

Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
Tesi di Laurea Magistrale



**Politecnico
di Torino**

“Progetto di un dispositivo per analisi fMRI durante il moto della mano”

Relatori

Prof.ssa Gabriella Eula

Prof. Terenziano Raparelli

Prof. Luigi Mazza

Prof. Katiuscia Sacco

Candidato

Nicolò Ferrero

Anno Accademico 2021-2022

Introduzione	4
Scopo della tesi.....	10
Movimenti da imporre.....	11
Tempi di movimentazione.....	14
Angoli di movimentazione	16
Misure antropometriche della mano del paziente.....	20
CAPITOLO 1: Guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici costruiti in materiale siliconico	21
1.1 Presentazione degli attuatori pneumatici morbidi in materiale siliconico	21
1.1.1 Materiali siliconici per la realizzazione degli attuatori pneumatici	23
1.1.2 Stampi per la produzione degli attuatori pneumatici in materiale siliconico	28
1.2 Installazione dei cilindri pneumatici in materiale siliconico sul guanto ad elasticità differenziata.....	56
1.3 Materiali tessili per la realizzazione del guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico	59
CAPITOLO 2: Guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici.....	64
2.1 Presentazione dei muscoli pneumatici	64
2.2 Materiali tessili per la realizzazione del guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici	68
2.3 Installazione dei muscoli pneumatici sul guanto ad elasticità differenziata	70
CAPITOLO 3: Struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici	72
3.1 Presentazione del box per attuare i cilindri pneumatici amagnetici.....	74
3.2 Cilindri pneumatici amagnetici commerciali	84
3.3 Installazione dei cilindri pneumatici alla struttura a box	91
3.4 Cappucci per il collegamento delle dita del paziente e i cilindri pneumatici amagnetici e fascia per il polso	93
3.5 Preparazione del dispositivo per eseguire l'analisi fMRI	100
3.6 Esempi di movimenti possibili	106
Conclusioni: Commenti e confronti delle soluzioni studiate	111
Bibliografia e sitografia	113
Ringraziamenti	116

Introduzione

La risonanza magnetica funzionale (fMRI) è una tecnica di neuroimaging biomedica non invasiva.

Lo scopo delle tecniche di neuroimmagine è quella di valutare il metabolismo cerebrale, al fine di studiare l'attività del cervello durante l'esecuzione di un determinato compito, ad esempio: parlare, leggere, pensare o muovere una mano.

Questa tecnica è stata introdotta per la prima volta all'inizio degli anni novanta da K.Thulborn e S.Ogawa, i quali capirono l'importanza dell'ossigenazione sanguigna per acquisire immagini relative ad una determinata area cerebrale. Questo effetto prende il nome di effetto BOLD (blood oxygenation level dependent effect). La variazione del segnale BOLD è legata alla variazione del flusso sanguigno. Il livello di sangue dipende, nello spazio e nel tempo, dalle sostanze nutrienti essenziali al metabolismo del cervello.

L'fMRI permette di visualizzare le variazioni del segnale RM in una determinata regione cerebrale in seguito al cambiamento metabolico ed emodinamico.

Quando viene eseguita un'attività cerebrale si osserva un maggiore afflusso di sangue in quella determinata regione del cervello, con aumento della quantità di ossigeno. Questo cambiamento viene rilevato mediante un segnale di risonanza magnetica ed è possibile perché l'emoglobina contenuta nel sangue ha proprietà magnetiche differenti a seconda che sia legata o meno all'ossigeno [21,34,37,38].

Nella FIGURA I.1 è riportata la sequenza temporale di scansioni fMRI nel paziente oggetto di studio.

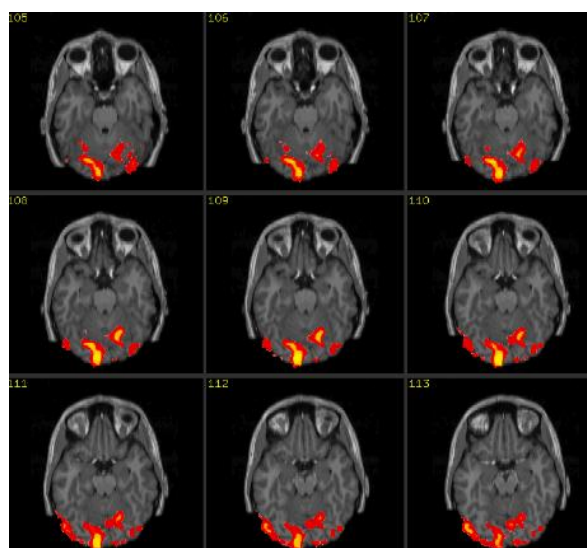


FIGURA I.1) Sequenza temporale di scansioni fMRI [17]

Oggigiorno si è cercato di realizzare macchinari per la risonanza magnetica più confortevoli per il paziente, con lo spazio sufficiente per eseguire i movimenti richiesti durante l'esame. Esistono due configurazioni di macchinari differenti, quelli chiusi (FIGURA I.2), che hanno una lunghezza tipica di 1.5 m e diametro di 60 o 70 cm, e quelli aperti (FIGURA I.3).



FIGURA I.2) Macchinario per l'analisi fMRI aperto [39]



FIGURA I.3) Macchinario per l'analisi fMRI chiuso [36]

Il macchinario per l'analisi fMRI è costituito dai seguenti componenti [2,3,12,33]:

- Magnete primario che crea il campo magnetico statico. I magneti più utilizzati sono quelli di tipo superconduttore, costituiti da fili superconduttori di nichel-titanio o niobio-titanio, avvolti in bobine che, a temperature prossime allo zero assoluto, generano il campo magnetico al passaggio della corrente elettrica. L'intensità dei campi generati è dell'ordine di 1T, 1.5T e 3T. I magneti superconduttivi sono i più utilizzati grazie all'elevata intensità del campo magnetico, omogeneità e stabilità temporale di campo.

In questo studio si considera un'intensità del campo magnetico pari a 1.5 T.

- Bobine di gradiente che si trovano a temperatura ambiente e generano il campo magnetico B_0 variabile nel tempo e nello spazio. Si tratta di bobine elettromagnetiche posizionate all'interno del magnete principale e orientate lungo le direzioni x, y e z (FIGURA I.4). Queste bobine, quando vengono attivate, permettono di modificare l'intensità del campo magnetico lungo i tre assi spaziali. Dalla combinazione di questi tre gradienti si possono ottenere sezioni del corpo oggetto di studio nel piano frontale, sagittale e trasversale. I valori caratteristici sono compresi tra i 20 T/m e i 100 T/m.

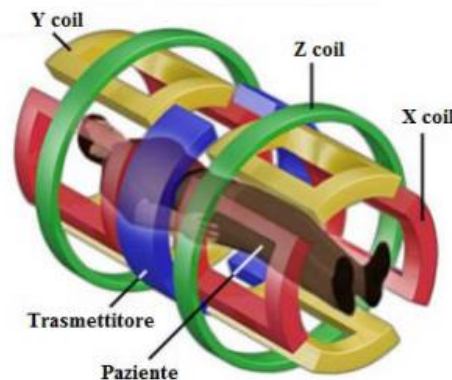


FIGURA I.4) Rappresentazione delle tre bobine di gradiente [4]

- Bobine di radiofrequenza che creano il campo magnetico B_1 e rilevano il segnale di risposta emesso dalla magnetizzazione. Queste bobine si distinguono in: bobine trasmettenti e riceventi, utilizzate per lo studio di fegato e pancreas; bobine riceventi, usate per le piccole articolazioni e bobine trasmettenti, impiegate per studi sul cuore. Le bobine di radiofrequenza si possono suddividere in bobine di volume, se avvolgono la parte da esaminare, e in bobine di superficie, se invece sono vicine alla parte da esaminare. Per l'analisi fMRI dell'encefalo si utilizzano bobine a gabbia d'uccello (FIGURA I.5), di tipo volumetrico ed operante come trasmettente-ricevente.

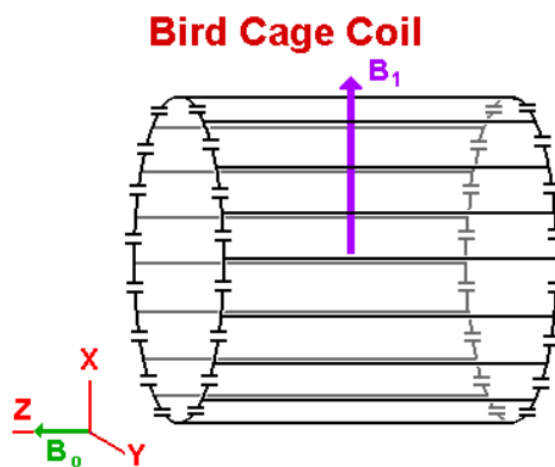


FIGURA I.5) Bobina a gabbia d'uccello per l'analisi fMRI dell'attività cerebrale [44]

- Bobine ausiliarie:
 - Bobine di shimming, sono delle piccole bobine che vengono inserite all'interno del magnete primario, con lo scopo di generare un campo magnetico in grado di correggere le imperfezioni del campo magnetico principale.
 - Bobine di Shielding, sono bobine che hanno la funzione di generare un campo magnetico in grado di annullare il campo prodotto dal magnete primario o dalle bobine di gradiente in punti in cui non è richiesto l'effetto magnetico.

Nella FIGURA I.6 è riportata la rappresentazione schematica del macchinario per condurre l'analisi fMRI in camera di risonanza magnetica.

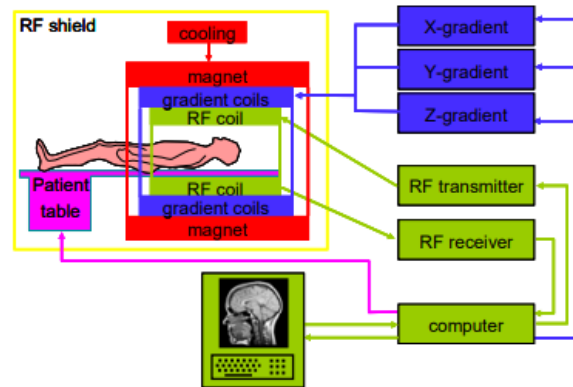


FIGURA I.6) Rappresentazione schematica del macchinario per l'analisi fMRI [2,12]

Durante l'esame il paziente è disteso supino su un lettino e la testa è posizionata all'interno dello scanner, come si può osservare dalla FIGURA I.7. Nel test si alternano fasi di riposo, a fasi in cui vengono svolti esercizi. L'attività neurale, associata ad una determinata azione, è rilevata mediante il confronto tra fase di riposo e fase attiva.

Con questa tecnica si ottengono mappe cerebrali che permettono di ottenere informazioni fondamentali per interventi chirurgici, supporto per interventi riabilitativi e sviluppo di robotica riabilitativa.

Il test ha una durata compresa tra i 30 e i 60 minuti.



FIGURA I.7) Macchinario per l'analisi fMRI aperto con l'installazione della bobina a gabbia d'uccello per l'analisi dell'encefalo [24]

Lo sviluppo delle tecniche di neuroimaging permette lo studio approfondito dei meccanismi di recupero motorio per le persone colpite e sopravvissute all'ischemia cerebrale, una delle principali cause di disabilità motoria. Nel mondo circa 20 milioni di persone ogni anno subiscono un incidente cerebrovascolare, di cui gli ictus sono una delle cause primarie. Un anno dopo l'incidente circa il 65% di questi pazienti presenta gravi problemi di mobilità motoria.

I disturbi motori legati alla mano sono uno dei principali problemi in seguito all'ischemia cerebrale. La robotica riabilitativa viene utilizzata al posto dei metodi di recupero convenzionali perché permette di realizzare movimenti precisi e ripetitivi per l'esercizio da svolgere.

La risonanza magnetica funzionale consente di avere un approccio oggettivo per identificare i cambiamenti nell'attività cerebrale prima, durante e dopo la terapia riabilitativa.

Per condurre studi fMRI i dispositivi devono essere compatibili con l'ambiente RM, non devono contenere componenti ferromagnetici, perché potrebbero essere rilevati dal campo magnetico nell'ambiente RM, generare forze intense sotto il campo magnetico e causare problemi di sicurezza per il paziente. La presenza di materiali ferromagnetici potrebbe, inoltre, alterare la qualità dell'immagine RM [13,29,40].

Nella camera di risonanza magnetica deve essere garantita una temperatura compresa tra i -2 °C e i +22 °C ed un'umidità relativa minore del 60%.

Scopo della tesi

Lo scopo della tesi è lo studio e il progetto di un dispositivo per la movimentazione della mano e del polso durante l'analisi fMRI. Questo strumento è pensato e sviluppato per l'utilizzo nella fase di studio e ricerca dell'attività cerebrale e non per la fase di riabilitazione o come supporto per la vita quotidiana del paziente oggetto di studio.

Per condurre questo percorso, i dispositivi devono essere compatibili con l'ambiente RM e non devono contenere componenti ferromagnetici perché potrebbero essere rilevati dal campo magnetico e generare intense forze, che potrebbero causare danni al paziente. I componenti ferromagnetici potrebbero alterare la qualità dell'immagine RM. Per questo motivo, durante lo studio e il progetto del dispositivo per il movimento della mano, la fase di ricerca dei materiali idonei è stata molto importante e fondamentale per una corretta realizzazione dello strumento per la movimentazione della mano e del polso.

L'obiettivo del congegno studiato è quello di piegare completamente ciascun dito della mano, partendo dalla condizione di dista distese e di flettere il polso. La mano del paziente è stata considerata scarica.

In questa trattazione non sono stati studiati dispositivi riabilitativi o ausili per l'attività quotidiana, ma solo durante l'analisi fMRI.

Le soluzioni studiate ed elaborate in questa trattazione per la movimentazione della mano e del polso sono le seguenti:

- Guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici costruiti con materiali siliconici
- Guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici
- Struttura a box con cilindri amagnetici

Lo scopo della tesi è stato quello di dare originalità di soluzione ai prototipi studiati: guanto ad elasticità differenziata, tipologia di materiali, attuatori pneumatici, soluzione tipo box e movimento del polso.

Movimenti da imporre

Durante l'analisi fMRI il paziente è disteso in posizione supina sul lettino e la sua mano sinistra viene inserita all'interno del dispositivo di movimentazione.

Il congegno studiato deve permettere di piegare completamente ciascun dito della mano del paziente, partendo dalla condizione di dita distese, e di flettere il polso.

Nella FIGURA S.1 è riportato uno schema delle ossa che costituiscono la mano. Il dispositivo per eseguire l'analisi deve essere in grado di piegare perfettamente ciascuna articolazione.



FIGURA S.1) Struttura ossea della mano [31]

Lo strumento utilizzato durante l'analisi fMRI deve:

- permettere la piegatura completa di un dito alla volta della mano sinistra del paziente, partendo dalla posizione di dito disteso fino ad arrivare alla condizione in cui il polpastrello del dito arriva a toccare il palmo della mano

Nelle FIGURE S.2 e S.3 sono riportati, come esempi, le flessioni dell'indice e del pollice.

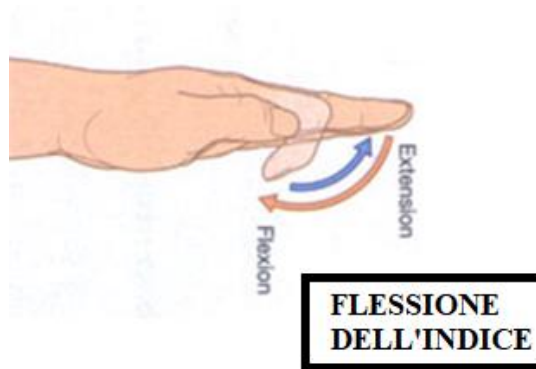


FIGURA S.2) Esempio della flessione dell'indice [20]



FIGURA S.3) Esempio della flessione del pollice [20]

- permettere la piegatura contemporanea di indice, medio, anulare e mignolo dalla condizione di dita distese, fino ad arrivare a toccare con i polpastrelli delle seguenti dita il palmo della mano. In questo caso, il pollice è lasciato fermo nella posizione distesa
- permettere la flessione del polso, partendo dalla condizione di polso disteso. In questo caso, gli attuatori pneumatici delle dita non vengono azionati. Nella FIGURA S.4 è riportata una rappresentazione schematica della flessione e dell'estensione del polso.

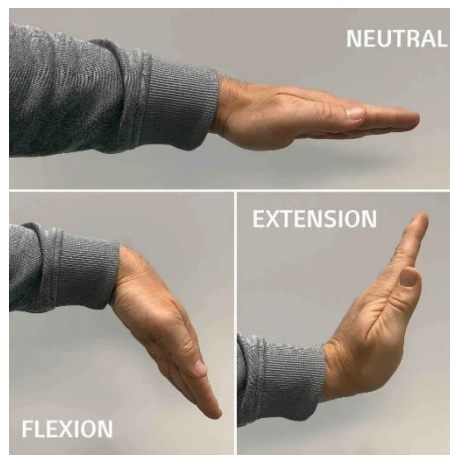


FIGURA S.4) Rappresentazione schematica della flessione del polso [15]

Tempi di movimentazione

Da uno studio in letteratura [28], è stato possibile ricavare informazioni per quanto riguarda il tempo di alimentazione delle valvole pneumatiche per piegare le dita della mano del paziente. In questo studio è stato realizzato un prototipo di guanto, chiamato MRC-Glove (FIGURA S.5), realizzato utilizzando attuatori pneumatici costruiti con materiali elastomerici morbidi non ferromagnetici. Questa ricerca ha dimostrato che è possibile utilizzare guanti robotici durante l'analisi fMRI per valutare l'attività cerebrale del paziente oggetto di studio.

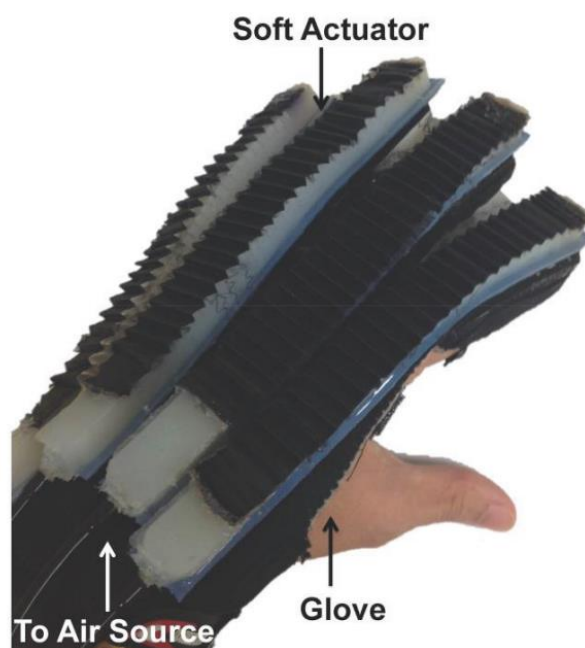


FIGURA S.5) Prototipo MRC-Glove [28]

In questo studio il guanto è stato indossato da un soggetto umano sano sdraiato supino sul lettino per analisi fMRI. Durante questo test, l'MRC-Glove è stato attivato cinque volte, in blocchi da 30 secondi. In ogni blocco ogni attuttore è stato attivato e disattivato cinque volte e il tempo di alimentazione della valvola pneumatica, per piegare completamente le articolazioni delle dita della mano, è stato di tre secondi. Allo stesso modo, per far tornare il dito nella condizione distesa di partenza, il tempo di scarico delle valvole pneumatiche è stato di tre secondi. Tra un blocco e quello successivo il tempo di riposo era di 21 secondi, mentre il tempo di riposo prima del primo blocco e quello dopo l'ultimo blocco di 18 secondi. La durata totale del test è stata di quattro minuti e ventisei secondi. La sequenza dei cinque blocchi è riportata nella FIGURA S.6.

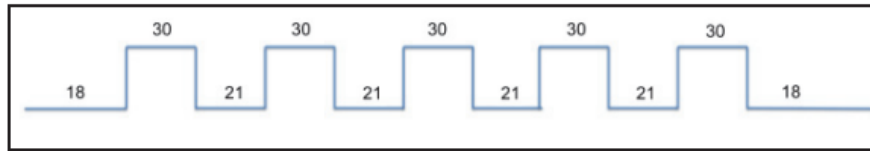


FIGURA S.6) Sequenza dei cinque blocchi durante l'analisi con MRC-Glove [28]

Questo studio è stato realizzato utilizzando una pressione di alimentazione di 2 bar ed è stato analizzato il movimento di tutte le dita, ad eccezione del pollice e del polso. Gli attuatori pneumatici che permettono di piegare le articolazioni delle dita della mano sono stati azionati non contemporaneamente.

Come si può osservare nella FIGURA S.7, per la realizzazione degli attuatori pneumatici sono necessari due stampi: chamber mold e outer layer mold. Il materiale siliconico viene colato nel chamber mold e successivamente viene posizionato l'outer layer mold, che permette di realizzare un attuttore pneumatico corrugato a fisarmonica. Terminata l'operazione di indurimento del materiale siliconico, la base dell'attuttore pneumatico è stata sigillata con una lamina di contenimento per evitare la deformazione da questo lato, mentre l'estremità a fisarmonica è stata rivestita con uno speciale tessuto a fisarmonica per evitare la sovraespansione da questo lato. L'MRC-Glove ha un peso complessivo inferiore ai 200 g.

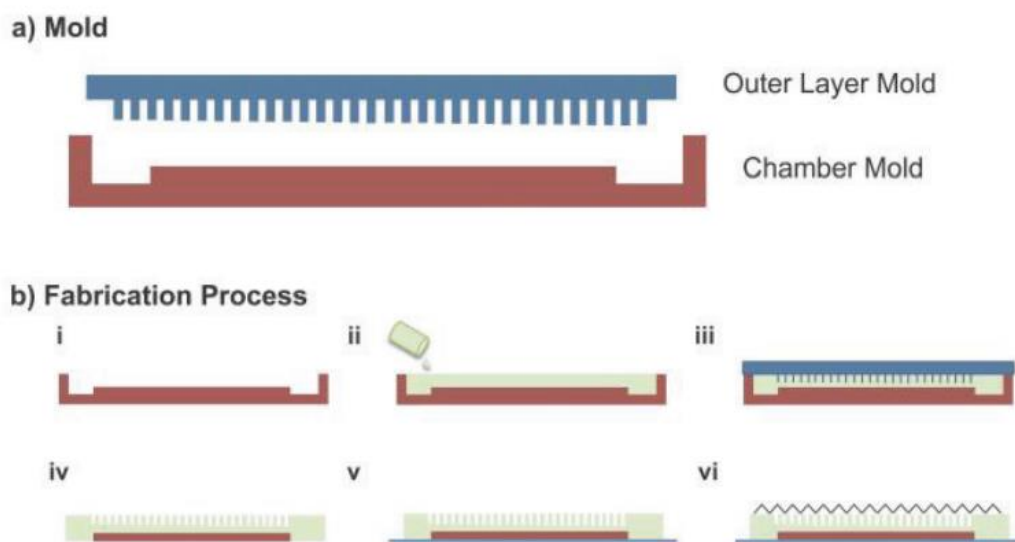


FIGURA S.7) Fabbricazione attuatori pneumatici per l'MRC-Glove [28]

Angoli di movimentazione

La mano umana è costituita da 14 falangi. Come si può vedere dalla FIGURA S.8, esse sono suddivise in questo modo:

- il pollice è formato dalle falangi prossimale (MCP) e distale (DIP)
- l'indice, il medio, l'anulare e il mignolo sono formati dalle falangi prossimale (MCP), intermedia o media (PIP) e distale (DIP)

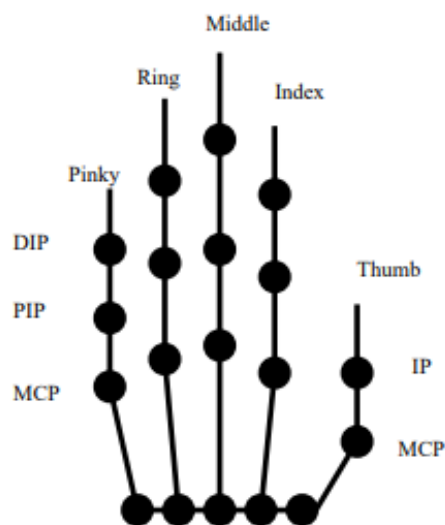


FIGURA S.8) Rappresentazione schematica delle falangi della mano umana [27]

Nella FIGURA S.9 è riportata la rappresentazione delle falangi MCP, PIP e DIP del dito medio del paziente oggetto di studio.

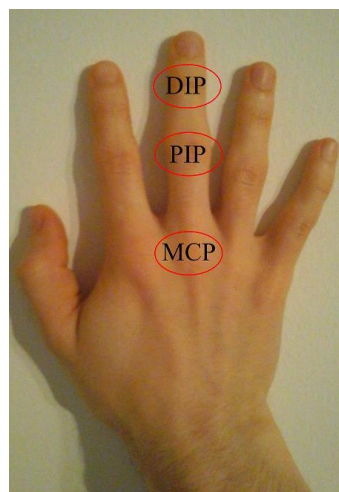


FIGURA S.9) Rappresentazione delle falangi MCP, PIP e DIP del dito medio [22]

Con l'angolo θ si esprime l'angolo di flessione delle falangi di ciascun dito della mano e del polso. Nella FIGURA S.10 è riportata una rappresentazione schematica degli angoli di flessione θ_{MCP} (falange prossimale), θ_{PIP} (falange intermedia) e θ_{DIP} (falange distale).

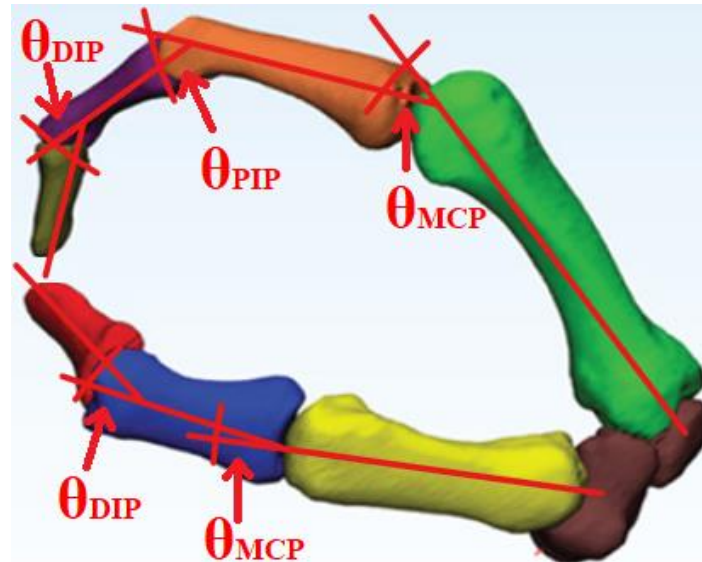


FIGURA S.10) Angoli di flessione delle falangi di indice (θ_{MCP} , θ_{PIP} , θ_{DIP}) e pollice (θ_{MCP} , θ_{DIP}) [16]

Da uno studio in letteratura [27], è emerso che esistono tre tipi di vincoli della mano: tipo I sono i limiti che riguardano il movimento delle dita in funzione dell'anatomia della mano; tipo II sono i limiti imposti alle articolazioni durante il movimento; tipo III sono i vincoli che non dipendono dall'anatomia umana, ma dal tipo di movimento.

Per questa trattazione sono stati considerati i vincoli di tipo I. Nella TABELLA S.1 sono riportati i range angolari di flessione delle falangi delle dita.

Falange	Range di flessione
θ_{MCP} (falange prossimale)	0° - 90°
θ_{PIP} (falange intermedia)	0° - 110°
θ_{DIP} (falange distale)	0° - 90°

TABELLA S.1) Range di flessione per le falangi prossimale, intermedia e distale [27]

La condizione di partenza per effettuare le analisi fMRI sul paziente oggetto di studio, con l'ausilio dei dispositivi studiati in questa tesi, è quella in cui le articolazioni della mano sono dritte:

$$\theta_{MCP}=0^{\circ}, \theta_{PIP}=0^{\circ} \text{ e } \theta_{DIP}=0^{\circ}.$$

Per quanto riguarda il polso, quest'articolazione ha un'ampiezza di flessione compresa tra gli 80° e gli 85° . Nella FIGURA S.11 è riportata una rappresentazione schematica dell'angolo di flessione del polso, θ_{POLSO} .



FIGURA S.11) Angoli di flessione del polso (θ_{POLSO}) [25]

La condizione di partenza del polso per condurre analisi fMRI con il guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici costruiti con materiali siliconici e con il guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici, è quella di polso disteso, ovvero $\theta_{POLSO}=0^{\circ}$, mentre quella con l'utilizzo della struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici è di polso flesso, quindi $\theta_{POLSO}=80^{\circ}-85^{\circ}$.

I dispositivi studiati in questa tesi permettono di soddisfare i vincoli di tipo I e rispettivi range angolari di flessione.

Nella TABELLA S.2, per schematizzare quanto detto precedentemente, si riportano i range angolari delle falangi delle dita e del polso.

	Range di flessione
Falange prossimale (θ_{MCP})	0°-90°
Falange intermedia (θ_{PIP})	0°-110°
Falange distale (θ_{DIP})	0°-90°
Polso (θ_{POLSO})	0°-85°

TABELLA S.2) Tabella riepilogativa dei range di flessione delle falangi prossimale, intermedia e distale e del polso

Misure antropometriche della mano del paziente

Dalle normative UNI EN ISO 7250-1:2010 e UNI EN ISO/TR 7250-2:2011 il soggetto da esaminare è un individuo che appartiene al 95 percentile uomo italiano, massa corporea totale 93 kg e altezza totale $H=1.834$ m.

Le dimensioni delle dita della mano del soggetto oggetto di studio sono riportate nella TABELLA S.3.

	Lunghezza dito [cm]	Larghezza massima dito [cm]
Pollice	7.6	2.4
Indice	8.1	2.2
Medio	9.3	2.4
Anulare	8.5	2.2
Mignolo	7.0	1.9

TABELLA S.3) Dimensioni delle dita del paziente oggetto di studio

Per questo studio si è fatto riferimento alle dimensioni delle dita della mano corrispondenti al 95 percentile uomo italiano, senza valutare se i dispositivi progettati permettano delle regolazioni antropometriche o se dovranno essere costruiti coprendo delle fasce differenti.

CAPITOLO 1: Guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici costruiti in materiale siliconico

In questo capitolo si è progettato e studiato come dispositivo per la movimentazione delle dita della mano sinistra e del polso un guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici realizzati con appositi materiali siliconici [11,42].

Gli attuatori pneumatici sono realizzati in gomma siliconica perché questo materiale permette una riproduzione precisa e dettagliata delle parti anatomiche umane.

Il guanto è costituito utilizzando due tessuti con caratteristiche differenti per facilitare la piegatura delle articolazioni delle dita e del polso, e per permettere l'installazione degli attuatori pneumatici morbidi in materiale siliconico.

Questo dispositivo non è utilizzato come supporto durante la vita quotidiana, ma solo per condurre le analisi fMRI per valutare l'attività cerebrale del paziente oggetto di studio. Dal momento che il paziente si trova sdraiato sul lettino è necessario prevedere un supporto fisso agganciato al lettino che sostenga l'avambraccio del paziente.

I movimenti da realizzare sono descritti nel capitolo Scopo della tesi: Movimenti da imporre.

1.1 Presentazione degli attuatori pneumatici morbidi in materiale siliconico

Per la produzione degli attuatori pneumatici è stato fondamentale produrre degli stampi mediante l'utilizzo di un software di disegno e progettazione 3D. Il programma utilizzato è stato Solidworks. Per la realizzazione degli attuatori pneumatici morbidi in materiale siliconico si è fatto riferimento ai "Fiber Reinforced Actuators" prodotti dalla Soft Robotics Toolkit [14]. La Soft Robotics Toolkit mette a disposizione raccolte di risorse per la progettazione, la fabbricazione, la modellazione e il controllo di dispositivi robotici morbidi. Il Toolkit è stato sviluppato dall'Harvard Biodesign Lab e il suo scopo è quello di permettere la produzione di componenti robotici in modo rapido e preciso, rendendo le informazioni necessarie alla loro realizzazione disponibili gratuitamente sul mercato. Questi attuatori però non erano impiegati come strumenti per eseguire analisi fMRI, ma come ausili per la riabilitazione.

Dal momento che le dita della mano hanno dimensioni differenti, anche gli attuatori pneumatici da realizzare avranno dimensioni differenti. Per questo motivo si dovranno realizzare stampi con dimensioni diverse. Per il movimento del polso si utilizzerà il cilindro pneumatico realizzato per il pollice.

Nella FIGURA 1.1.1 è riportato, a titolo d'esempio, l'attuatore pneumatico costruito in materiale siliconico.

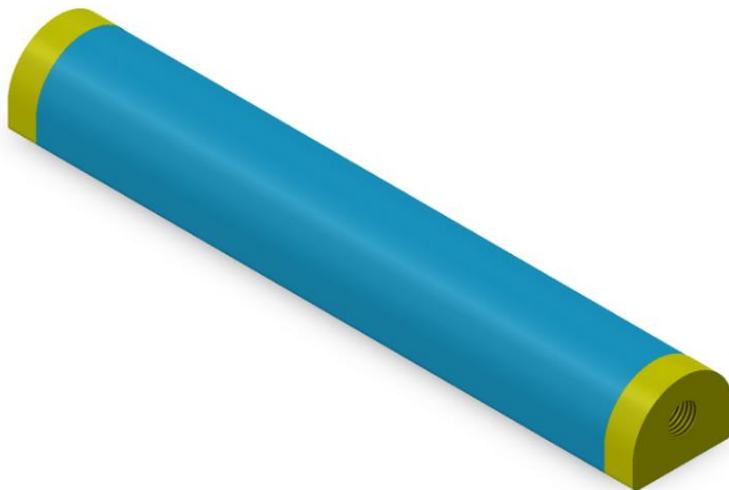


FIGURA 1.1.1) Esempio di attuatore pneumatico in materiale siliconico

1.1.1 Materiali siliconici per la realizzazione degli attuatori pneumatici

Per la realizzazione degli attuatori pneumatici è necessario utilizzare le seguenti gomme siliconiche:

- Ecoflex 00-30 [7]
- Dragon Skin 10 slow [8]
- Dragon Skin 30 [9]
- Elastosil M4601 A/B [10]



FIGURA 1.1.1.1) Gomme siliconiche Ecoflex 00-30, Dragon-skin 10 slow, Dragon Skin 30 ed Elastosil M4001 A/B [7,8,9,10]

Tutte le gomme siliconiche utilizzate sono skin safe certified. Questi materiali sono morbidi, resistenti ed elastici, caratteristiche fondamentali perché gli attuatori pneumatici devono allungarsi e piegarsi per garantire il movimento delle articolazioni delle dita della mano e del polso del paziente.

Le gomme Ecoflex 00-30, Dragon Skin 10 slow e Dragon Skin 30 sono costituite da due componenti: componente A e componente B. Durante l'operazione di miscelazione, al fine di omogenizzare il composto, bisogna premiscelare accuratamente il componente B. Successivamente è introdotta la corretta quantità di parte A e la proporzione da rispettare è la seguente: 1A:1B in peso o volume. A questo punto bisogna mescolare tutto il composto per almeno tre minuti. Il tempo di utilizzo della gomma siliconica è di 45 minuti, prima che il composto inizi ad indurire. È possibile colorare il silicone con l'aggiunta dei pigmenti Silc-Pig (FIGURA 1.1.1.2) [41].



FIGURA 1.1.1.2) Pigmenti Silc-Pig per la colorazione delle gomme siliconiche [41]

Terminata l'operazione di colatura nello stampo, bisogna lasciare il tempo necessario alla gomma siliconica di catalizzare a temperatura ambiente (23°C). Per l'indurimento della gomma Ecoflex 00-30 sono necessarie dodici ore, per la Dragon-Skin 10 slow sette ore e per la Dragon Skin 30 sedici ore.

