



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Bioprotesi

*Brevetto US-10,772,742 B2: protesi di una caviglia policentrica
Analisi e modellazione assistita da calcolatore*

Studenti

Emanuele Gerardi
Mario Regine
Valerio Auriemma

Professori

Pier Paolo Valentini
Ettore Pennestrì

Overview

- Introduzione al brevetto US-10,772,742 B2
- Studio sperimentale della biomeccanica
 - Riproduzione della funzionalità meccanica
 - Dimensioni
- Modellazione parti e assiemi
- Analisi del movimento
 - Grafici della coppia
- Attività integrative



Introduzione

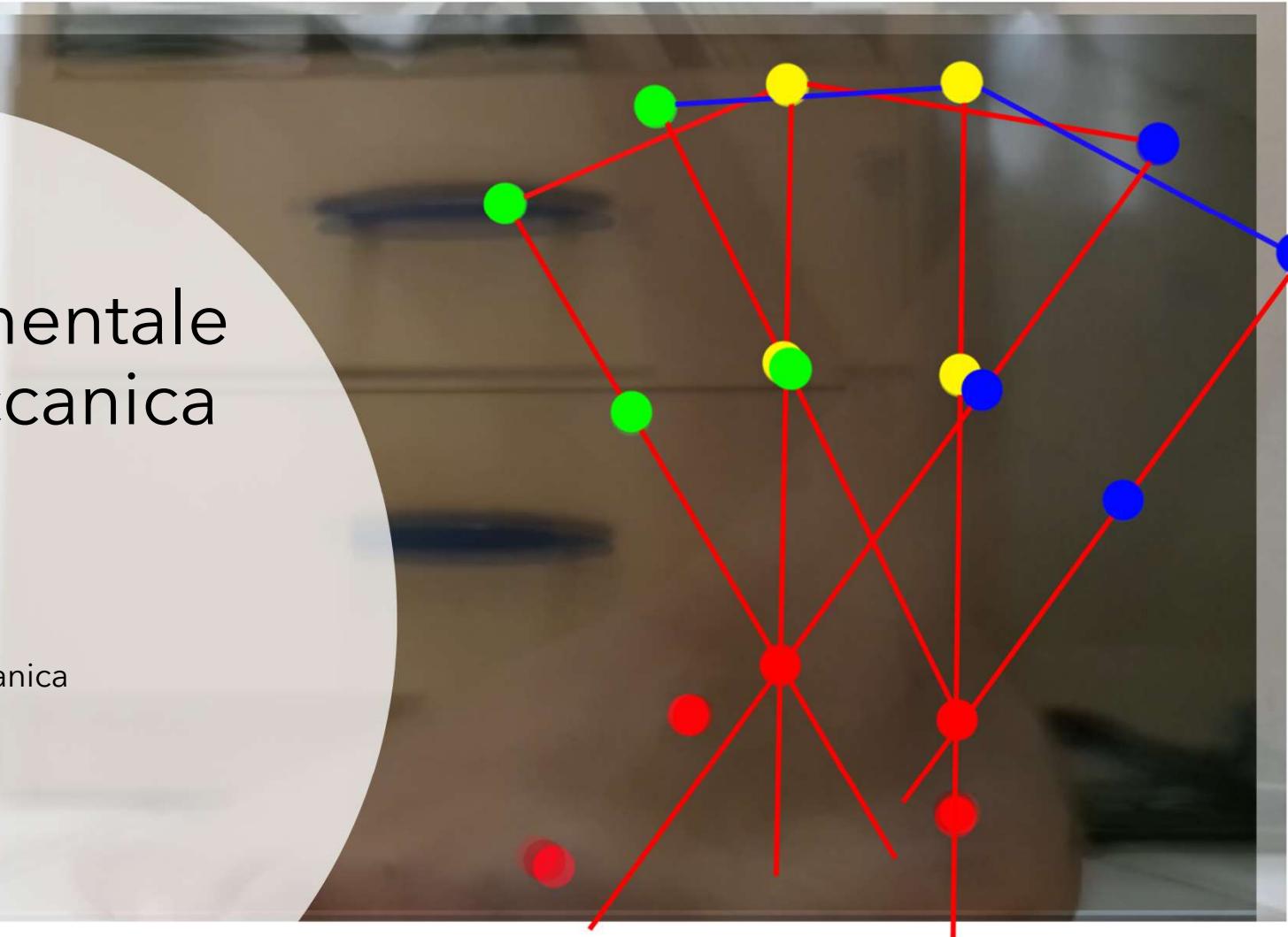


L'obiettivo di tale progetto consiste nello studio e nella **realizzazione del modello di una protesi di una caviglia policentrica a partire dal suo brevetto**. La realizzazione è stata preceduta da uno studio della cinematica del caviglia di un membro del gruppo, in modo da riuscire ad identificare la libertà di movimento della caviglia in oggetto.

Una volta raccolte le informazioni si è passati al **dimensionamento della protesi stessa** tramite misurazioni della caviglia studiata e simulazioni di movimento eseguite tramite PC. Solo dopo queste fasi preliminari è stato possibile, seguendo il brevetto, **modellare ogni componente della protesi sul software Solidworks**.

Studio sperimentale della biomeccanica

1. Studio preliminare della biomeccanica
2. Funzionalità meccanica



Di seguito è possibile visionare il video da cui sono stati estrapolati i frame che ci hanno permesso di trovare i **marker della biella**.

Nel suddetto video si può notare come **la posizione dei tre marker sul lato del piede rimanga per lo più invariata** durante tutta la ripresa.



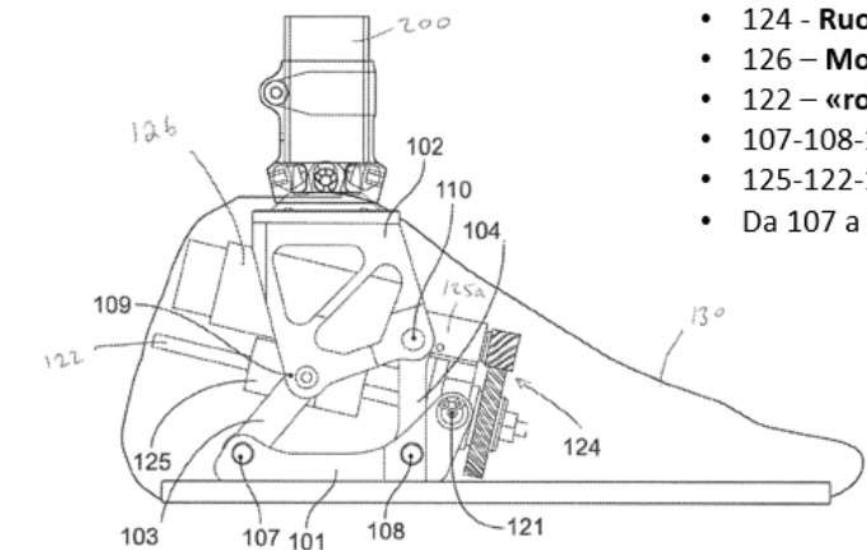
Studio preliminare della biomeccanica

Una protesi di caviglia policentrica ha il vantaggio di avere un centro variabile con il movimento della caviglia stessa.

Questo è possibile grazie ai perni del quadrilatero articolato (107 - 108 - 109 - 110).

Altri componenti che influiscono sulla cinematica del sistema sono:

- 122: albero che gira grazie alla rotazione del motore, sposta la cerniera 109 avanti e indietro.
- 125: roller screw che trasforma il moto rotatorio in moto traslatorio.
- 126: motore della protesi, essendo quest'ultima una protesi attiva e non passiva.



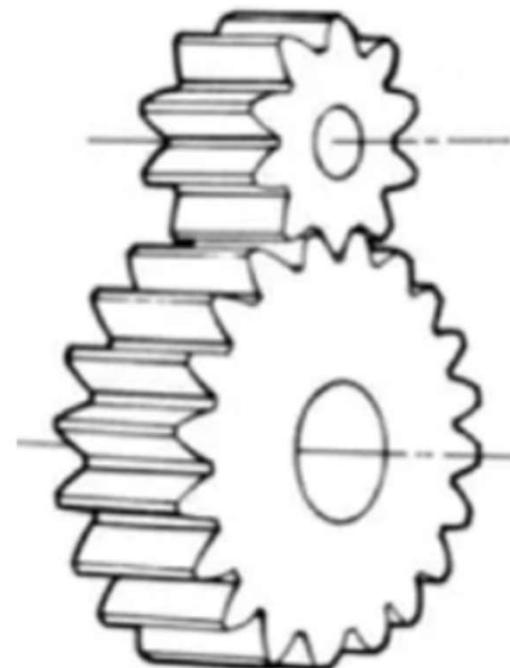
- 124 - **Ruote elicoidali**
- 126 – **Motore**
- 122 – «**roller screw**»
- 107-108-109-110 **quadrilatero**
- 125-122-101-103 **glifo**
- Da 107 a 109 **perni**

Andando a parlare degli ingranaggi
sono stati scelti degli elicoidali,
perché utilizzarli?

Essi permettono di avere un maggior
numero di denti in presa
contemporaneamente, essi si sono più
complessi da utilizzare ma sono molto più
precisi.

Il vantaggio degli ingranaggi elicoidali sta
nel fatto di una maggiore trasmissione della
potenza e sui seguenti aspetti:

- Basse vibrazioni, bassa rumorosità e
trasmissione stabile.
- Il contatto superficiale porta ad avere un
area di forza grande e perciò la coppia di
trasmissione è grande.
- Siccome il dente ha un angolo, genera
una forza assiale, rendendo il meccanismo
più stabile.



Denti dritti



Denti elicoidali

Schematizzazione

Si va a schematizzare il modello reale per poterlo andare a studiare, osserviamo che i perni 107, 108, 109, 110 mi identificano un quadrilatero.

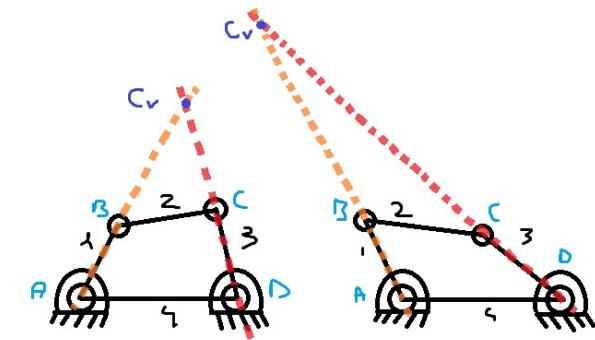
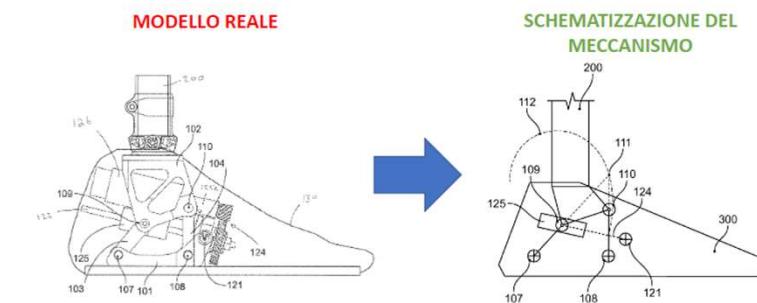
Andiamo ad utilizzare il quadrilatero perché la caviglia non è approssimabile ad una cerniera.

Il punto fondamentale da evidenziare è che nella protesi di caviglia policentrica il nostro centro di istantanea rotazione è variabile, esso varia col moto del piede stesso, questo movimento del centro di istantanea rotazione è descritto dalla traiettoria 112.

Come possiamo vedere dalla fig.2 il centro di istantanea rotazione cambia a seconda della configurazione del quadrilatero (corrispettivo movimento della caviglia).

Per trovare il punto di una specifica configurazione bisogna tracciare le rette passanti per i punti (A,B) e (D,C), a questo punto si individuerà il punto di intersezione di tali rette, esso sarà il nostro punto di istantanea rotazione.

Tracciando l'unione di punti di istantanea rotazione per ogni configurazione del quadrilatero si avrà la la traiettoria (112).



Studio del moto / sintesi del quadrilatero

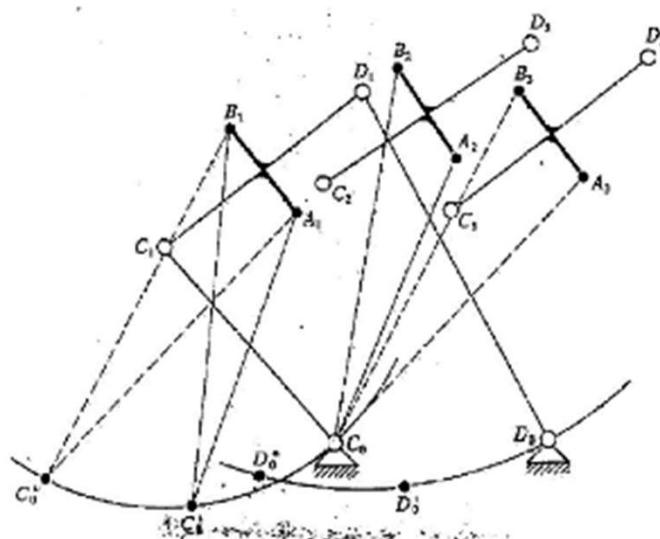
Il moto passa dal motore fino ad arrivare al quadrilatero grazie ai due ingranaggi elicoidali e all'elemento 125 che ha funzionamento analogo a quello di un dado, così trasformando il moto rotatorio in uno traslatorio.

