2: Plànols

Document 3: Plec de condicions

Document 4: Estat d'amidaments

Document 5: Pressupost

## 13. Referències

[1] Podiatrists.org [Internet]. California podiatric medical association. [Actualitzada 12 febrer 2013; citada 5 juny 2019].

Disponible a: <https://www.podiatrists.org/visitors/foothhealth/espanol/orthotics>

[2] Institutcataladelpeu.com [Internet]. Institut català del peu.

[Actualitzada 7 març 2014; citada 21 febrer 2019].

Disponible a: <https://www.institutcataladelpeu.com/catalan-ortesis-de-pie-y-tobillo/>

[3] es.wikipedia.org [Internet]. Wikipedia.

[Actualitzada 14 agost 2019; citada 21 agost 2019].

Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93rtesis>

[4] mibienestar.es [Internet]. Mi bienestar

[Actualitzada 25 març 2017; citada 21 febrer 2019].

Disponible a: <http://www.mibienestar.es/salud/2-general/23-los-seis-movimientos-del-pie.html>

[5] msdmanuals.com [Internet]. Manual MSD

[Actualitzada 12 desembre 2018; citada 15 juny 2019].

Disponible a: <https://www.msdmanuals.com/es/hogar/enfermedades-cerebrales,-medulares-y-nerviosas/trastornos-de-la-m%C3%A9dula-espinal/paraparesia-esp%C3%A1stica-hereditaria>

# Annex de Càlculs

## A.1. Introducció

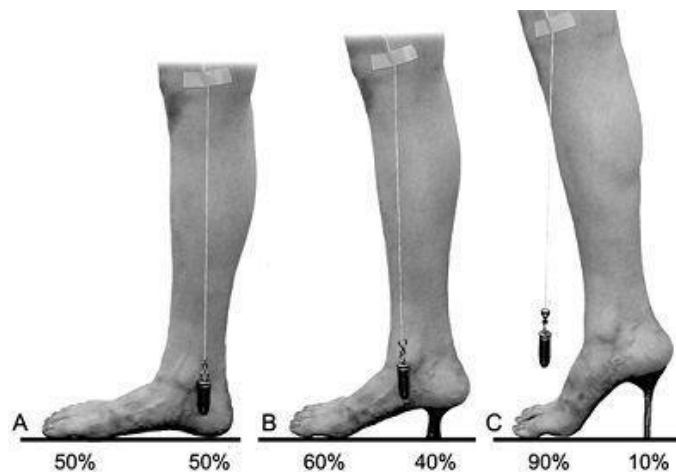
Per tal de dissenyar el sistema, són necessaris diversos càlculs.

Cal tenir en compte que al ser un projecte de disseny, no han estat realitzats càlculs de deformacions de les peces a causa del pes del portador, ni càlculs a fatiga.

Tots els càlculs han estat utilitzats per la realització del disseny i la seva parametrització.

## A.2. Elevació del peu

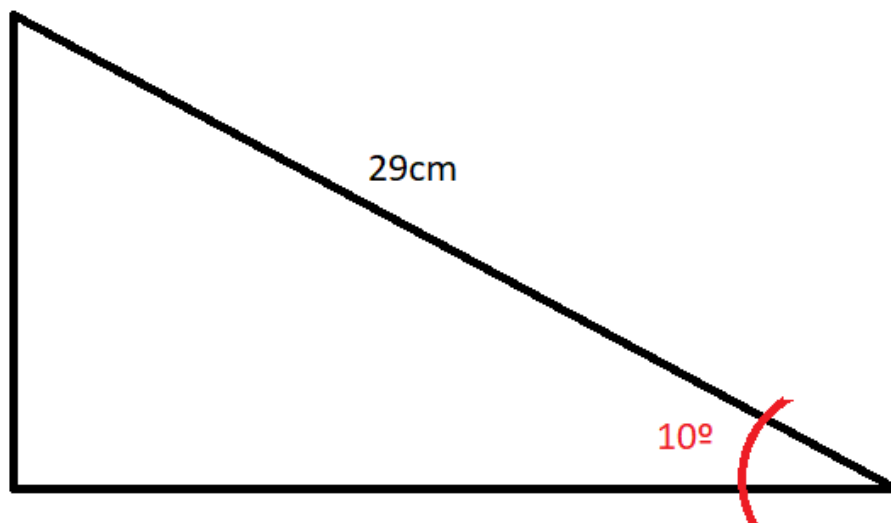
Primerament cal saber quina distància s'ha separat el peu del terra, ja que és l'altura que haurà d'eleva-se la cambra d'aire (il·lustració 51).