Per sfruttare a pieno le caratteristiche di queste gomme siliconiche è opportuno eseguire un processo di post-catalizzazione, mettendo lo stampo in forno per due ore a 80°C e per un'ora a 100°C.

Terminato il processo di post-catalizzazione, bisogna lasciar raffreddare lo stampo e solo successivamente è possibile rimuovere il componente realizzato.

Con la gomma siliconica Ecoflex 00-30 si realizza il corpo semicilindrico cavo corrugato, perché questo materiale ha una durezza minore rispetto al Dragon Skin 10 slow e al Dragon Skin 30 e in questo modo è più facile l'espansione della camera semicilindrica cava mediante l'utilizzo dell'aria compressa a 4 bar. Questo materiale è extra-soft, ha una durezza di 00-30 Shore e una resistenza a trazione di 200 psi (13.8 bar).

Nella FIGURA 1.1.1.3 è riportata la scala di durezza Shore.

Nella FIGURA 1.1.1.4 sono riportate le informazioni generali sulla gomma siliconica Ecoflex 00-30.



FIGURA 1.1.1.3) Scala durezza Shore [19]

INFORMAZIONI GENERALI

	Viscosità della miscela	Peso Specifico	Volume Specifico	Tempo utilizzo	Tempo di catalizzazione	Durezza	Resistenza alla trazione	Modulo 100%	Resistenza alla lacerazione (Die B)	Allungamento alla rottura
Ecoflex 5	13.000cps	1.07	25.8	1 min	5 min	5A	350psi	15psi	75pli	1,000%
Ecoflex 00-10	14.000cps	1.04	26.00	30 min	4 ore	00-10	120psi	8psi	22pli	800%
Ecoflex 00-20	3.000cps	1.07	26.00	30 min	4 ore	00-20	160psi	8psi	30pli	845%
Ecoflex 00-30	3.000cps	1.07	26.00	45 min	4 ore	00-30	200psi	10psi	38pli	900%
Ecoflex 00-33 AF	3.000cps	1.07	26.00	45 min	4 ore	00-33	200psi	10psi	38pli	900%
Ecoflex 00-50	8.000cps	1.07	25.9	18 min	3 ore	00-50	315psi	12psi	50pli	980%

Rapporto di miscela: 1A:1B in peso o volume
Colore: traslucido
Ritiro: <.001 in./in.

Temperatura d'utilizzo: -53°C ai 232°C
Rigidità elettrica (astm d-147-97 a): >350 volts/mil

FIGURA 1.1.1.4) Caratteristiche Ecoflex 00-30 [9]

Con la gomma siliconica Dragon Skin 10 Slow si realizza il rivestimento del nucleo dell'attuatore pneumatico. Questo materiale ha una durezza di 10 Shore, è una gomma soft ma più dura rispetto all'Ecoflex 00-30 e quindi ideale per la produzione del rivestimento esterno del corpo semicilindrico cavo, ovvero il nucleo dell'attuatore pneumatico. Questo materiale ha una resistenza a trazione di 475 psi (32.8 bar).

Con la gomma siliconica Dragon Skin 30 si realizza la sottile lamina che viene incollata alla faccia piatta del nucleo dell'attuatore pneumatico. Questo materiale ha una durezza media pari a 30 Shore ed è ideale per la realizzazione di questa lamina per impedire l'espansione dell'attuatore da questo lato. Il Dragon Skin 30 ha una resistenza a trazione di 500 psi (34.5 bar).

Nella FIGURA 1.1.1.5 sono riportate le informazioni generali sulle gomme siliconiche Dragon Skin 10 Slow e Dragon Skin 30.

Dati Tecnici



	Viscosità	Peso specifico	Volume specifico	Tempo d'utilizzo	Tempo di catalizzazione	Durezza	Resistenza alla trazione	Modulo 100%	Allungamento alla rottura	Resistenza alla lacerazione
Dragon Skin 10 Very Fast	23,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	4 min.	30 min.	10A	475 psi	22 psi	1,000%	102 pli
Dragon Skin 10 Fast	23,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	8 min.	75 min.	10A	475 psi	22 psi	1,000%	102 pli
Dragon Skin 10 Medium	23,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	20 min.	5 ore	10A	475 psi	22 psi	1,000%	102 pli
Dragon Skin 10 Slow	23,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	45 min.	7 ore	10A	475 psi	22 psi	1,000%	102 pli
Dragon Skin 10 AF	23,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	20 min.	5 ore	10A	475 psi	22 psi	1,000%	102 pli
Dragon Skin 10 NV	6,000 cps	1.07 g/cc	25.8 cu.in./lb.	15 min.	75 min.	10A	400 psi	27 psi	663%	90 pli
Dragon Skin 20	20,000 cps	1.08 g/cc	25.6 cu.in./lb.	25 min.	4 ore	20A	550 psi	49 psi	620%	120 pli
Dragon Skin 30	20,000 cps	1.08 g/cc	25.7 cu.in./lb.	45 min.	16 ore	30A	500 psi	86 psi	364%	108 pli
Dragon Skin FX-PRO	18,000 cps	1.062 g/cc	25.0 cu.in./lb.	12 min.	40 min.	2A	288 psi	37.8 psi	763%	61 pli

Rapporto di miscela: **1A:1B in peso o volume**
 Temperatura d'utilizzo: **-53°C ai 232°C**

Colore: **Traslucido**
 Ritiro: **<.001 in./in.**

Tutti i valori sono stati misurati dopo 7 giorni a 23°C

FIGURA 1.1.1.5) Caratteristiche Dragon Skin 10 slow e Dragon Skin 30 [7,8]

La gomma siliconica Elastosil M4601 A/B è un materiale bicomponente, costituito dal componente A e dal componente B, ma il rapporto tra le due parti è diverso rispetto a quello delle precedenti gomme siliconiche. Per questo materiale il rapporto tra le due componenti è di 9A:1B in peso o volume. È una gomma a bassa viscosità, ha una durezza di 28 Shore, quindi è un materiale soft, ma più duro rispetto all'Ecoflex 00-30 e al Dragon Skin 10 Slow. Questa gomma siliconica ha un'elevata resistenza allo strappo, un'eccellente stabilità a lungo termine delle proprietà meccaniche e una resistenza a trazione di circa 943 psi (65 bar).

Il processo di preparazione e di miscelazione è analogo a quello dei precedenti materiali, ma il tempo di catalizzazione è di dodici ore.

Con l'Elastosil M4601 A/B sono realizzati il tappo anteriore e il tappo posteriore di chiusura dell'attuatore pneumatico.

Nella FIGURA 1.1.1.6 sono riportate le informazioni generali sulla gomma siliconica Elastosil M4601 A/B.

Product data		
Typical general characteristics	Inspection Method	Value
Product data (uncured)		
Component A		
Color		white
Density at 23 °C		1.14 g/cm ³
Viscosity at 23 °C, after stirring	ISO 3219	15000 mPa s
Component B		
Color		reddish brown
Density at 23 °C		1.01 g/cm ³
Viscosity at 23 °C, after stirring	ISO 3219	800 mPa s
Product data (catalyzed A + B)		
Mix ratio (pbw)	A : B	9 : 1
Viscosity at 23 °C	ISO 3219	10000 mPa s
Processing time , up to 60000 mPa s		90 min
Cure time, tack-free		12 h
Product data (cured)		
Color		reddish brown
Density at 23 °C in water	ISO 2781	1.13 g/cm ³
Hardness Shore A	ISO 868	28
Tensile strength	ISO 37	6.50 N/mm ²
Elongation at break	ISO 37	700 %
Tear strength	ASTM D 624 B	> 30 N/mm
Linear shrinkage		< 0.1 %
These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications		
Vulcanizate after 24 h at 23 °C		

FIGURA 1.1.1.6) Caratteristiche Elastosil M4601 A/B [10]

1.1.2 Stampi per la produzione degli attuatori pneumatici in materiale siliconico

Le dimensioni degli stampi per la fabbricazione degli attuatori pneumatici in materiale siliconico sono specifiche per ciascun dito, perché le dita del paziente hanno lunghezze e larghezze differenti, e quindi gli attuatori da realizzare avranno dimensioni diverse.

Dal momento che la forma degli stampi è analoga per ciascun dito, si riportano solo le immagini degli stampi e dell'attuatore pneumatico in materiale siliconico realizzati per l'indice della mano sinistra.

Per ciascun dito sono stati realizzati due stampi:

- stampo interno
- stampo esterno

Tutte le quote dei disegni sono espresse in millimetri.

Lo stampo interno è costituito da una base, da un coperchio di chiusura e da un coperchio di chiusura frontale.

Nella FIGURA 1.1.2.1 è riportata la base dello stampo.

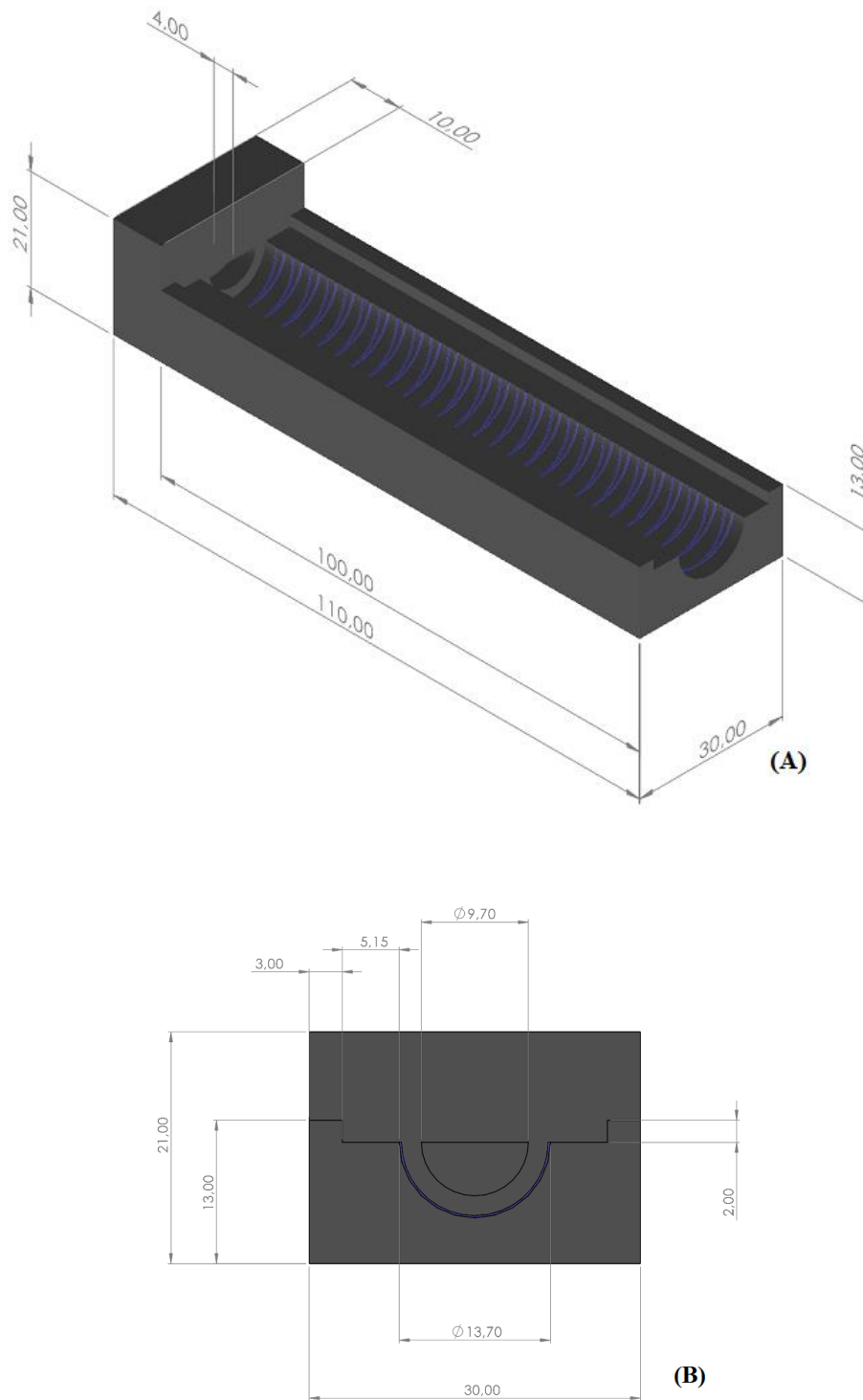


FIGURA 1.1.2.1) Base dello stampo interno con le rispettive quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

Nella FIGURA 1.1.2.2 è riportato il coperchio di chiusura dello stampo.

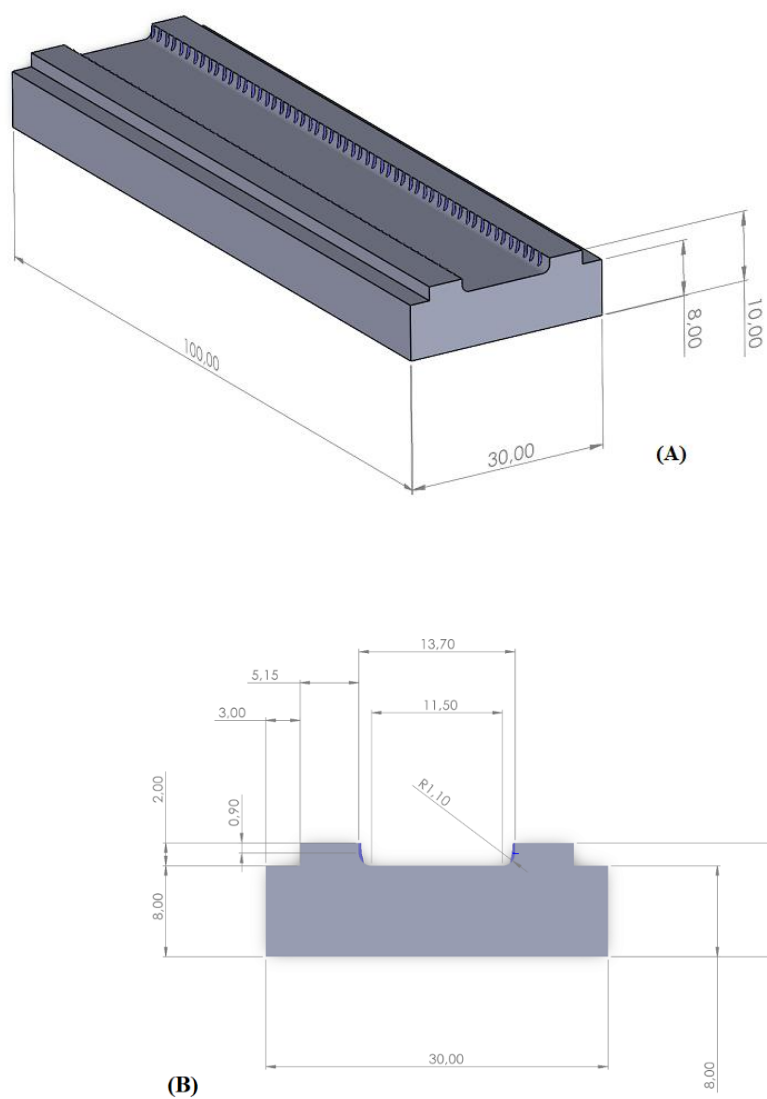


FIGURA 1.1.2.2) Coperchio di chiusura con le rispettive quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

Nella FIGURA 1.1.2.3 è riportato il coperchio di chiusura frontale dello stampo.

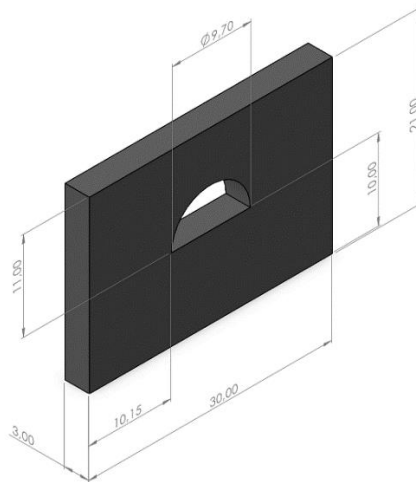


FIGURA 1.1.2.3) Coperchio di chiusura frontale con le rispettive quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.4 è riportato lo stampo interno assemblato formato dalla base, dal coperchio di chiusura e dal coperchio di chiusura frontale.

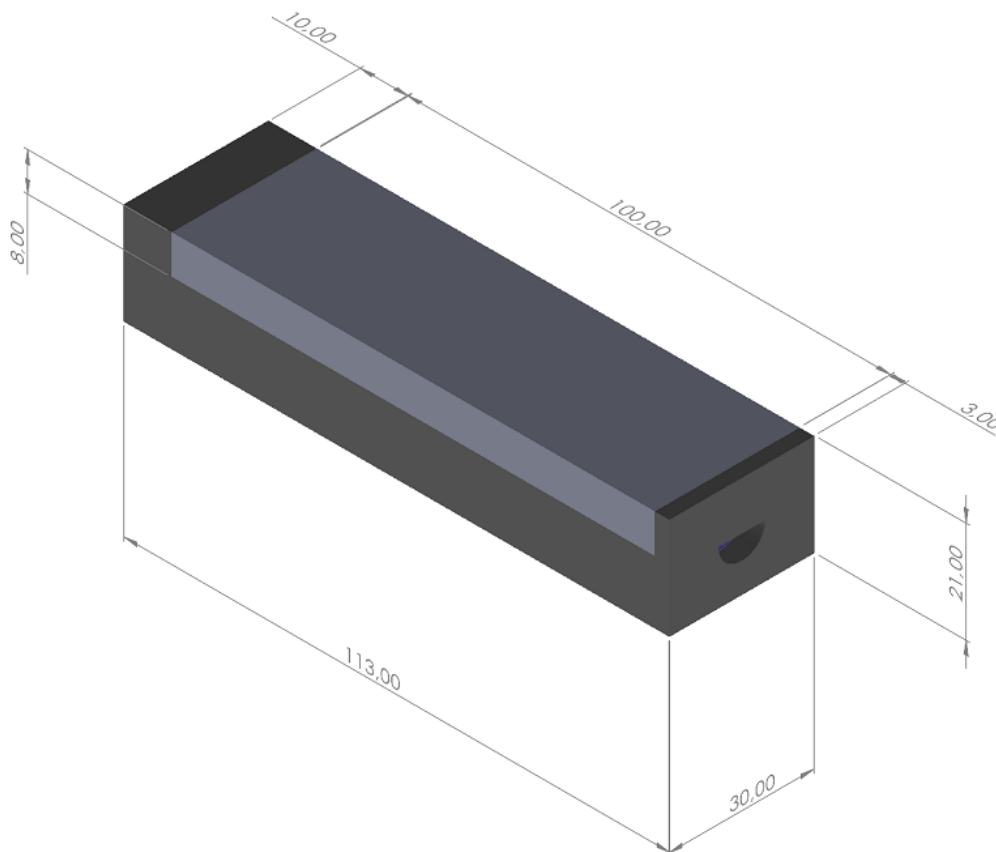


FIGURA 1.1.2.4) Stampo interno assemblato con le rispettive quote in millimetri

Lo stampo interno serve a realizzare il corpo semicilindrico cavo, il nucleo dell'attuatore pneumatico in materiale siliconico. La caratteristica fondamentale di questo corpo semicilindrico è l'essere corrugato per favorire la piegatura. La configurazione simmetrica a doppia elica permette all'attuatore pneumatico in materiale siliconico di espandere solamente in direzione assiale e non in direzione radiale. Per ottenere questa struttura, sulla base dello stampo e sul coperchio di chiusura deve essere intagliata la struttura a doppia elica simmetrica. L'elica ha un passo di 3.6 mm e lunghezza di 98 mm.

Nella FIGURA 1.1.2.5 è riportato l'ingrandimento della base dello stampo interno per evidenziare la struttura a doppia elica.

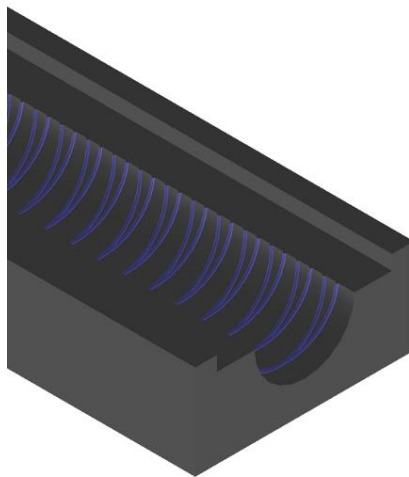


FIGURA 1.1.2.5) Ingrandimento della configurazione simmetrica a doppia elica presente all'interno della base dello stampo interno

Nella FIGURA 1.1.2.6 è riportato l'ingrandimento del coperchio di chiusura dello stampo interno per evidenziare la struttura a doppia elica.

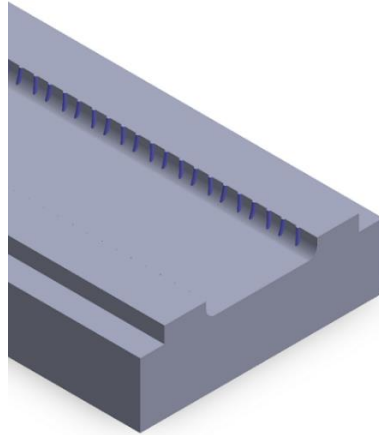


FIGURA 1.1.2.6) Ingrandimento della configurazione simmetrica a doppia elica presente all'interno del coperchio di chiusura

Il nucleo dell'attuatore pneumatico è cavo, perché durante il funzionamento per la piegatura delle articolazioni delle dita della mano e del polso del paziente sarà riempito con l'aria compressa e si espanderà. Dallo studio in letteratura, riportato nel capitolo “Scopo della tesi”, la pressione di alimentazione dell'aria compressa per attuatori pneumatici a “fisarmonica” era di 2 bar. Per questo dispositivo si è deciso di utilizzare una pressione di alimentazione di 4 bar, per garantire un movimento fluido, preciso e rapido durante la flessione delle dita e del polso del paziente. Come si è visto nel paragrafo 1.1.1 Materiali siliconici per la realizzazione degli attuatori pneumatici, è possibile utilizzare una pressione di alimentazione di 4 bar, perché i materiali siliconici utilizzati hanno un'ottima resistenza a trazione.

All'interno della base dello stampo viene posizionata un'asta rigida, in materiale plastico, per ottenere la cavità all'interno del corpo semicilindrico.

Nella FIGURA 1.1.2.7 è riportata l'asta rigida

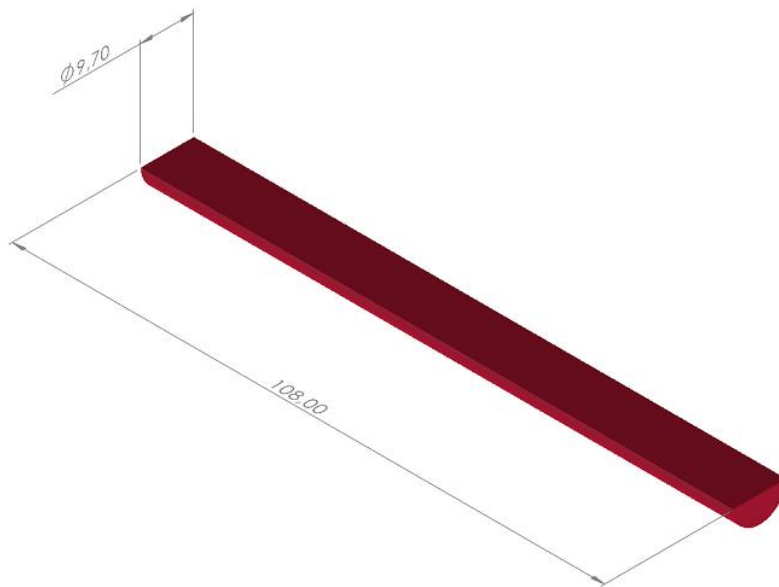


FIGURA 1.1.2.7) Asta rigida con le rispettive quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.8 è riportata l'asta rigida posizionata all'interno della base dello stampo.

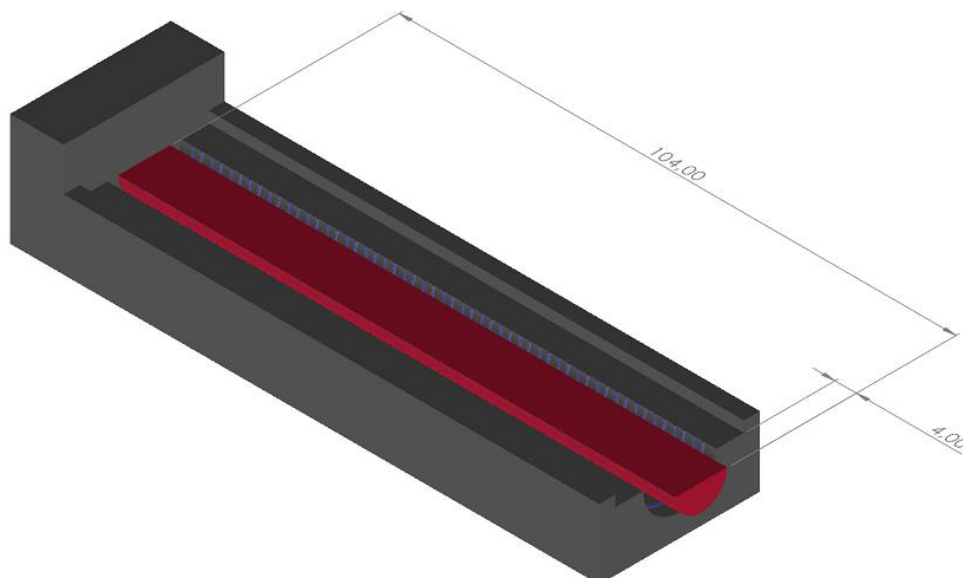


FIGURA 1.1.2.8) L'asta rigida è posizionata all'interno dell'apposito foro presente nella base dello stampo interno, con relative quote in millimetri

A questo punto viene posizionato il coperchio di chiusura e all'interno dello stampo viene colata la gomma siliconica Ecoflex 00-30.

Nella FIGURA 1.1.2.9 è riportata la base dello stampo con l'asta rigida al suo interno e chiusa con il coperchio di chiusura.

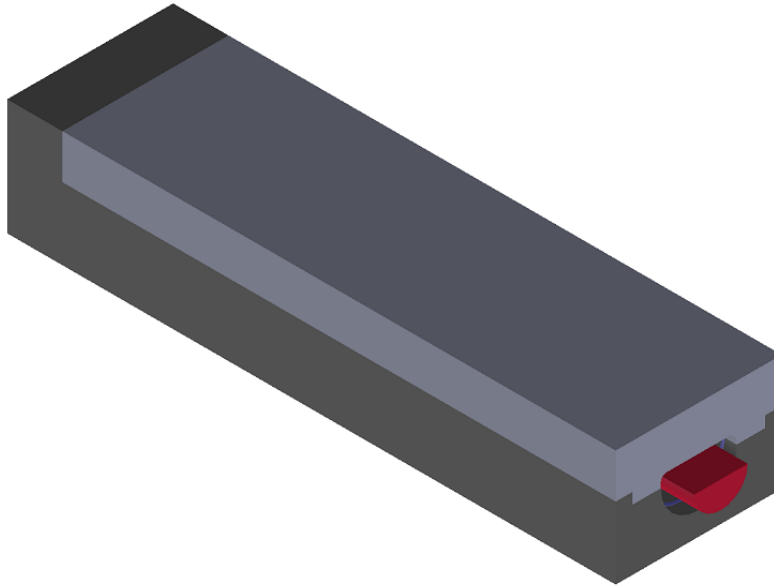


FIGURA 1.1.2.9) Base stampo interno, asta rigida e coperchio di chiusura. All'interno del corpo cavo viene colata la gomma siliconica

Terminata l'operazione di colatura della gomma siliconica Ecoflex 00-30 viene posizionato il coperchio di chiusura frontale per la chiusura dello stampo (FIGURA 1.1.2.10)

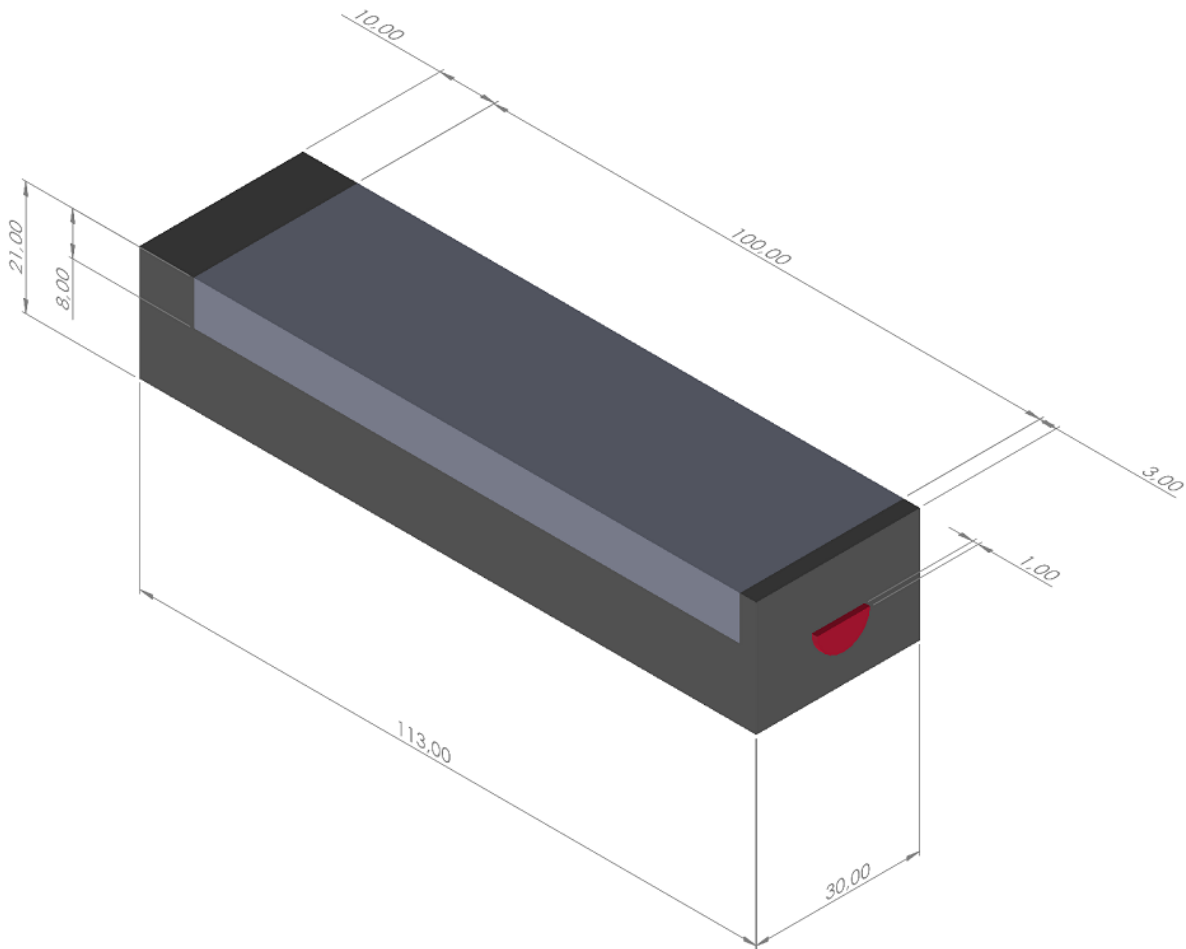


FIGURA 1.1.2.10) Stampo interno chiuso con il coperchio di chiusura frontale con le rispettive quote in millimetri

Trascorso il tempo necessario all'indurimento della gomma siliconica, il corpo semicilindrico viene estratto dallo stampo e l'asta rigida viene lasciata al suo interno (FIGURA 1.1.2.11)

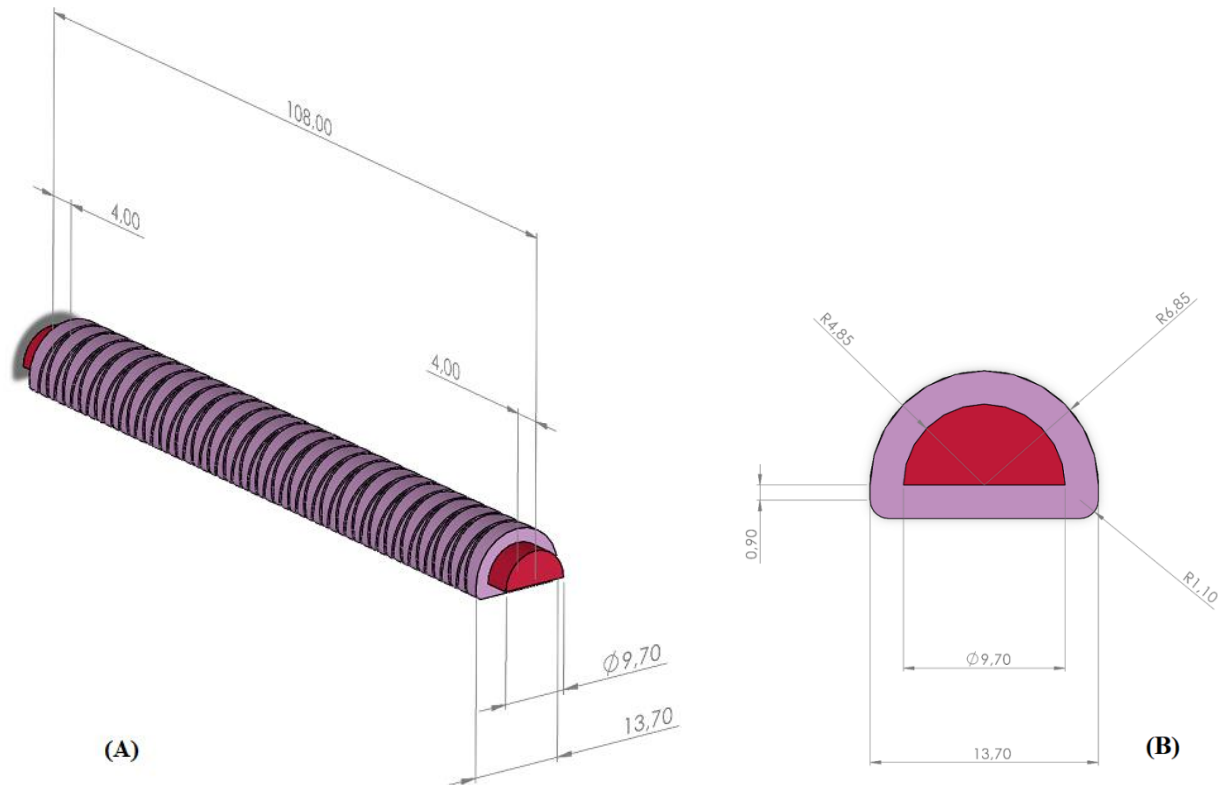


FIGURA 1.1.2.11) Corpo semicilindrico cavo con le rispettive quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale. L'asta rigida non viene rimossa dal corpo semicilindrico cavo

Sulla faccia piatta della struttura semicilindrica viene incollata una sottile lamina in gomma siliconica Dragon Skin 30 (strain limiting layer) per impedire l'espansione dell'attuatore da questo lato. È stata scelta questa gomma siliconica perché è caratterizzata da una durezza pari a 30 Shore. La colla utilizzata per unire la faccia piatta del corpo semicilindrico cavo e la sottile lamina in gomma siliconica è la colla "Pattex special Gomma", ideale per incollare in modo duraturo le superfici in gomma.

All'interno della base dello stampo per la realizzazione della lamina in gomma viene colata la gomma siliconica Dragon Skin 30 e successivamente lo stampo viene chiuso con il coperchio. Nella FIGURA 1.1.2.12 è riportata la base dello stampo, utilizzata per la realizzazione della sottile lamina in gomma.