Il centro di istantanea rotazione descrive una traiettoria legata alla lunghezza dell'aste, e quindi, alla lunghezze dei membri del quadrilatero.

Ma come possiamo trovare tali lunghezze?

Le lunghezze vengono trovate andando a mettere dei marker sul polpaccio e sul piede. Ora si scattano molte foto (per avere più materiale possibile) al piede in movimento, con il fine di andare ad individuare i punti che costituiscono il quadrilatero.

Per 3 posizioni finite



Passi del metodo grafico:

- Fisso i punti C_0 e D_0
- I punti A_i e B_i sono le posizioni dei marker nelle tre posizioni finite
 1. Disegno la parallela al segmento B_2C_0 passante per B_1 e la parallela al segmento A_2C_0 passante per A_1
 2. Dall'intersezione di tali rette ricavo C'_0
 3. Ripeto il procedimento per B_3 e A_3 e ricavo C''_0
- Ripeto i passi 1-2-3 sostituendo C_0 con D_0 e ottengo D'_0 e D''_0
- Il centro della cerniera mobile C_1 sarà il centro della circonferenza per tre punti passante per $C_0 - C'_0 - C''_0$
- Il centro della cerniera mobile D_1 sarà il centro della circonferenza per tre punti passante per $D_0 - D'_0 - D''_0$

Preparazione al dimensionamento e alla meccanismo

Siccome abbiamo detto che la protesi è riassumibile in un quadrilatero tra piede e stinco, ciò che dobbiamo andare a determinare sono i quattro punti del quadrilatero stesso.

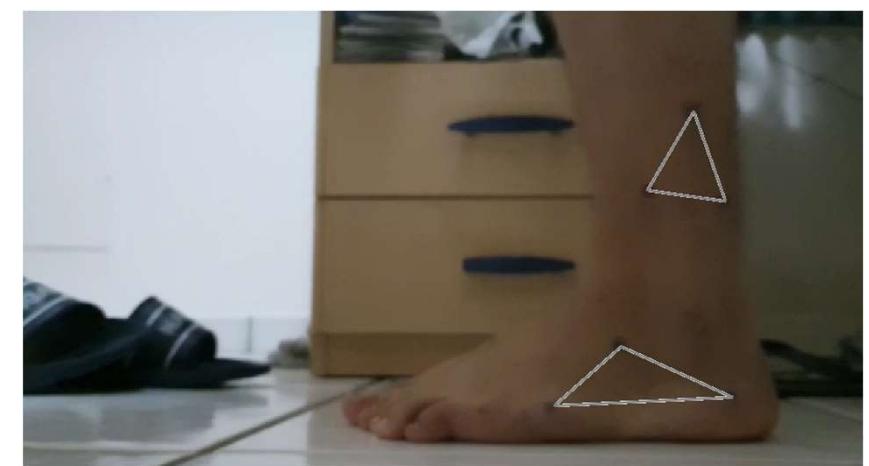
Abbiamo due gruppi di marker: quelli solidali al piede (che ci identificano la piattaforma/suola) e quelli sullo stinco che sarebbe dove abbiamo il collegamento protesi - parte amputata.

Adesso dobbiamo andare a scegliere quale moto relativo andare a studiare:

- Tenere lo stinco fisso e studiare il modo relativo del piede.
- Tenere il piede fisso e studiare il moto relativo della caviglia (nel nostro caso si è utilizzato questo approccio).

Successivamente si sono prese delle posizioni iniziali per le cerniere mobili, facendo test sulla flessione del piede e quindi analogamente sul movimento del quadrilatero si è stati in grado di 'regolare' il sistema andando ad osservare la dinamica di essa.

Infine siamo andati a posizionare ortogonalmente al profilo del piede la videocamera per andare a girare un video sul movimento delle massime estensioni della caviglia per poter estrapolare le foto di una posizione: 'in indietro', 'neutra', 'in avanti'.



Quanti marker e dove metterli?

- Per la posizione dei marker si va ad evitare la zona attorno all'articolazione della caviglia perché andrà a deformarsi, quindi si va a cercare punti in cui percepiamo qualcosa di significativo come le sporgenze asse.
- Mettere 3 punti invece che 2 ci permette di stimare eventuali errori: se ad esempio, le distanze nelle foto non restano costanti, sarà sinonimo di deformazione della pelle nella zona.



Riproduzione della funzionalità meccanica

Dimensioni

Una volta trovati i punti della biella tramite la sintesi dei moti finiti, questi sono stati riportati sulla caviglia e si è passati alle misurazioni sul piede (le misure sono relative alle distanze tra i centri):

- Telaio: 80mm;
- Biella: 30mm;
- Manovella: 60mm;
- Bilanciere: 50mm;
- Pianta del piede: 260mm;

Le altre misure utilizzate all'interno della protesi sono state ricavate partendo da quest'ultime.

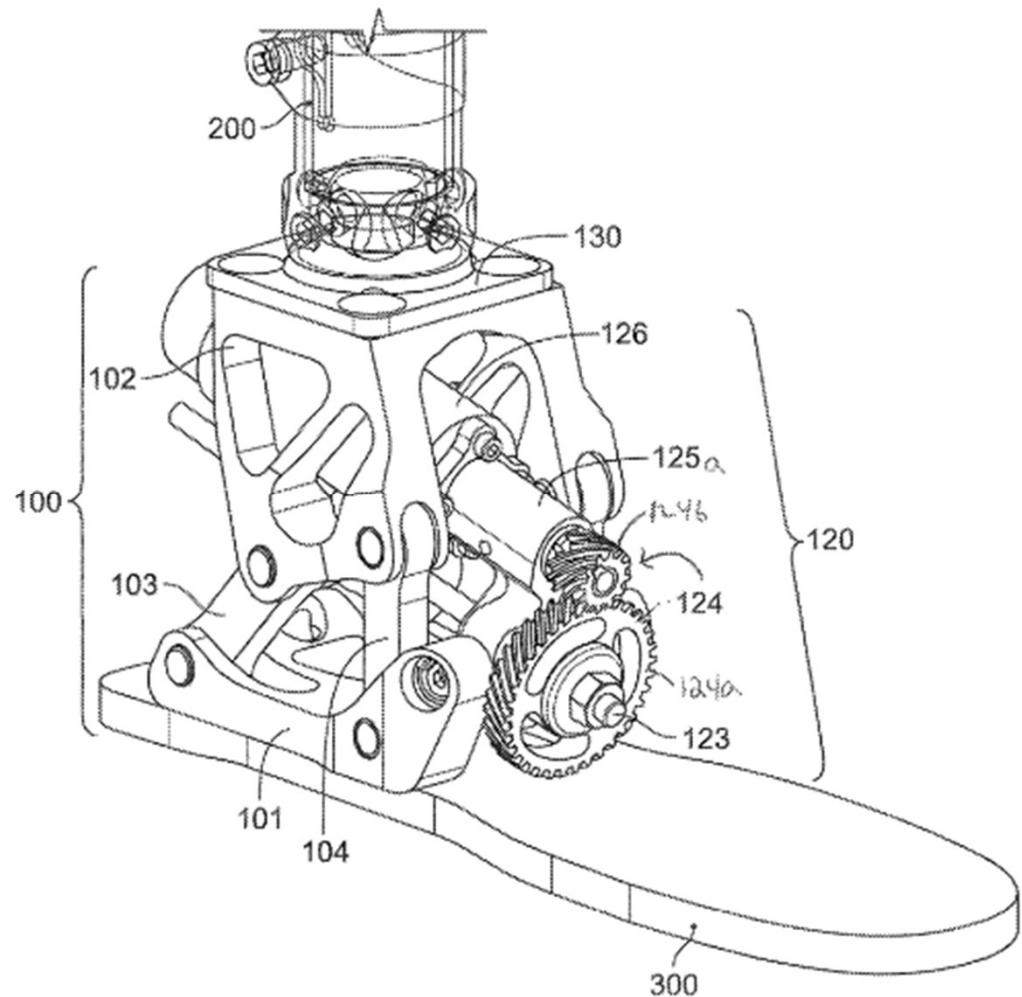


Modellazione parti e assiemi

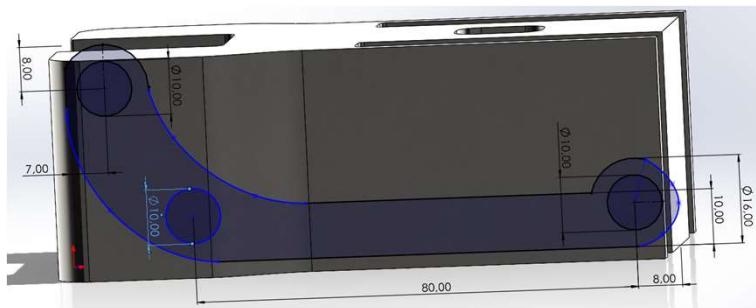
In questa sezione si eseguirà un approfondimento in merito alla **realizzazione delle parti** tramite l'analisi dell'albero delle lavorazioni di **Solidworks**.

Vengono di seguito elencate le suddette parti:

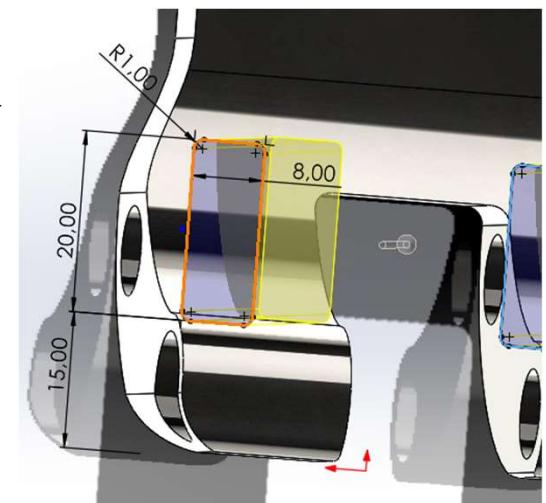
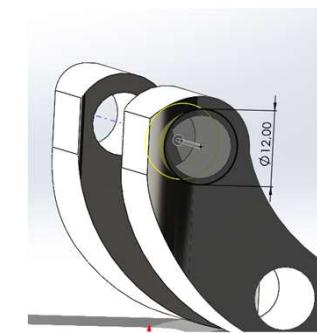
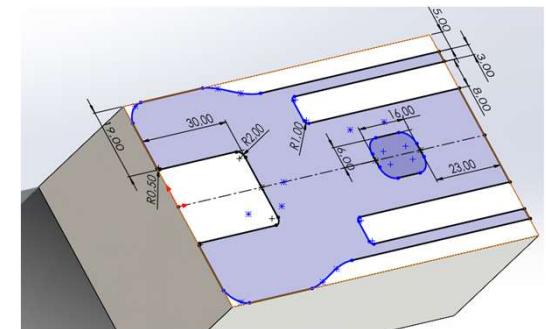
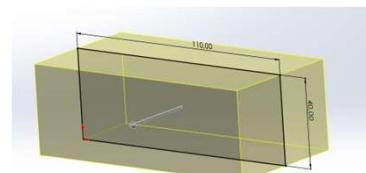
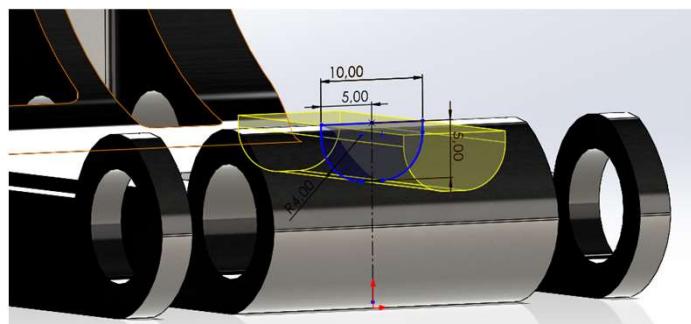
- Quadrilatero articolato
- Motore
- Roller Screw
- Ingranaggi
- Componenti vari