*Il·lustració 51 – Elevació taló*

Cal saber, doncs, la llargada del peu i l'angle amb el taló aixecat.

Realitzem una mesura i obtenim els següents resultats (veure il·lustració 52):



*Il·lustració 52 – Trigonometria taló*

Utilitzant la trigonometria s'obté que;

$$\sin(\alpha) = \frac{y}{h}$$

$$\sin(10) = \frac{y}{29}$$

S'obté  $y = 5.035\text{cm}$

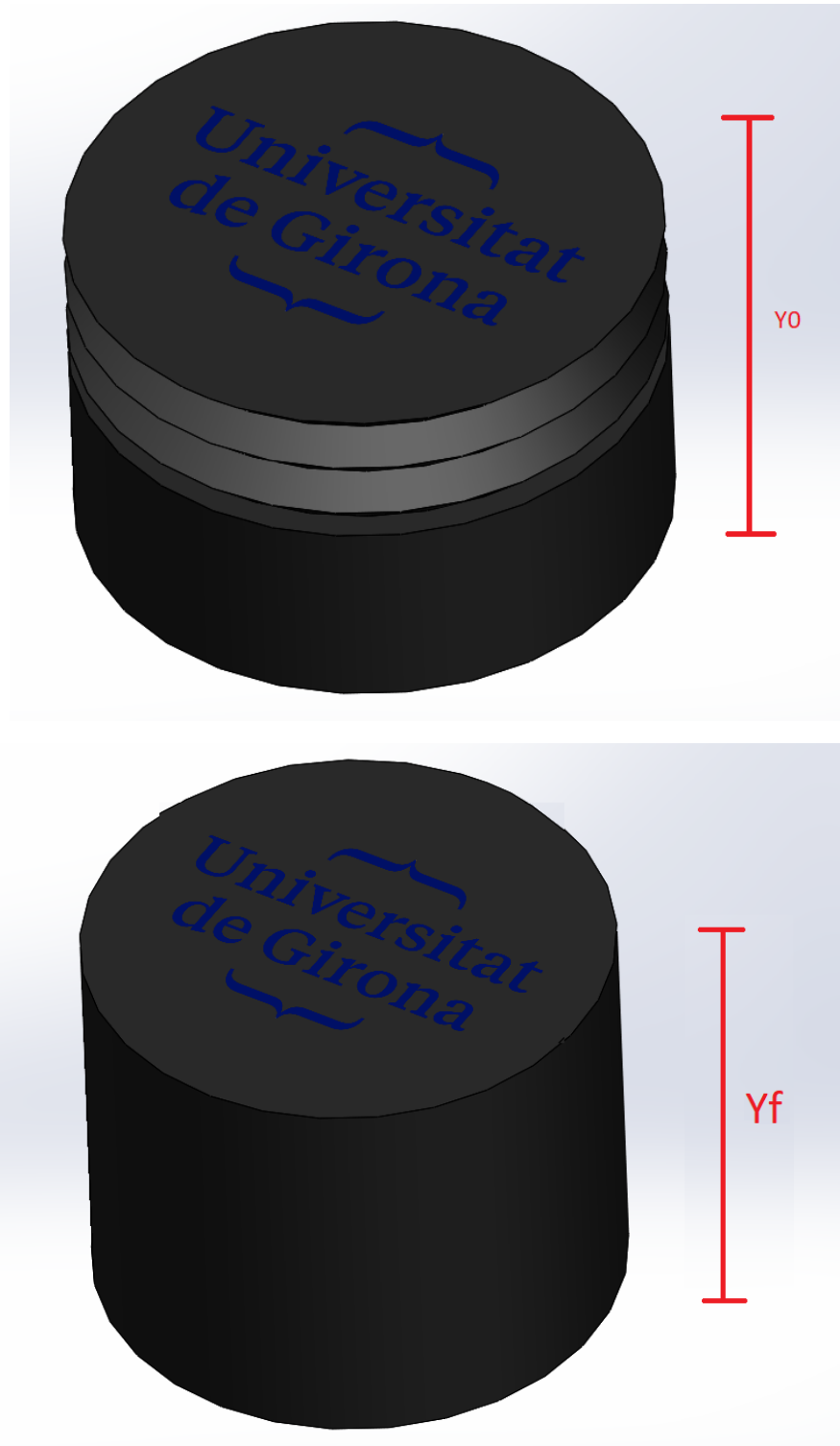
Per tant, cal elevar el taló 5cm.