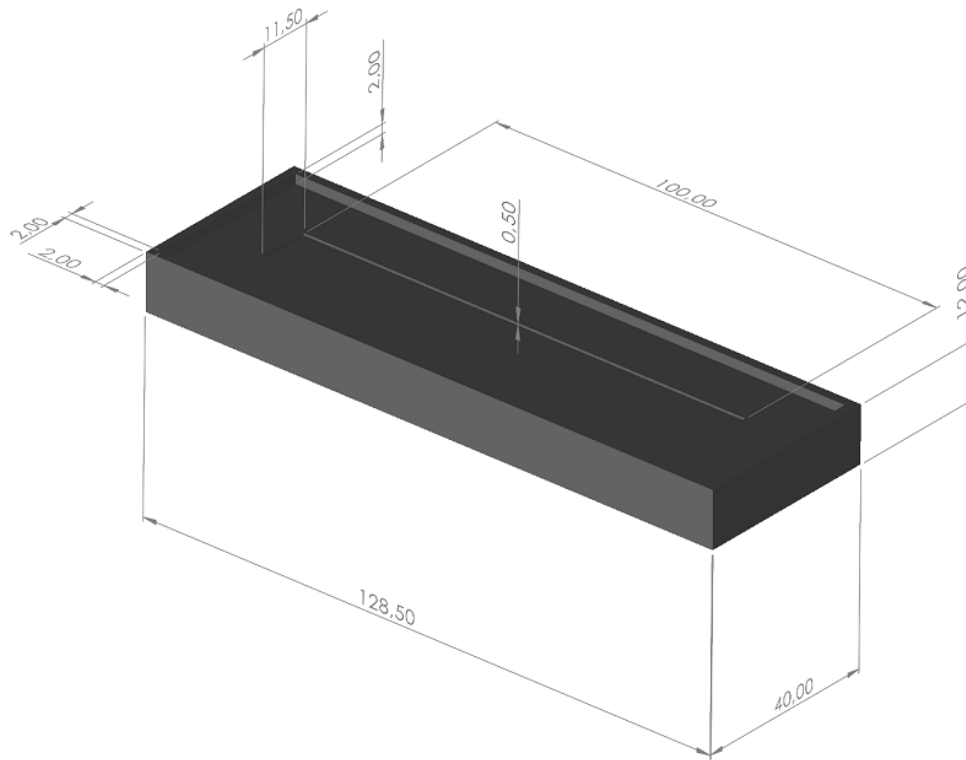


FIGURA 1.1.2.12) Base dello stampo con le relative quote in millimetri per la realizzazione della lamina in gomma

Nella FIGURA 1.1.2.13 è riportato il coperchio di chiusura dello stampo per la realizzazione della sottile lamina in gomma.

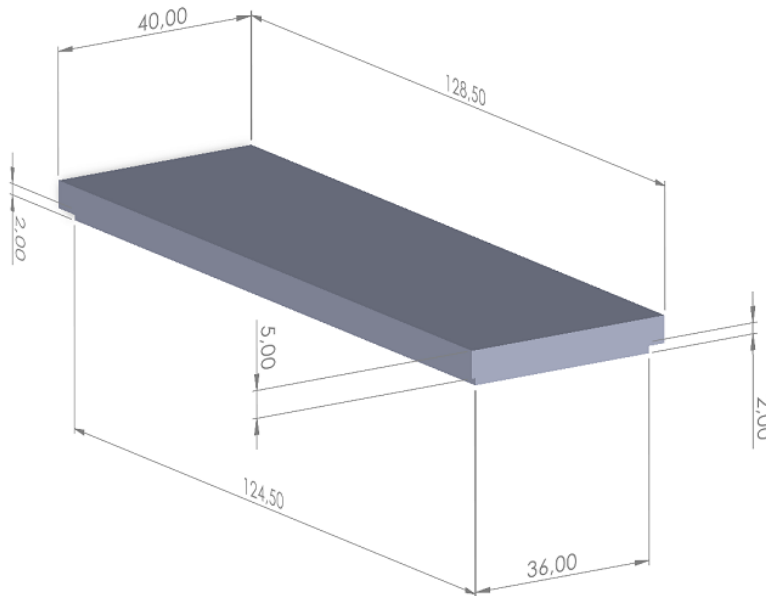


FIGURA 1.1.2.13) Coperchio di chiusura dello stampo con le relative quote in millimetri per la realizzazione della lamina in gomma

Nella FIGURA 1.1.2.14 è riportata la base dello stampo con all'interno la gomma siliconica colata.

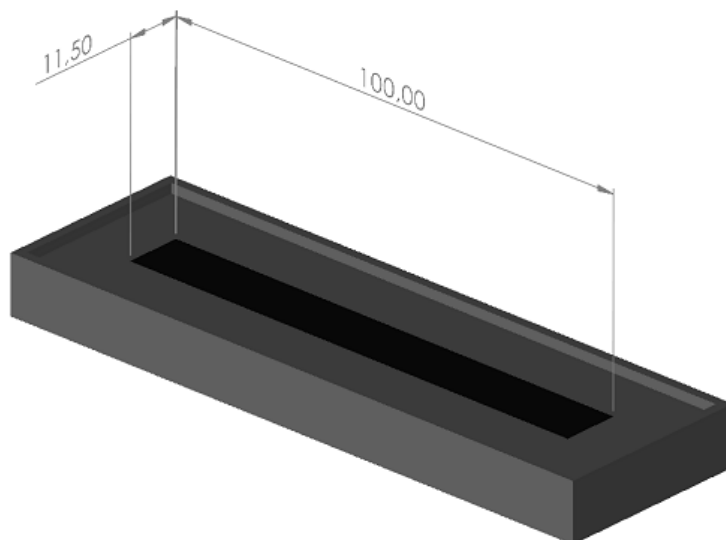


FIGURA 1.1.2.14) All'interno della base dello stampo, nell'apposito spazio, viene colata la gomma siliconica Dragon Skin 30, con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.15 è riportato lo stampo chiuso con il coperchio, terminata l'operazione di colatura della gomma siliconica.

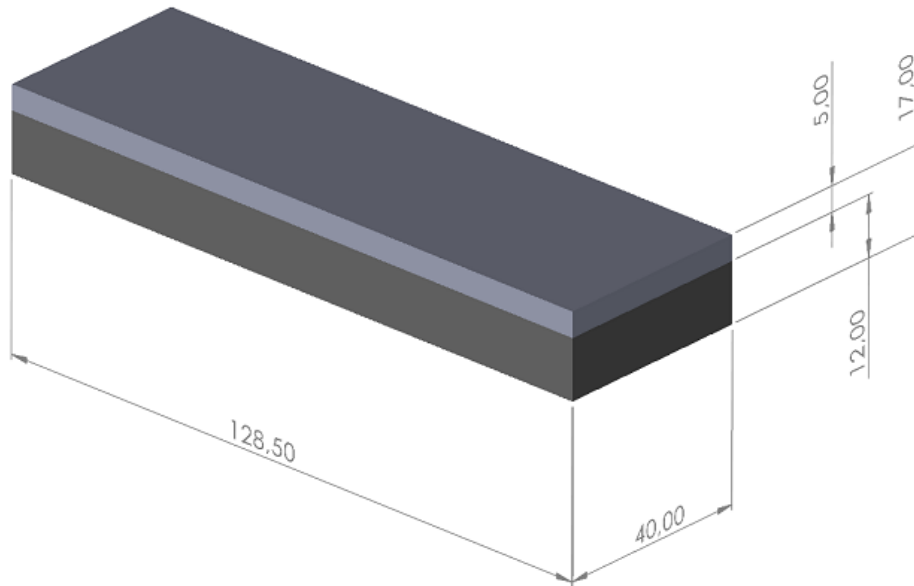


FIGURA 1.1.2.15) Stampo chiuso con il coperchio dopo la colatura della gomma siliconica, con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.16 è riportata la sottile lamina in gomma realizzata con lo stampo.

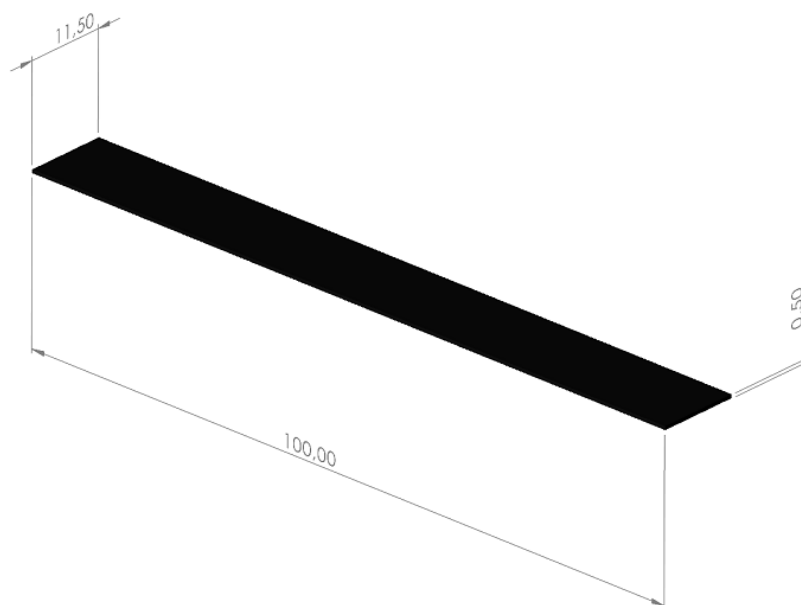


FIGURA 1.1.2.16) Sottile lamina in gomma con le rispettive quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.17 la lamina in gomma è incollata al corpo semicilindrico cavo.



FIGURA 1.1.2.17) Lamina in gomma incollata alla faccia piatta del corpo semicilindrico, con relative quote in millimetri

Lo stampo esterno serve ad ottenere il rivestimento del nucleo dell'attuatore pneumatico. Esso è costituito, come lo stampo interno, da una base, da un coperchio di chiusura e da un coperchio di chiusura frontale.

Nella FIGURA 1.1.2.18 è riportata la base dello stampo esterno.

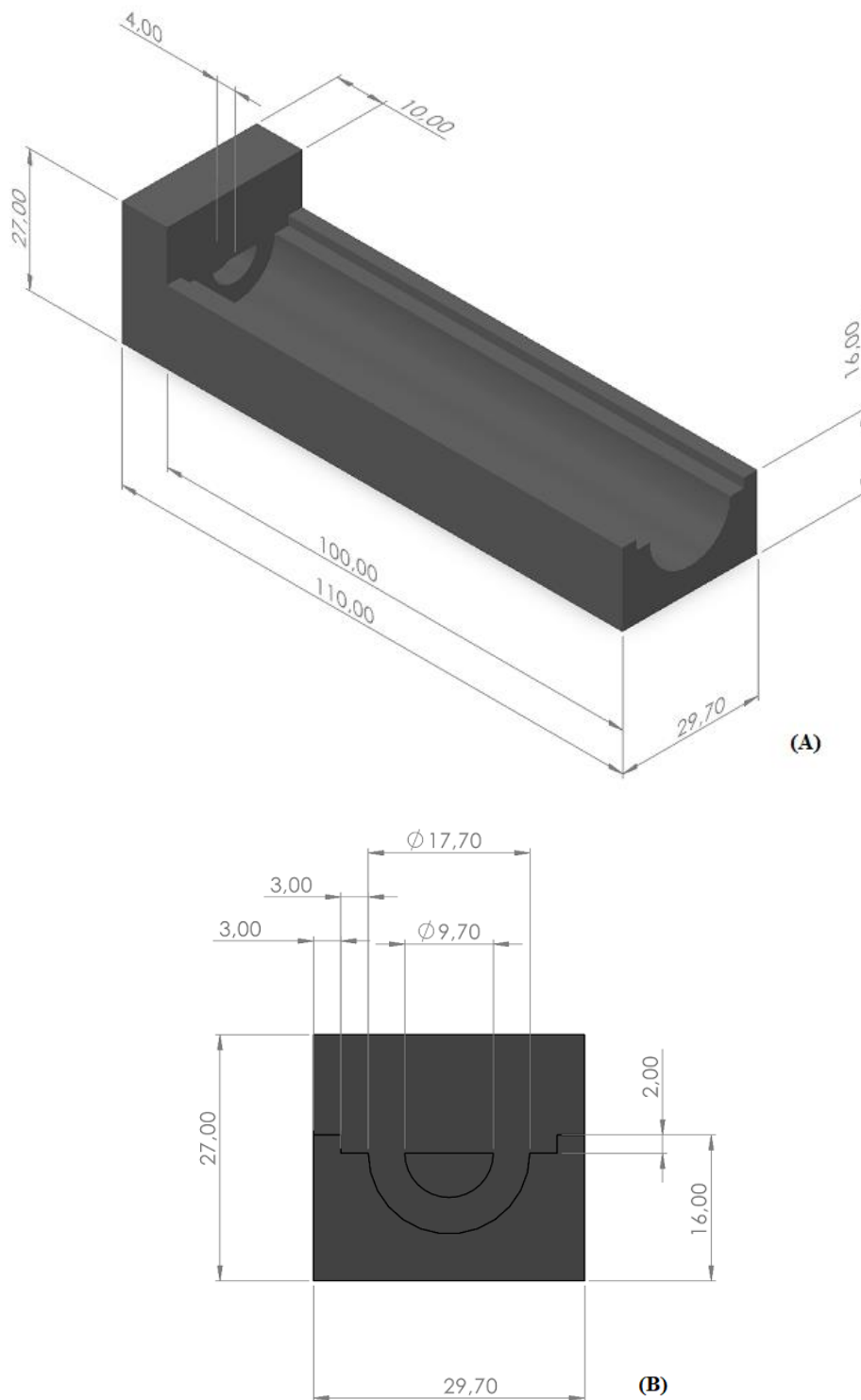


FIGURA 1.1.2.18) Base dello stampo esterno con le rispettive quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

Nella FIGURA 1.1.2.19 è riportato il coperchio di chiusura dello stampo esterno.

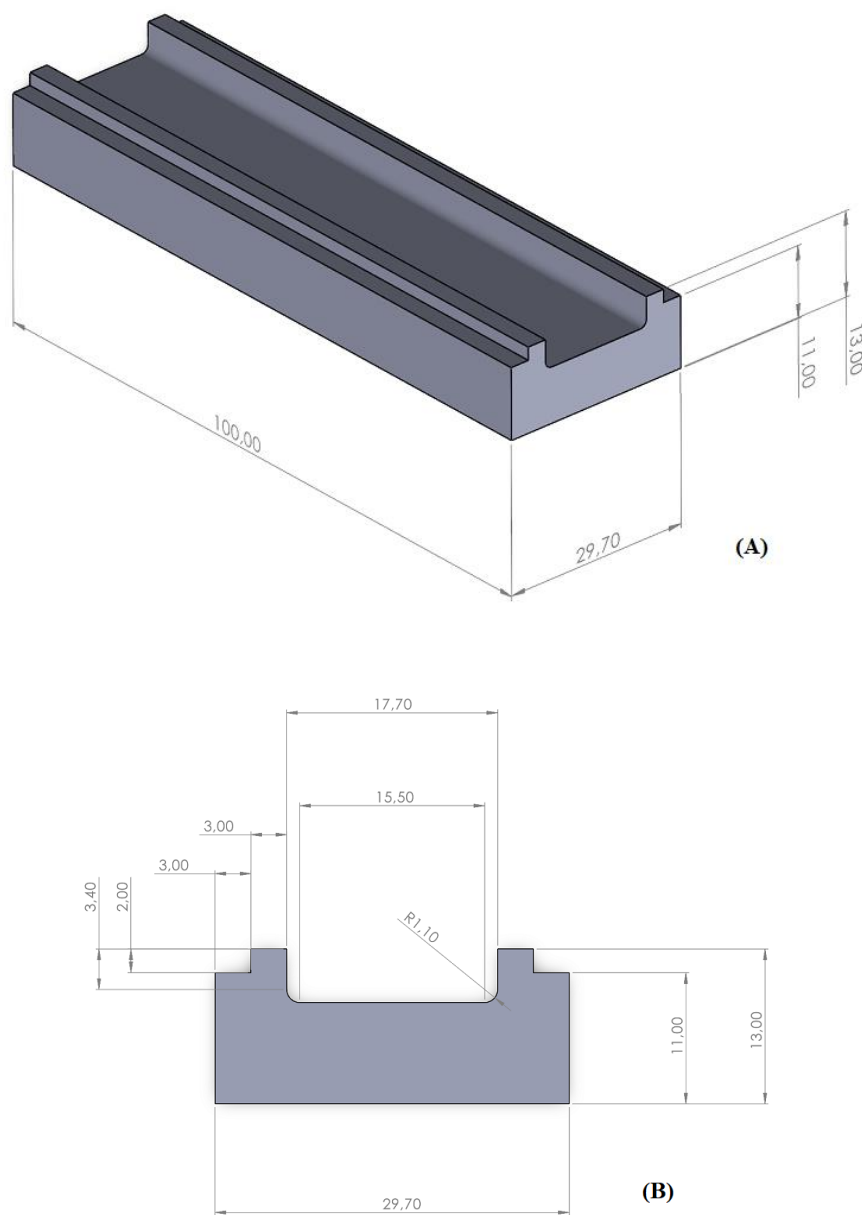


FIGURA 1.1.2.19) Coperchio di chiusura con le rispettive quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

Nella FIGURA 1.1.2.20 è riportato il coperchio di chiusura frontale dello stampo esterno.

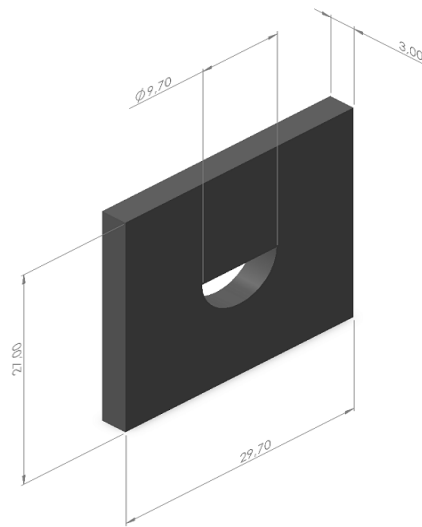


FIGURA 1.1.2.20) Coperchio di chiusura frontale con le rispettive quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.21 è riportato lo stampo esterno assemblato, formato dalla base, dal coperchio di chiusura e dal coperchio di chiusura frontale.

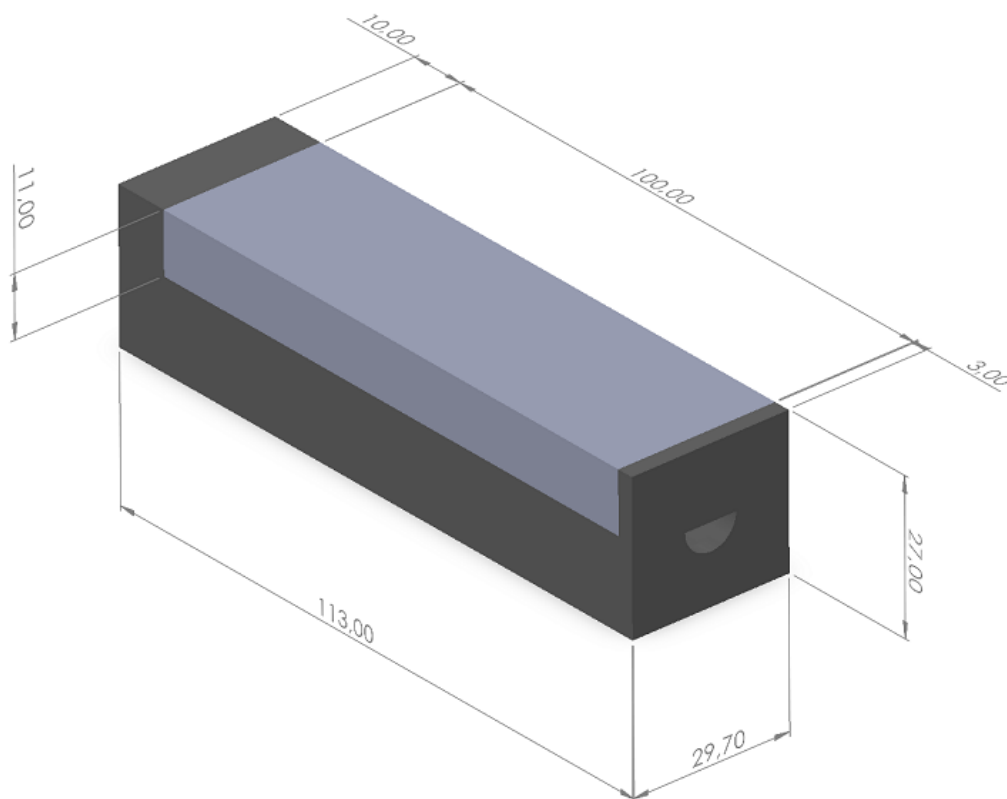


FIGURA 1.1.2.21) Stampo esterno assemblato, con coperchio di chiusura trasparente per vedere all'interno dello stampo, con relative quote in millimetri

La struttura costituita dal corpo semicilindrico, asta rigida e lamina in gomma è posizionata all'interno della base dello stampo (FIGURA 1.1.2.22). Il coperchio di chiusura viene posizionato sopra la base e all'interno dello stampo viene colata la gomma siliconica Dragon Skin 10 Slow. Terminata l'operazione di colatura, lo stampo viene chiuso con il coperchio di chiusura frontale.

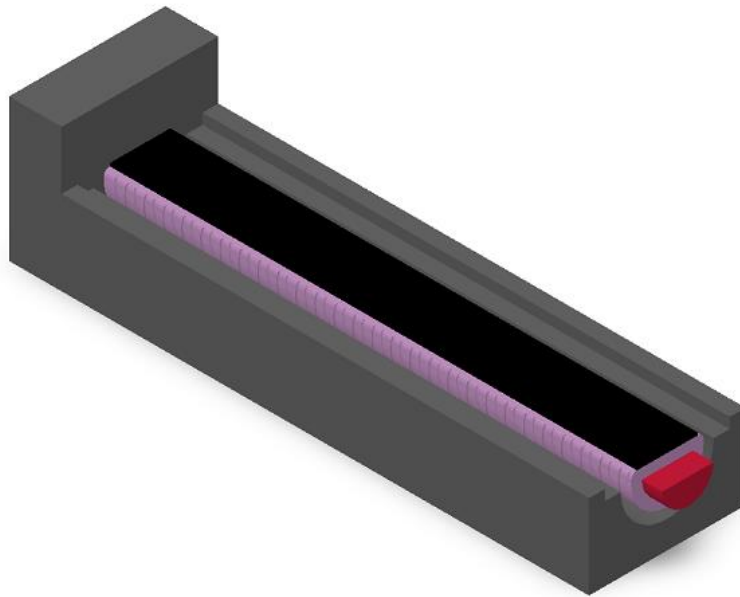


FIGURA 1.1.2.22) Corpo semicilindrico, asta rigida e lamina in gomma posizionati all'interno della base dello stampo esterno

Nella FIGURA 1.1.2.23 è riportata la base dello stampo, con il nucleo dell'attuatore, chiusa con il coperchio.

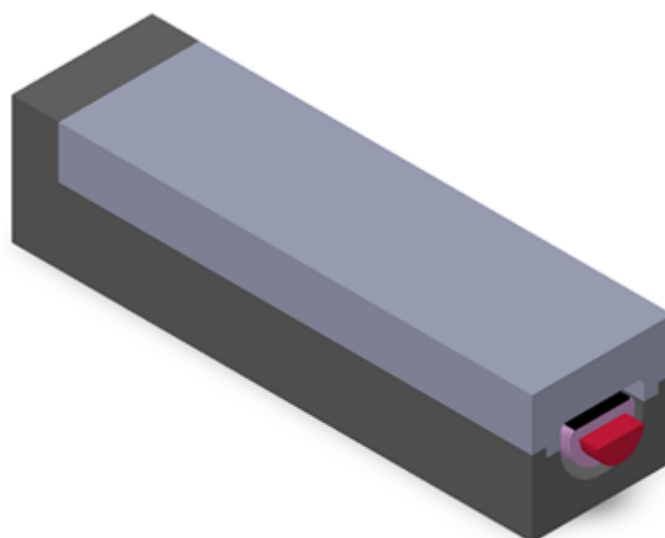


FIGURA 1.1.2.23) Base stampo esterno, asta rigida e coperchio di chiusura. All'interno dello stampo viene colata la gomma siliconica Dragon Skin 10 slow

Nella FIGURA 1.1.2.24 è riportato lo stampo esterno terminata l'operazione di colatura della gomma siliconica.

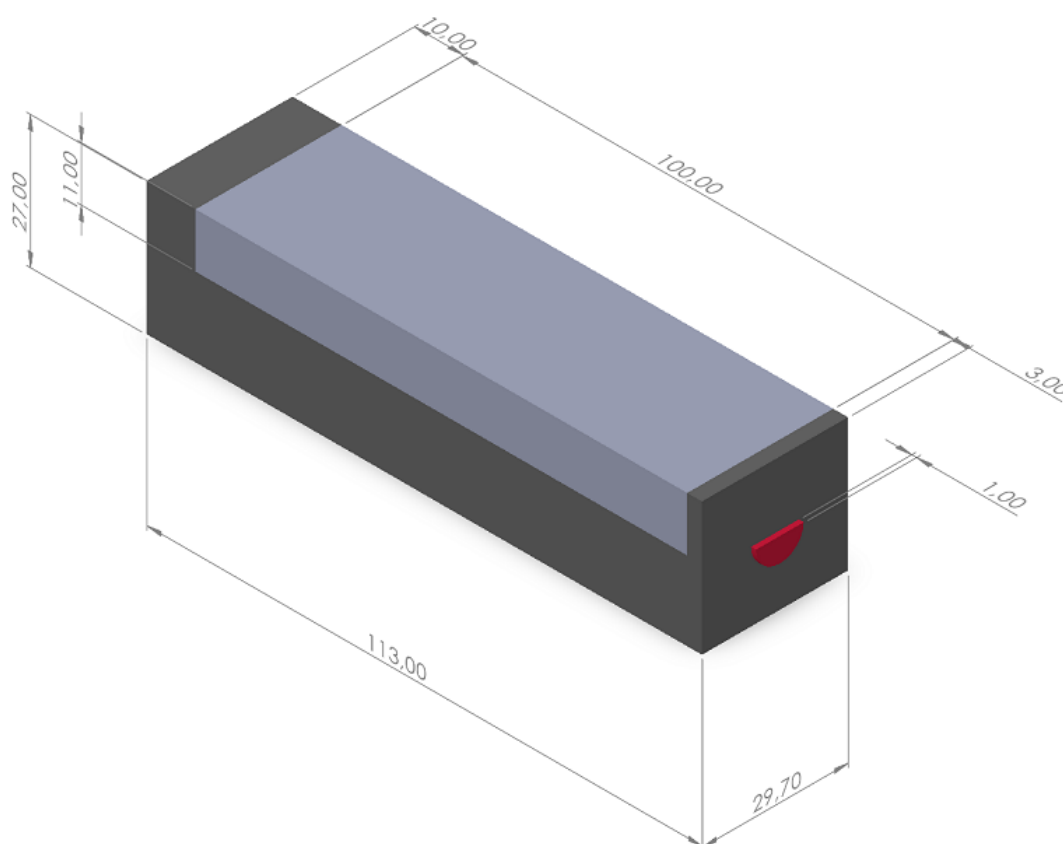


FIGURA 1.1.2.24) Stampo esterno chiuso con il coperchio di chiusura frontale con relative quote in millimetri

Terminata la fase di indurimento della gomma siliconica, la struttura viene prelevata dallo stampo esterno e successivamente viene rimossa l'asta rigida.

Nella FIGURA 1.1.2.25 è riportato il nucleo dell'attuatore pneumatico rivestito con la gomma siliconica Dragon Skin 10 Slow.

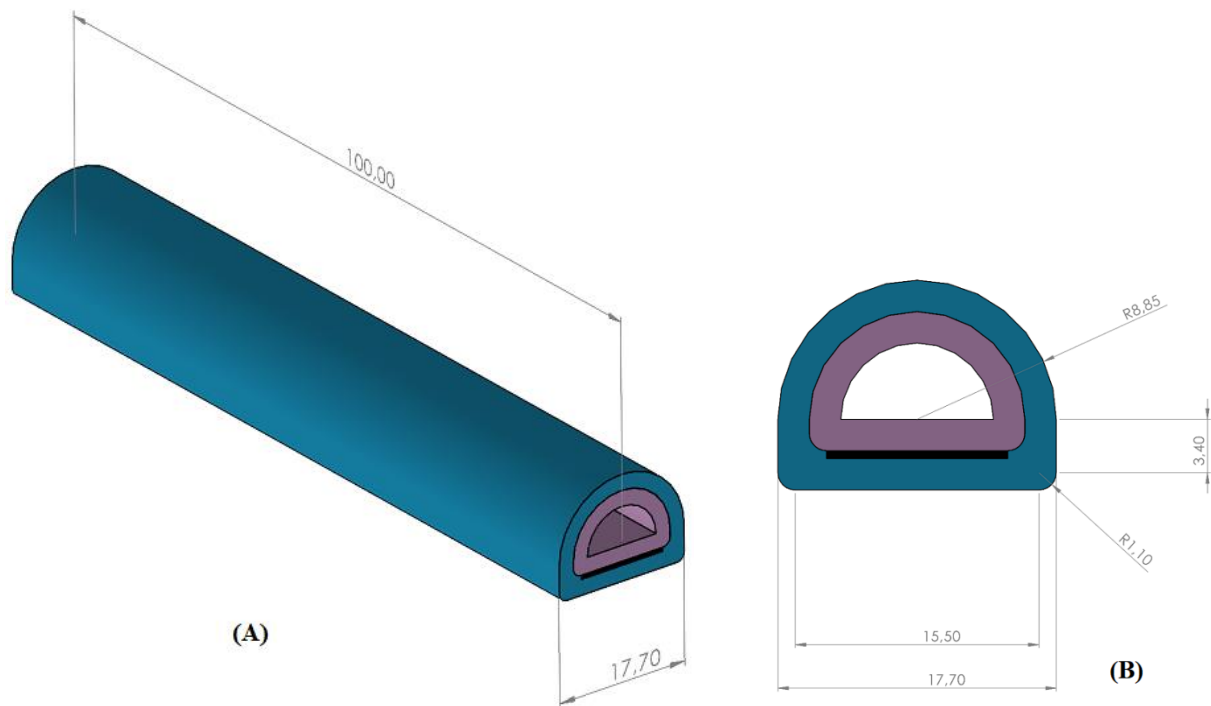


FIGURA 1.1.2.25) Attuatore pneumatico con estremità aperte, con relative quote in millimetri. (A): Vista tridimensionale. (B): Vista laterale

Dal momento che le estremità dell'attuatore pneumatico sono aperte, bisogna realizzare, sempre tramite software grafico, gli stampi per la fabbricazione dei tappi di chiusura. Sono necessari due stampi diversi perché bisogna produrre due tappi differenti. Per semplicità si chiamerà il tappo con il foro di alimentazione per l'aria compressa tappo anteriore e l'altro tappo posteriore.

Entrambi gli stampi sono costituiti da una base e da un coperchio di chiusura.

Il procedimento per la fabbricazione dei tappi è analogo a quello descritto per gli altri componenti.

All'interno della base dello stampo viene colata la gomma siliconica, in questo caso il materiale utilizzato è l'Elastosil M4601 A/B, e successivamente viene posizionato il coperchio di chiusura.

Trascorso il tempo necessario all'indurimento della gomma, i tappi prodotti vengono rimossi dagli stampi.

Nella FIGURA 1.1.2.26 è riportata la base dello stampo del tappo anteriore.

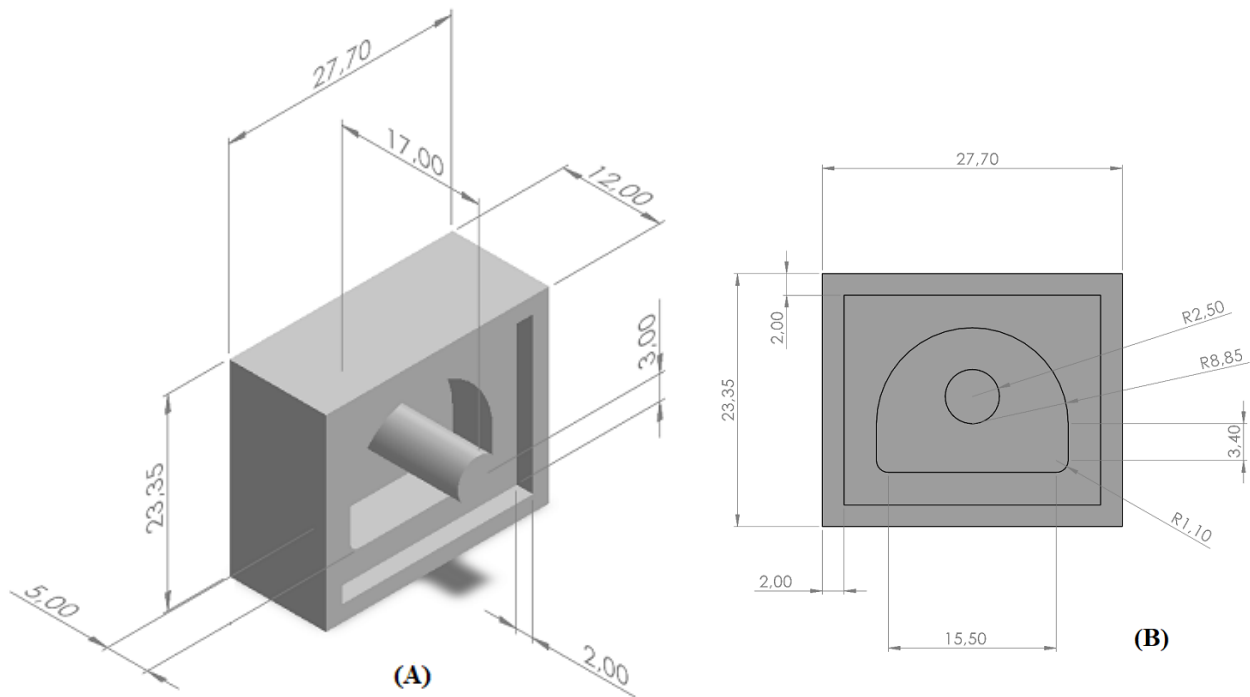


FIGURA 1.1.2.26) Base dello stampo del tappo anteriore con relative quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

Nella FIGURA 1.1.2.27 è riportato il coperchio dello stampo del tappo anteriore

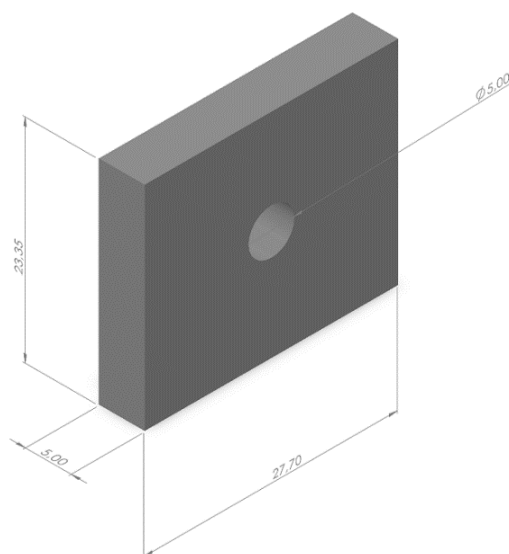


FIGURA 1.1.2.27) Coperchio di chiusura dello stampo del tappo anteriore con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.28 è riportata la base dello stampo con all'interno la gomma siliconica colata al suo interno.

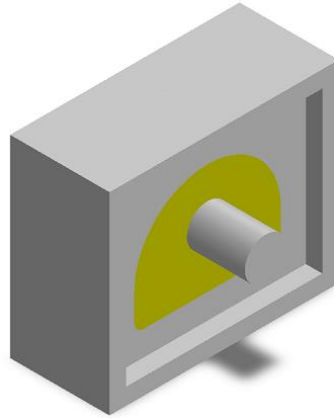


FIGURA 1.1.2.28) Base dello stampo del tappo anteriore, con all'interno la gomma siliconica colata

Nella FIGURA 1.1.2.29 è riportato lo stampo chiuso del tappo anteriore.