Quadrilatero articolato Telaio

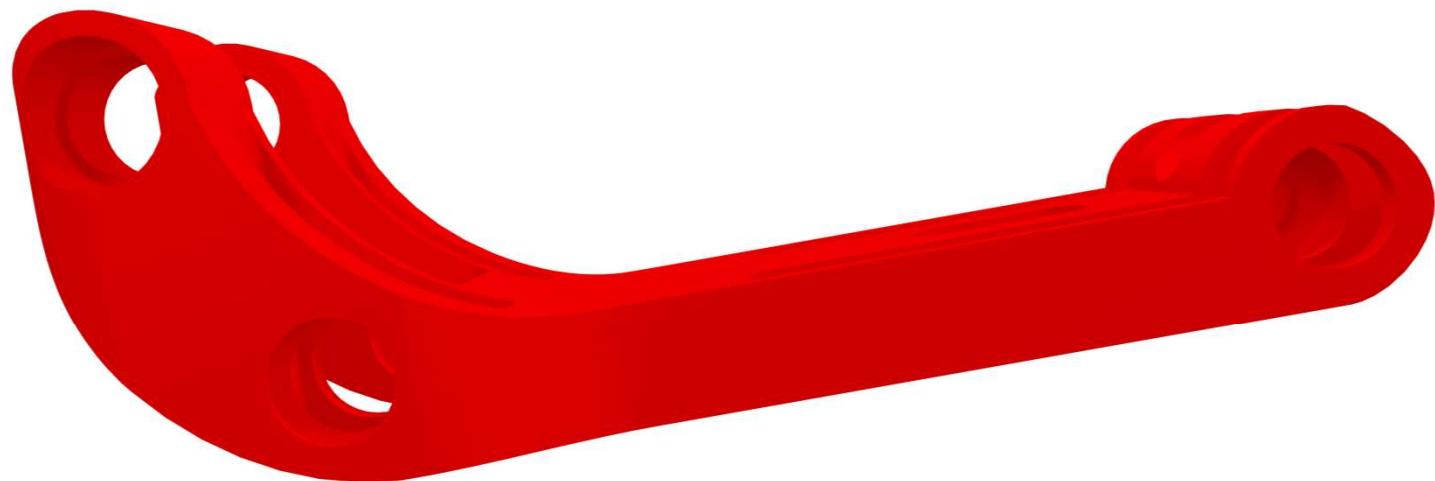


- ▼ Estrusione-Estrusione1
 - └ Schizzo2
- ▼ Taglio-Estrusione1
 - └ (-) Schizzo3
- ▼ Taglio-Estrusione2
 - └ (-) Schizzo4
- ▼ Taglio-Estrusione6
 - └ Schizzo7
- └ Specchia1
- └ Piano2
- ▼ Taglio-Estrusione9
 - └ (-) Schizzo8
- ▼ Taglio-Estrusione10
 - └ (-) Schizzo9

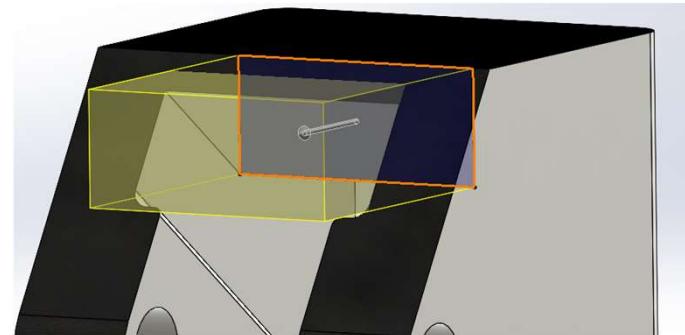
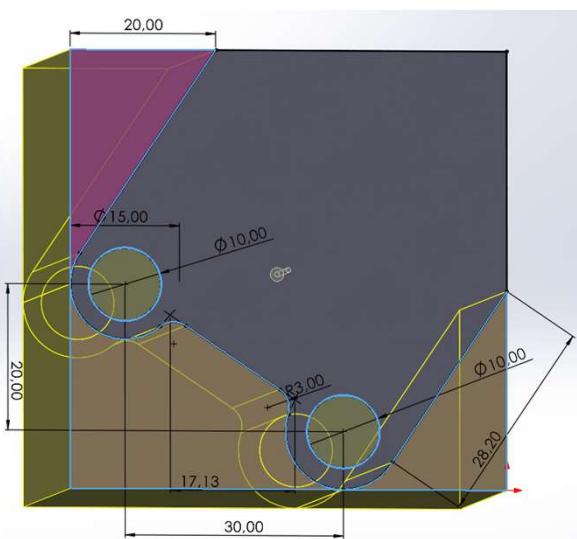


Quadrilatero articolato

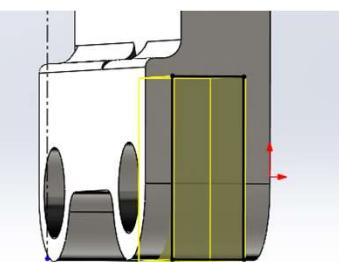
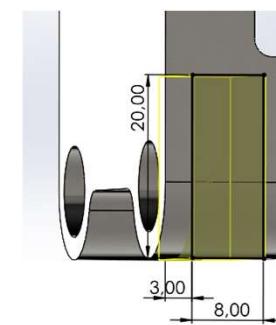
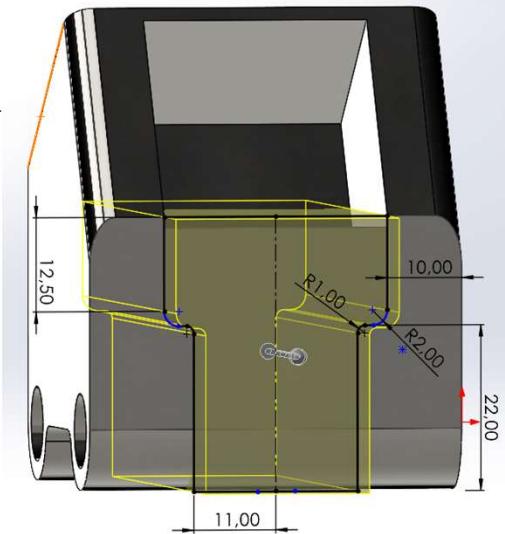
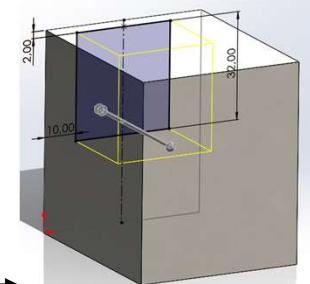
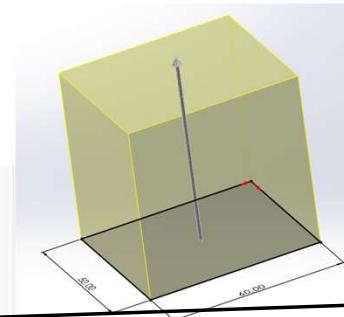
Telaio



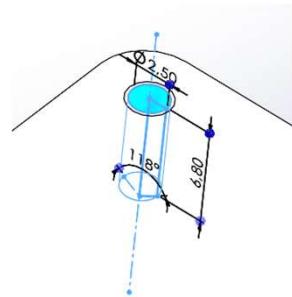
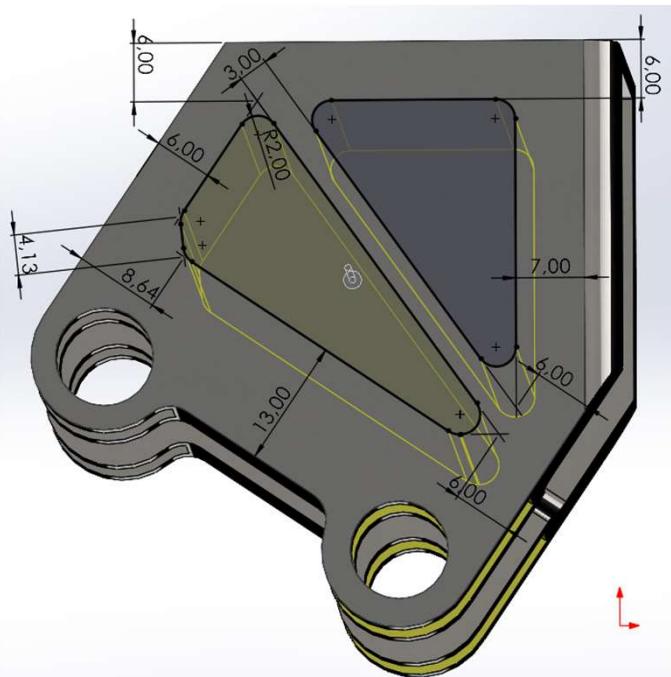
Quadrilatero articolato Biella (1)



- ▼ Estrusione-Estrusione1
 - └ Schizzo2
- ▼ Taglio-Estrusione1
 - └ Schizzo3
- ▼ Taglio-Estrusione2
 - └ Schizzo4
- └ Raccordo1
- ▼ Taglio-Estrusione3
 - └ (-) Schizzo8
- ▼ Taglio-Estrusione8
 - └ Schizzo12
- └ Taglio-Estrusione5
 - └ Schizzo10
- ▼ Taglio-Estrusione9
 - └ Schizzo13
- ▼ Taglio-Estrusione10
 - └ Schizzo14
- ▼ Taglio-Estrusione11
 - └ (-) Schizzo15
- └ Raccordo4
- └ Raccordo5

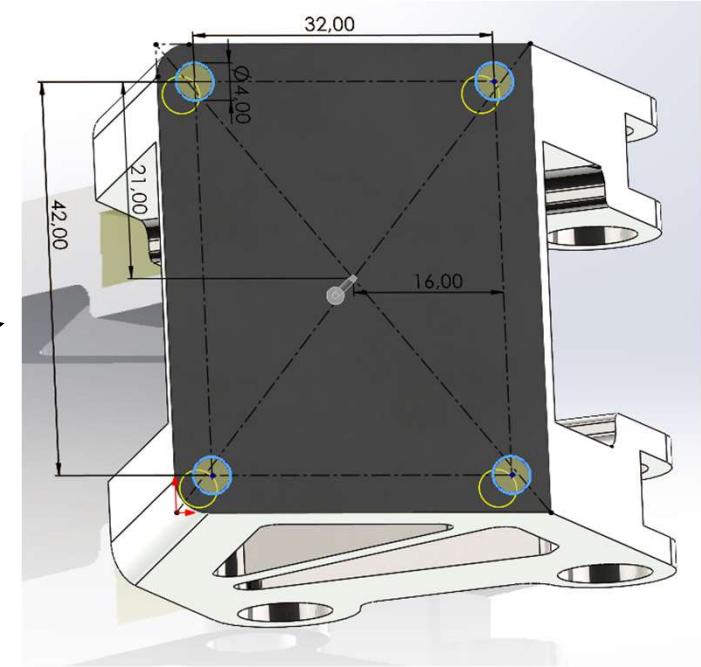
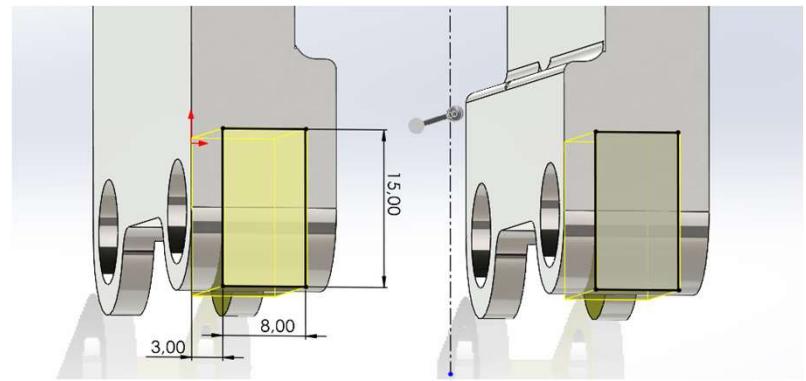


Quadrilatero articolato Biella (2)



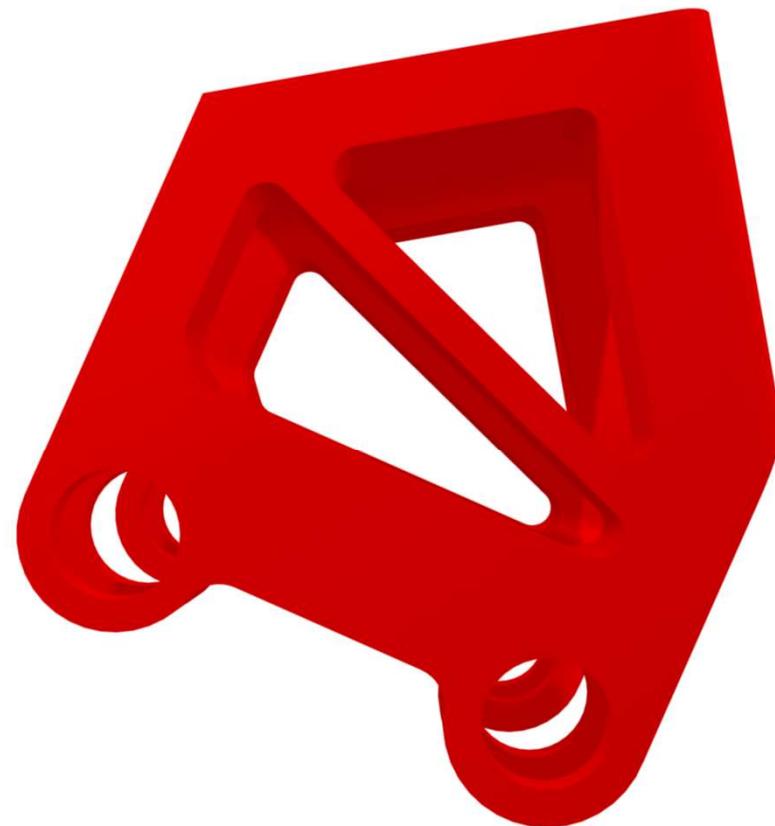
Filettati

- ▼ Estrusione-Estrusione1
 - └ Schizzo2
- ▼ Taglio-Estrusione1
 - └ Schizzo3
- ▼ Taglio-Estrusione2
 - └ Schizzo4
- └ Raccordo1
- ▼ Taglio-Estrusione3
 - └ (-) Schizzo8
- ▼ Taglio-Estrusione8
 - └ Schizzo12
- ▼ Taglio-Estrusione5
 - └ Schizzo10
- ▼ Taglio-Estrusione9
 - └ Schizzo13
- ▼ Taglio-Estrusione10
 - └ Schizzo14
- ▼ Taglio-Estrusione11
 - └ (-) Schizzo15
- └ Raccordo4
- └ Raccordo5
- └ Schizzo15
- └ Foroavanzato1