### A.3. Disseny de la cambra d'aire

La secció de la cambra d'aire ha de ser suficient gran per no produir dolor al portador (molta força en un punt) però no massa gran per que hi hagi la elevació desitjada del taló (quan s'infla cal fer un moviment vertical).

Estudiant el disseny de la sola es veu que el màxim diàmetre de la cambra és de 40cm.

Es vol incorporar un sistema com el d'un acordió per tal d'elevat el tendó, tal i com es mostra a la següent imatge (il·lustració 53):



Il·lustració 53 – Elevació cambra d'aire

La diferència entre  $Y_0$  i  $Y_f$  ha de ser de 5cm (altura que puja el taló).

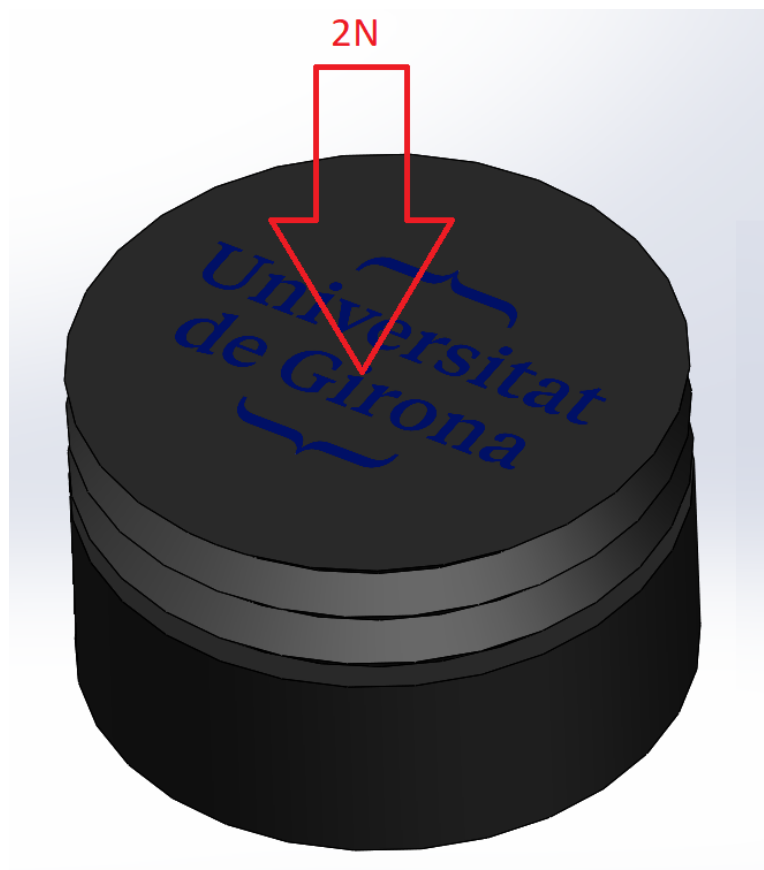
Per fer-ho es decideix una  $Y_f$  de 31cm (altura estèticament correcte pel sistema) i això comporta una  $Y_0$  de  $31-5 = 26$ cm.

Es decideix fer 3 dents d'acordió de 4cm distància entre elles amb un total de 12cm de dents i 14 de llis, per on entraran els tubs i la vàlvula.

#### A.4. Superfície d'aire impulsat pel pistó.

Cal determinar la quantitat d'aire i la força que ha de generar el pistó per vèncer la força del pes del portador, que en aquest cas es gairebé nul·la (el pes està totalment a la punta).

Tot i això, i per seguretat, es decideix posar 2Kg de força a la superfície de la cambra (veure il·lustració 54).



Il·lustració 54 – Força aplicada a la cambra



Al ser un circuit tancat, la força es transmet sense pèrdues, havent de ser 2 Kg (20N) els que ha de suportar el pistó.

Observant la fitxa tècnica del pistó (il·lustració 55).



100mm L12 Actuator  
Actual Size

**Benefits**

- Compact
- Simple control
- Low voltage
- Equal push/pull
- Easy mounting

**Applications**

- Robotics
- Appliances
- Toys
- RC vehicles
- Automotive
- Industrial Automation

## Miniature Linear Motion Series · L12

Actuonix Motion Devices unique line of Miniature Linear Actuators enables a new generation of motion-enabled product designs, with capabilities that have never before been combined in a device of this size. These small linear actuators are a superior alternative to designing with awkward gears, motors, servos, and linkages.