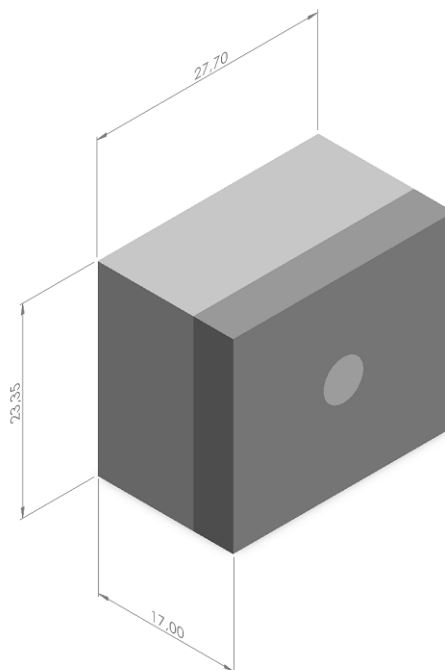


FIGURA 1.1.2.29) Stampo tappo anteriore chiuso con il coperchio di chiusura, con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.30 è riportato il tappo anteriore.

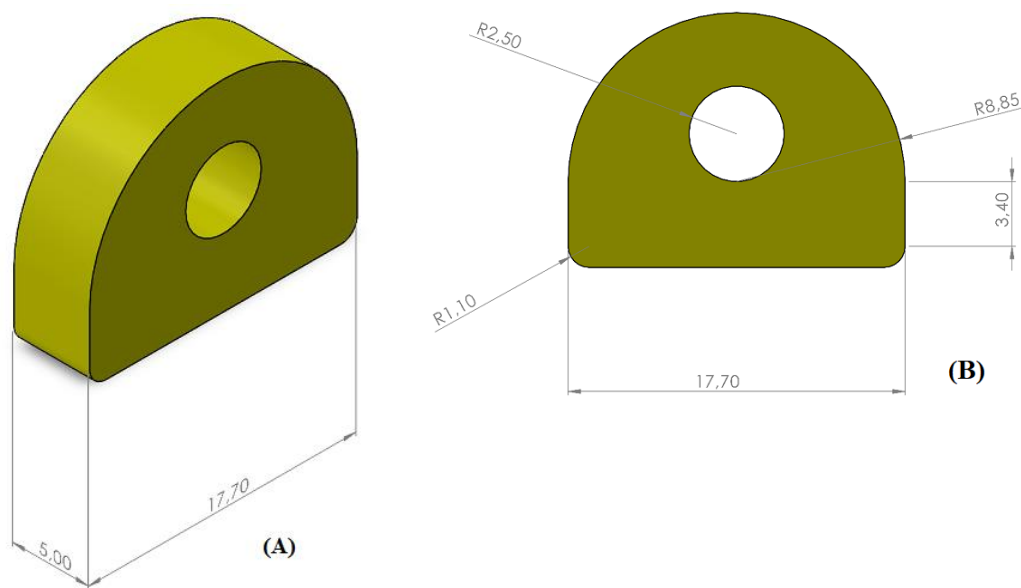


FIGURA 1.1.2.30) Tappo di chiusura anteriore con relative quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista laterale

Sul foro del tappo anteriore viene realizzata la filettatura per permettere l'attacco con il raccordo in tecnopolimero della Pneumax, modello T2204M5 gomito girevole con filetto cilindrico maschio con O-Ring (FIGURA 1.1.2.31) [35].



FIGURA 1.1.2.31) Tappo di chiusura anteriore con foro filettato

Nella FIGURA 1.1.2.32 è riportato il raccordo in tecnopolimero della Pneumax per l'alimentazione degli attuatori pneumatici costruiti in materiale siliconico.

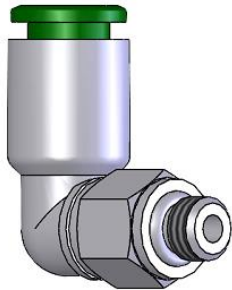


FIGURA 1.1.2.32) Gomito girevole, filetto cilindrico maschio con O-Ring [35]

Nella FIGURA 1.1.2.33 si riportano il raccordo in tecnopolimero T2204M5 quotato e la tabella con le relative dimensioni.

ART. T22		Gomito girevole filetto cilindrico maschio con O-Ring Swivel L male adaptor parallel						
CODICE	ØD	G	ØB	H	L	L1		
T2204M3	4	M3	9,5	3	17,2	17	8	50
T2204M5	4	M5	9,5	4	17,2	17	8	100
T220418	4	1/8	9,5	5,5	17,2	18,5	13	100
T220414	4	1/4	9,5	6,5	17,2	20,4	16	100
T2206M5	6	M5	11,5	4	20,8	17	8	100
T220618	6	1/8	11,5	5,5	20,8	18,5	13	100
T220614	6	1/4	11,5	6,5	20,8	20,4	16	100
T220818	8	1/8	13,5	5,5	23	20	13	100
T220814	8	1/4	13,5	6,5	23	20,4	16	100
T220838	8	3/8	13,5	7,5	23	24,8	18	50
T221018*	10	1/8	19	5,5	27,8	26	14	50
T221014	10	1/4	17	6,5	26,4	23,2	16	50
T221038	10	3/8	17	7,5	26,4	24,8	18	50
T221012	10	1/2	17	9	26,4	31,1	21	25
T221214	12	1/4	20	6,5	28,9	24,2	16	25
T221238	12	3/8	20	7,5	28,9	26,3	18	25
T221212	12	1/2	20	9	28,9	31,1	21	25

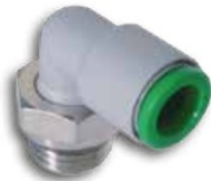
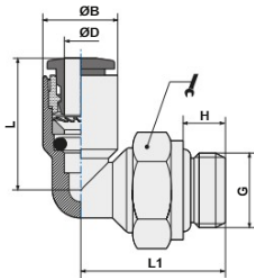


FIGURA 1.1.2.33) Tabella delle dimensioni del raccordo T2204M5: gomito girevole con filetto cilindrico maschio con O-Ring [35]

Nella FIGURA 1.1.2.34 è riportata la base dello stampo del tappo posteriore.

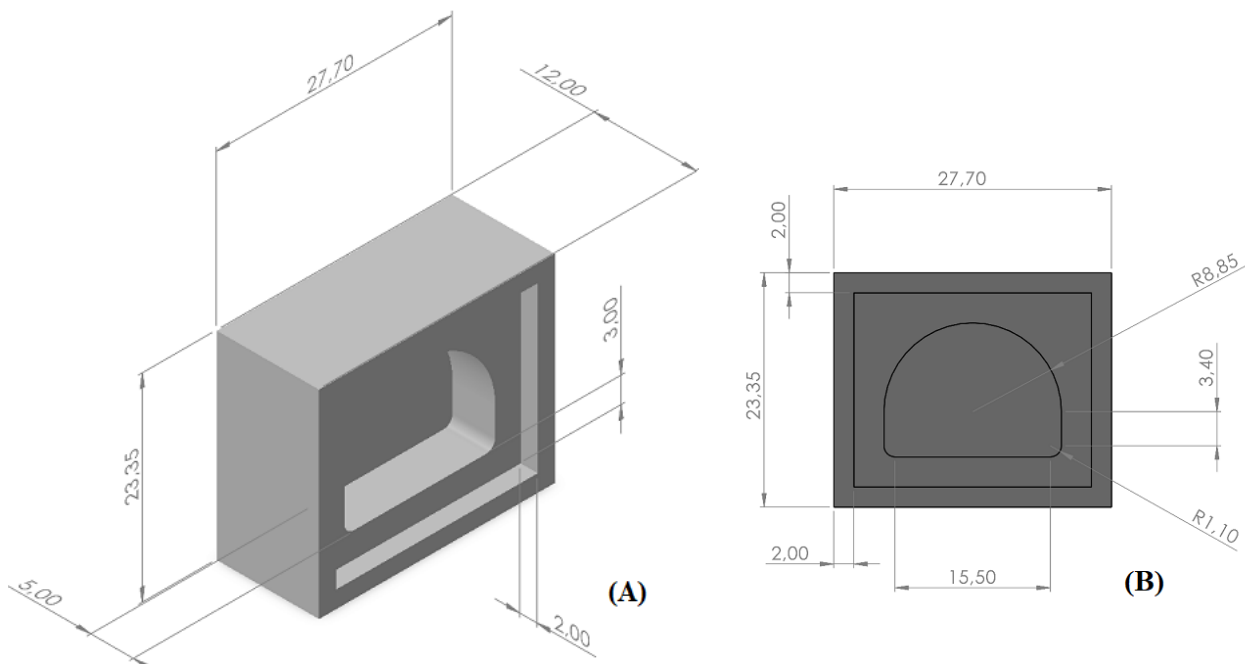


FIGURA 1.1.2.34) Base dello stampo del tappo posteriore con relative quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista laterale

Nella FIGURA 1.1.2.35 è riportato il coperchio dello stampo del tappo posteriore.

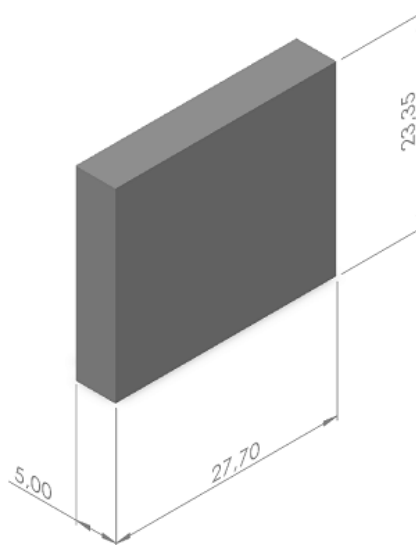


FIGURA 1.1.2.35) Coperchio di chiusura dello stampo del tappo posteriore con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.36 è riportata la base dello stampo con all'interno la gomma siliconica colata al suo interno.

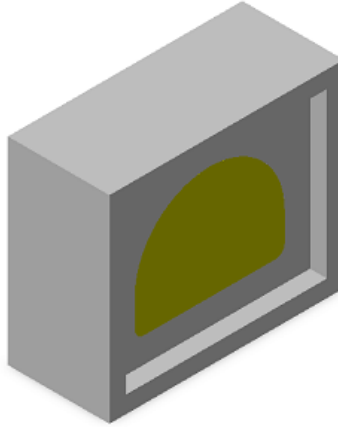


FIGURA 1.1.2.36) Base dello stampo del tappo posteriore, con all'interno la gomma siliconica colata

Nella FIGURA 1.1.2.37 è riportato lo stampo chiuso del tappo posteriore.

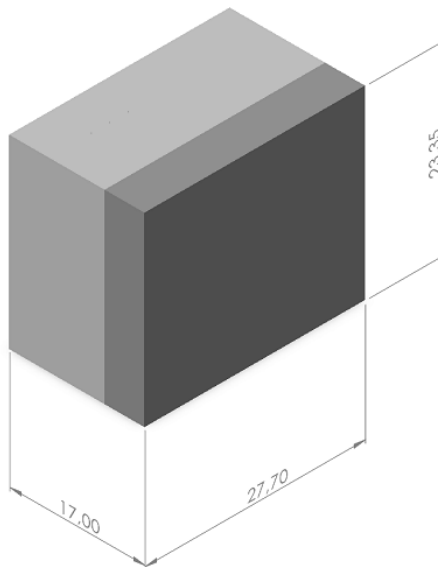


FIGURA 1.1.2.37) Stampo tappo posteriore chiuso con il coperchio di chiusura con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.38 è riportato il tappo posteriore.

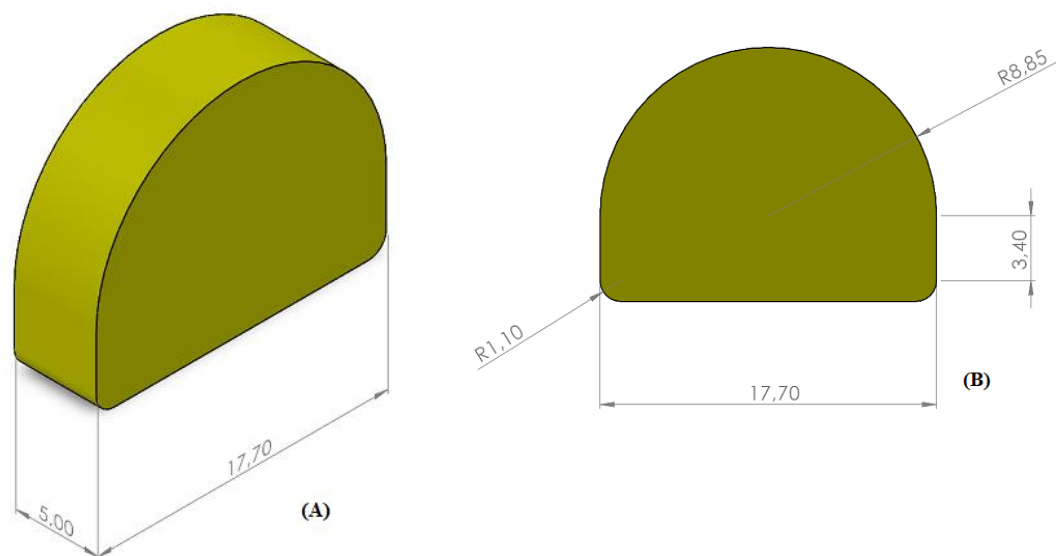


FIGURA 1.1.2.38) Tappo di chiusura posteriore con relative quote in millimetri.

(A): Vista tridimensionale. (B): Vista frontale

A questo punto i tappi realizzati vengono incollati alle estremità libere dell'attuatore pneumatico (FIGURA 1.1.2.39). La colla utilizzata per posizionare questi tappi alle estremità aperte dell'attuatore è la colla "Pattex special Gomma", ideale per incollare in modo duraturo le superfici in gomma.

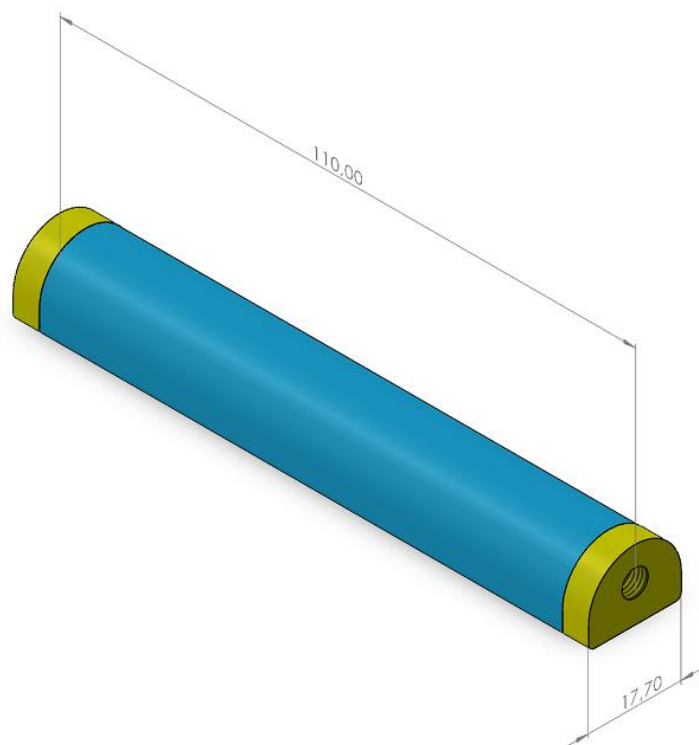


FIGURA 1.1.2.39) Attuatore pneumatico per il dito indice della mano sinistra con relative quote in millimetri

Nella FIGURA 1.1.2.40 è riportato l'attuatore pneumatico in materiale siliconico con il raccordo per l'alimentazione prodotto dalla Pneumax.

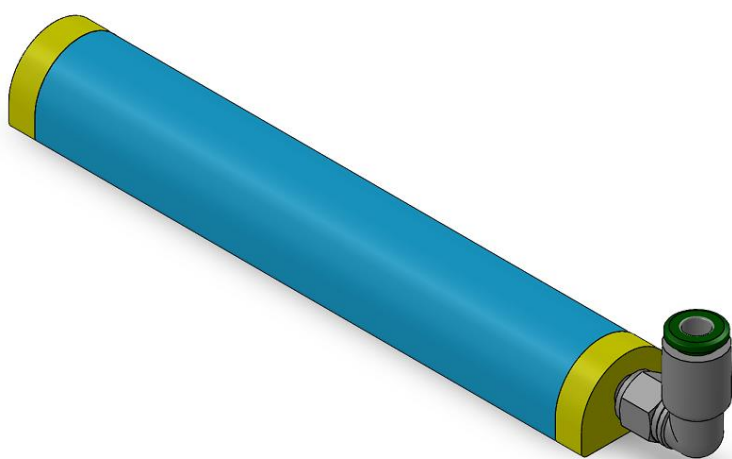


FIGURA 1.1.2.40) Attuatore pneumatico per il dito indice della mano sinistra con gomito girevole, filetto cilindrico maschio con O-Ring

1.2 Installazione dei cilindri pneumatici in materiale siliconico sul guanto ad elasticità differenziata

Una volta realizzati tutti gli attuatori pneumatici in materiale siliconico, necessari alla movimentazione delle dita della mano sinistra e del polso del paziente, questi vengono posizionati sul guanto ad elasticità differenziata.

Sul guanto sono realizzate delle apposite calzette in tessuto per permettere l'installazione degli attuatori pneumatici, i quali vengono inseriti all'interno delle tre calzette cucite su ciascun dito del guanto e sul polso per favorire la piegatura delle articolazioni delle dita della mano e del polso del paziente.

Nella FIGURA 1.2.1 è riportato il guanto ad elasticità differenziata con gli attuatori pneumatici in materiale siliconico installati dentro le apposite calzette.

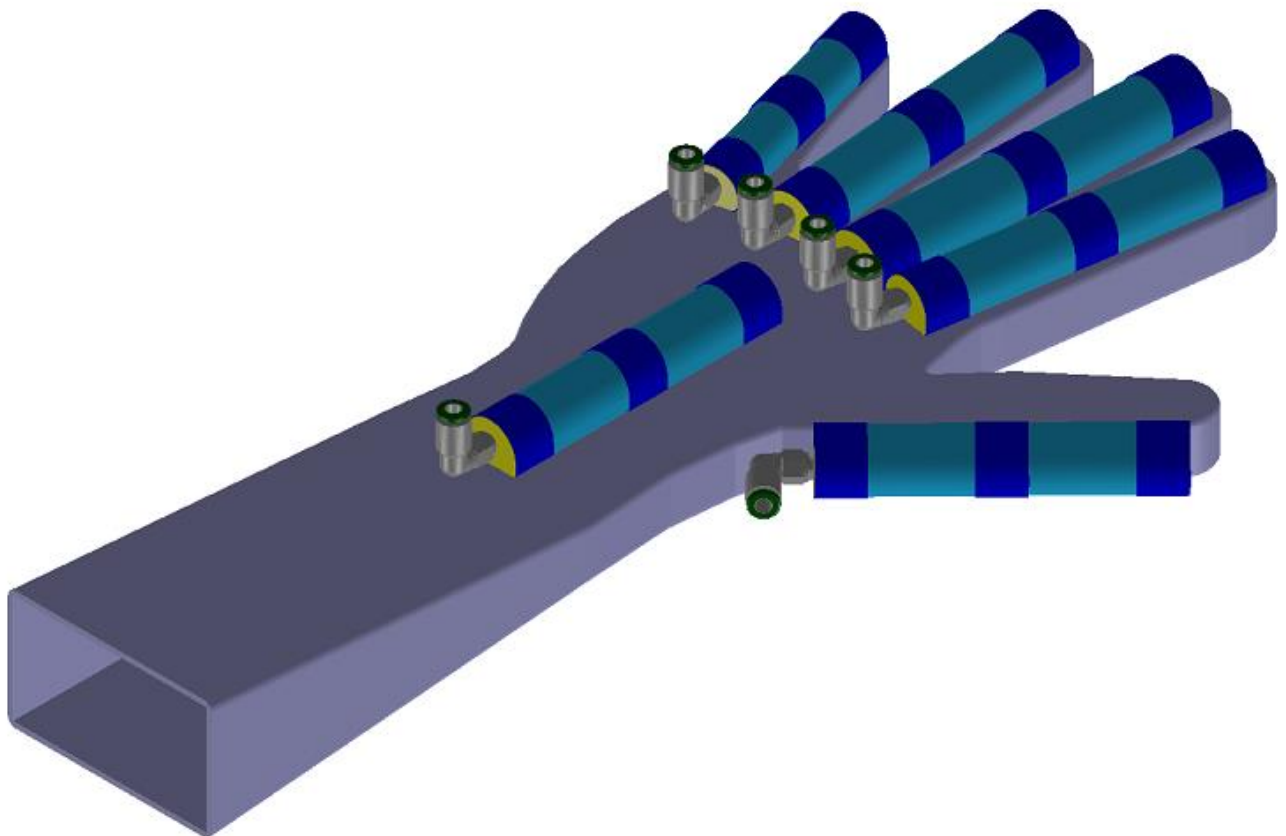


FIGURA 1.2.1) Guanto per la mano sinistra con gli attuatori pneumatici in materiale siliconico

Nella TABELLA 1.2.1 sono riportate le dimensioni degli attuatori pneumatici costruiti in materiale siliconico.

Attuatore pneumatico	Lunghezza [mm]
Pollice	88
Indice	100
Medio	107
Anulare	97
Mignolo	69
Polso	88

TABELLA 1.2.1) Lunghezza attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico

Nella FIGURA 1.2.2 si riportano le quote dimensionali del guanto per quanto riguarda la lunghezza totale, la larghezza in corrispondenza del polso e la larghezza in corrispondenza della parte terminale sull'avambraccio.

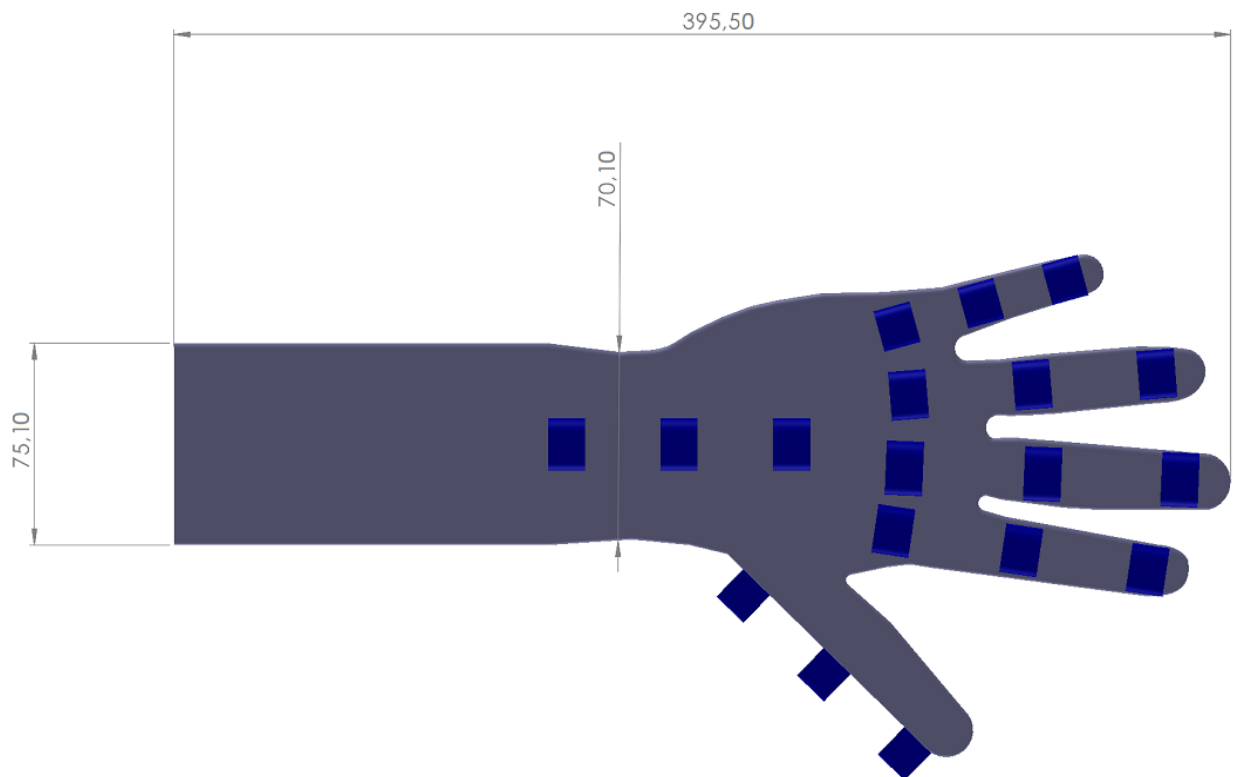


FIGURA 1.2.2) Dimensioni del guanto, con quote in millimetri

Il dispositivo realizzato può essere inserito facilmente sul braccio e sulla mano sinistra del paziente (FIGURA 1.2.3). A questo punto possono essere collegati i tubi di alimentazione a tutti gli attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico e successivamente il dispositivo potrà essere azionato e utilizzato per condurre studi e analisi fMRI sull'attività cerebrale del paziente.

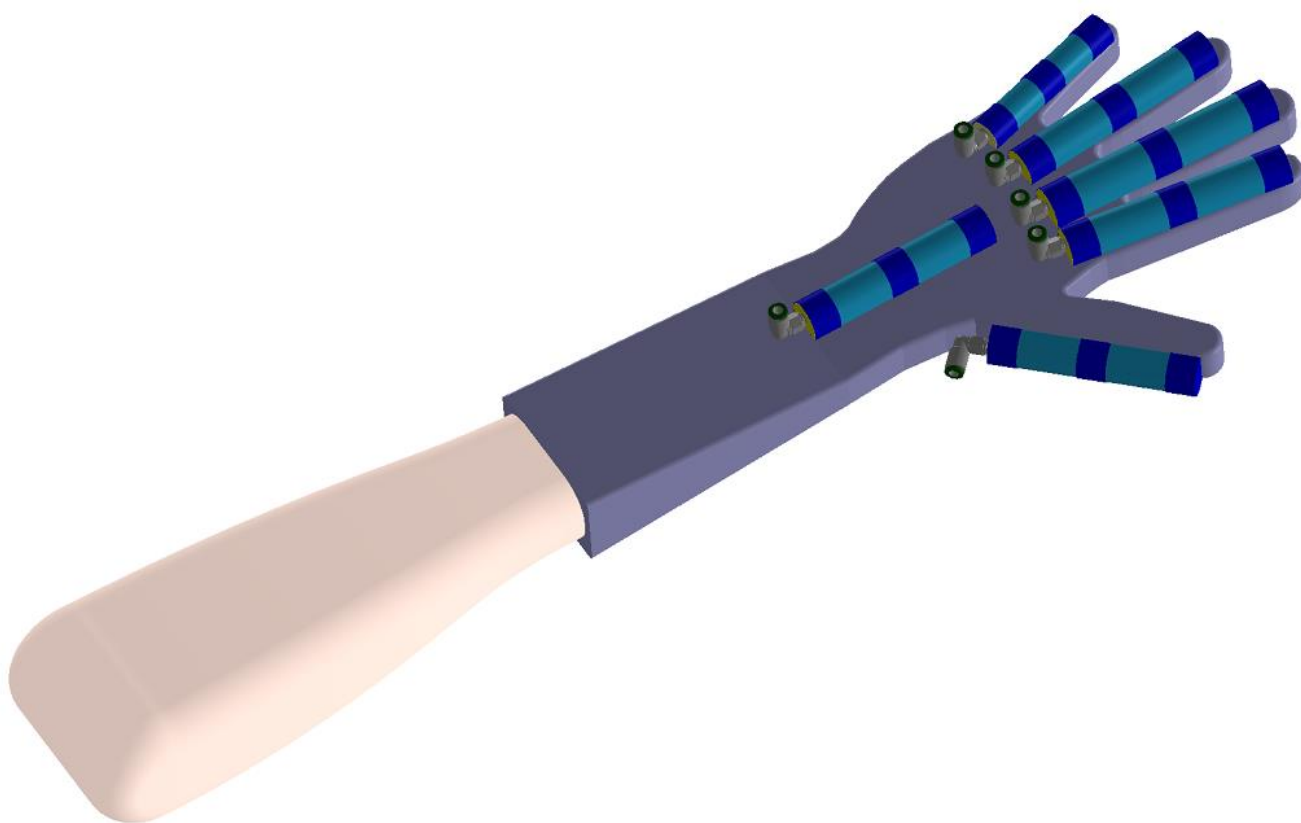


FIGURA 1.2.3) Guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici in materiale siliconico indossato dal paziente

1.3 Materiali tessili per la realizzazione del guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico

Per la fabbricazione del guanto ad elasticità differenziata è stato molto importante lo studio delle proprietà e delle caratteristiche di varie tipologie di tessuti. Questa fase ha richiesto molto tempo e approfondimento perché il guanto deve essere realizzato con materiali adatti per la perfetta aderenza del dispositivo alla mano e al braccio sinistro del paziente. I tessuti devono essere anallergici perché sono a contatto diretto con la pelle del paziente. Per lo studio dei materiali idonei, sono stati consultati svariati negozi tessili e mercerie.

Il guanto è prodotto con due diversi tipi di materiali:

- Tessuto jersey stretch
- Tessuto a filo continuo in HPPE e nylon

Il tessuto jersey stretch è una stoffa realizzata con una lavorazione a maglia e non con l'intreccio di fili sul telaio. Questo tessuto veniva già utilizzato a partire dal XIX secolo nell'isola di Jersey, isola situata nel canale della Manica, dai pescatori che utilizzavano questo tessuto come indumento perché morbido ed elastico. Questo tessuto ha iniziato a prendere valore e impiego grazie a Coco Chanel per la produzione di capi d'alta moda, grazie alla sua ottima vestibilità.

Le caratteristiche principali della stoffa jersey sono la leggerezza, la morbidezza, la traspirabilità e l'elasticità. Quello che rende speciale questo materiale è la sua malleabilità, che consente di adattarsi in maniera ottimale alle forme del corpo, in questo caso alla forma della mano.

Il tessuto jersey stretch, utilizzato per la realizzazione del guanto, deriva dalle fibre di cotone ed è costituito dal 95% da cotone e dal 5% da elastan. L'elastan è una fibra sintetica, utilizzata per elasticizzare i tessuti. Questo materiale presenta un aspetto opaco, morbido ed elastico [6].

Con questo tessuto sono realizzate tutte le parti del guanto dov'è necessaria una maggiore elasticità per facilitare la piegatura delle articolazioni delle dita.

Nella FIGURA 1.3.1 è riportato il tessuto jersey stretch.



FIGURA 1.3.1) Tessuto jersey stretch [23]

Al posto del tessuto jersey stretch si potrebbe utilizzare un tessuto a rete (FIGURA 1.3.2). Questo materiale è traspirante, elastico ed è molto confortevole per il paziente. Queste si rivelano necessarie per la realizzazione delle parti a maggiore mobilità del guanto.



FIGURA 1.3.2) Tessuto a rete [45]

L'altro materiale utilizzato è un tessuto a filo continuo in HPPE (High Performance Polyethylene) e nylon. Questo materiale offre un buon livello di protezione dai rischi meccanici (resistenza al taglio, alla bucatura e all'abrasione), ha una buona flessibilità, un ottimo comfort sulla pelle del paziente, è leggero e facile da cucire. Oggigiorno questo materiale viene utilizzato per la produzione dei guanti da lavoro. Questi guanti devono essere in grado di proteggere le mani dei lavoratori da eventuali pericoli durante il lavoro e quindi per questo motivo devono essere resistenti [30].

Questo materiale è robusto e adatto per la realizzazione di tutte le parti del guanto dov'è richiesta una maggiore resistenza. Con questo tessuto sono realizzate le calzette per l'installazione degli attuatori pneumatici e le parti in cui queste calzette vengono cucite al guanto.

Nella FIGURA 1.3.3 è riportato il tessuto a filo continuo in HPPE e nylon.



FIGURA 1.3.3) Tessuto a filo continuo in HPPE e nylon [30]

Per cucire questi tessuti si devono utilizzare aghi a testa piatta per non danneggiare la stoffa. Un esempio di questa tipologia di aghi è riportato nella FIGURA 1.3.4.

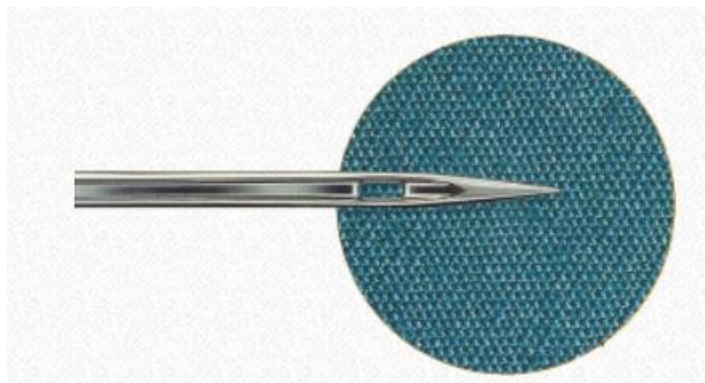


FIGURA 1.3.4) Ago a testa piatta [1]

Tutti i tessuti utilizzati sono facilmente lavabili, in modo da disinfettare il dispositivo una volta terminata l'analisi fMRI sul paziente oggetto di studio.

Nella FIGURA 1.3.5 si riporta il layout del guanto con le parti realizzate con i due tessuti selezionati. In turchese scuro sono rappresentate le parti del guanto a maggiore elasticità, realizzate con il tessuto jersey stretch, mentre in blu le parti a rigidità maggiore, realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon

Con le linee tratto-punto in nero sono rappresentati gli assi di rotazione delle falangi delle dita e del polso. Questi assi aiutano a comprendere come avviene la piegatura delle falangi prossimali, medie e distali di ciascun dito della mano e la flessione del polso dall'alto verso il basso e viceversa attorno a questi assi. Per facilitare la piegatura delle articolazioni delle dita, le strisce blu, realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon, non devono cadere sugli assi di rotazione delle falangi e del polso, perché renderebbero più complicati questi movimenti.