Quadrilatero articolato

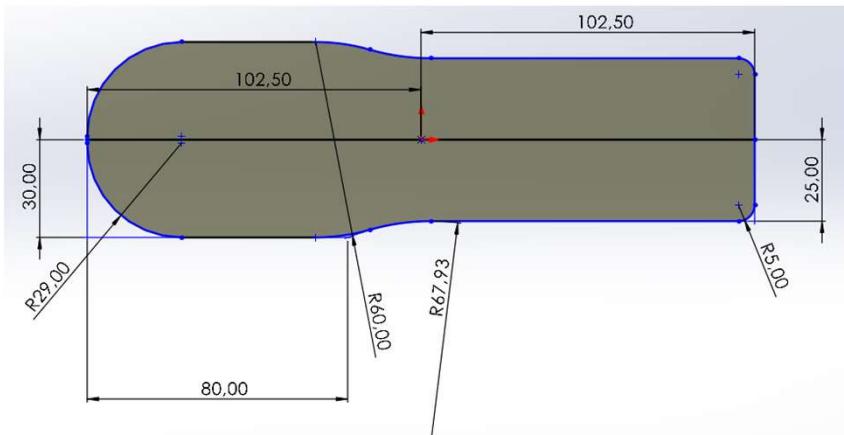
Biella (2)



Quadrilatero articolato

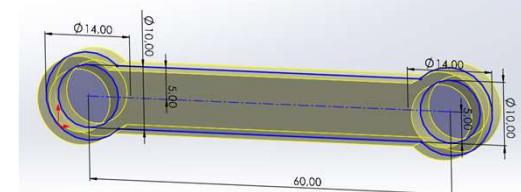
Base

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1



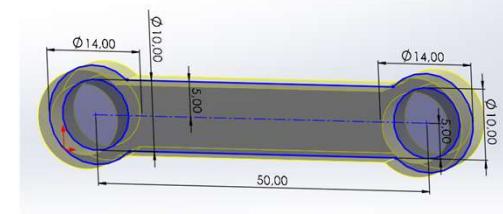
Manovella

▼ Estrusione-Estrusione2
└ (-) Schizzo1
 Raccordo1

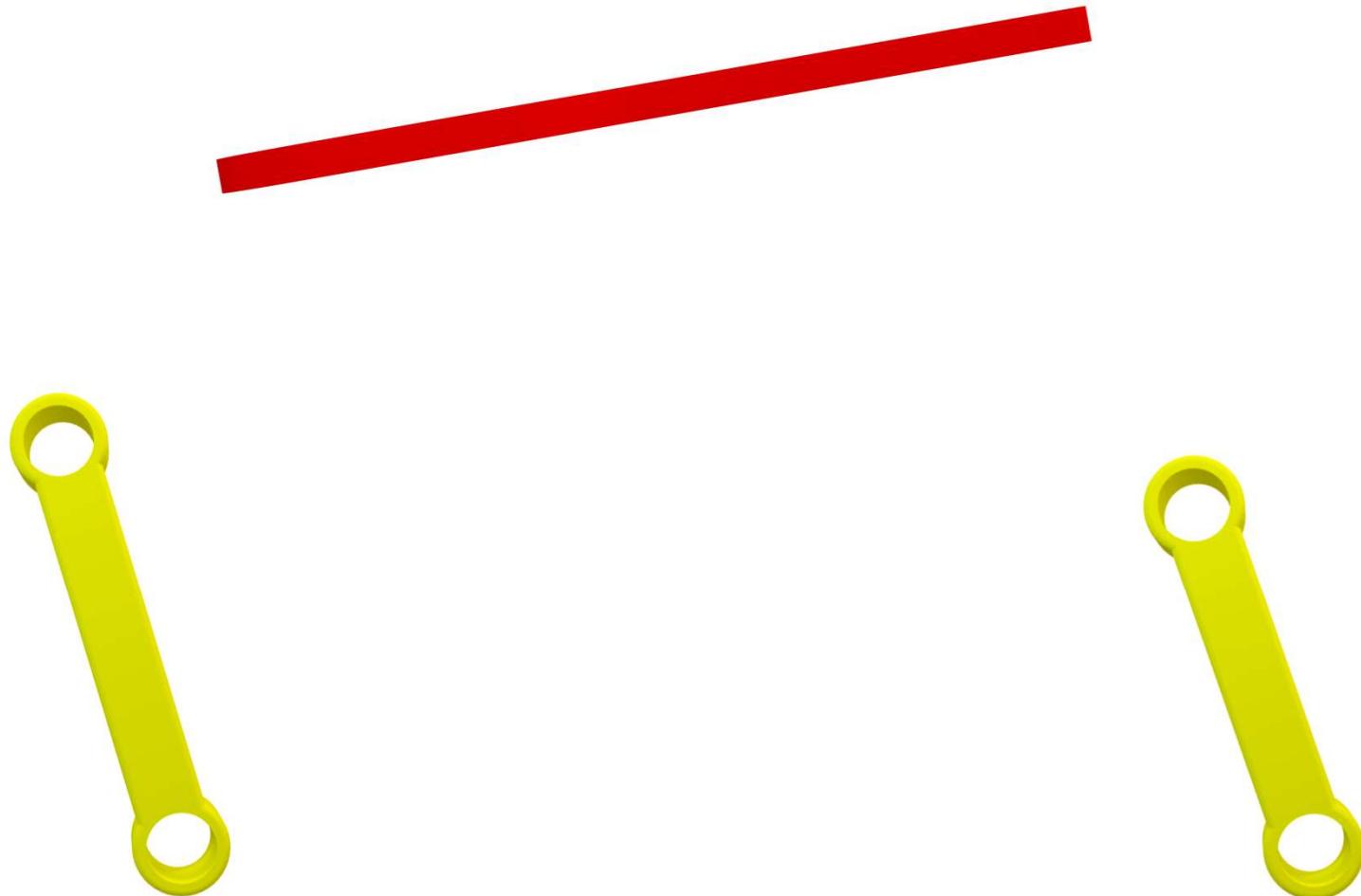


Bilanciere

▼ Estrusione-Estrusione2
└ (-) Schizzo1
 Raccordo1

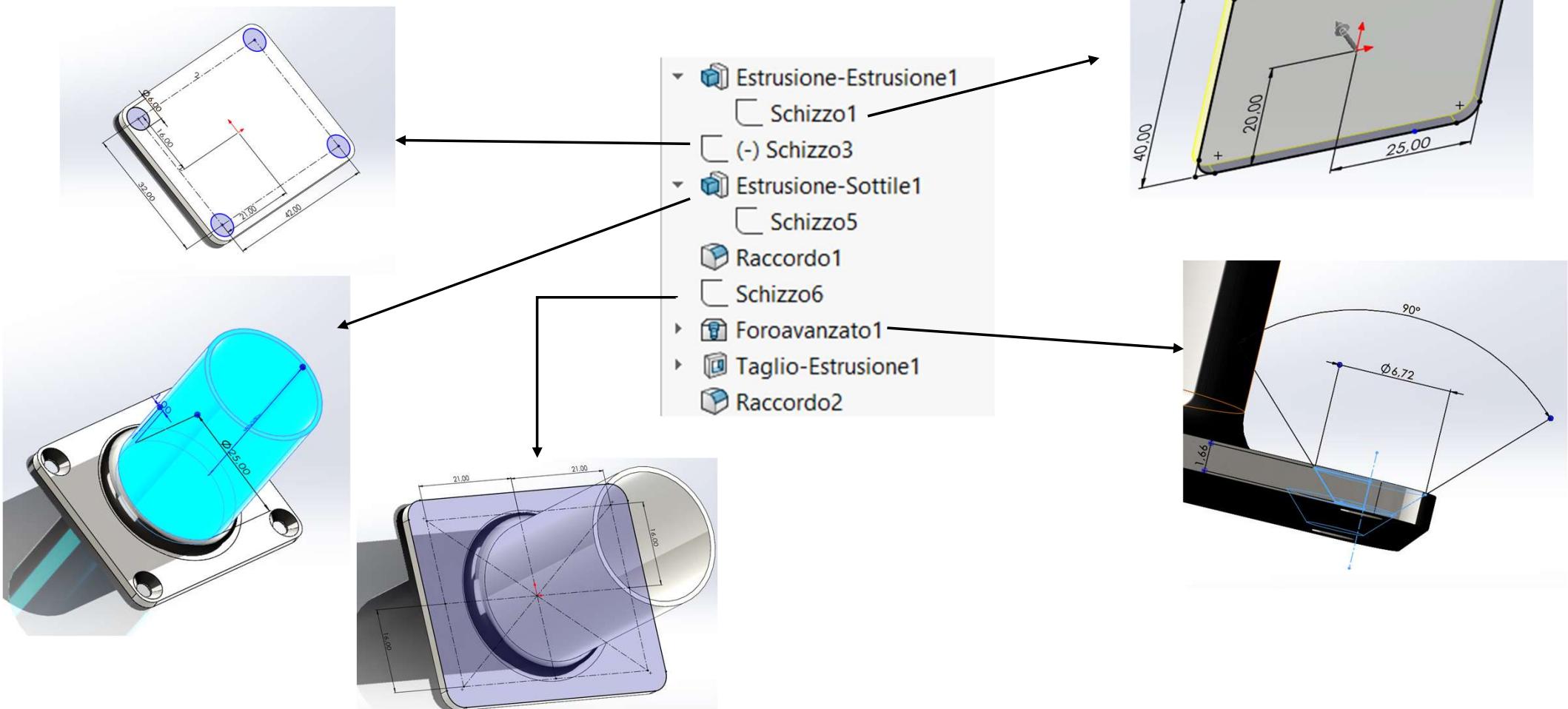


Quadrilatero articolato



Quadrilatero articolato

Base superiore



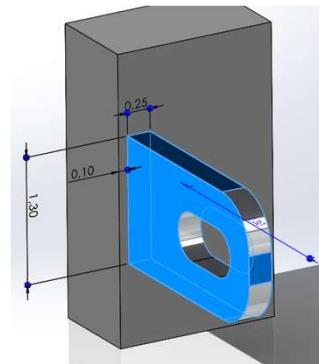
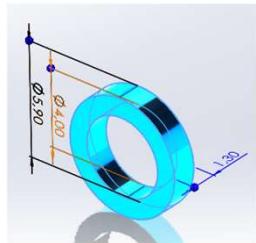
Quadrilatero articolato
Base superiore



Motore

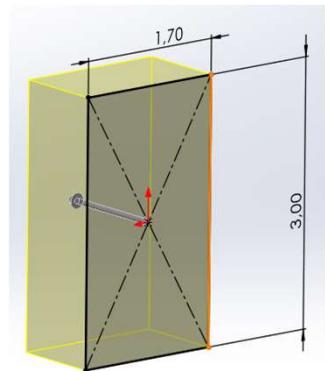
Shaft Holder

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1



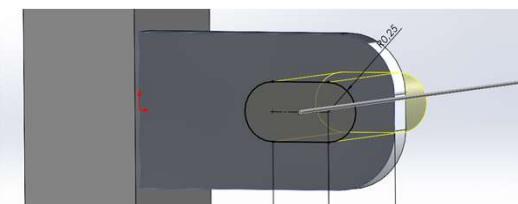
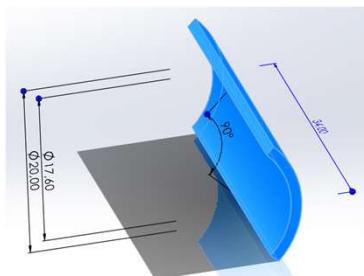
Connettore

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1
▼ Estrusione-Estrusione2
└ Schizzo2
Raccordo1
▼ Taglio-Estrusione1
└ Schizzo3