Actuonix's L series of micro linear actuators combine the best features of our existing micro actuator families into a highly flexible, configurable, and compact platform with an optional sophisticated on-board microcontroller. The first member of the L series, the L12, is an axial design with a powerful drive-train and a rectangular cross section for increased rigidity. But by far the most attractive feature of this actuator is the broad spectrum of available configurations.

**L12 Specifications**

| Gearing Option                 | 50:1                      | 100:1        | 210:1         |          |
|--------------------------------|---------------------------|--------------|---------------|----------|
| Peak Power Point               | 17N @ 14mm/s              | 31N @ 7mm/s  | 62N @ 3.2mm/s |          |
| Peak Efficiency Point          | 10N @ 19mm/s              | 17N @ 10mm/s | 36N @ 4.5mm/s |          |
| Max Speed (no load)            | 25mm/s                    | 13mm/s       | 6.5mm/s       |          |
| Max Force (lifted)             | 22N                       | 42N          | 80N           |          |
| Back Drive Force (static)      | 12N                       | 22N          | 45N           |          |
| Stroke Option                  | 10 mm                     | 30mm         | 50mm          | 100mm    |
| Mass                           | 28 g                      | 34 g         | 40 g          | 56 g     |
| Repeatability (-I, -R, -P&LAC) | ±0.1 mm                   | ±0.2 mm      | ±0.3 mm       | ±0.5 mm  |
| Max Side Load (extended)       | 50N                       | 40N          | 30N           | 15N      |
| Closed Length (hole to hole)   | 62mm                      | 82mm         | 102mm         | 152mm    |
| Potentiometer (-I, -R, -P)     | 1kΩ±50%                   | 3kΩ±50%      | 6kΩ±50%       | 11kΩ±50% |
| Voltage Option                 |                           | 6VDC         | 12VDC         |          |
| Max Input Voltage              |                           | 7.5V         | 13.5V         |          |
| Stall Current                  |                           | 460mA        | 246mA         |          |
| Standby Current (-I/-R)        |                           | 7.2mA        | 3.3mA         |          |
| Operating Temperature          | -10°C to +50°C            |              |               |          |
| Potentiometer Linearity        | Less than 2.00%           |              |               |          |
| Max Duty Cycle                 | 20 %                      |              |               |          |
| Audible Noise                  | 55dB @ 45cm               |              |               |          |
| Ingress Protection             | IP-54                     |              |               |          |
| Mechanical Backlash            | 0.2mm                     |              |               |          |
| Limit Switches (-S)            | Max. Current Leakage: 8uA |              |               |          |
| Maximum Static Force           | 200N                      |              |               |          |

1 - Control Option Specific values are identified with -I, -R, -P, -S, and LAC

2 - 1 N (Newton) = 0.225 lbf (pound-force) & 25.4mm=1 Inch

3 - A powered-off actuator will statically hold a force up to the Backdrive Force

4 - Actuators should be tested in each specific application to determine their effective life under those loading conditions and environment.

All information provided on this datasheet is subject to change. Purchase or use of Actuonix actuators is subject to acceptance of our terms and conditions as posted here: <http://www.actuonix.com/terms.asp>



Actuonix Motion Devices Inc

580 Starling Lane  
Victoria, BC, V9E 2A9  
Canada

1 (206) 347-9684 phone  
1 (888) 225-9198 toll-free  
1 (206) 347-9684 fax

sales@actuonix.com  
www.actuonix.com

Copyright 2018 © Actuonix Motion Devices Inc.

Il·lustració 55 – Fitxa tècnica actuador lineal

El pistó suporta una força de 22N.

Per altre banda es calcula un segon i mig entre pas i pas del portador.

L'actuador lineal gira a 13mm/s amb una carrera de 30mm.

$$30mm \times \frac{1s}{25} = 1.2s$$

L'actuador lineal compleix les característiques.

### A.3 )Tub i èmbol

Finalment cal decidir el diàmetre del tub i de l'èmbol que transportin prou aire com per inflar la cambra d'aire.

El volum de la cambra d'aire és:

$$V = \pi * r^2 * h$$

Volum inicial:

$$V_0 = \pi * 10^2 * 26 = 8168.14mm^3$$

Volum final

$$V_0 = \pi * 10^2 * 31 = 9738.93mm^3$$

Tenint una diferència de volums de  $1570mm^3$ .

Al tenir una carrera de 30mm, cal buscar el diàmetre que pugui generar aquest volum.

Comptem amb 2 pistons per tan:

$$2 * \pi * r^2 = 1570$$

El radi del tub haurà de ser de 15.8 mm.