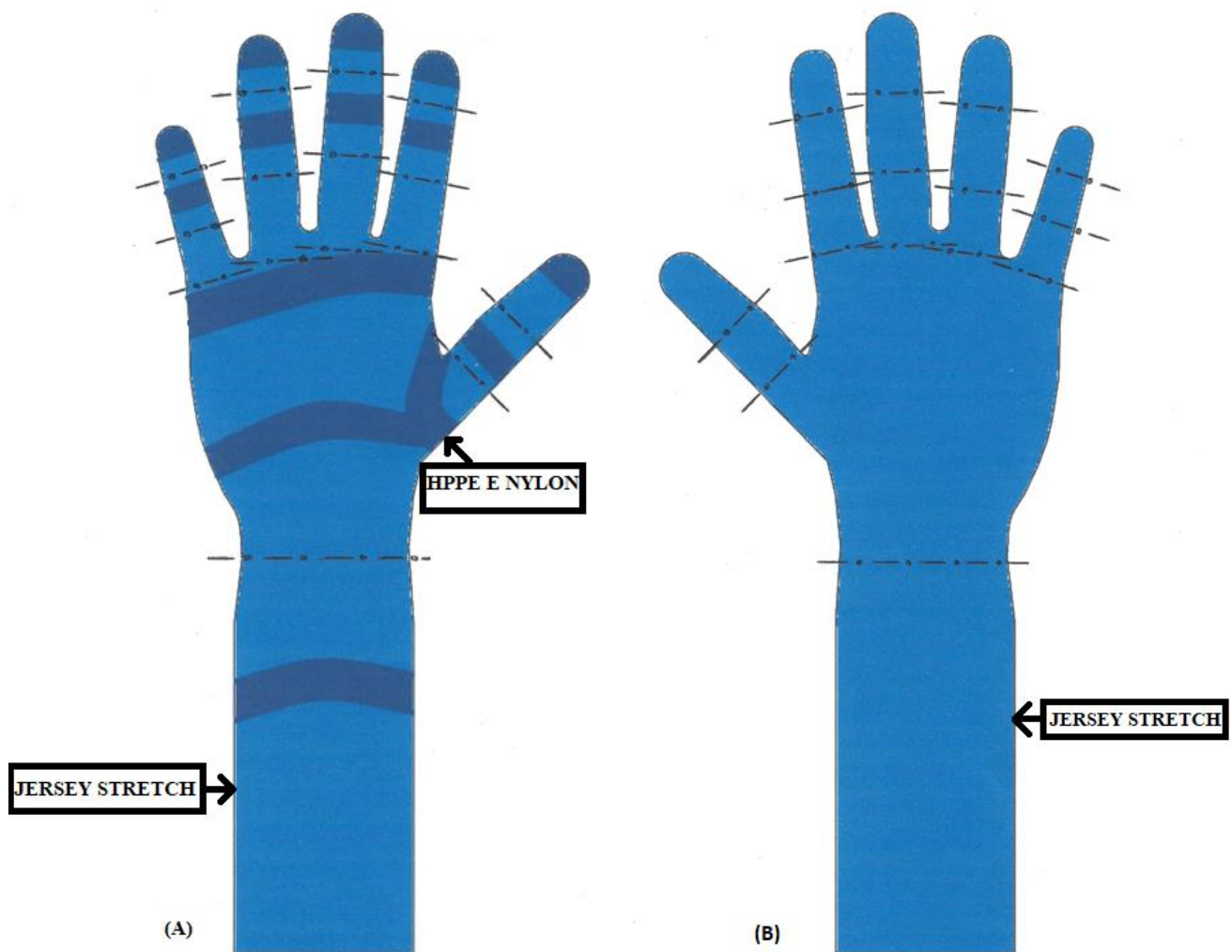


FIGURA 1.3.5) (A): Dorso del guanto con in turchese scuro le parti realizzate con il tessuto jersey stretch e in blu le parti realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon. **(B):** Palmo del guanto realizzato in tessuto jersey stretch. Con le linee tratto-punto si indicano gli assi di rotazione di ciascuna falange e del polso

Nella FIGURA 1.3.6 sono stati messi in evidenza gli occhielli di aggancio e di tenuta per gli attuatori pneumatici realizzati con materiali siliconici.

Gli occhielli di aggancio permettono l'installazione degli attuatori pneumatici sul guanto. Per ogni dito sono necessari due occhielli di aggancio, quello posizionato in prossimità del metacarpo è visto come punto di attacco fisso, che deve fare da telaio; quello posizionato in prossimità della punta del dito deve produrre il movimento richiesto.

Gli occhielli di tenuta permettono di evitare che gli attuatori pneumatici, durante il loro funzionamento, si sollevino dal dorso del dito. Se dovesse verificarsi questa situazione, non si produrrebbe più il movimento richiesto.

Lo stesso discorso vale per la flessione del polso.

Gli occhielli sono realizzati in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon, perché devono essere rigidi e robusti, e sono cuciti sul guanto in corrispondenza delle strisce blu, realizzate anch'esse in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon.

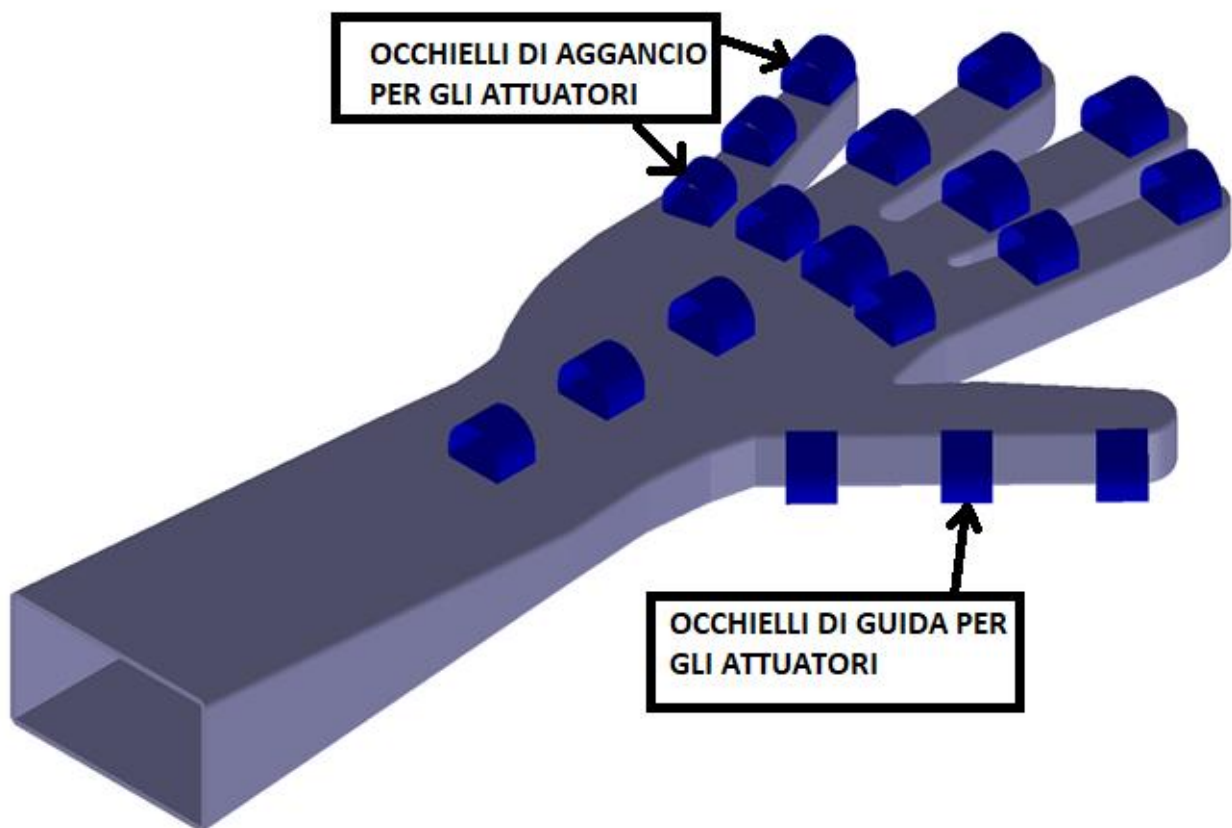


FIGURA 1.3.6) Layout schematico del guanto realizzato con Solidworks, con le relative calzette per l'installazione degli attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico

CAPITOLO 2: Guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici

In questo capitolo si è studiato come dispositivo per la movimentazione delle dita della mano sinistra e del polso un guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici.

I muscoli pneumatici, installati sul guanto ad elasticità differenziata, sono realizzati con una camera elastomerica cava, rivestita con una struttura a rete e le estremità sono chiuse con due piattine in ergal. I muscoli pneumatici sono cuciti al guanto mediante l'utilizzo di fettuccine in tessuto, presenti sulle testate di chiusura.

Questo dispositivo non è utilizzato come supporto durante la vita quotidiana, ma solo per condurre analisi fMRI per valutare l'attività cerebrale del paziente oggetto di studio. Dal momento che il paziente si trova sdraiato sul lettino è necessario prevedere un supporto fisso agganciato al lettino che sostenga l'avambraccio del paziente.

I movimenti da realizzare sono descritti nel capitolo Scopo della tesi: Movimenti di imporre.

2.1 Presentazione dei muscoli pneumatici

I muscoli pneumatici artificiali sono costituiti da una camera elastomerica cilindrica vuota ricoperta da un manicotto intrecciato realizzato da fibre in materiale non estensibile, che serve per contenere l'espansione della membrana interna. La guaina esterna è realizzata con un tessuto antistrappo, in grado di trasformare le forze prodotte dall'espansione radiale in forze di contrazione assiale.

Le estremità aperte della camera interna, rivestita dalla guaina esterna di rivestimento, sono sigillate e fissate a delle testate realizzate in leghe leggere di alluminio e magnesio. Una delle due testate presenta un foro per l'alimentazione e lo scarico dell'aria compressa.

Mandando in pressione la camera elastomerica, si ha un accrescimento della dimensione diametrale e un accorciamento del muscolo pneumatico.

I muscoli pneumatici hanno trovato largo impiego grazie all'elevato rapporto potenza/peso, alla loro leggerezza e alla loro facilità d'installazione e utilizzo. Oggigiorno sono molto utilizzati nella robotica riabilitativa, per la realizzazione di protesi robotiche e per la produzione di dispositivi per la riabilitazione [43].

Per garantire i movimenti necessari per la piegatura delle articolazioni delle dita della mano, descritti nello Scopo della tesi: Movimenti da imporre, a ogni dito del guanto devono essere

installati due muscoli pneumatici, uno sul dorso e uno sul palmo del dito. I muscoli pneumatici lavorano con il principio agonista-antagonista. Partendo da una condizione di dita distese, il muscolo pneumatico installato sul dorso del dito è in fase di contrazione, mentre quello sul palmo è in fase di riposo. Per piegare l'articolazione del dito, il muscolo pneumatico installato sul dorso del dito viene svuotato attraverso la valvola di scarico. In questo modo il muscolo passa dalla fase di contrazione a quella di riposo. Contemporaneamente viene alimentato quello cucito sul palmo del dito attraverso la valvola di alimentazione, e quest'ultimo passerà dalla fase di riposo alla fase di contrazione. Per tornare alla fase di partenza, bisogna svuotare il muscolo pneumatico installato sul palmo del dito e alimentare quello cucito sul dorso.

Lo stesso ragionamento vale per i due muscoli pneumatici installati per il polso.

Per lo sviluppo del guanto ad elasticità differenziata con i muscoli pneumatici, si è fatto riferimento al prototipo di muscolo pneumatico progettato dalla Dottoressa Sirolli nello "Studio di muscoli pneumatici e loro integrazione in vestiti attivi a scopo riabilitativo" [43].

Il cuore del muscolo pneumatico è una camera elastomerica interna realizzata in lattice (FIGURA 2.1.1). Per l'alimentazione è stato posizionato un tubo in silicone ad un'estremità della camera e successivamente le due estremità in lattice sono state incollate per garantire l'impermeabilità della camera stessa.



FIGURA 2.1.1) Camera elastomerica in lattice e tubo di alimentazione realizzato dalla Dottoressa Sirolli [43]

La struttura in lattice è stata rivestita con una rete, denominata DIMEAS, costituita da fili ad elevata resistenza di materiale para-aramidico, che conferiscono alla guaina un'ottima deformabilità radiale. Il tessuto in fibra para-aramidica possiede un'eccellente resistenza al taglio, alla rottura ed ha un'elevata flessibilità.

Le testate per la chiusura delle due estremità sono piatte e sono realizzate in ergal, materiale amagnetico e quindi adatto all'ambiente della camera di risonanza magnetica (FIGURA 2.1.2).



FIGURA 2.1.2) Testata di chiusura vista dall'alto e fettuccina per cucitura del muscolo pneumatico sul guanto realizzato dalla Dottoressa Sirolli [43]

Le testate sono costituite da due basi piatte, serrate utilizzando viti in ergal. Per incrementare l'aderenza tra le superfici, all'interno delle basi delle testate è stato incollato uno strato di carta vetro. Le testate sono dotate di due fettuccine in tessuto per permettere la cucitura del muscolo pneumatico al guanto ad elasticità differenziata.



FIGURA 2.1.3) A sinistra la testata di chiusura per l'estremità con tubo di alimentazione. A destra la testata di chiusura dell'altra estremità [43]

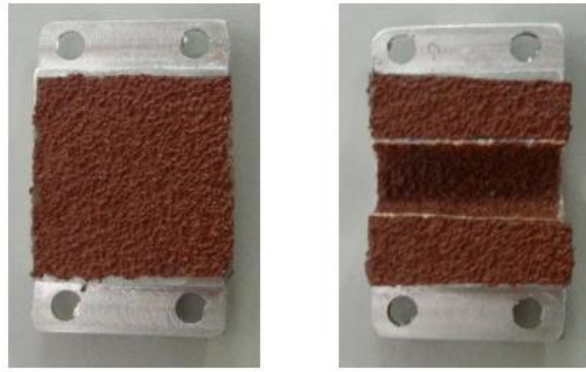


FIGURA 2.1.4) Le due basi che formano la testata di chiusura e lo strato di carta vetro incollato all'interno [43]

Nella figura 2.1.5 è riportato il muscolo pneumatico realizzato dalla Dottoressa Sirolli.

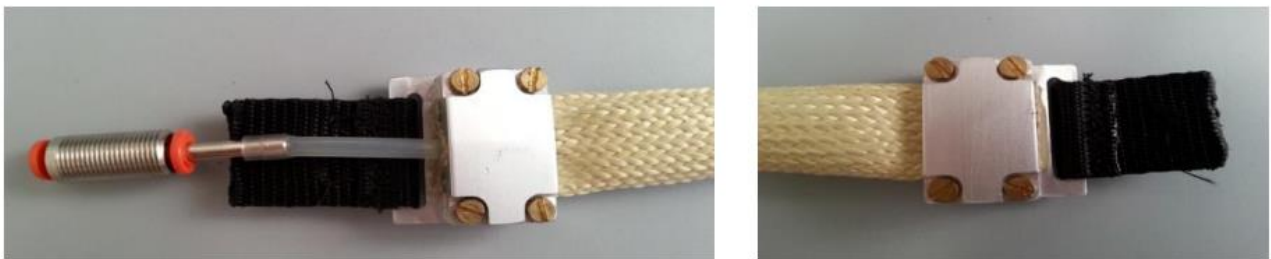


FIGURA 2.1.5) Muscolo pneumatico all'interno delle testate di chiusura realizzato dalla Dottoressa Sirolli [43]

2.2 Materiali tessili per la realizzazione del guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici

Il guanto ad elasticità differenziata è realizzato con gli stessi materiali utilizzati per la fabbricazione del guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici realizzati in materiale siliconico.

I materiali utilizzati sono:

- Tessuto jersey stretch
- Tessuto a filo continuo in HPPE e nylon

Le caratteristiche di questi due tipi di materiale sono riportate nel paragrafo “1.3 Materiali tessili per la realizzazione del guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici in materiale siliconico”.

Dal momento che per la piegatura delle dita della mano sono necessari per ciascun dito due muscoli pneumatici, di cui uno installato sul dorso del dito e uno sul palmo del dito, la struttura del guanto ad elasticità differenziata sarà diversa rispetto a quella con gli attuatori pneumatici in materiale siliconico. Il dorso e il palmo del guanto sono realizzati utilizzando sia il tessuto jersey stretch che quello a filo continuo in HPPE e nylon, perché sono necessarie delle strisce in tessuto più resistenti per la cucitura delle fettuccine dei muscoli pneumatici e delle parti più elastiche per facilitare il movimento delle dita della mano del paziente.

Questo discorso vale anche per il movimento del polso perché sono necessari, anche qui, due muscoli pneumatici, uno installato sul dorso e uno sul palmo del guanto in prossimità del polso.

Nella FIGURA 2.2.1 si riporta una rappresentazione schematica del guanto ad elasticità differenziata realizzato con il tessuto jersey stretch e quello a filo continuo in HPPE e nylon. In turchese scuro sono rappresentate le parti a maggiore elasticità, realizzate con il tessuto jersey stretch, mentre in blu le parti a maggiore rigidità, realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon.

Con le linee tratto-punto in nero sono rappresentati gli assi di rotazione delle falangi delle dita e del polso. Questi assi aiutano a comprendere come avviene la piegatura delle falangi prossimali, medie e distali di ciascun dito della mano e la flessione del polso dall'alto verso il basso e viceversa attorno a questi assi. Per facilitare la piegatura delle articolazioni delle dita, le strisce blu, realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon, non devono cadere sugli assi di rotazione delle falangi e del polso perché renderebbero più complicati questi movimenti.

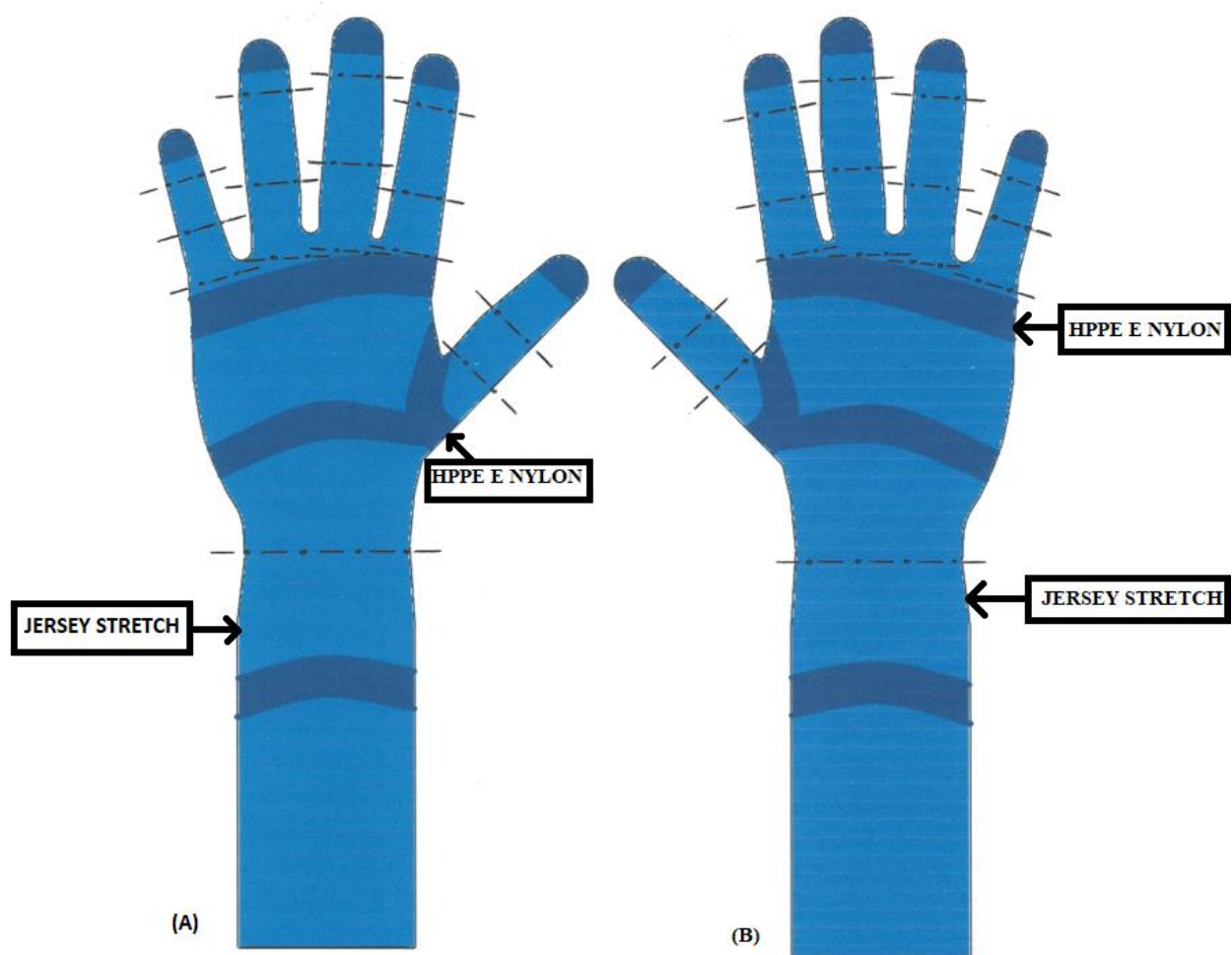


FIGURA 2.2.1) (A): Dorso del guanto. (B): Palmo del guanto. In turchese scuro le parti realizzate con il tessuto jersey stretch e in blu le parti realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon. Con le linee tratto-punto si indicano gli assi di rotazione di ciascuna falange e del polso

2.3 Installazione dei muscoli pneumatici sul guanto ad elasticità differenziata

Una volta realizzato il guanto ad elasticità differenziata con i materiali descritti nel paragrafo precedente, è possibile installare i muscoli pneumatici. Essi vengono cuciti sul guanto, attraverso la cucitura delle fettuccine presenti sulle testate di chiusura in corrispondenza delle strisce blu realizzate in tessuto a filo continuo in HPPE e nylon.

Nella FIGURA 2.3.1 si riporta una rappresentazione schematica del guanto ad elasticità differenziata con gli attuatori pneumatici cuciti sul dorso e sul palmo delle dita del guanto. Con le linee tratteggiate in nero sono rappresentati gli assi di rotazione di ogni falange delle dita e del polso. La fettuccina, cucita in corrispondenza del metacarpo, funziona da telaio, ovvero permette l'attacco del muscolo pneumatico e si comporta da punto fisso. La fettuccina cucita in corrispondenza della punta del dito è quella che produce il movimento richiesto.

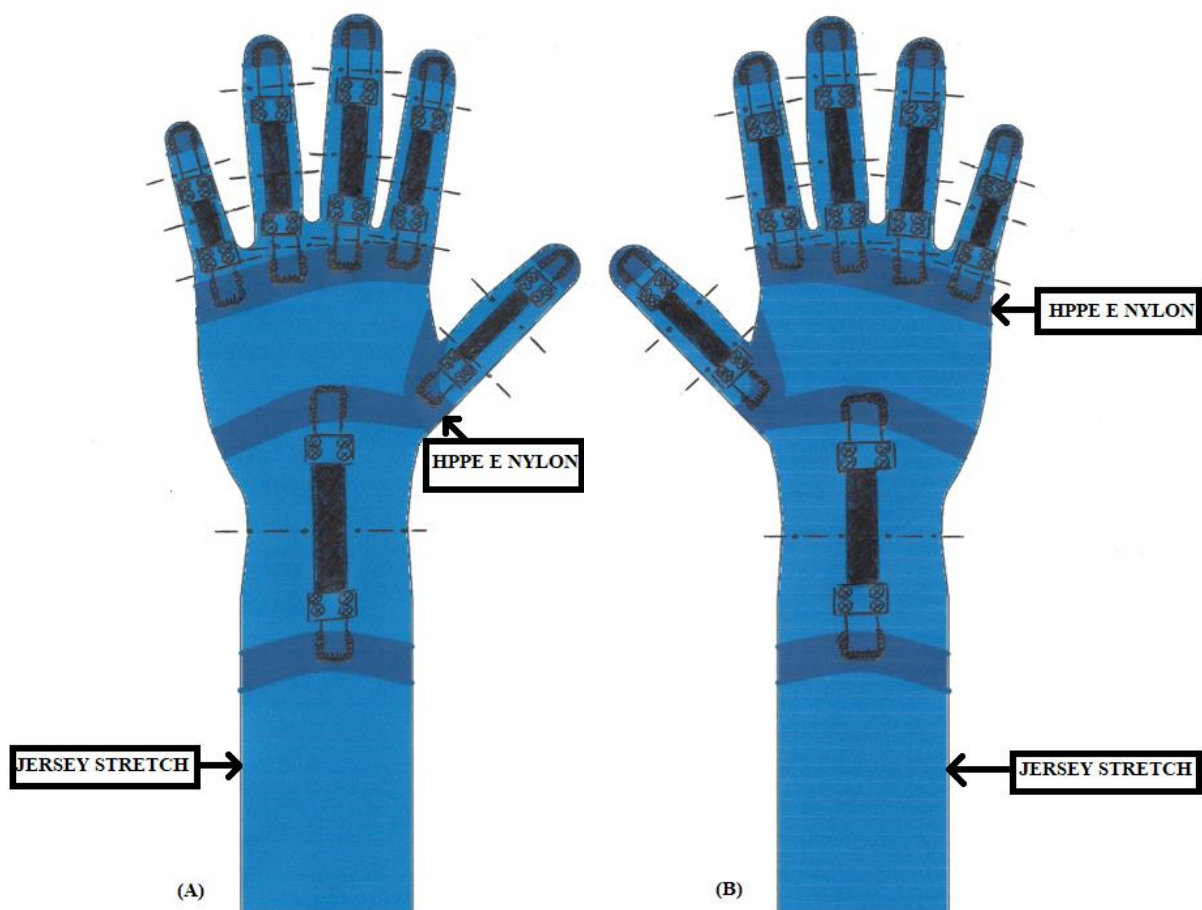


FIGURA 2.3.1) (A): Dorso del guanto con muscoli pneumatici. (B): Palmo del guanto con muscoli pneumatici. Con le linee tratto-punto si indicano gli assi di rotazione di ciascuna falange e del polso

Il dispositivo realizzato può essere inserito facilmente sul braccio e sulla mano sinistra del paziente. A questo punto vengono collegati i tubi di alimentazione a ciascun muscolo pneumatico e in seguito il dispositivo può essere azionato e utilizzato per condurre studi e analisi fMRI sull'attività cerebrale del paziente.

Come si può notare la configurazione del guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici non è ottimale per condurre analisi fMRI per valutare l'attività cerebrale del paziente oggetto di studio. Questo non dipende da un'incompatibilità dei materiali che costituiscono i muscoli pneumatici con l'ambiente in cui si svolge la risonanza magnetica, ma dal fatto che per ogni dito sono necessari due muscoli pneumatici, uno utilizzato per piegare il dito e installato sul palmo del guanto, e uno per riportare il dito nella posizione distesa, installato sul dorso del guanto. La presenza dei muscoli pneumatici sul palmo del guanto non rende possibile una piegatura completa delle dita, perché non si arriva a toccare con i polpastrelli delle dita il palmo della mano. Per questo motivo questa soluzione non è stata approfondita ulteriormente.

Con ulteriori approfondimenti e con un'analisi più dettagliata, si potrebbe valutare di installare il muscolo pneumatico presente sul palmo del dito, sulla superficie laterale del dito stesso in modo da ridurre l'ingombro sotto il dito.

CAPITOLO 3: Struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici

In questo capitolo è stata studiata e progettata una struttura a box dove inserire la mano del paziente per il movimento delle articolazioni delle dita e del polso utilizzando cilindri pneumatici amagnetici.

Il paziente è disteso sul lettino e il suo braccio sinistro viene posizionato sopra un cuscino. La sua mano viene adagiata all'interno della struttura a box e le dita vengono inserite in appositi cappucci, che permettono il collegamento con i cilindri pneumatici amagnetici. Intorno alla mano del paziente è posizionata una fascia con ganci, ai quali vengono collegati i cordini in kevlar di supporto per mantenere il polso in posizione orizzontale e fermo durante la movimentazione delle dita della mano. Durante la flessione del polso, i cordini di supporto e i cappucci vengono rimossi.

Questo dispositivo di movimentazione della mano e del polso non è uno strumento di supporto per la vita quotidiana, ma utilizzato durante l'analisi fMRI. Si tratta di una struttura statica che non genera fastidio al paziente, perché quest'ultimo si trova sdraiato sul lettino.

I movimenti da realizzare sono descritti nel capitolo Scopo della tesi: Movimenti di imporre.

Per la flessione del polso si parte dalla condizione di polso flesso verso il basso, fino a raggiungere la condizione di polso flesso verso l'alto.

Nella FIGURA 3.1 è riportata la struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici.

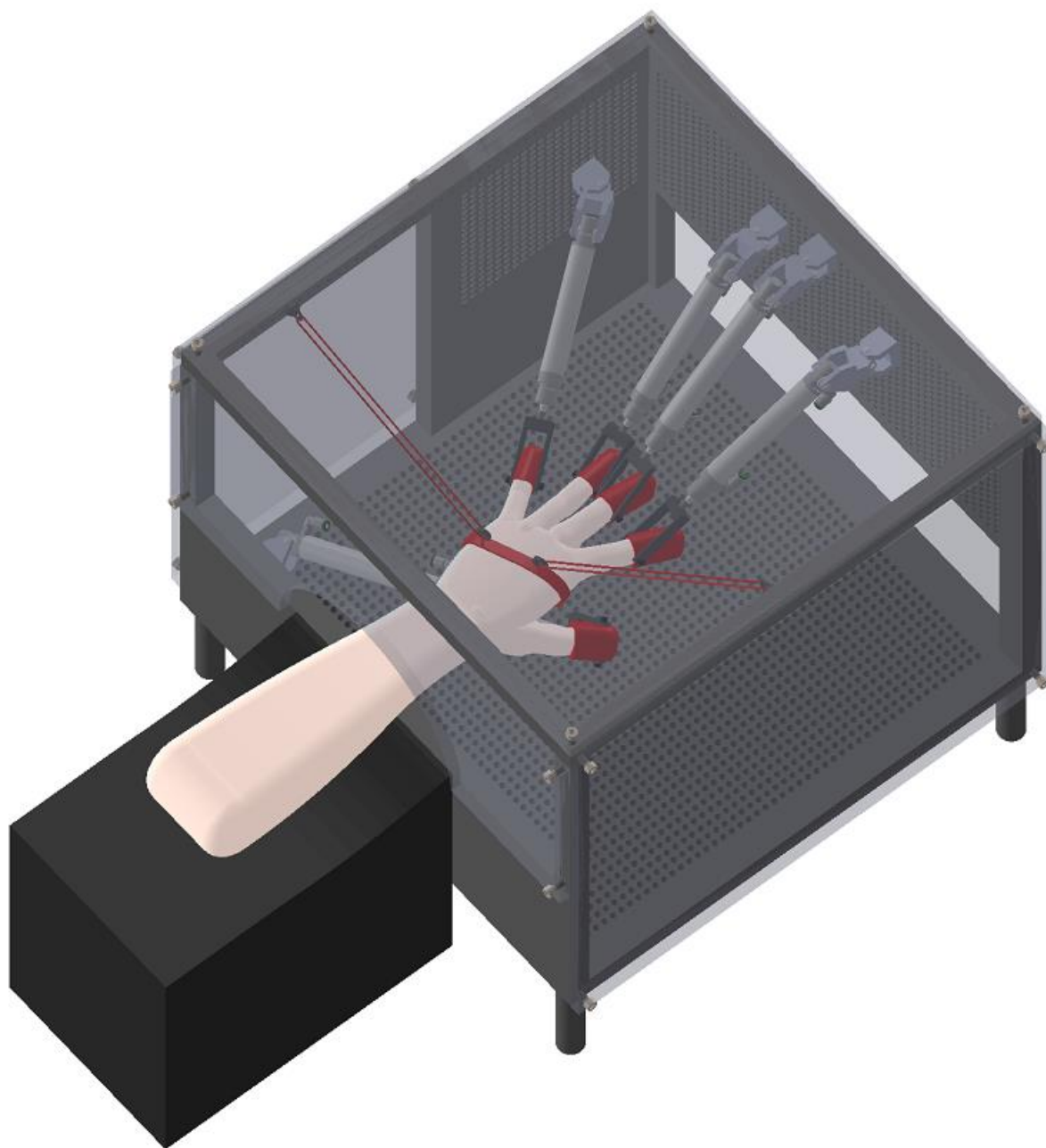


FIGURA 3.1) Struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici

3.1 Presentazione del box per attuare i cilindri pneumatici amagnetici

La struttura a box è realizzata in polimetacrilato PMMA o vetro acrilico o plexiglas.

Questo materiale è considerato il sostituto del vetro per la sua leggerezza e duttilità, che lo rendono la soluzione ideale per la realizzazione di rivestimenti e coperture. Si tratta di un tecnopolimero caratterizzato da un'elevata trasparenza, da un'elevata resistenza meccanica e da una buona resistenza all'invecchiamento.

Per la costruzione del box è stato utilizzato il PMMA colato (FIGURA 3.1.1). Con il termine colato si fa riferimento al plexiglas che è stato prodotto tramite colatura del monomero tra le due lastre di vetro. Questo processo produttivo fa sì che la lastra di PMMA sia priva di tensioni e con ottime proprietà meccaniche. Il polimetacrilato colato è facile da piegare, tagliare, forare, fresare e lavorare meccanicamente [32].

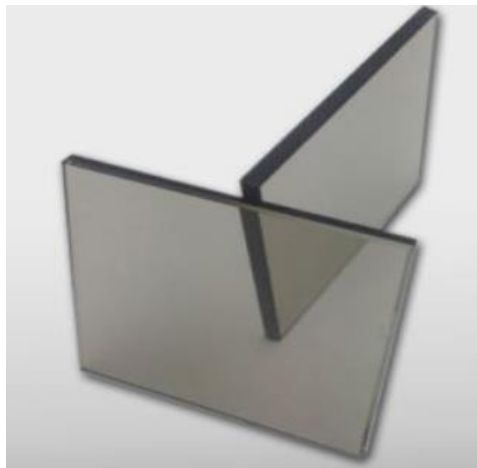


FIGURA 3.1.1) Esempio di lastra in polimetacrilato [32]

La struttura a box (FIGURA 3.1.2) ha la forma di un parallelepipedo ed è formata dai seguenti lati:

- Lato frontale
- Lato posteriore
- Lato sinistro
- Lato destro
- Base inferiore
- Base superiore

Nella FIGURA 3.1.2 è riportata la struttura a box con la denominazione dei lati.