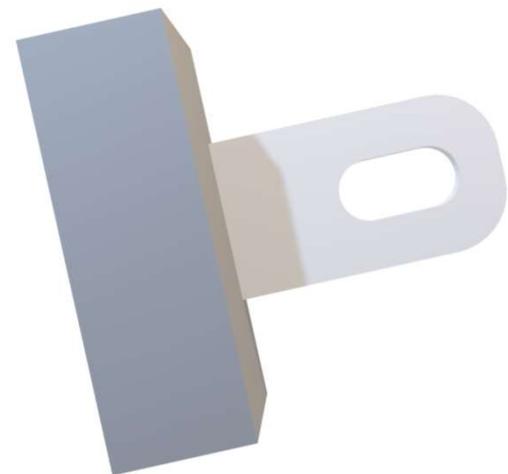
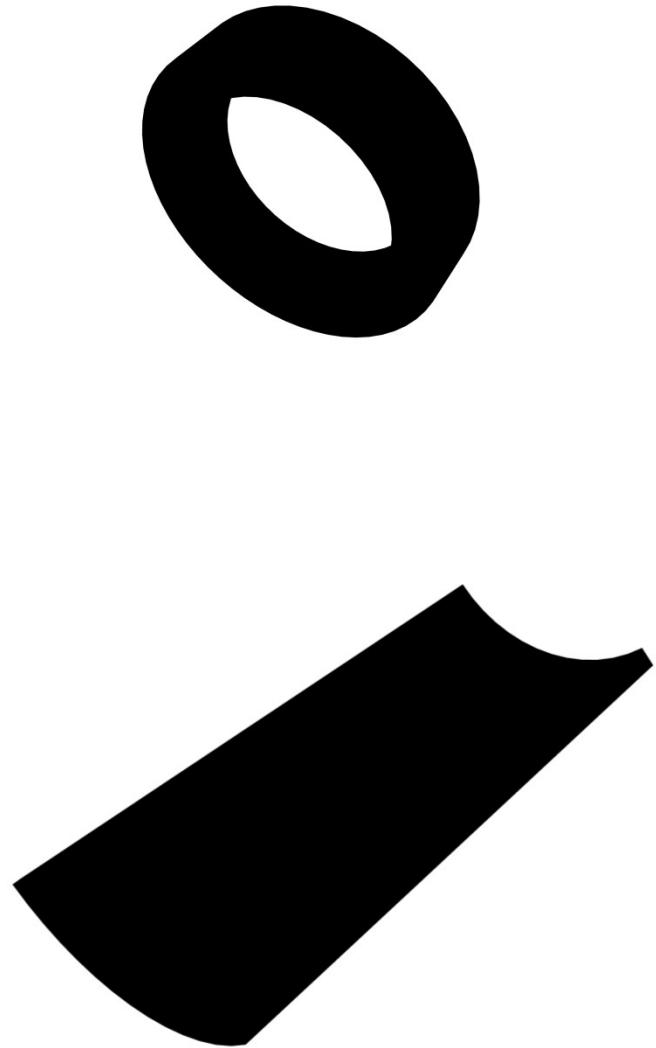


Magnete

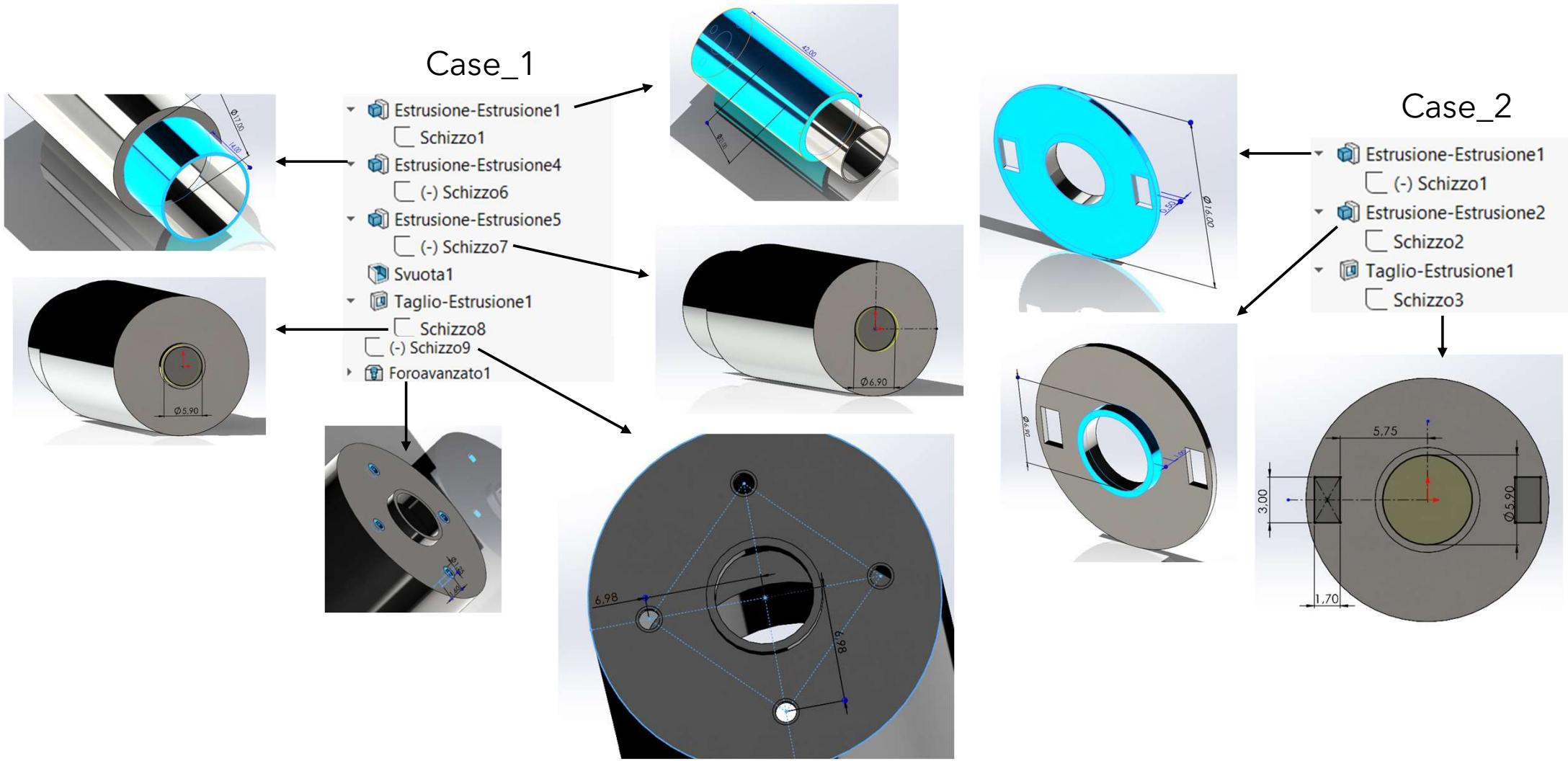
▼ Estrusione-Estrusione1
└ (-) Schizzo1



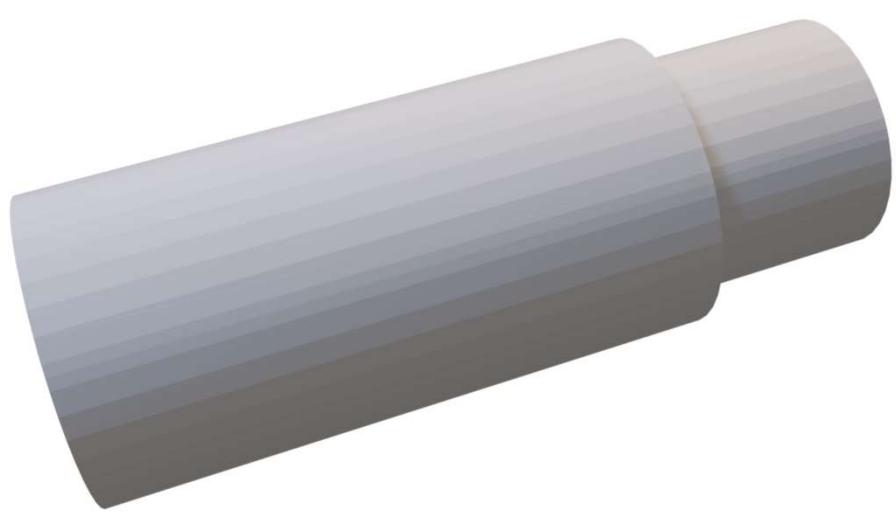
Motore



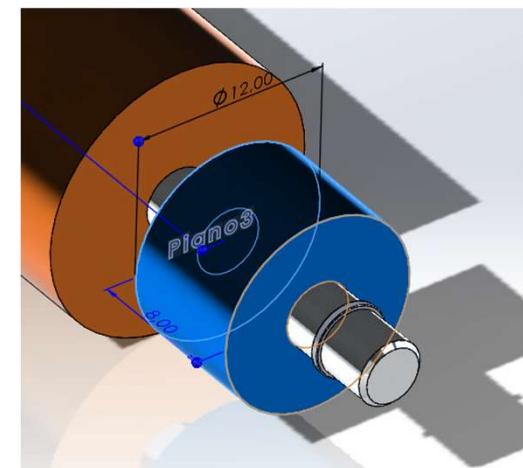
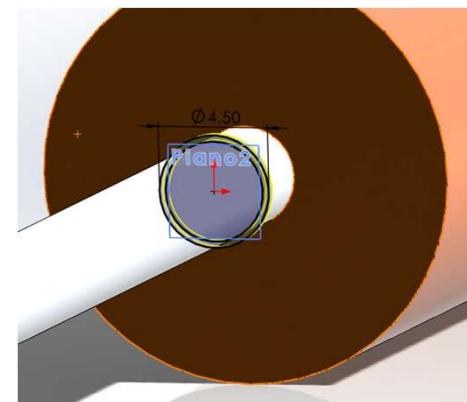
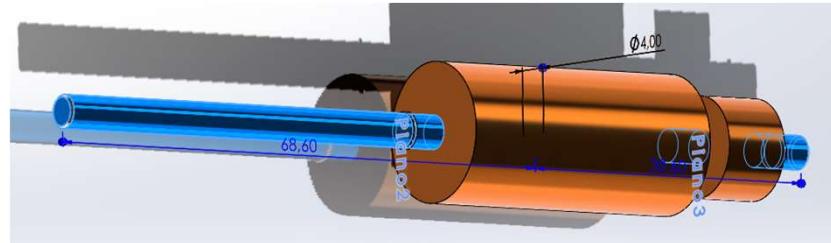
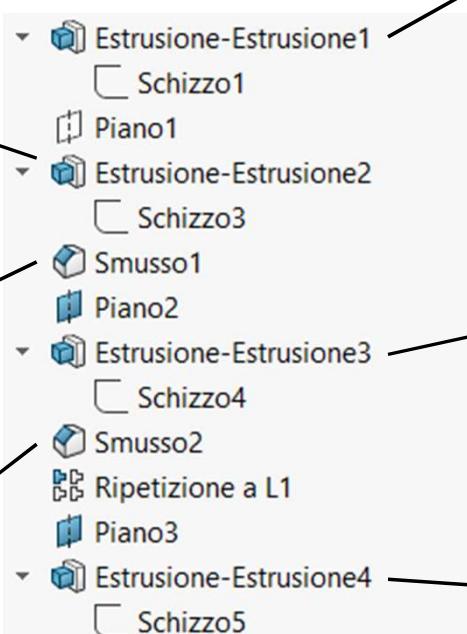
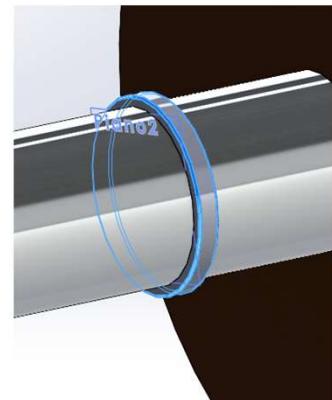
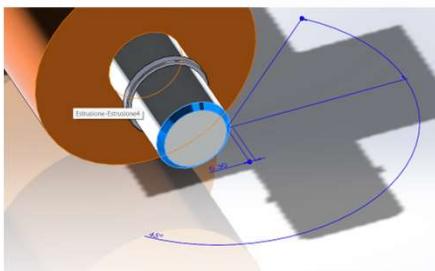
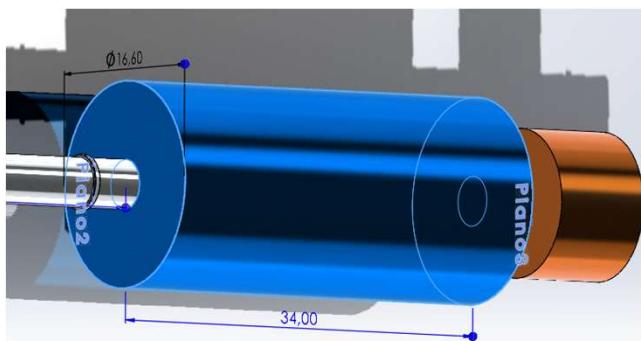
Motore



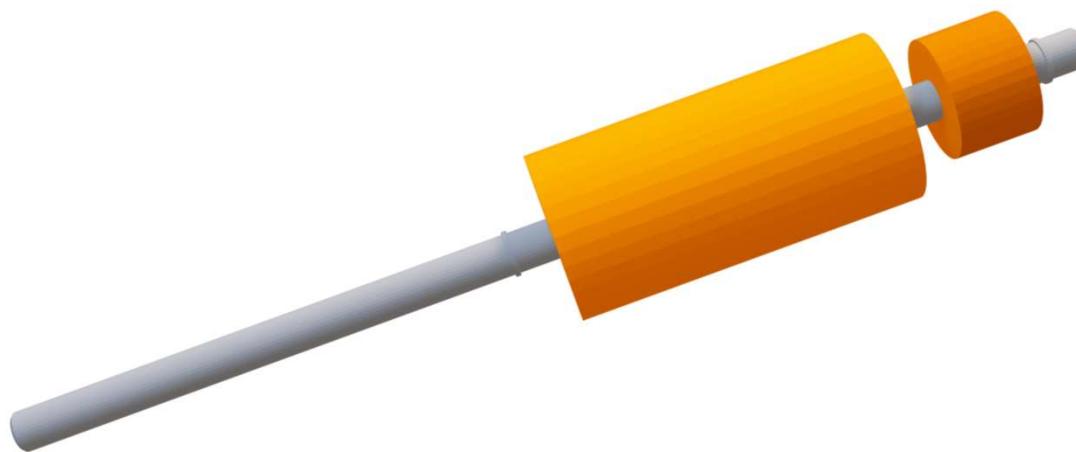
Motore



Motore Rotore



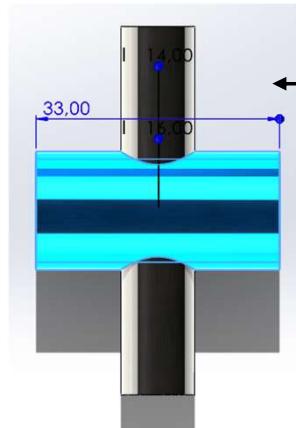
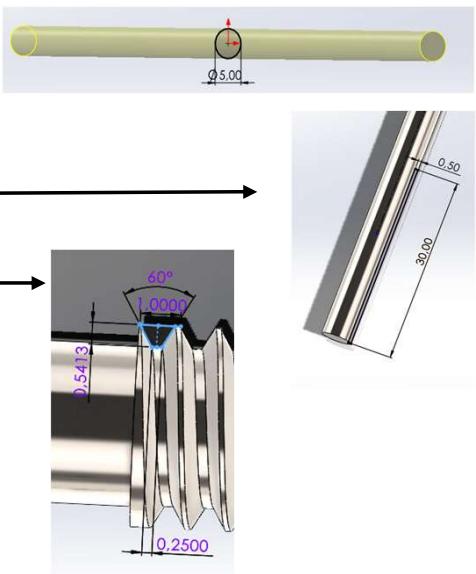
Motore Rotore