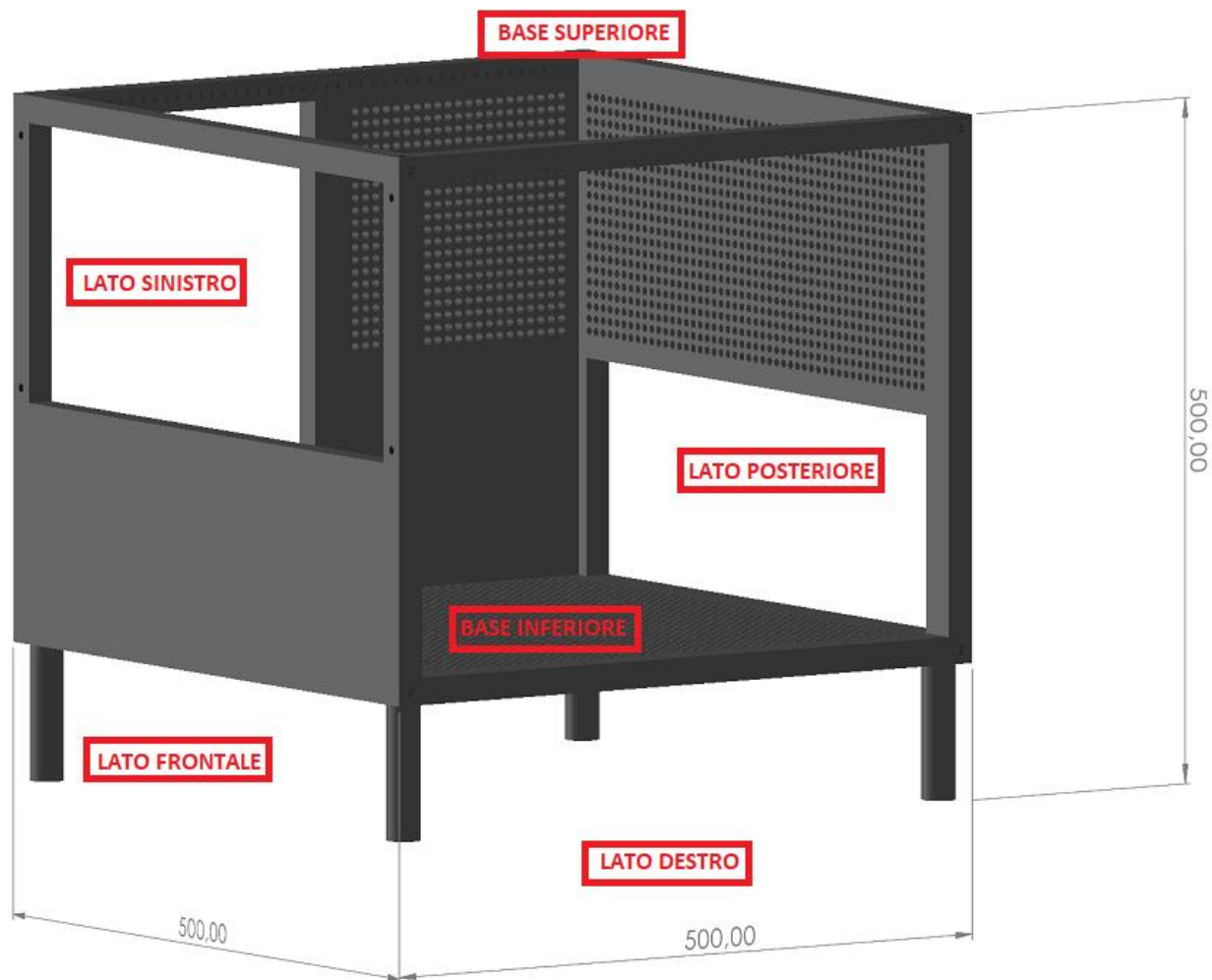


FIGURA 3.1.2) Struttura a box in PMMA colato, con la denominazione di ciascun lato e le quote di base, altezza e profondità in millimetri

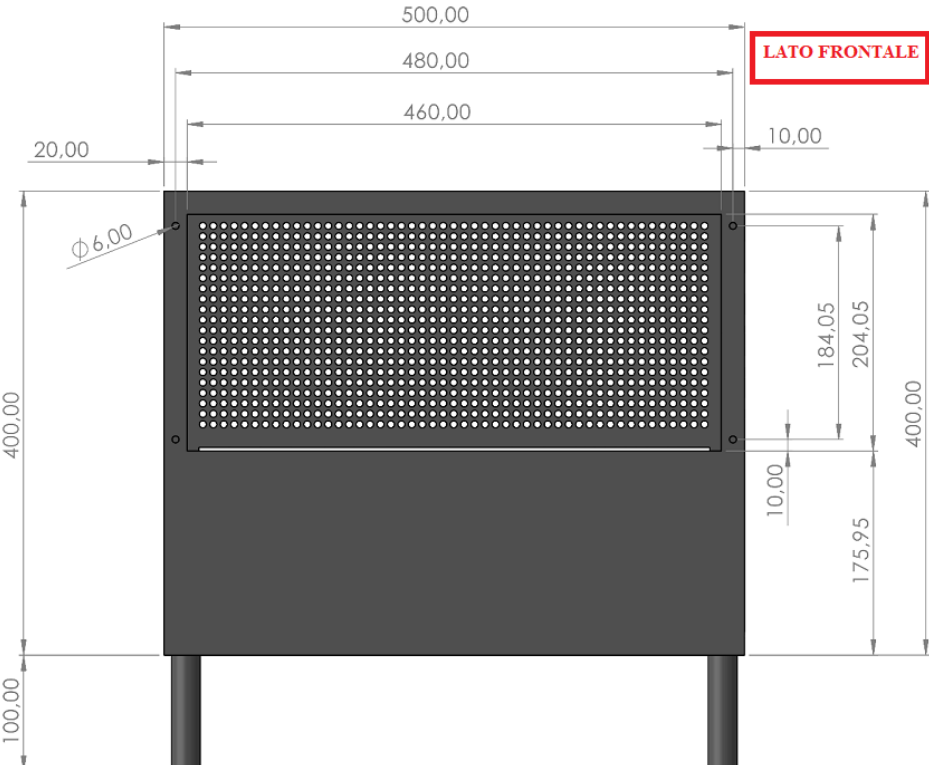


FIGURA 3.1.3) Lato frontale della struttura a box con quote in millimetri

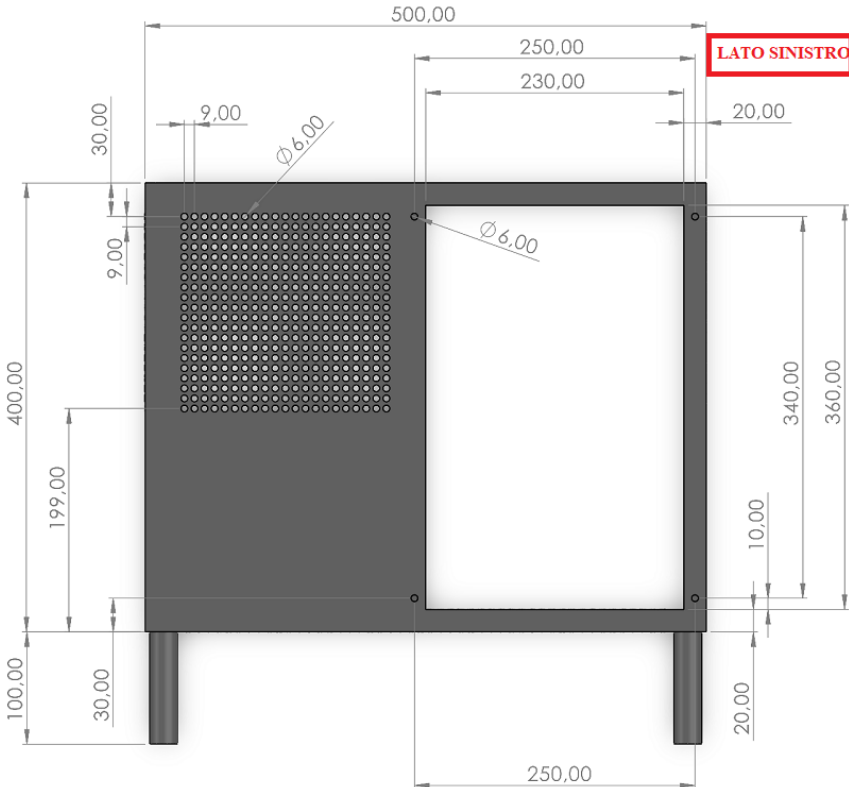


FIGURA 3.1.4) Lato sinistro della struttura a box con quote in millimetri

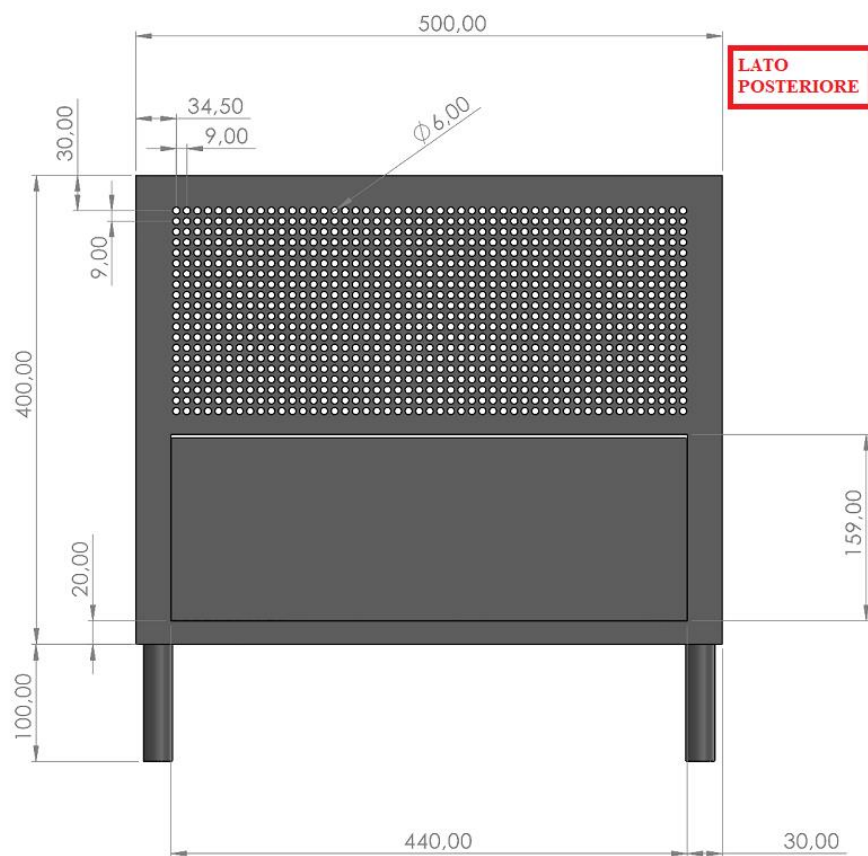


FIGURA 3.1.5) Lato posteriore della struttura a box con quote in millimetri

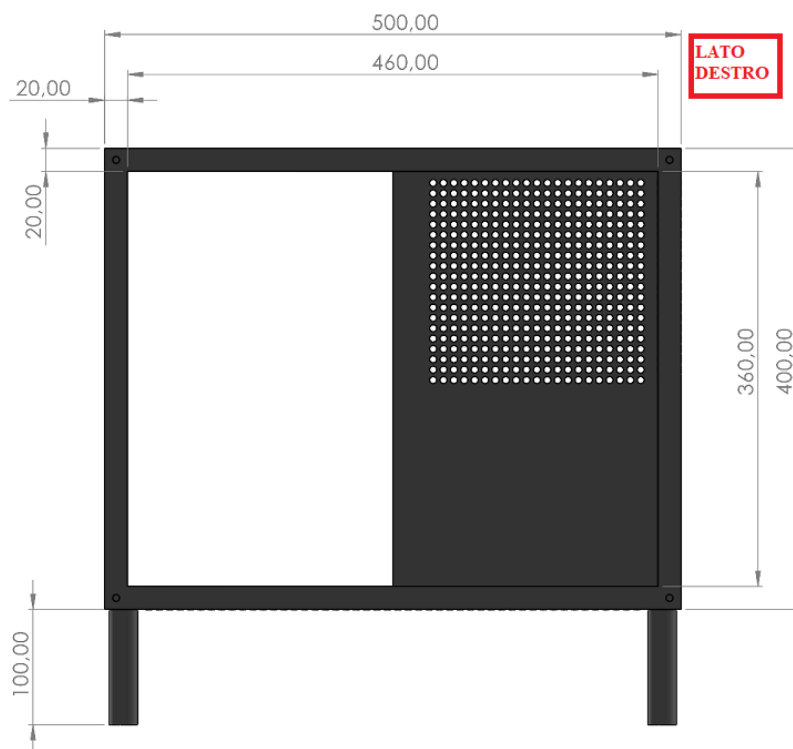


FIGURA 3.1.6) Lato posteriore della struttura a box con quote in millimetri

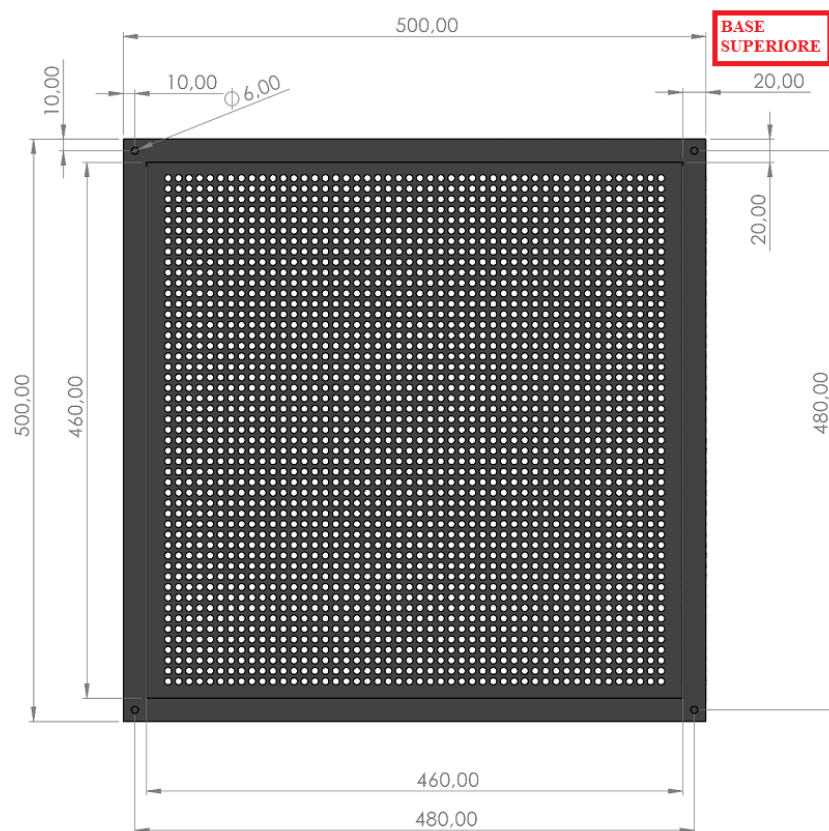


FIGURA 3.1.7) Base superiore della struttura a box con quote in millimetri

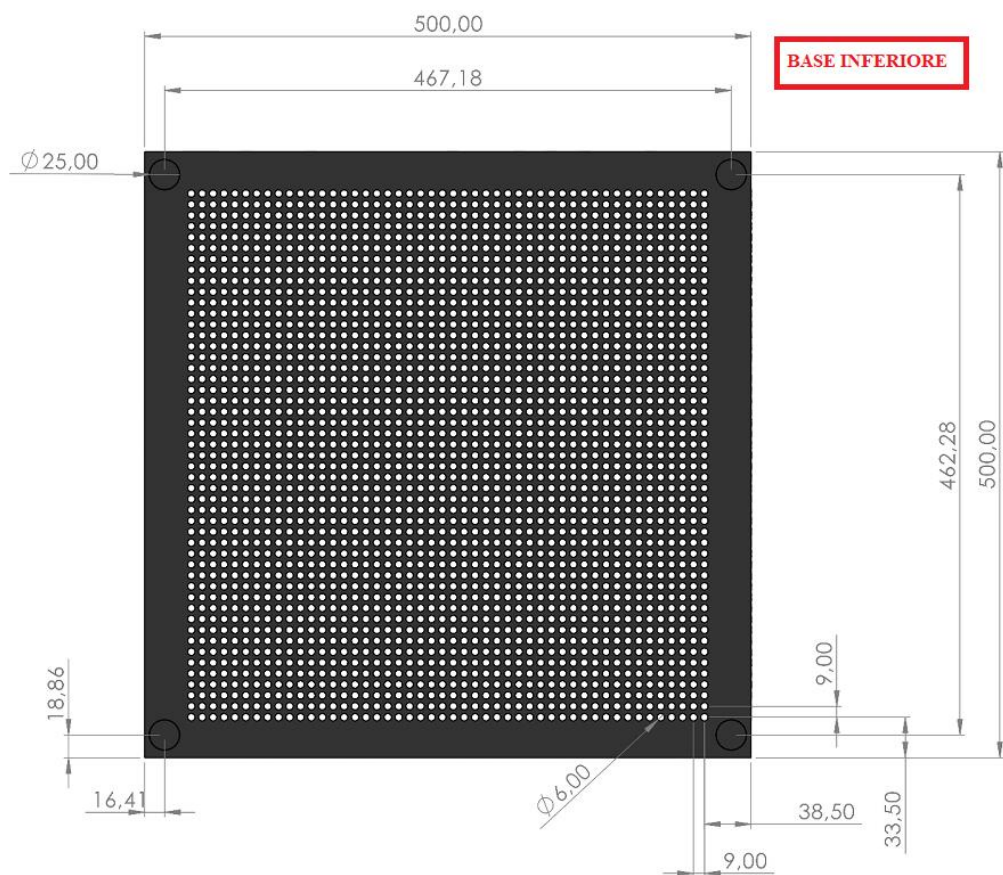


FIGURA 3.1.8) Base inferiore della struttura a box con quote in millimetri

Sul lato frontale del box è realizzata l'apertura per permettere l'inserimento della mano del paziente all'interno del box. Dopo aver posizionato il braccio del soggetto all'interno della struttura, viene posizionato il coperchio d'ispezione. Quest'ultimo componente serve a chiudere questo lato del box durante il funzionamento del dispositivo. La chiusura avviene mediante l'utilizzo di viti in resina a ceramica.

Nella FIGURA 3.1.9 è riportato il coperchio d'ispezione del lato frontale.

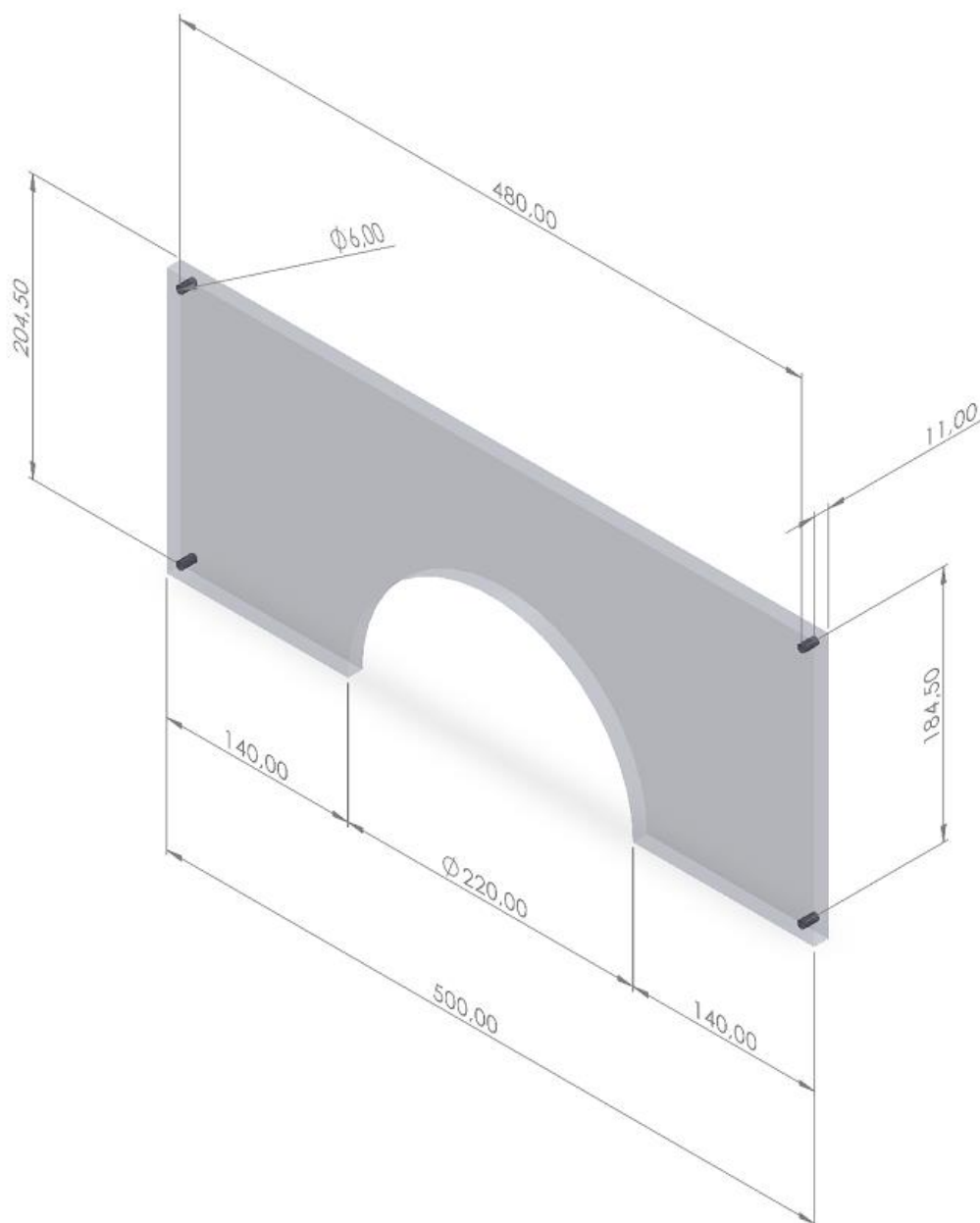


FIGURA 3.1.9) Coperchio d'ispezione lato frontale con rispettive quote in millimetri

Il lato sinistro presenta sulla parte sinistra i fori per permettere l'installazione dei cilindri pneumatici amagnetici, utilizzati per il movimento delle dita della mano sinistra del paziente. La parte destra di questo lato della struttura a box è aperta per facilitare l'inserimento delle dita del soggetto, oggetto di studio, all'interno dei cappucci e per correggere eventuali errori di posizionamento dei cilindri pneumatici. Quest'apertura aiuta nella rimozione dei cilindri pneumatici amagnetici e dei cappucci dalle dita del paziente e nel posizionamento del cilindro pneumatico per il movimento del polso, quando si vuole studiare la flessione di quest'ultima articolazione. La parte aperta del lato sinistro viene chiusa con il coperchio d'ispezione con viti in resina a ceramica. Quest'apertura dovrà essere chiusa durante il funzionamento dello strumento.

Nella FIGURA 3.1.10 è riportato il coperchio d'ispezione del lato sinistro.

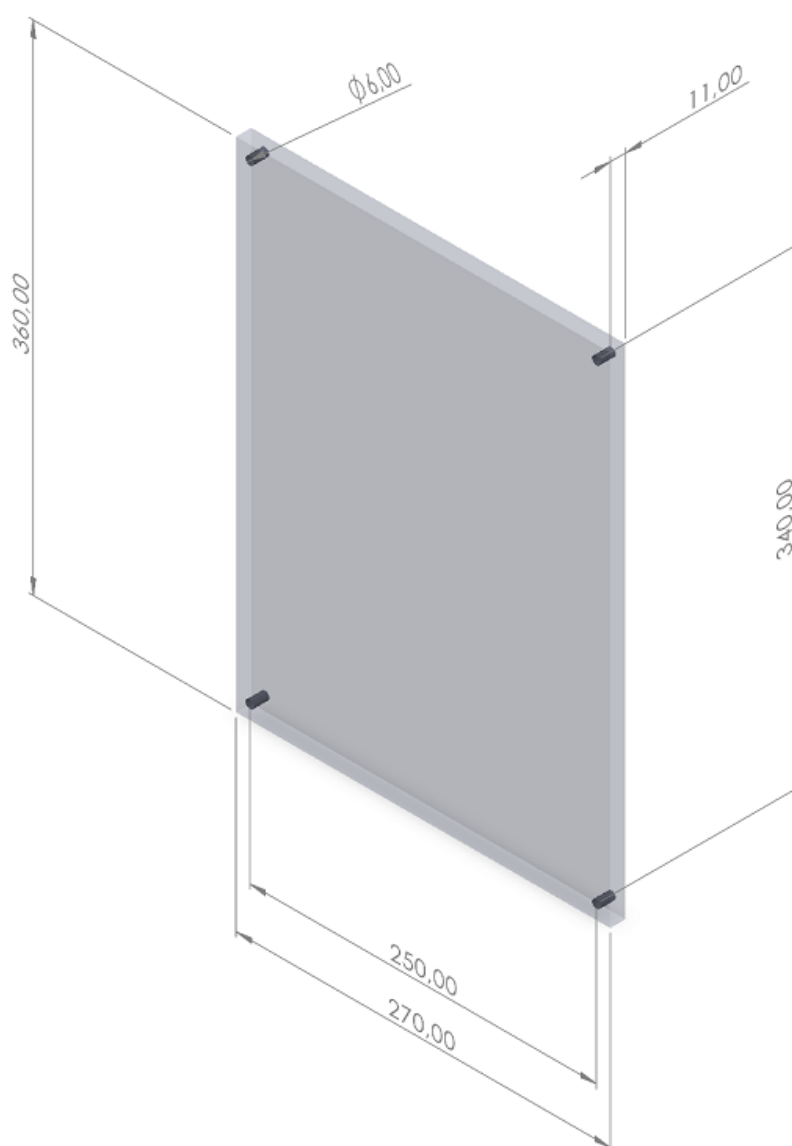


FIGURA 3.1.10) Coperchio d'ispezione lato sinistro con rispettive quote in millimetri

Sul lato posteriore sono presenti i fori per l'installazione dei cilindri pneumatici amagnetici. Nella parte bassa di questo lato è presente il vano per il collegamento dei cilindri pneumatici con i tubi di alimentazione.

Il lato destro e la base superiore sono completamente aperti per l'installazione dei cappucci sulle dita del paziente e per permettere eventuali correzioni nel posizionamento dei cilindri pneumatici. Queste aperture consentono la rimozione dei cilindri pneumatici amagnetici e dei relativi cappucci dalle dita del paziente, facilitando il posizionamento del cilindro pneumatico per il movimento del polso, quando si vuole studiare la flessione di quest'ultima articolazione. Questi lati, durante il funzionamento del dispositivo, vengono chiusi utilizzando i coperchi d'ispezione con viti in resina a ceramica.

Nella FIGURA 3.1.11 è riportato il coperchio d'ispezione del lato destro.

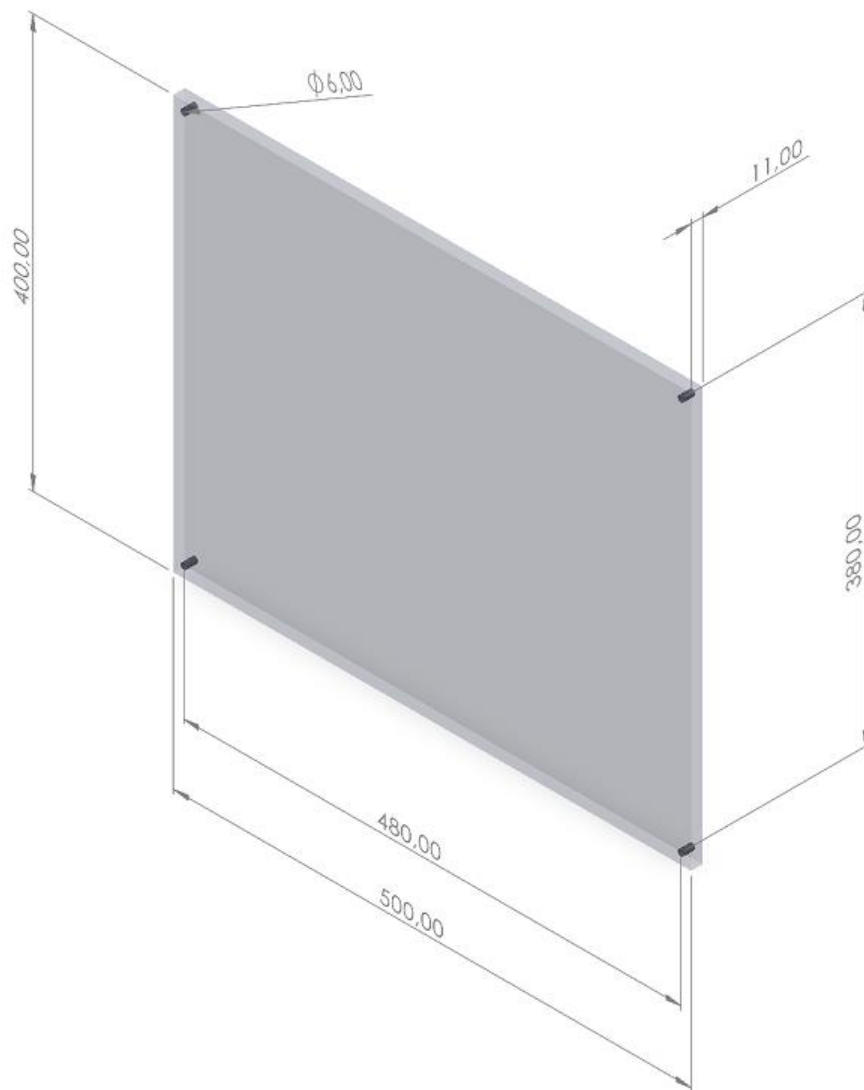


FIGURA 3.1.11) Coperchio d'ispezione lato destro con rispettive quote in millimetri

Nella FIGURA 3.1.12 è riportato il coperchio d'ispezione della base superiore.

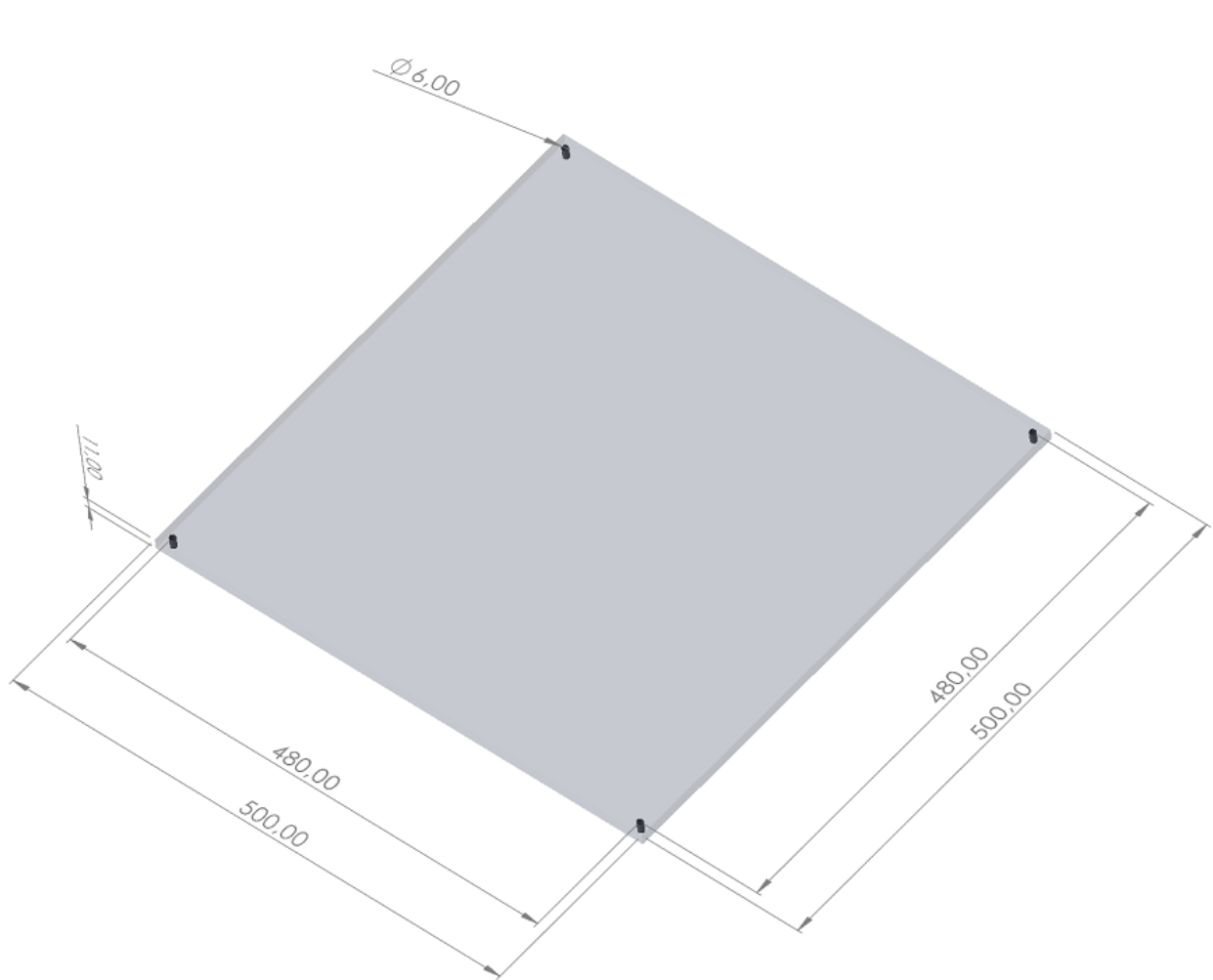


FIGURA 3.1.12) Coperchio d'ispezione base superiore con rispettive quote in millimetri

Sulla base inferiore della struttura a box sono realizzati i fori per permettere l'installazione del cilindro pneumatico amagnetico per la movimentazione del polso.

Nella FIGURA 3.1.13 è riportata la struttura a box, chiusa con i coperchi d'ispezione.

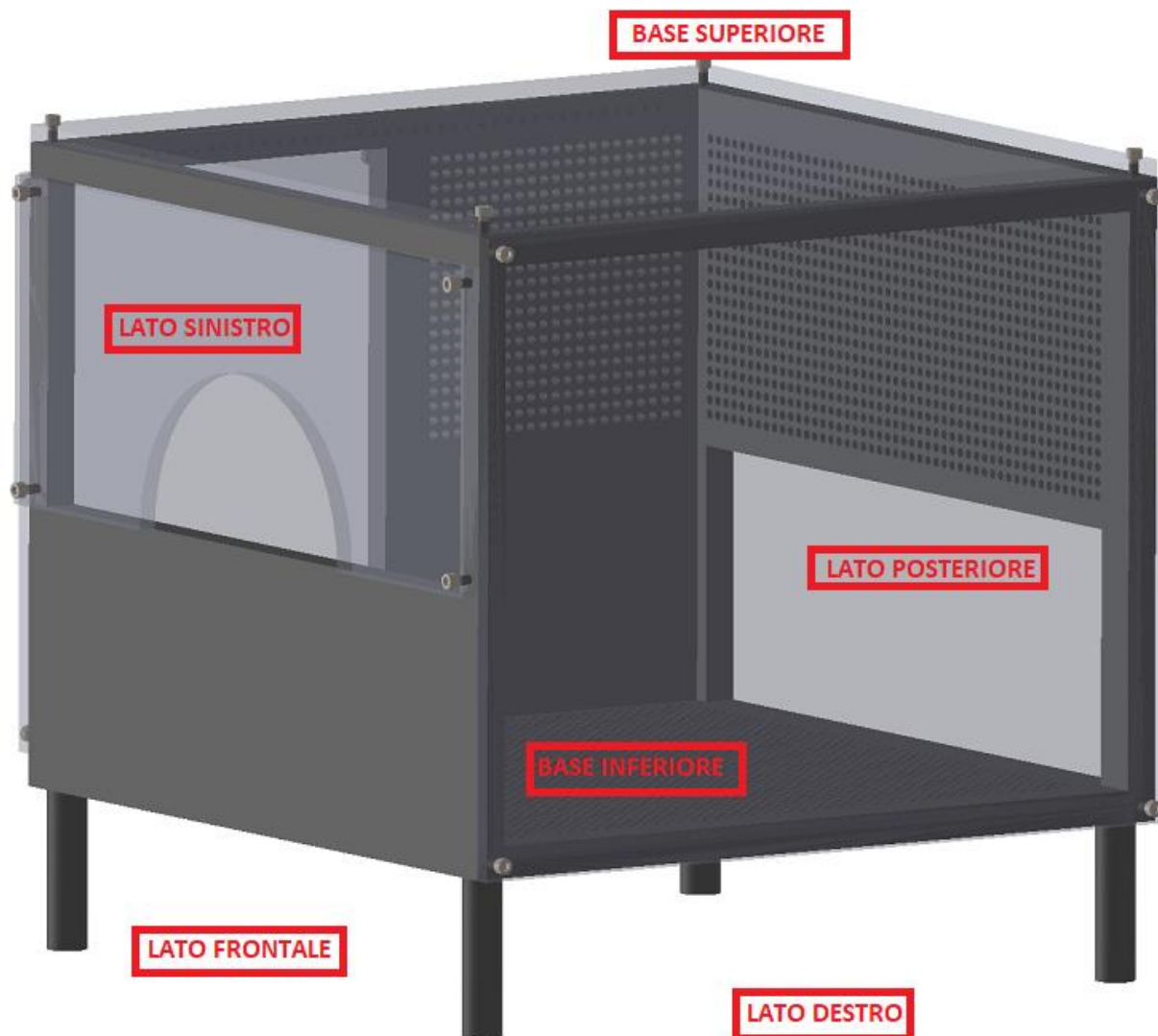


FIGURA 3.1.13) Struttura a box chiusa con i coperchi d'ispezione

3.2 Cilindri pneumatici amagnetici commerciali

I cilindri pneumatici devono essere realizzati con materiali amagnetici, perché nella camera di risonanza magnetica i dispositivi di analisi utilizzati non devono contenere componenti ferromagnetici, perché potrebbero essere rilevati dal campo magnetico e generare forze pericolose per il paziente. La presenza di materiali ferromagnetici potrebbe alterare la qualità dell'immagine della risonanza magnetica.

I cilindri pneumatici devono essere costituiti da componenti amagnetici per non alterare il campo magnetico durante le analisi fMRI.

Il cilindro pneumatico è costituito dalla camicia o mantello, dallo stelo, dal pistone, dalle testate e dalle guarnizioni, come si può osservare dalla FIGURA 3.2.1 [18,26].

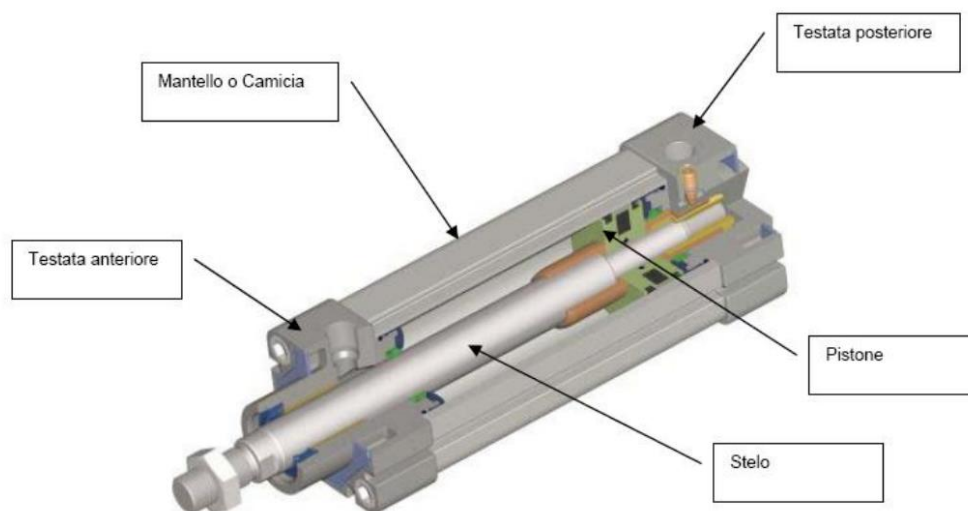


FIGURA 3.2.1) Esempio di cilindro pneumatico e delle sue componenti [18]

Per evitare interferenze con il campo magnetico la camicia del cilindro pneumatico può essere realizzata in ottone, alluminio o acciaio inossidabile; il pistone in alluminio, lo stelo in acciaio inossidabile e le testate in alluminio.

Nella struttura a box sono stati utilizzati per la movimentazione delle dita della mano sinistra e del polso del paziente i cilindri pneumatici prodotti dalla Pneumax.

In un primo momento era stato preso in considerazione il modello serie 1200 in tecnopolimero “TECNO-MIR”. Questo cilindro pneumatico aveva testate e camicia in nylon 66 rinforzate con fibre di vetro, pistone in alluminio, ma stelo in C43 cromato. Quest’ultimo materiale, purtroppo, è ferromagnetico e non compatibile con l’ambiente della camera di risonanza magnetica.

Il modello utilizzato è la serie 1200 Testate cianfrinate “MIR” [5]. Si tratta di microcilindri caratterizzati da dimensioni ridotte e conformi allo standard ISO 6432.

Nelle FIGURE 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5 si riportano le caratteristiche del cilindro pneumatico utilizzato nella struttura a box.

Caratteristiche costruttive

Testate	alluminio anodizzato
Camicia	inox AISI 304
Stelo	inox
Pistone	ottone (ø8-10-12) alluminio (ø16-20-25)
Guarnizioni	di serie gomma antiolio NBR, guarnizioni stelo PUR (a richiesta in HNBR o FPM)
Fissaggi	acciaio verniciati in cataforesi
Forcelle	acciaio zincato
Molle per semplice effetto	acciaio per molle C98 zincato
Lunghezze di ammortizzo	ø 16 - 20 - 25 - 32 mm 15 - 18 - 18 - 18

FIGURA 3.2.2) Caratteristiche costruttive del cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR [5]

Caratteristiche di funzionamento

Fluido	aria filtrata e preferibilmente lubrificata
Press. max. di esercizio	10 bar
Temperatura di esercizio	-5°C ÷ +70°C con guarnizioni di serie pistone magnetico o non magnetico -5°C ÷ +80°C con guarnizioni in FPM pistone magnetico -5°C ÷ +80°C con guarnizioni in HNBR pistone magnetico -5°C ÷ +120°C con guarnizioni in HNBR pistone non magnetico -5°C ÷ +150°C con guarnizioni in FPM pistone non magnetico

FIGURA 3.2.3) Caratteristiche costruttive del cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR [5]

La pressione di alimentazione utilizzata è pari a 4 bar.

Corse standard**Ø 8 e Ø 10**

15 - 25 - 50 - 75 - 80 - 100 mm

Ø 12 e Ø 16

15 - 25 - 50 - 75 - 80 - 100 - 150 - 160 - 200 - 250 - 300 mm

Ø 20 e Ø 25

15 - 25 - 50 - 75 - 80 - 100 - 150 - 160 - 200 - 250 - 300 - 320 - 350 - 400 mm

Ø 32

15 - 25 - 50 - 75 - 80 - 100 - 150 - 160 - 200 - 250 - 300 - 320 - 350 - 400 - 450 - 500 mm

FIGURA 3.2.4) Corse standard del cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR
[5]

Sono stati utilizzati cilindri pneumatici con alesaggio di 12 mm. Nella tabella sottostante sono riportate le lunghezze totali dei cilindri pneumatici, serie 1200 Testate cianfrinate MIR, utilizzati e la relativa corsa dello stelo.

Nella TABELLA 3.4.1 si riportano le lunghezze e le corse dei cilindri utilizzati per ciascun dito e per il polso.

Cilindro	Lunghezza totale del cilindro pneumatico [mm]	Corsa dello stantuffo [mm]
Cilindro pollice	205	100
Cilindro indice	185	80
Cilindro medio	205	100
Cilindro anulare	185	80
Cilindro mignolo	180	75
Cilindro polso	155	50

TABELLA 3.4.1) Lunghezze totali e corse dei cilindri pneumatici per il movimento delle dita e del polso

Carico minimo e massimo delle molle

Alesaggio	Ø8	Ø10	Ø12	Ø16	Ø20	Ø25	Ø32
Carico min. (N)	2.2	2.2	4	7.5	11	16.5	23
Carico max (N)	4.2	4.2	8.7	21	22	30.7	52.5

FIGURA 3.2.5) Carico minimo e massimo delle molle cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR [5]

Nella FIGURA 3.2.6 è riportato il cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR prodotto dalla Pneumax.



FIGURA 3.2.6) Cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR [5]

Nella FIGURA 3.2.7 sono riportate le dimensioni del cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR.

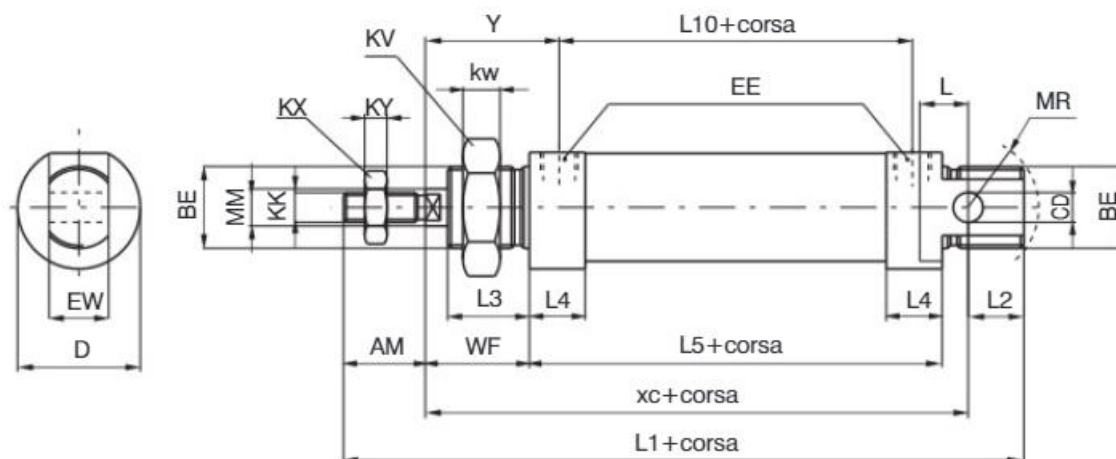


FIGURA 3.2.7) Cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR quotato [5]

Tabella dimensioni

		Alesaggio						
		8	10	12	16	20	25	32
AM (-0,2)		12	12	16	16	20	22	20
BE		M12X1,25	M12X1,25	M16X1,5	M16X1,5	M22X1,5	M22X1,5	M30X1,5
CD (H9)		4	4	6	6	8	8	12
D (h11)		16	16	20	21	27	30	38
EE		M5	M5	M5	M5	G1/8"	G1/8"	G1/8"
EW (d13)		8	8	12	12	16	16	26
KK (6g)		M4X0,7	M4X0,7	M6X1	M6X1	M8X1,25	M10X1,25	M10X1,25
KV		17	17	22	22	30	30	42
KW		5,5	5,5	6	6	7	7	8
KX		7	7	10	10	13	17	17
KY		3	3	4	4	5	6	6
L		6	6	9	9	12	13	13
L1 (±1)	★	86	86	105	111	130	141	139
L2		10	10	14	13	15	15	14
L3		12	12	17	17	18	22	22
L4		9	9	9	11	15,5	15	14,5
L5 (±1)	★	46	46	50	56	68	69	69
L6	★	48	48	52	58	70,5	71,5	71,5
L7		2	2	2	2	2,5	2,5	2,5
L8		64	64	74	80	94,5	99,5	99,5
L9 (±1,2)	★	78	78	94	100	116	125	125
L10 (±1)	★	37	37	41	45	52,5	53	54,5
L11		1,5	1,5	1,5	1,5	2	2	2
MM (f7)		4	4	6	6	8	10	12
MR		12	12	16	16	18	19	22
WF (±1,2)		16	16	22	22	24	28	28
XC (±1)		64	64	75	82	95	104	105
Y (±1,2)		20,5	20,5	26,5	27,5	32	36	35

FIGURA 3.2.8) Dimensioni del cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR [5]

Nella FIGURA 3.2.9 è riportato il cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR realizzato in Solidworks.



FIGURA 3.2.9) Esempio di cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR per il dito medio, con quote in millimetri [5]

Per il collegamento dei cilindri pneumatici con i tubi per l'alimentazione sono stati utilizzati i raccordi in tecnopolimero realizzati sempre dalla Pneumax. Il modello utilizzato il T2204M5: gomito girevole con filetto cilindrico maschio con O-Ring [35].

Nella FIGURA 3.2.10 è riportato il raccordo in tecnopolimero T2204M5.

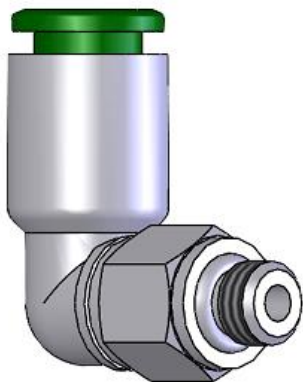


FIGURA 3.2.10) Raccordo T2204M5: gomito girevole con filetto cilindrico maschio con O-Ring [35]

Nella FIGURA 3.2.11 sono riportate le dimensioni del raccordo in tecnopolimero T2204M5 quotato e la tabella con le relative dimensioni.

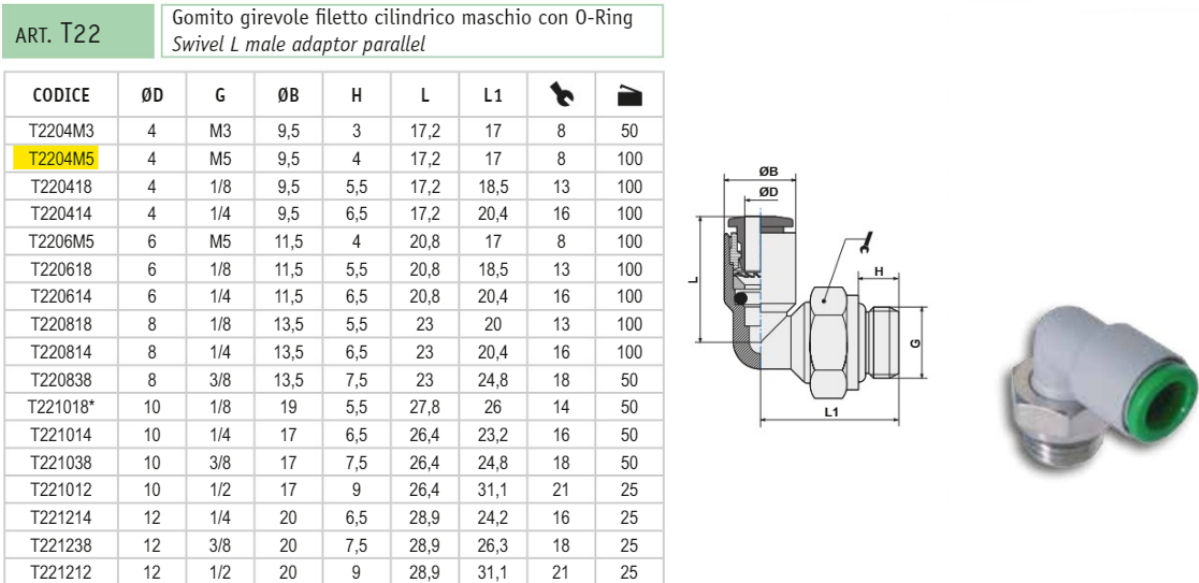


FIGURA 3.2.11) Tabella delle dimensioni del raccordo T2204M5: gomito girevole con filetto cilindrico maschio con O-Ring [35]

Nella FIGURA 3.2.12 è riportato il cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR con i rispettivi attacchi per l'alimentazione con i tubi dell'aria compressa.

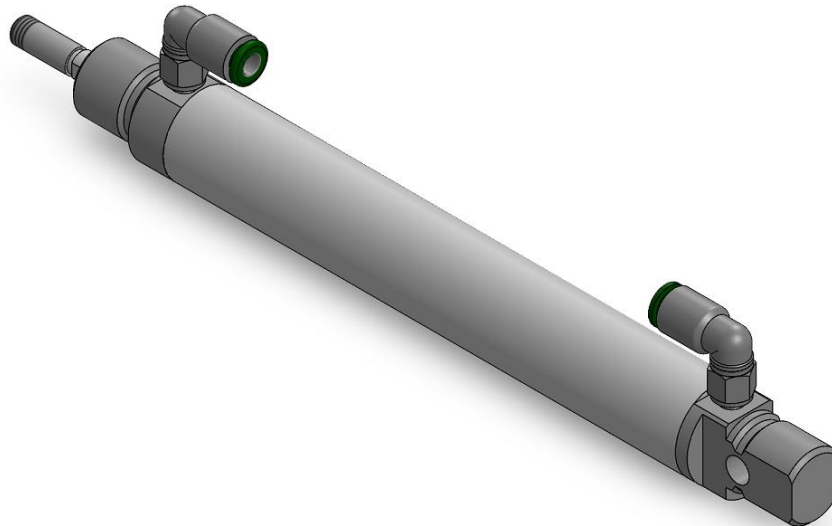


FIGURA 3.2.12) Cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR con installati i raccordi per l'alimentazione T2204M5

I cilindri pneumatici amagnetici per la movimentazione dell'indice, del medio, dell'anulare, del mignolo e del polso partono da una condizione di stelo retracts. Il cilindro pneumatico collegato al pollice parte dalla condizione di stelo a fine corsa.

3.3 Installazione dei cilindri pneumatici alla struttura a box

Per l'installazione dei cilindri pneumatici amagnetici alle pareti della struttura a box sono stati utilizzati dei perni a forcella.

Per il collegamento di ciascun cilindro pneumatico sono necessari due perni a forcella:

- uno per il collegamento diretto con la struttura del box (FIGURA 3.3.1). Questo perno a forcella viene vincolato alla parete della struttura attraverso i fori realizzati sui vari lati utilizzando una vite di serraggio amagnetica.

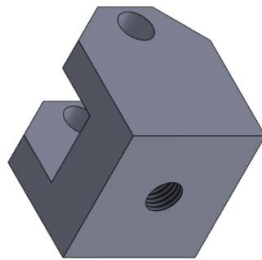


FIGURA 3.3.1) Perno a forcella per il collegamento con la struttura del box

- uno per il collegamento tra il perno a forcella descritto precedentemente e il cilindro pneumatico (FIGURA 3.3.2). Per vincolare le due parti è stata utilizzata una spina con intagli.

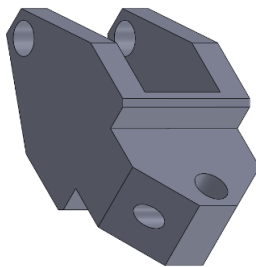


FIGURA 3.3.2) Perno a forcella per il collegamento con il cilindro pneumatico

Con questo collegamento, FIGURA 3.3.3, è possibile dare al cilindro pneumatico un movimento orizzontale destra-sinistra e un movimento verticale dall'alto verso il basso e viceversa.

Durante il funzionamento del dispositivo, è necessario bloccare il movimento orizzontale del cilindro, introducendo una spina blocca rotazione.

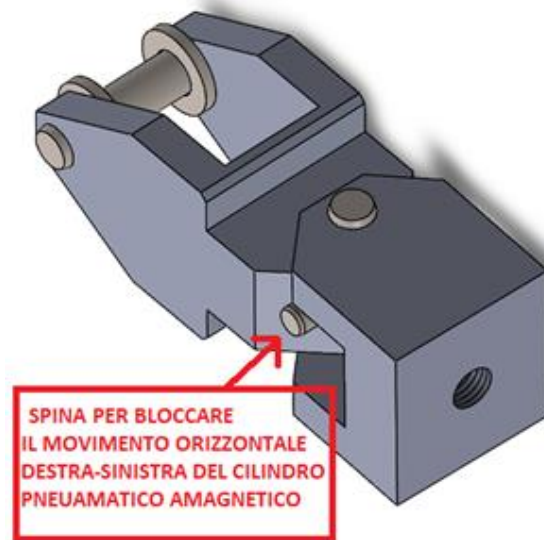


FIGURA 3.3.3) Assemblaggio dei due perni a forcetta e spina per bloccare il movimento orizzontale destra-sinistra del cilindro pneumatico

Nella FIGURA 3.3.4 è riportato il collegamento tra i due perni a forcetta con il cilindro pneumatico amagnetico.

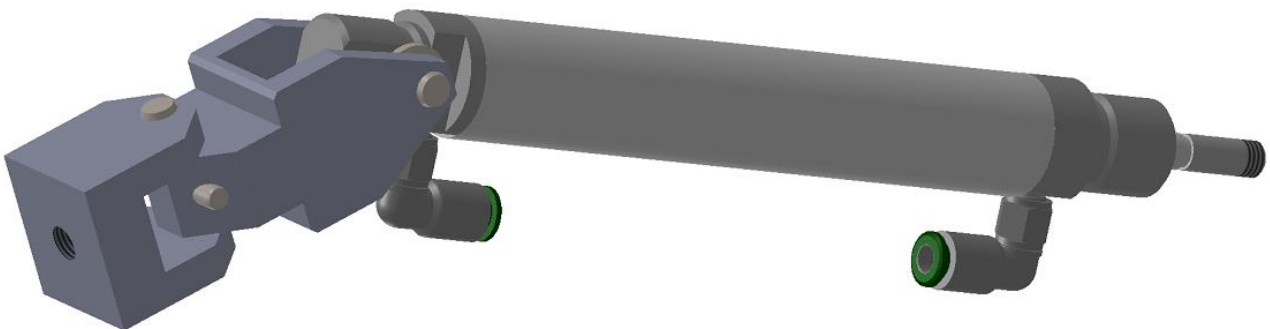


FIGURA 3.3.4) Cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR installato nei perni a forcetta per il movimento del dito medio

Per il movimento del polso è utilizzato solo il perno a forcetta per l'attacco con la base inferiore della struttura a box, perché il polso si flette dal basso verso l'alto.

3.4 Cappucci per il collegamento tra le dita del paziente e i cilindri pneumatici amagnetici e fascia per il polso

Per il collegamento tra le dita della mano sinistra e i cilindri pneumatici si utilizzano dei cappucci, nei quali vengono inseriti il pollice, l'indice, il medio, l'anulare e il mignolo del paziente

I cappucci sono realizzati in plastica modellabile. Questo materiale è formato da un polimero termoplastico che si presenta sotto forma di piccoli granelli sferici di consistenza dura. Questi granuli vengono sciolti in acqua calda tra i 60 °C e i 70 °C e il materiale sciolto può essere modellato con le mani o con attrezzi specifici. Conoscendo la forma e le dimensioni delle dita della mano del paziente, si possono realizzare dei cappucci che aderiscono perfettamente al pollice, all'indice, al medio, all'anulare e al mignolo. Una volta ottenuta la forma desiderata, si lascia raffreddare gli elementi prodotti all'aria o in acqua fredda per accelerare la fase di indurimento.

I cappucci prodotti sono duri, resistenti, biodegradabili e skin-safe.

La plastica modellabile è riutilizzabile infinite volte, perché basta riscaldarla per renderla nuovamente modellabile e malleabile.

Sulle superfici laterali dei cappucci sono realizzati due supporti di forma cilindrica per permettere il collegamento con i cilindri pneumatici amagnetici. Dopo aver collegato i cappucci ai rispettivi cilindri, le estremità dei due supporti vengono bloccate con dei piccoli tappi di chiusura, per impedire alle forcelle di fuoriuscire dalle sedi d'incastro. Questo viene fatto per una ragione di sicurezza durante il funzionamento del dispositivo.

Nella FIGURA 3.4.1 è riportato l'esempio di un cappuccio da installare sul dito del paziente.

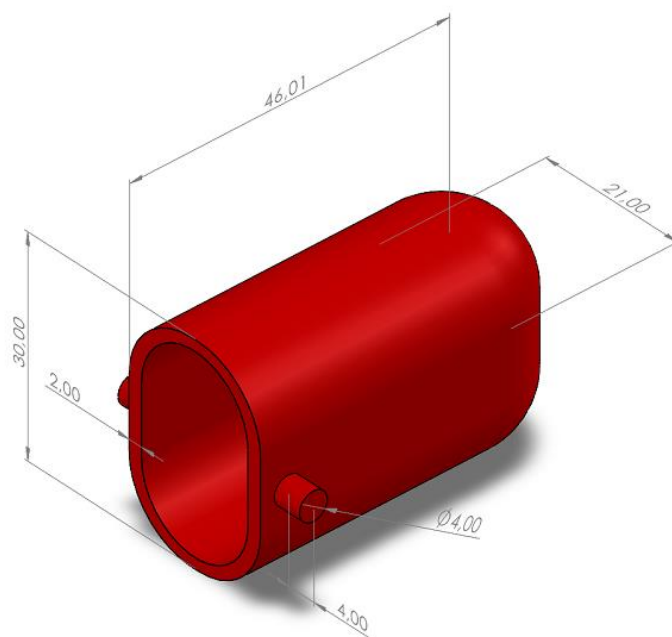


FIGURA 3.4.1) Esempio di cappuccio da posizionare sul dito del paziente con le rispettive quote in millimetri

Il collegamento cappuccio-cilindro pneumatico avviene mediante una struttura a forcina realizzata in tecnopolimero, che viene avvitata allo stelo del cilindro. Nelle FIGURE 3.4.2 e 3.4.3 sono rappresentate le forcine per il collegamento dei cappucci dell'indice, del medio, dell'anulare e del mignolo con il rispettivo cilindro pneumatico e quella per il collegamento tra il cappuccio del pollice e il cilindro. Sono state utilizzate due forcine con dimensioni diverse per il pollice e per l'indice, il medio, l'anulare e il mignolo perché per queste dita la forcina, durante l'azionamento del cilindro pneumatico, deve ruotare attorno al cappuccio.

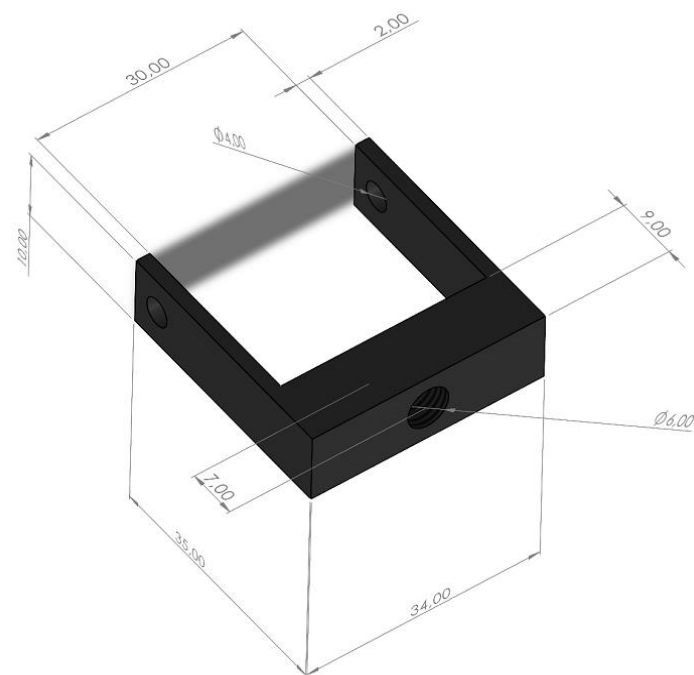


FIGURA 3.4.2) Forcella per il collegamento tra il cappuccio del pollice e il cilindro pneumatico con le rispettive quote in millimetri

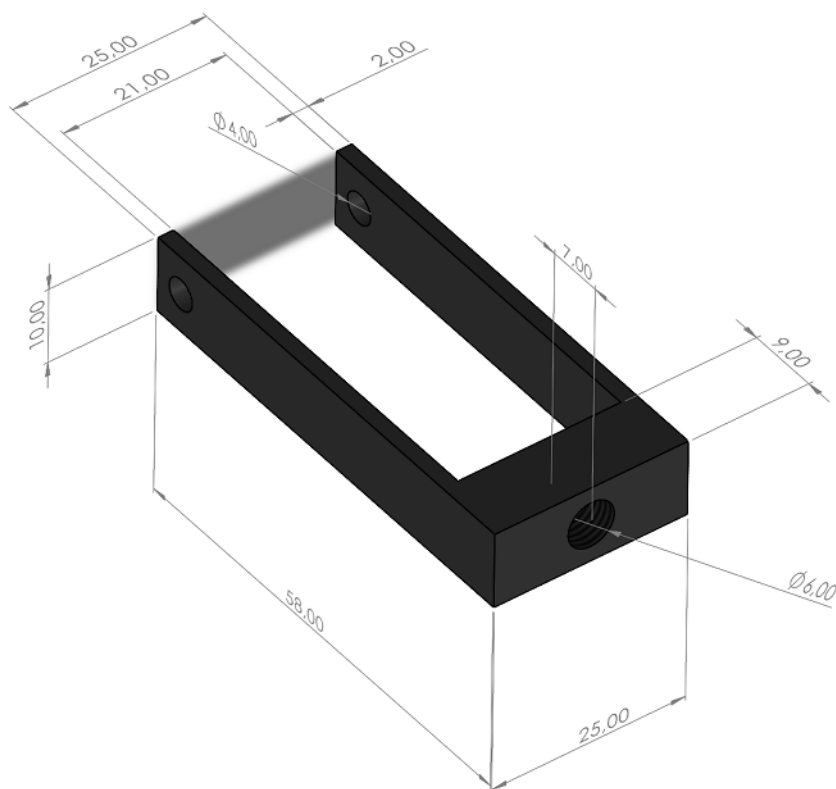


FIGURA 3.4.3) Forcella per il collegamento tra il cappuccio dell'indice, del medio, dell'anulare e del mignolo e il rispettivo cilindro pneumatico, con le quote in millimetri

Nella FIGURA 3.4.4 è riportato come esempio illustrativo il collegamento tra il cilindro pneumatico amagnetico per la movimentazione dell'indice e la rispettiva forcina.

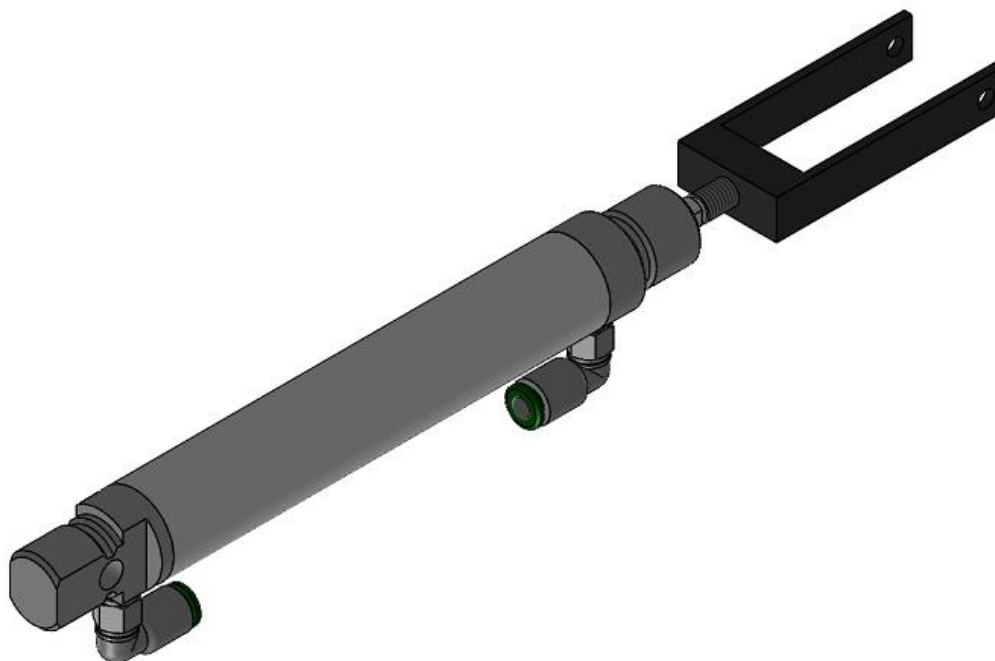


FIGURA 3.4.4) Cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR con forcina per il collegamento con il cappuccio dell'indice del paziente

La fascia, per mantenere il polso in posizione orizzontale durante la movimentazione delle dita della mano sinistra del paziente, è realizzata in plastica modellabile per riuscire a realizzare una struttura rigida ma al tempo stesso che si adatti perfettamente al profilo e alla forma della mano del paziente oggetto di studio.

Nella FIGURA 3.4.5 è rappresentata la fascia da posizionare sulla mano del paziente.

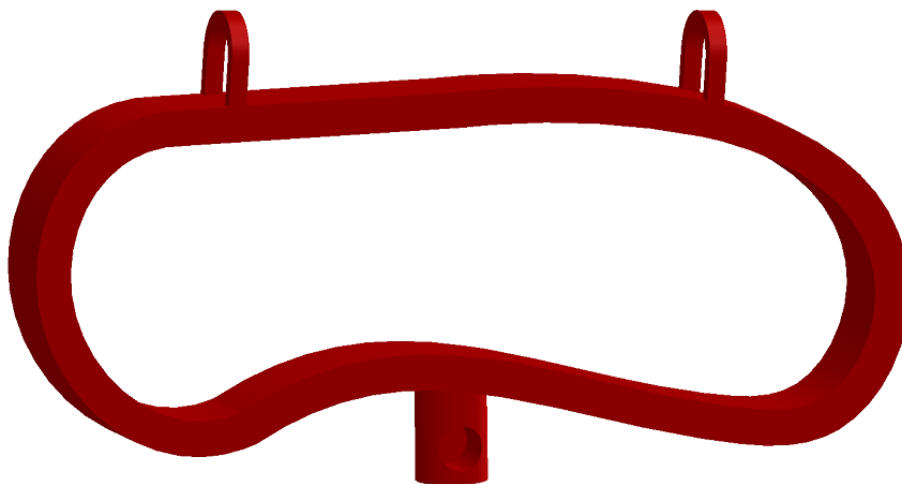


FIGURA 3.4.5) Fascia di supporto modellata per la mano del paziente oggetto di studio

Sulla faccia superiore della fascia sono stati realizzati due attacchi per permettere il collegamento, tramite cordini in kevlar, alla struttura a box (FIGURA 3.4.6). Sui lati interni sinistro e destro del box sono realizzati i fori filettati per l'avvitamento dei ganci a cui sono collegati i fili in kevlar.



FIGURA 3.4.6) Cordino in kevlar, con le relative dimensioni in millimetri

Sulla base della fascia, sotto la parte a contatto con il palmo della mano del paziente, è stato realizzato l'attacco per il collegamento con il rispettivo cilindro pneumatico amagnetico.

Nelle FIGURE 3.4.7 e 3.4.8 sono riportati gli attacchi per il collegamento tra i fili in kevlar e i ganci sulla fascia per sostenere il polso durante la movimentazione delle dita.