Roller Screw

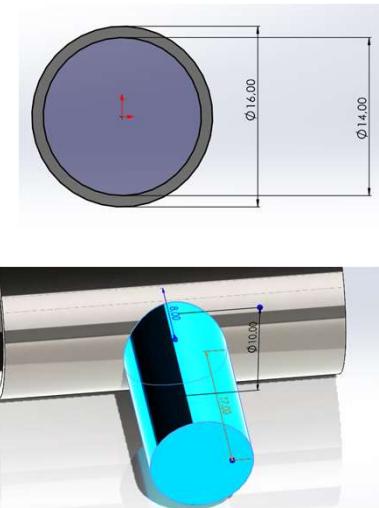
Barra filettata

- Estrusione-Estrusione1
 - Schizzo1
- Taglia-Rivoluzione1
 - Schizzo2
- Filettatura1
 - Profilo filettatura1
 - Smusso1



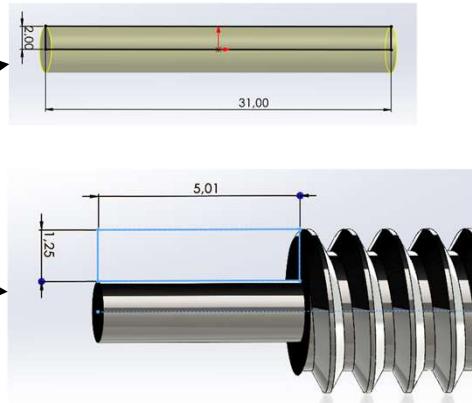
Case_1

- Estrusione-Estrusione1
 - Schizzo1
- Piano1
- Estrusione-Estrusione5
 - Schizzo10
 - Specchia1



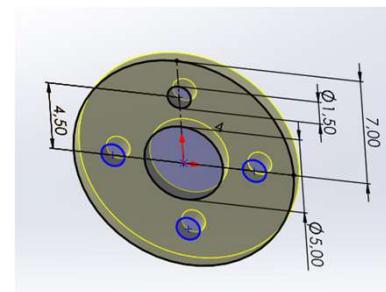
Filetti interni

- Rivoluzione1
 - Schizzo11
- Filettatura2
 - Profilo filettatura2
- Taglia-Rivoluzione2
 - Schizzo14

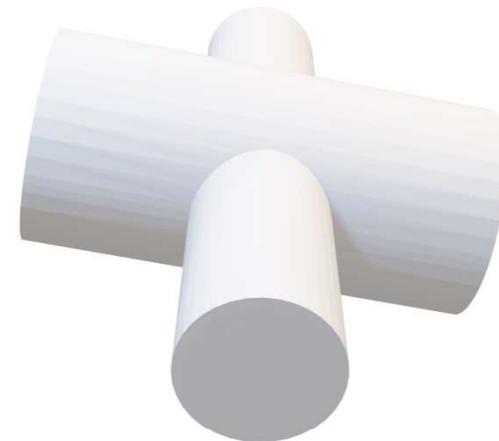


Finale

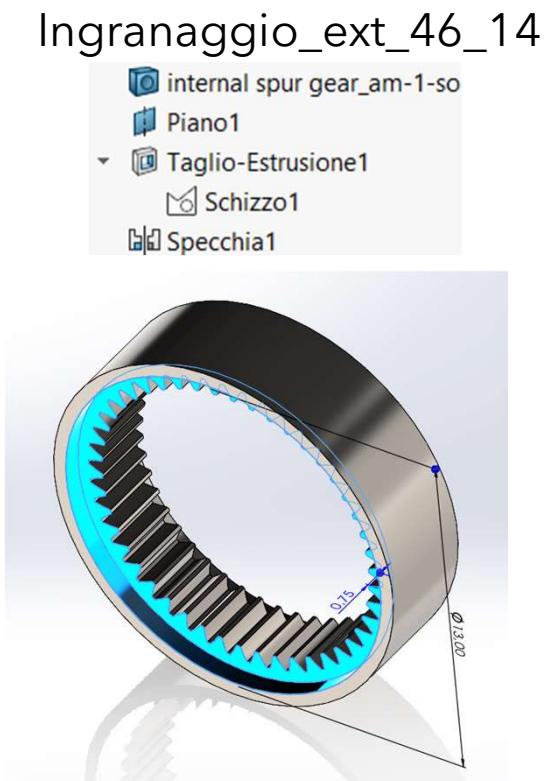
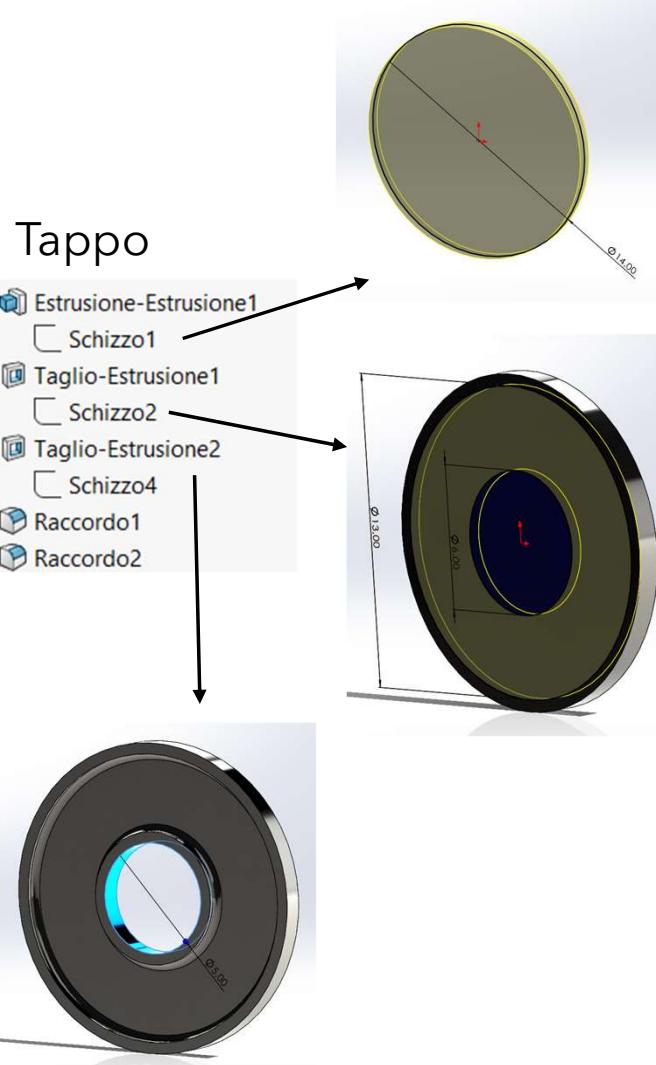
- Estrusione-Estrusione1
 - (-) Schizzo1



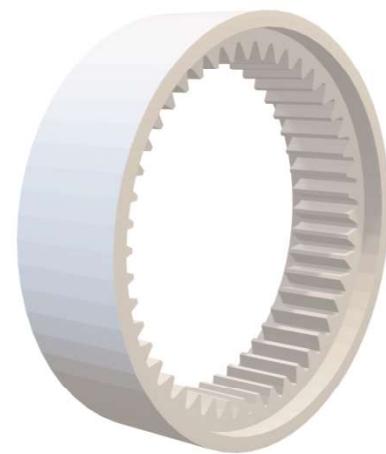
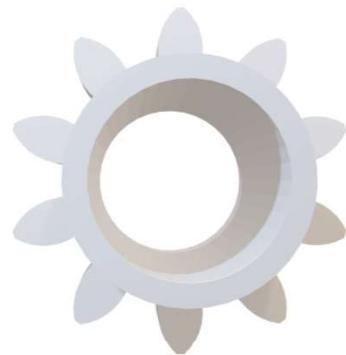
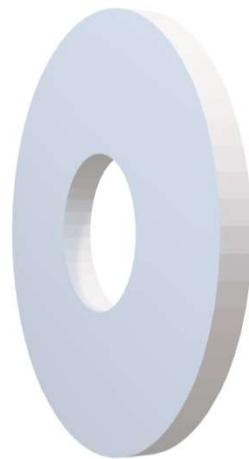
Roller Screw



Roller Screw



Roller Screw

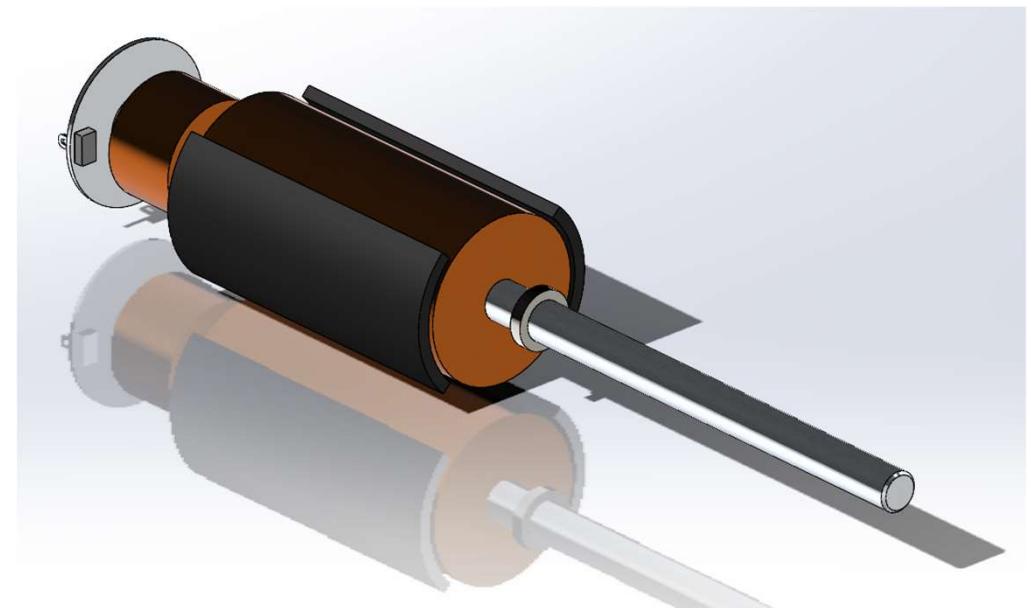


Assiemi

Roller Screw



DC Motor



Ingranaggi

Per modellare gli **ingranaggi elicoidali** (parte fondamentale della trasmissione della protesi), si è partiti dai componenti del toolbox per poi modificarli per renderli il più fedeli possibile con quelli visibili nel brevetto.

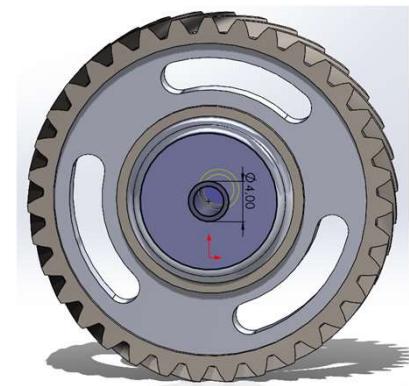
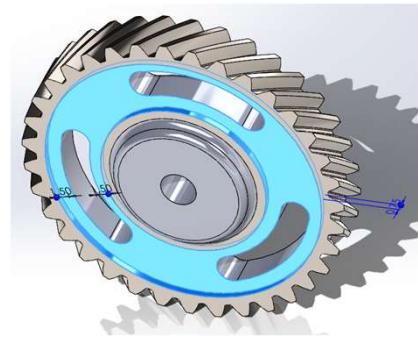
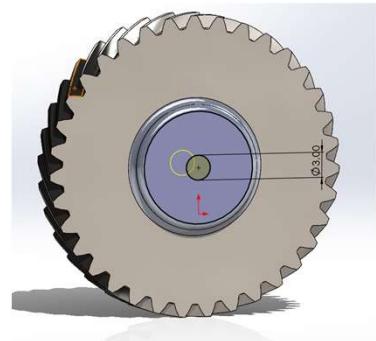
Di seguito sono riportate tutte le caratteristiche inerenti a queste componenti, le quali sono state trovate anche tramite diverse prove di montaggio nell'assieme finale.

	DIREZIONE ELICA	DENTI	MODULO	SPESSORE	ANGOLO ELICA	ANGOLO PRESSIONE	ALBERO
PICCOLO	SX	12	0.7	10	50	20	4
GRANDE	DX	36	0.7	8	45	20	4

Ingranaggi

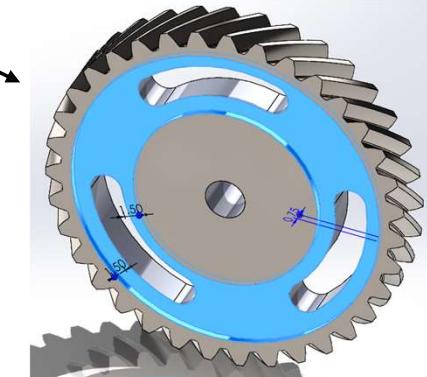
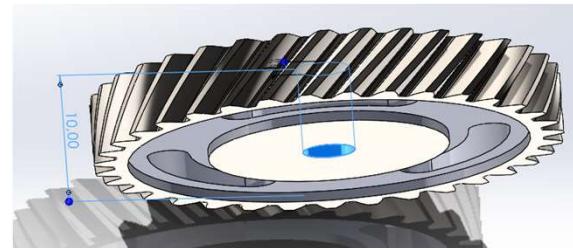
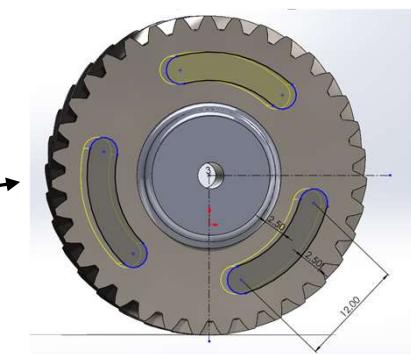
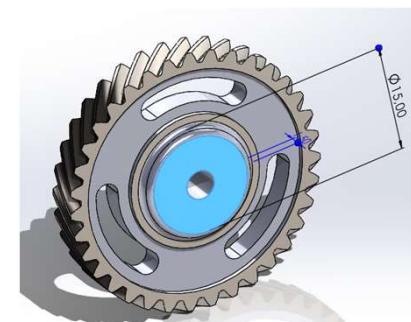
Ingranaggio eli_1

- helical gear_3_am-1-solid1
- Taglio-Estrusione1
- Schizzo1



Ingranaggio eli_2

- helical gear_3_am-1-solid1
- Estrusione-Estrusione1
 - Schizzo1
- Raccordo1
- Taglio-Estrusione1
 - Schizzo2
- Taglio-Estrusione2
 - (-) Schizzo3
- Taglio-Estrusione3
 - Schizzo4
- Taglio-Estrusione4
 - Schizzo5
- Taglio-Estrusione5
 - Schizzo6

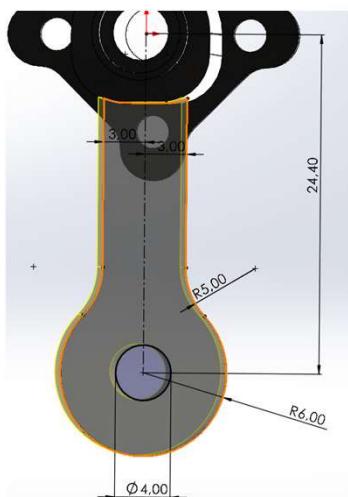
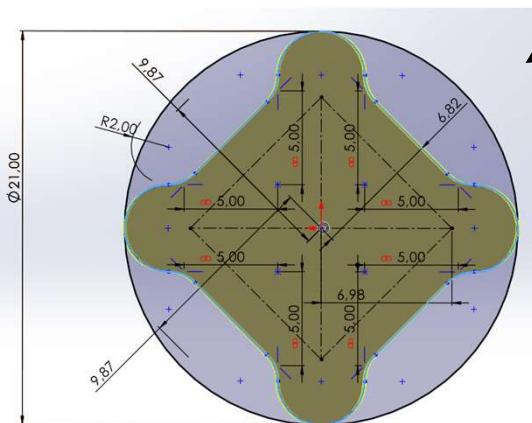


Ingranaggi

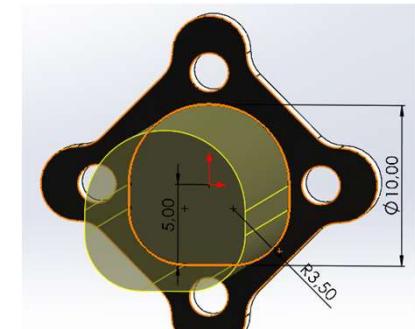
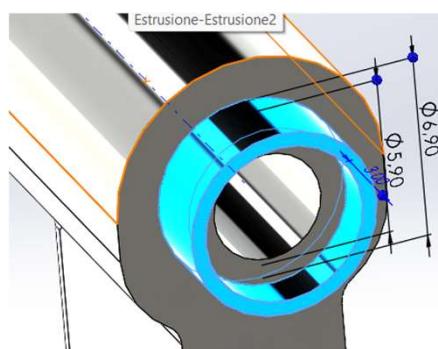
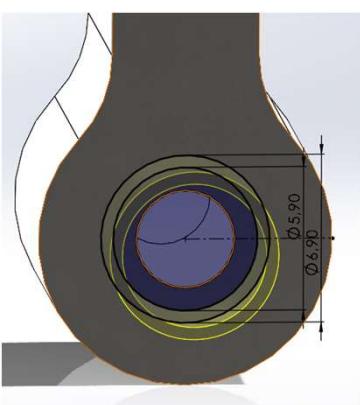
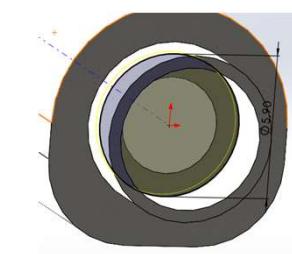
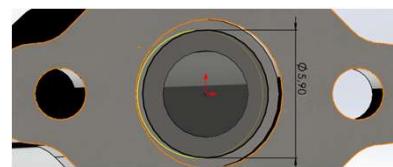
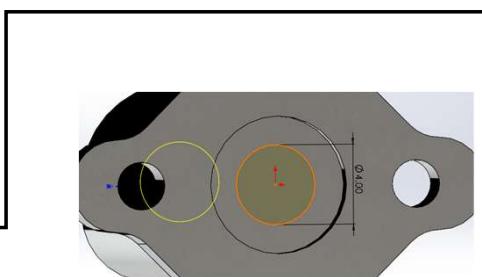


Componenti vari

Supporto (1)

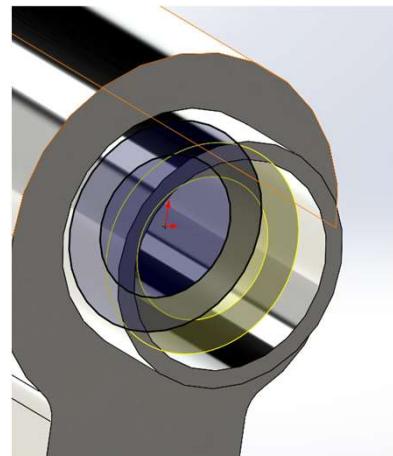
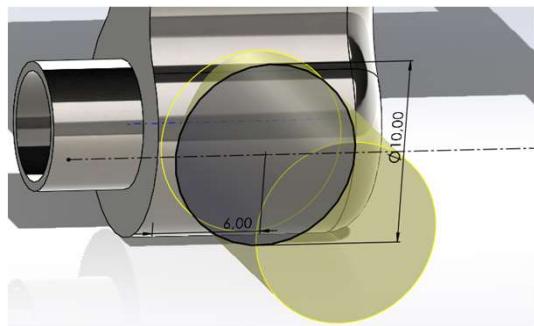


- Estrusione-Estrusione1
 - (-) Schizzo1
- Estrusione-Estrusione2
 - Schizzo2
- Taglio-Estrusione2
 - Schizzo4
- Taglio-Estrusione3
 - Schizzo5
- Taglio-Estrusione4
 - Schizzo6
- Estrusione-Estrusione3
 - Schizzo7
- Taglio-Estrusione5
 - Schizzo8
- Piano1
- Estrusione-Estrusione4
 - Schizzo9
- Estrusione-Estrusione5
 - Schizzo10
- Raccordo1
- Raccordo2

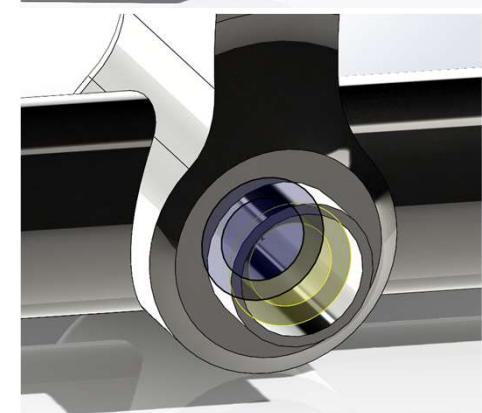
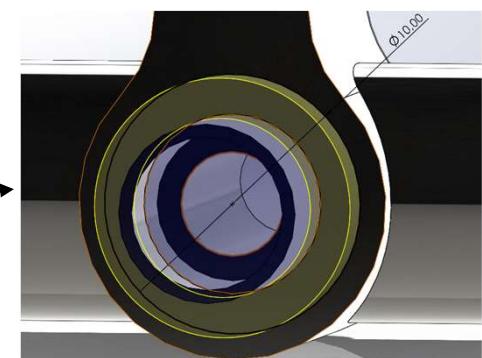
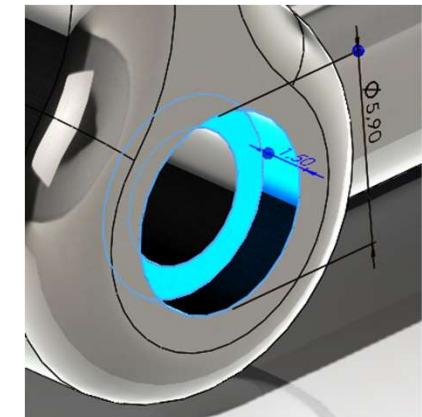


Componenti vari

Supporto (2)



- Raccordo2
- Taglio-Estrusione7
- Raccordo3
- Piano2
- Estrusione-Estrusione6
 - Schizzo13
- Specchia1
- Estrusione-Estrusione7
 - Schizzo14
- Raccordo4
- Estrusione-Estrusione8
 - Schizzo15
- Estrusione-Estrusione9
 - Schizzo16



Componenti vari

Supporto



Componenti vari

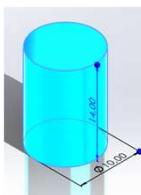
Perno

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1



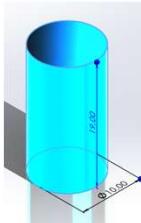
Perno_1

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1



Perno_2

▼ Estrusione-Estrusione1
└ Schizzo1

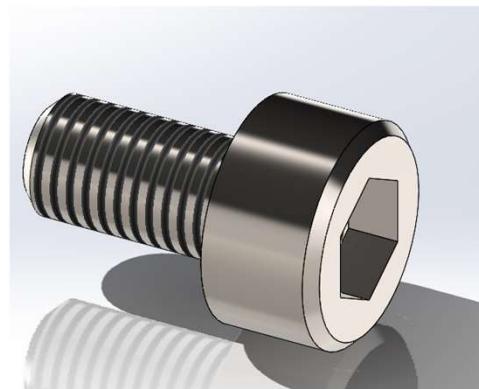


Bullone base superiore



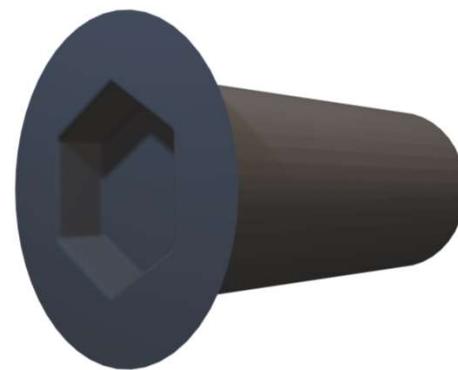
Dimensione	M3
Lunghezza	8mm
Lunghezza filettatura	8mm

Bullone motore

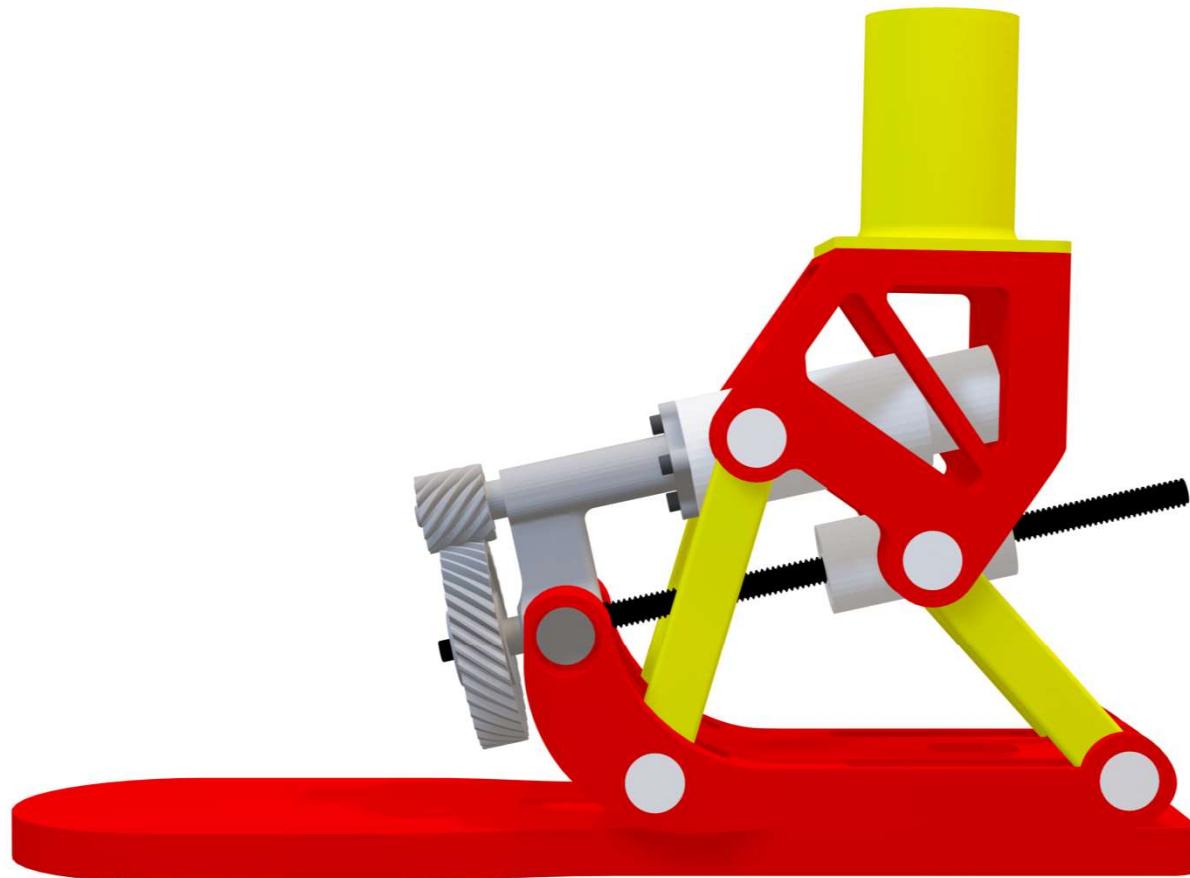


Dimensione	M1.6
Lunghezza	5mm
Lunghezza filettatura	5mm

Componenti vari

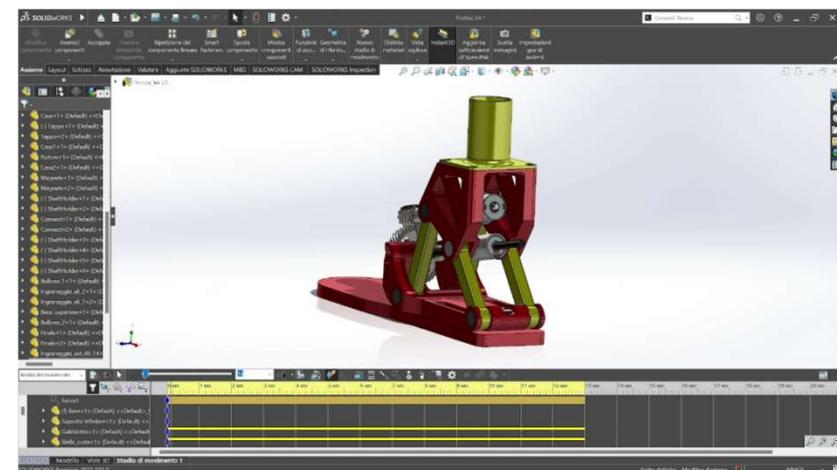
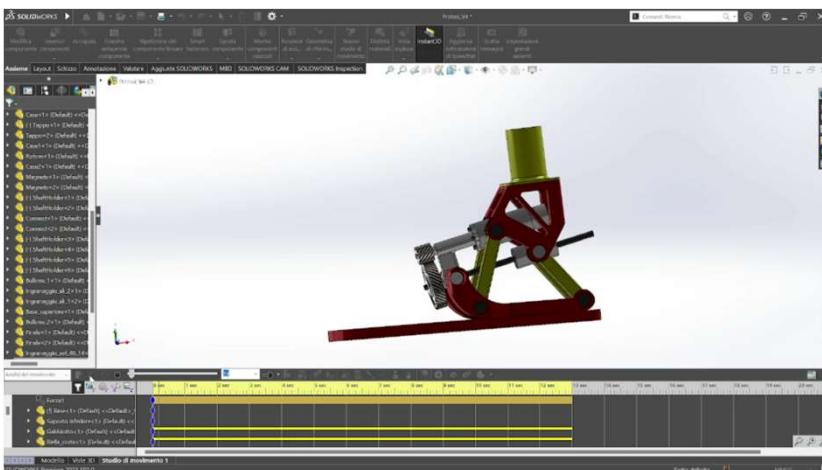
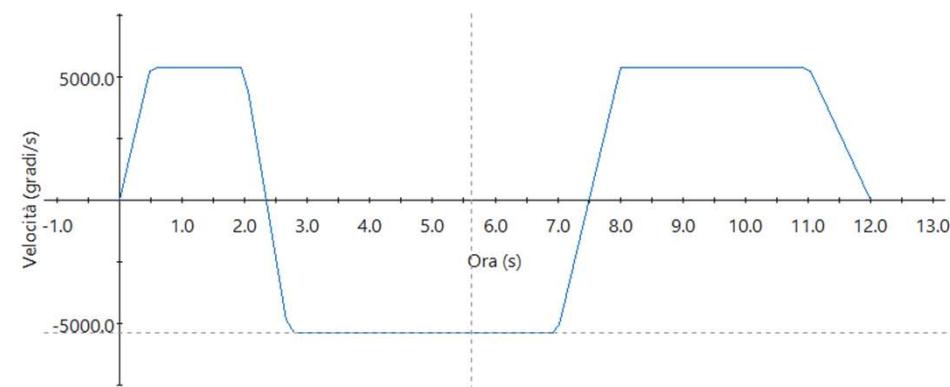


Assieme finale Protesi



Analisi del movimento

Per eseguire l'analisi del movimento è stato inserito un **motore in corrispondenza del rotore del motore reale** impostando un profilo di velocità a punti dati (vedi fig.). Successivamente è stato inserito **l'attrito tra gli ingranaggi elicoidali** della trasmissione e tra i componenti del roller screw. Non è stato possibile inserire ulteriori attriti (ad es. tra telaio e perno) poiché si andava ad appesantire eccessivamente la simulazione, tanto da impedirne lo svolgimento. Infine è stata applicata una **forza agente** sulla base superiore pari al peso della persona presa in esame (un membro del gruppo).



Analisi del movimento

Grafici della coppia

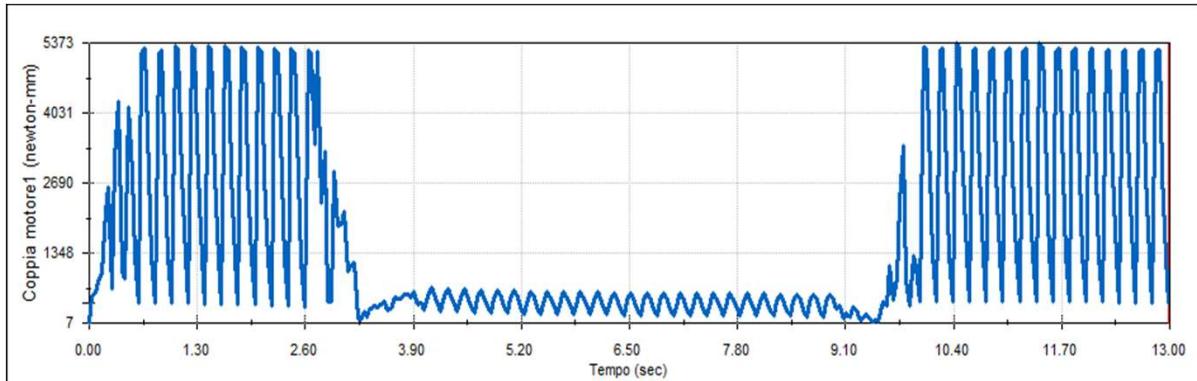
Per avere una maggiore visione sulla correttezza dell'assieme, è stato inserito un grafico relativo alla coppia motrice.

Sono state eseguite due differenti simulazioni variando le condizioni di attrito, in particolare, considerando:

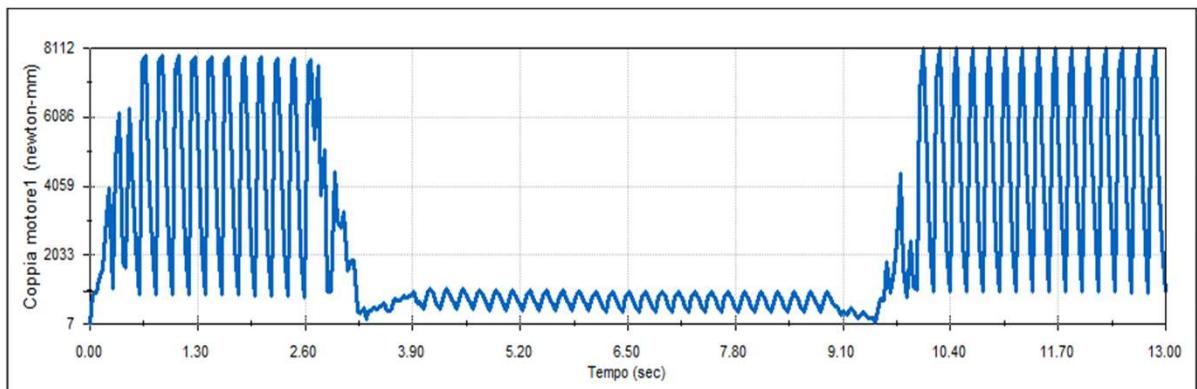
1. Attrito tra metallo lubrificato
2. Attrito tra metallo a secco

Analizzando i grafici, è possibile notare come la coppia massima necessaria **differisca notevolmente** tra le due simulazioni. Questo risultato è **concorde con la realtà poiché il coefficiente di attrito del primo caso è minore rispetto al secondo.**

Lubrificato



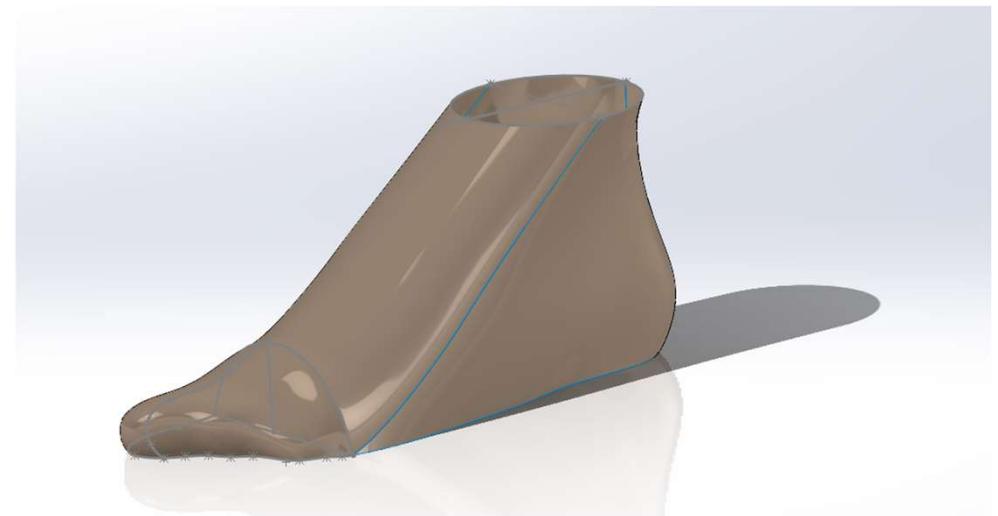
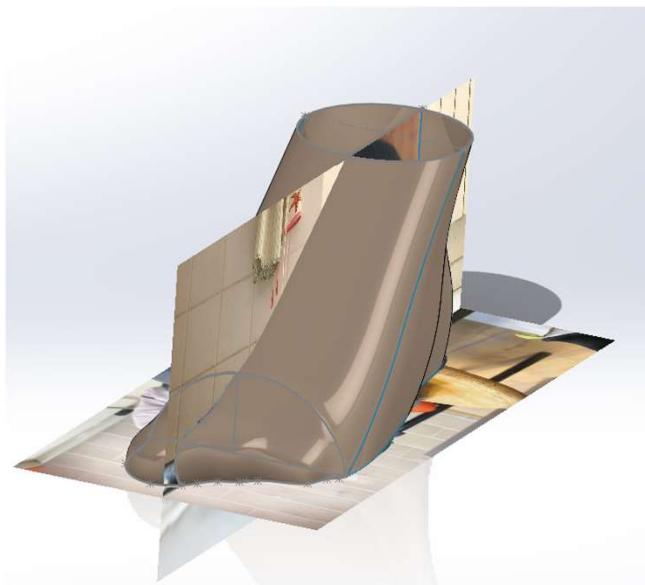
A secco





Attività integrative

Modellazione della superficie del piede





Immagini di partenza

Queste sono le due immagini utilizzate per modellare la superficie che servirà per il rivestimento della protesi della caviglia policentrica.