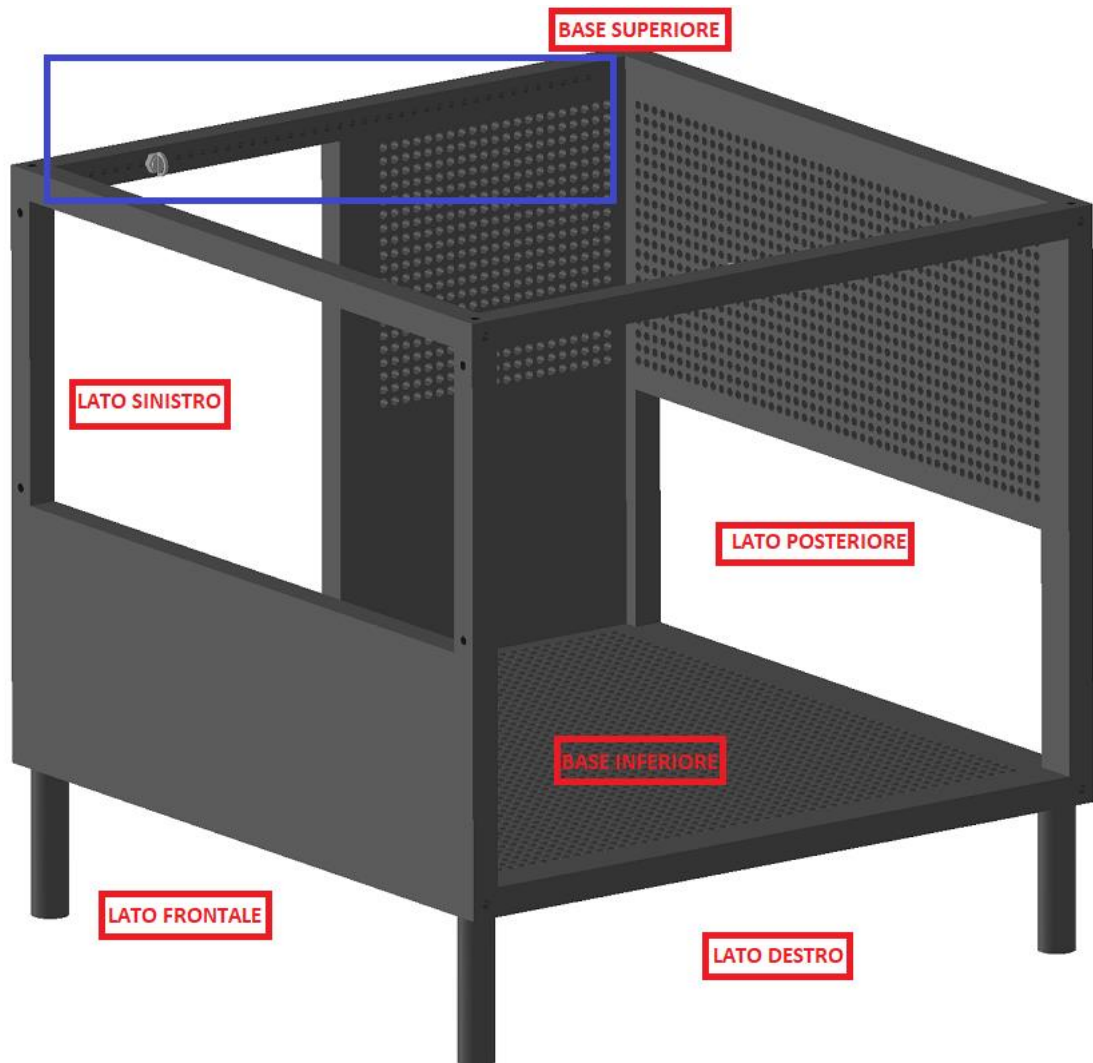


FIGURA 3.4.7) In blu sono riquadrati i fori filettati realizzati nella parte interna del lato sinistro per il collegamento del cordino in kevlar tramite gancio

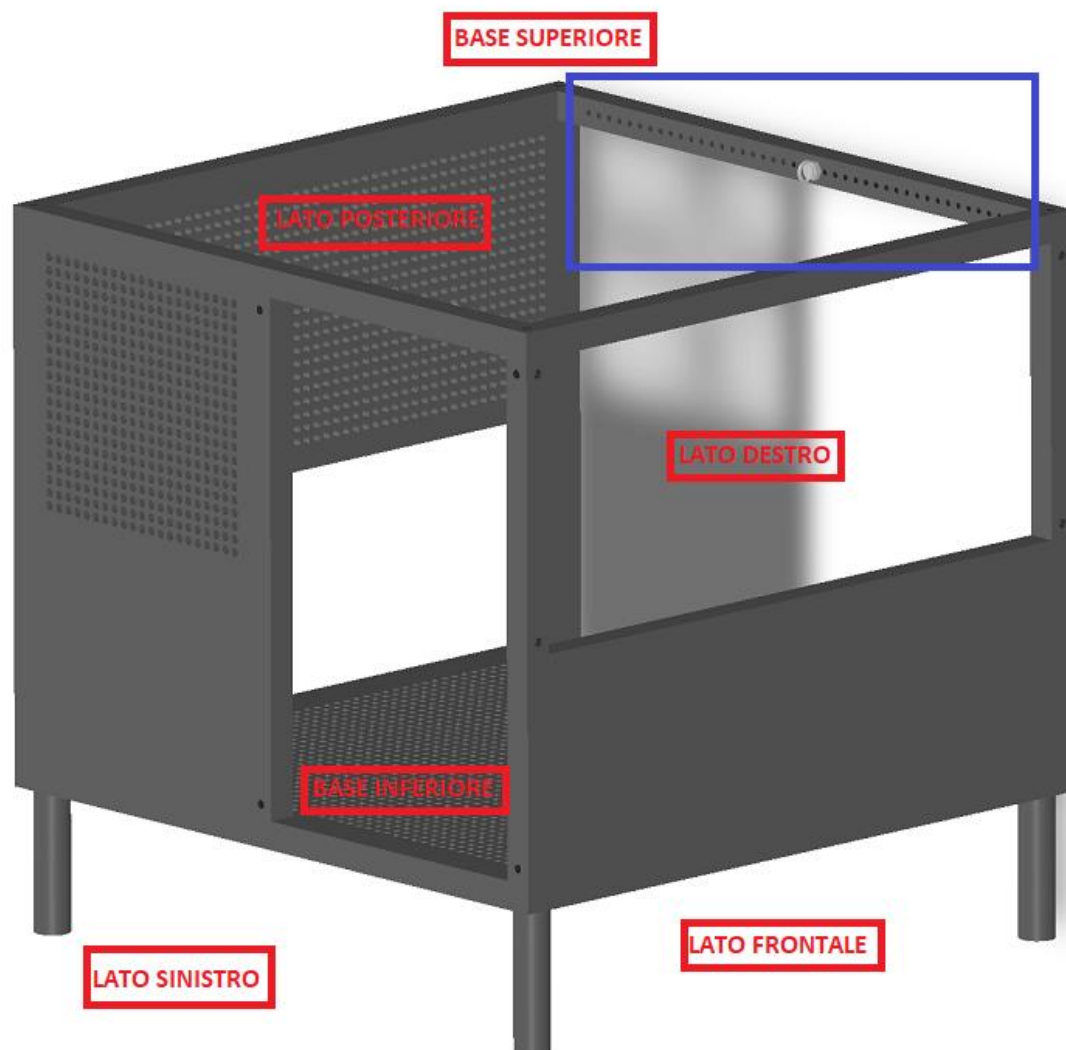


FIGURA 3.4.8) In blu sono riquadrati i fori filettati realizzati nella parte interna del lato destro per il collegamento del cordino in kevlar tramite gancio

3.5 Preparazione del dispositivo per eseguire l'analisi fMRI

Il paziente è disteso sul lettino e il suo braccio sinistro viene posizionato sopra un cuscino. La sua mano viene adagiata all'interno della struttura a box (FIGURA 3.7.1)

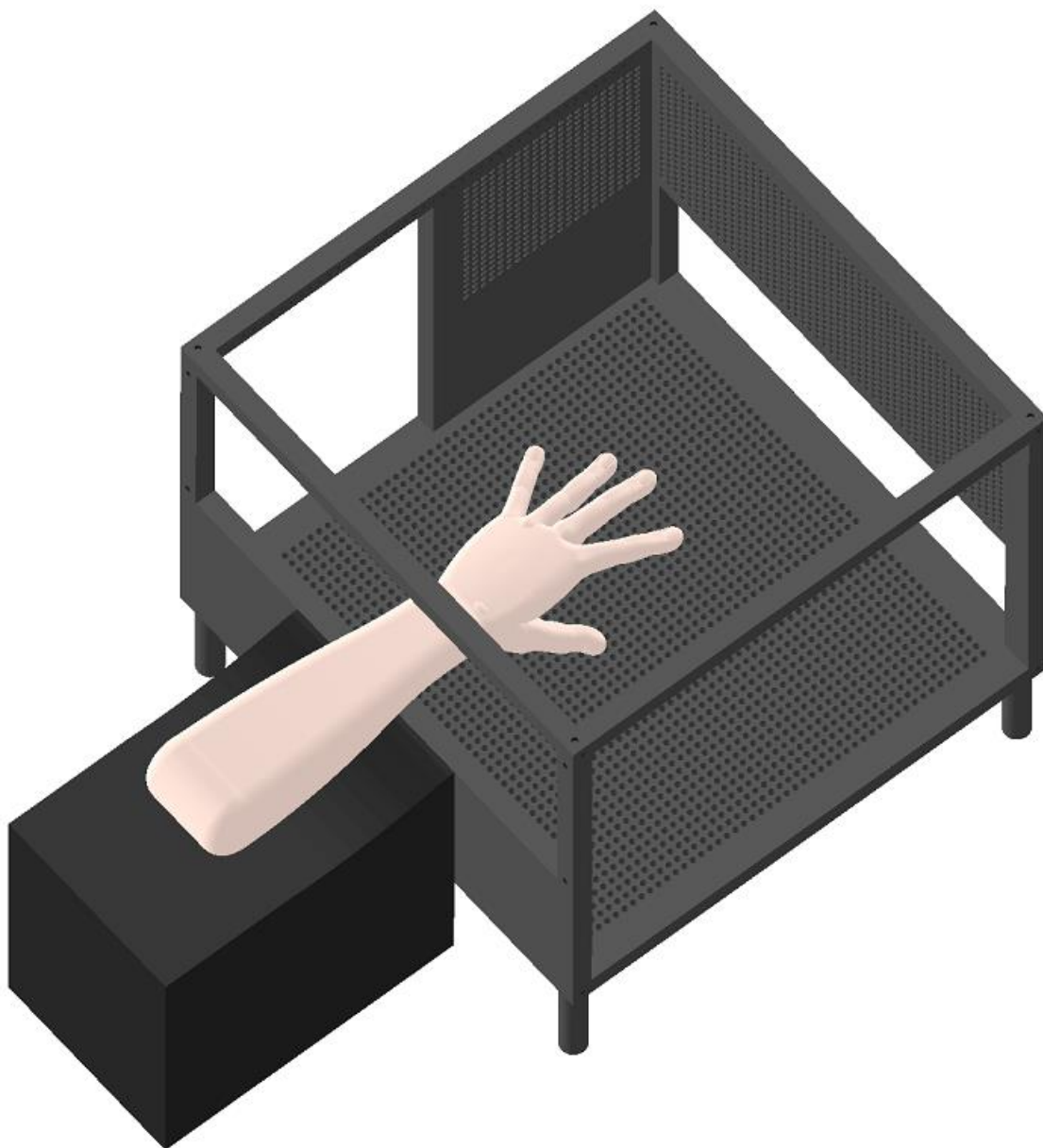


FIGURA 3.7.1) La mano sinistra del paziente è posizionata all'interno della struttura a box

Intorno alla mano del paziente è posizionata la fascia con ganci, ai quali vengono collegati i cordini in kevlar di supporto per mantenere il polso in posizione orizzontale e fermo durante la movimentazione delle dita della mano. Nelle dita vengono inseriti i cappucci per il collegamento con i cilindri pneumatici amagnetici (FIGURA 3.7.2).

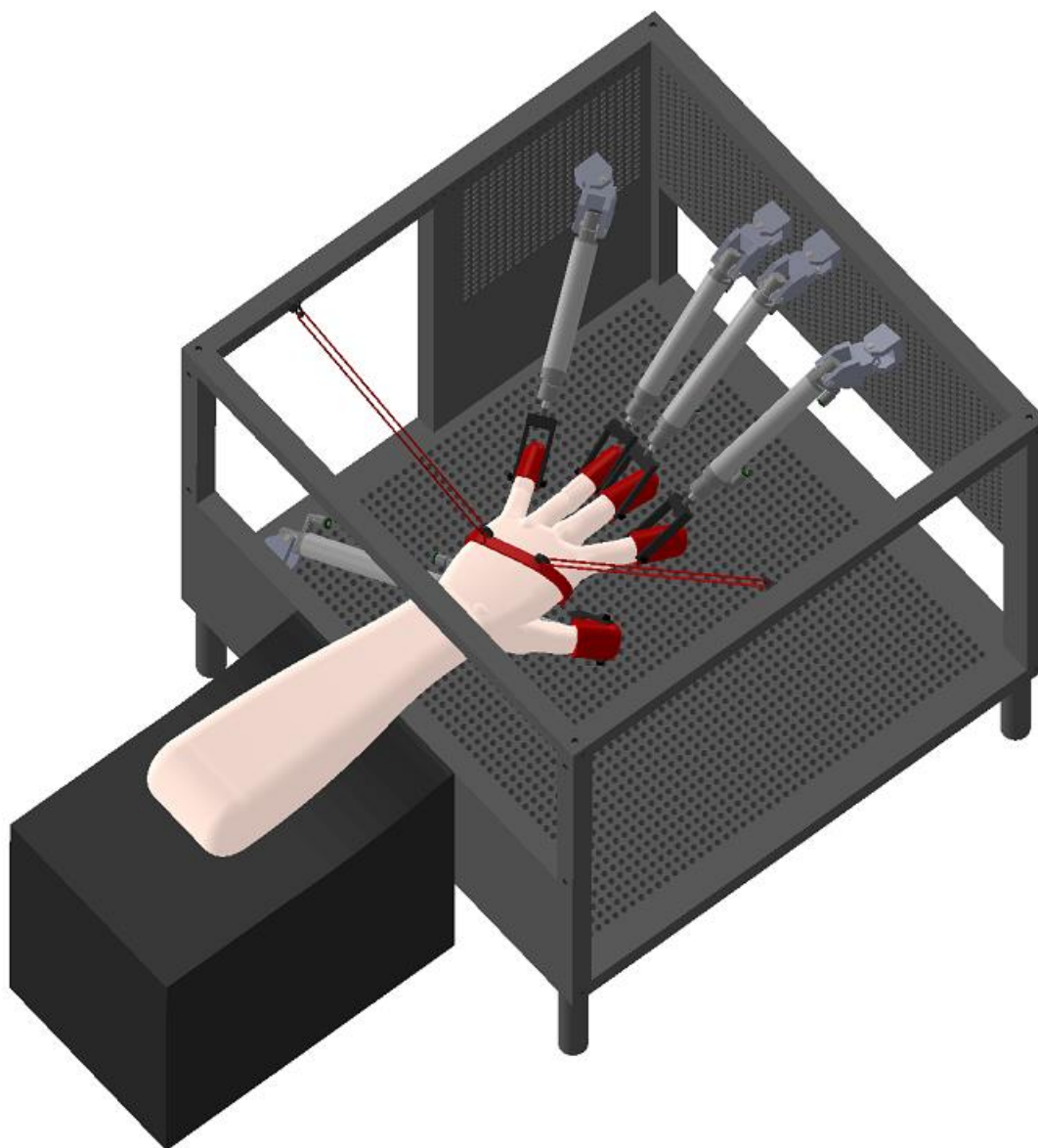


FIGURA 3.7.2) I cappucci vengono inseriti nelle dita del paziente e viene posizionata la fascia per mantenere il polso in posizione orizzontale

Dopo aver eseguito tutti i collegamenti ed aver verificato che le dita e i rispettivi cilindri pneumatici siano allineati, si può procedere con il posizionamento dei coperchi d'ispezione per la chiusura della struttura a box. A questo punto il dispositivo è pronto all'uso (FIGURA 3.7.3).

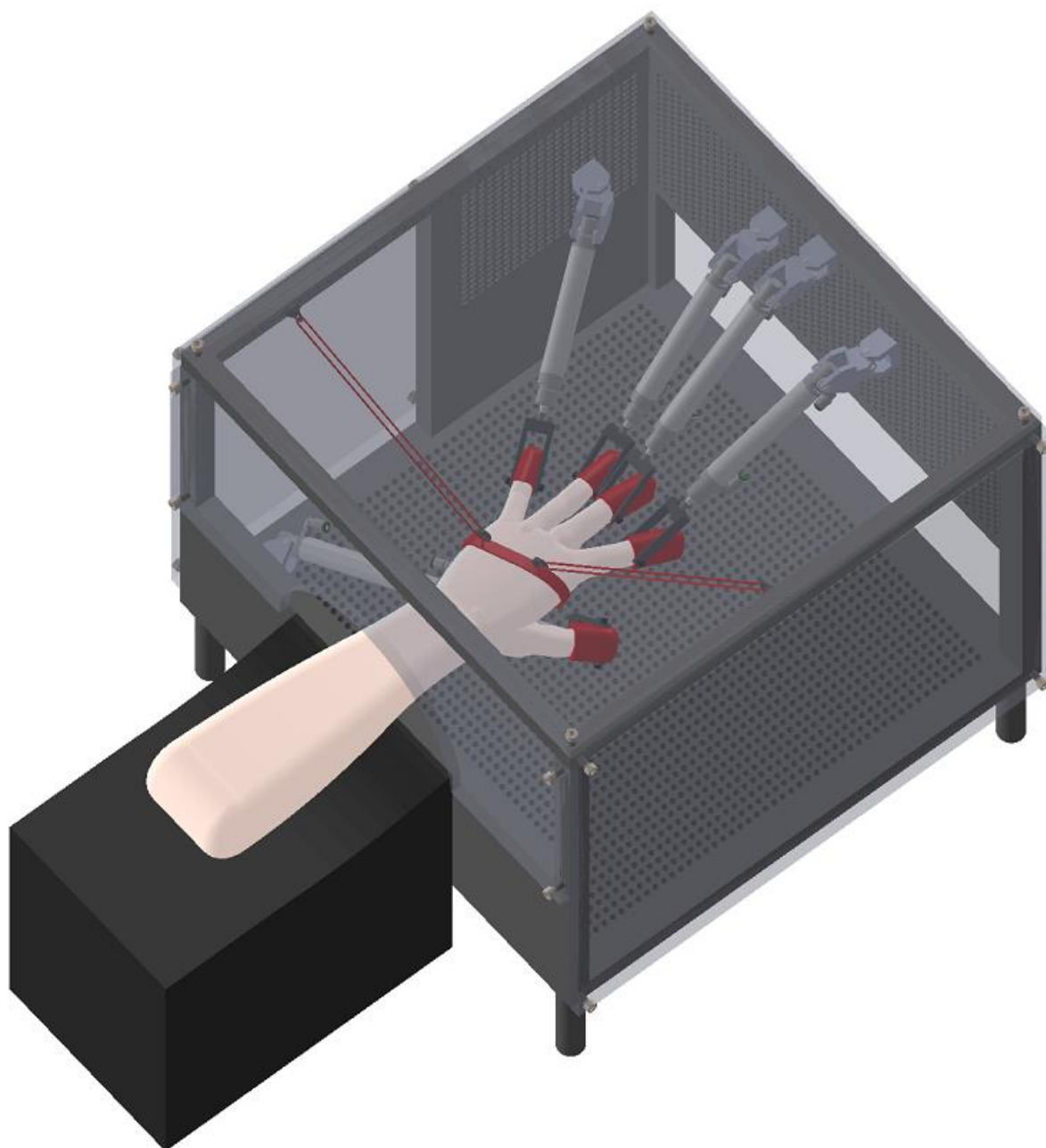


FIGURA 3.7.3) Chiusura della struttura a box con i coperchi d'ispezione

Il movimento del polso è disaccoppiato da quello delle dita.

Per eseguire i collegamenti necessari alla movimentazione del polso, i coperchi d'ispezione vengono rimossi e tolti i cappucci dalle dita del paziente e i rispettivi cilindri pneumatici amagnetici. Vengono anche rimossi i cordini di supporto in kevlar e viene installato il cilindro pneumatico necessario alla flessione del polso, collegato alla mano del paziente grazie all'aggancio predisposto sulla fascia (FIGURE 3.7.4 e 3.7.5).

Per il movimento del polso si parte dalla condizione di polso flesso verso il basso, con stelo retracts, fino ad arrivare alla condizione di polso flesso verso l'alto e stelo nella posizione di fine corsa.

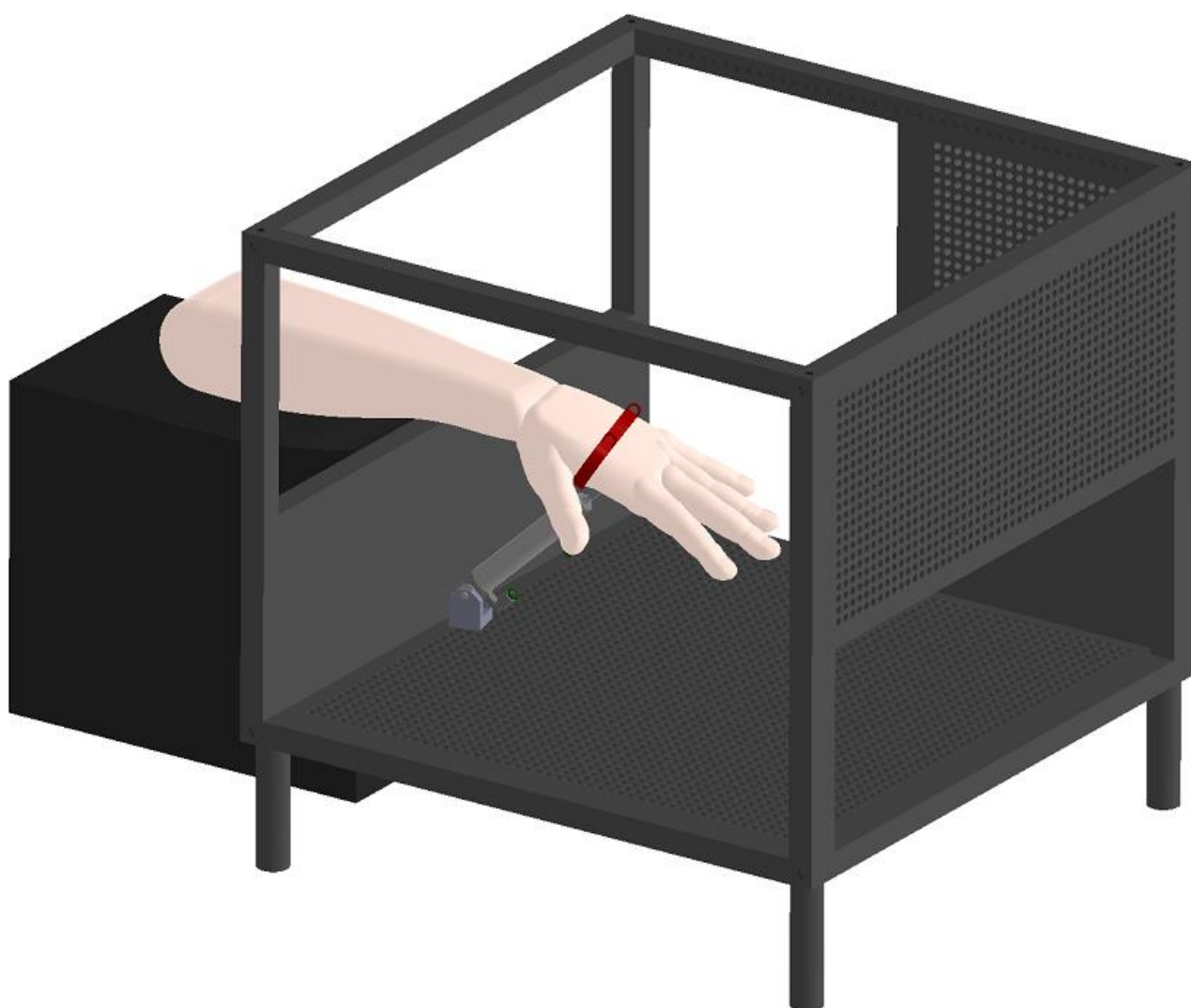


FIGURA 3.7.4) Mano del paziente con la fascia priva dei cordini in kevlar di supporto e il cilindro pneumatico serie 1200 Testate cianfrinate MIR installato

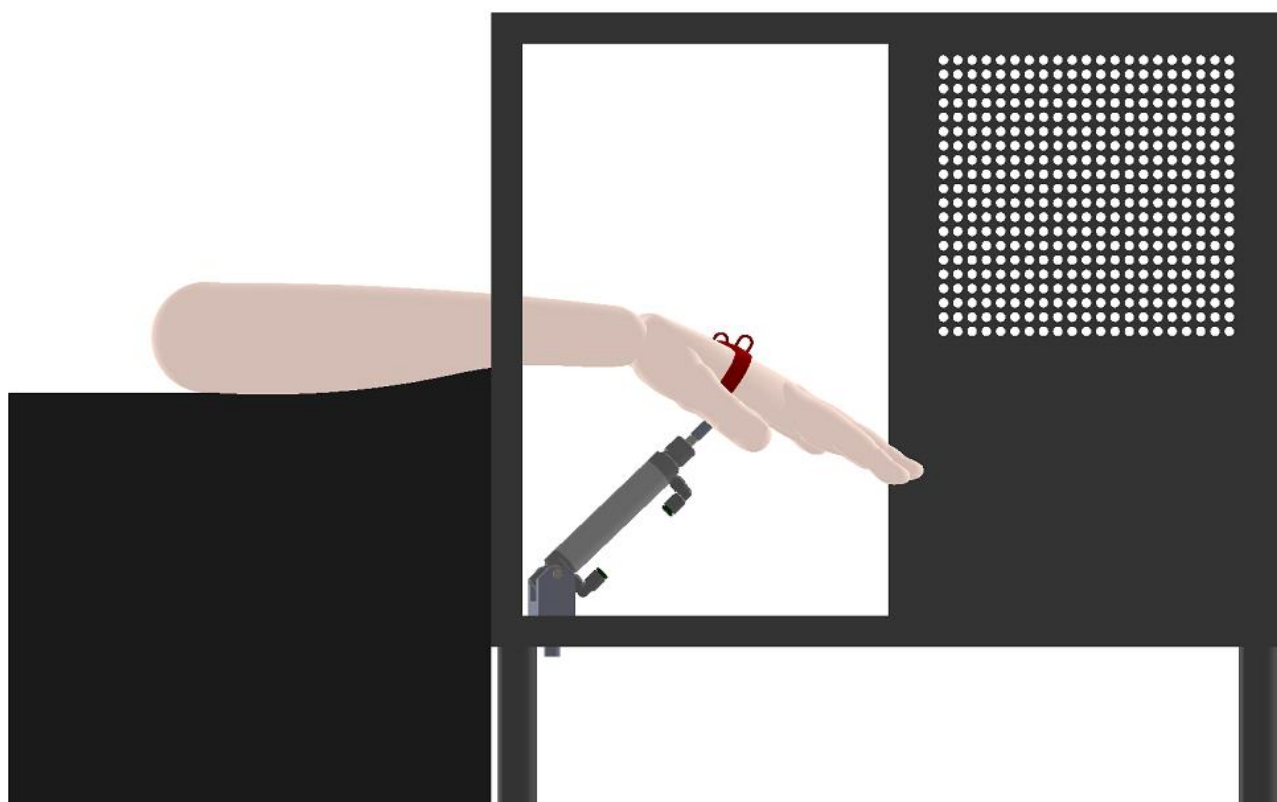


FIGURA 3.7.5) Visione laterale della mano del paziente per evidenziare la condizione di partenza di polso flesso verso il basso

Successivamente si procede con la chiusura del dispositivo attraverso i coperchi d'ispezione e il dispositivo è pronto all'uso (FIGURA 3.7.6).

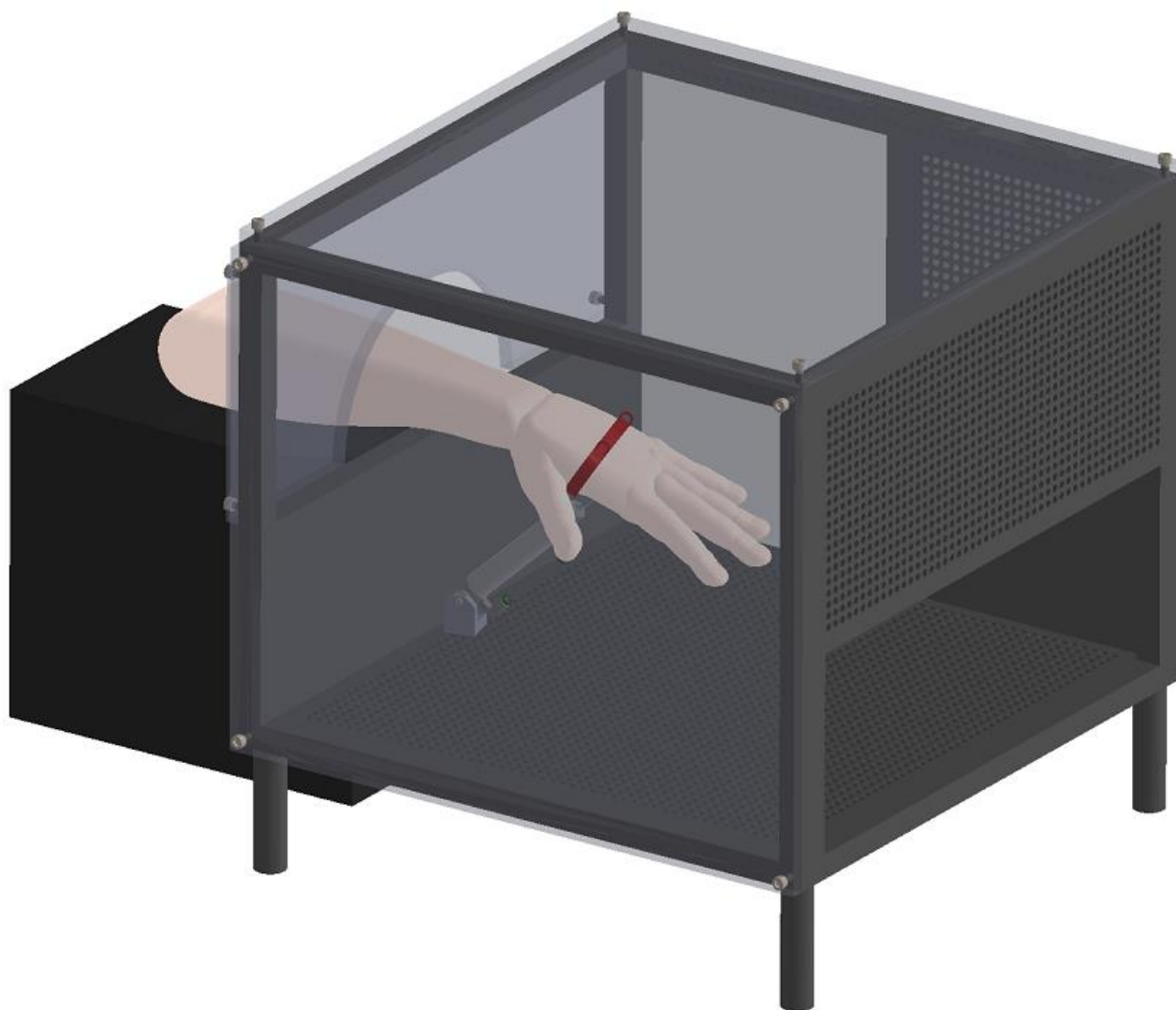


FIGURA 3.7.6) Chiusura della struttura a box con i coperchi d'ispezione

3.6 Esempi di movimenti possibili

Qui di seguito si riportano due esempi di movimenti possibili.

Nelle FIGURE 3.6.1, 3.6.2 e 3.6.3 si può osservare che è stato azionato il cilindro pneumatico amagnetico dell'indice. Il dito del paziente viene piegato fino ad arrivare a toccare con il polpastrello il palmo della mano.

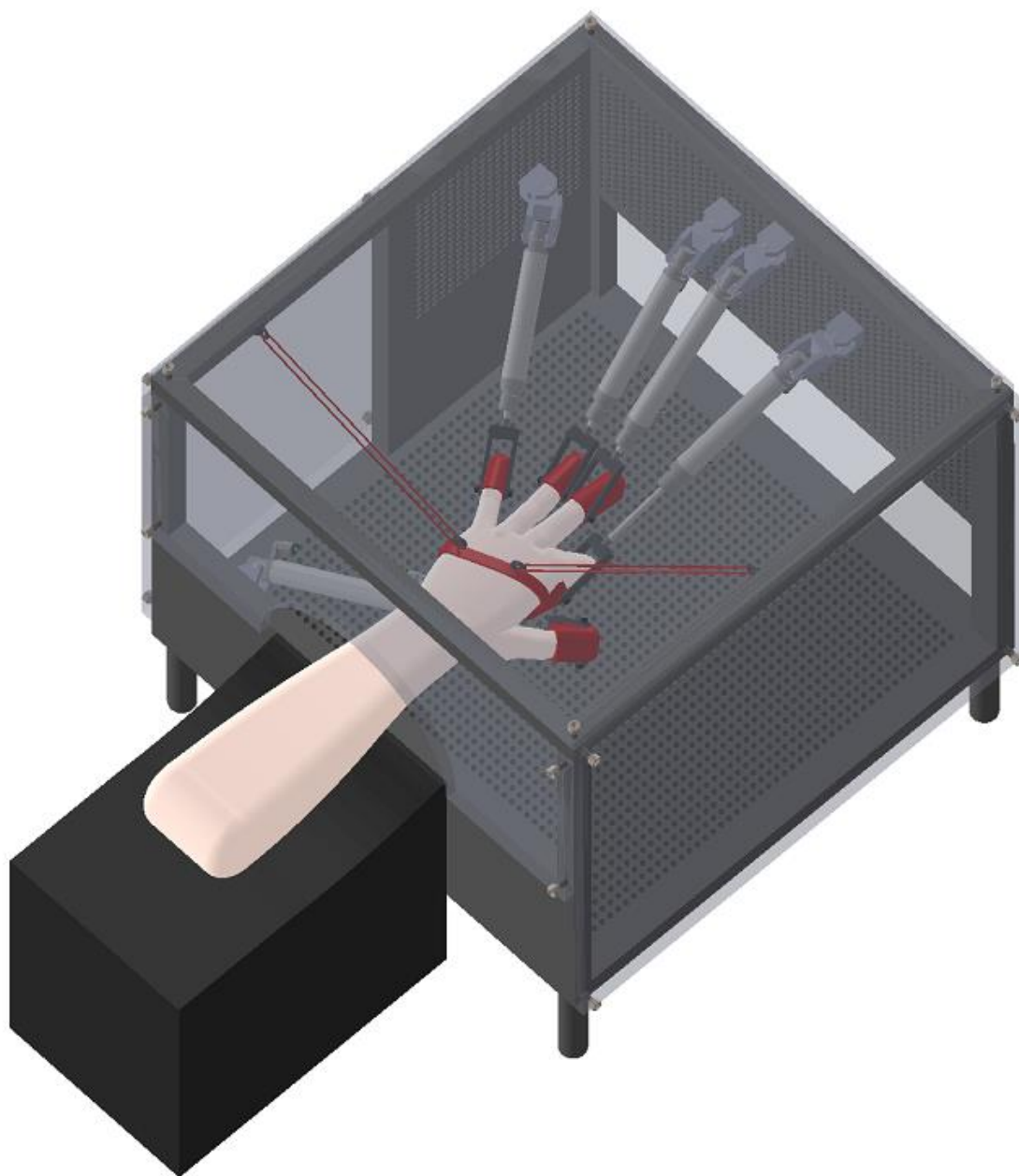


FIGURA 3.6.1) Esempio di azionamento del cilindro pneumatico amagnetico dell'indice, vista tridimensionale

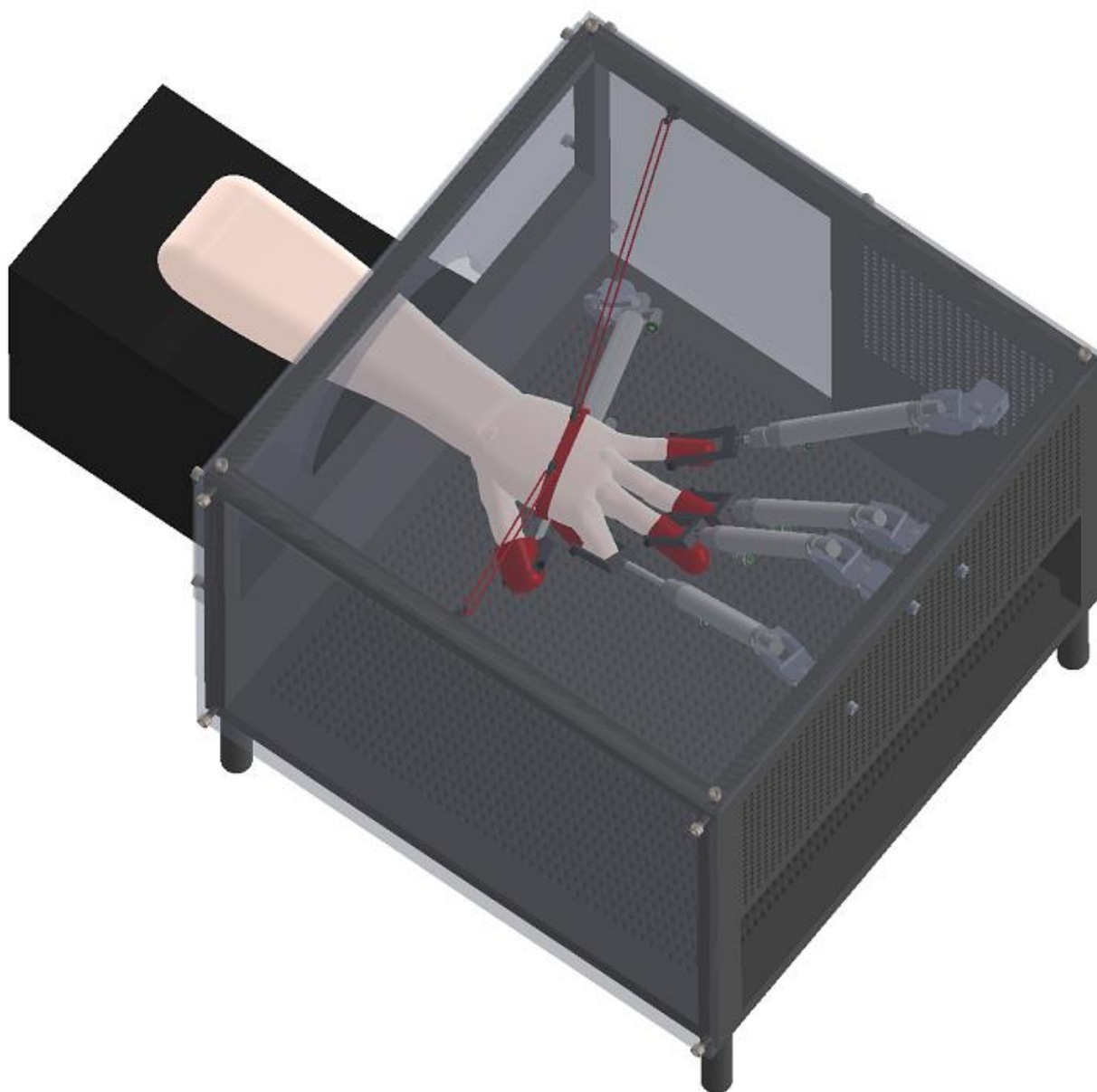


FIGURA 3.6.2) Esempio di azionamento del cilindro pneumatico amagnetico dell'indice, vista tridimensionale

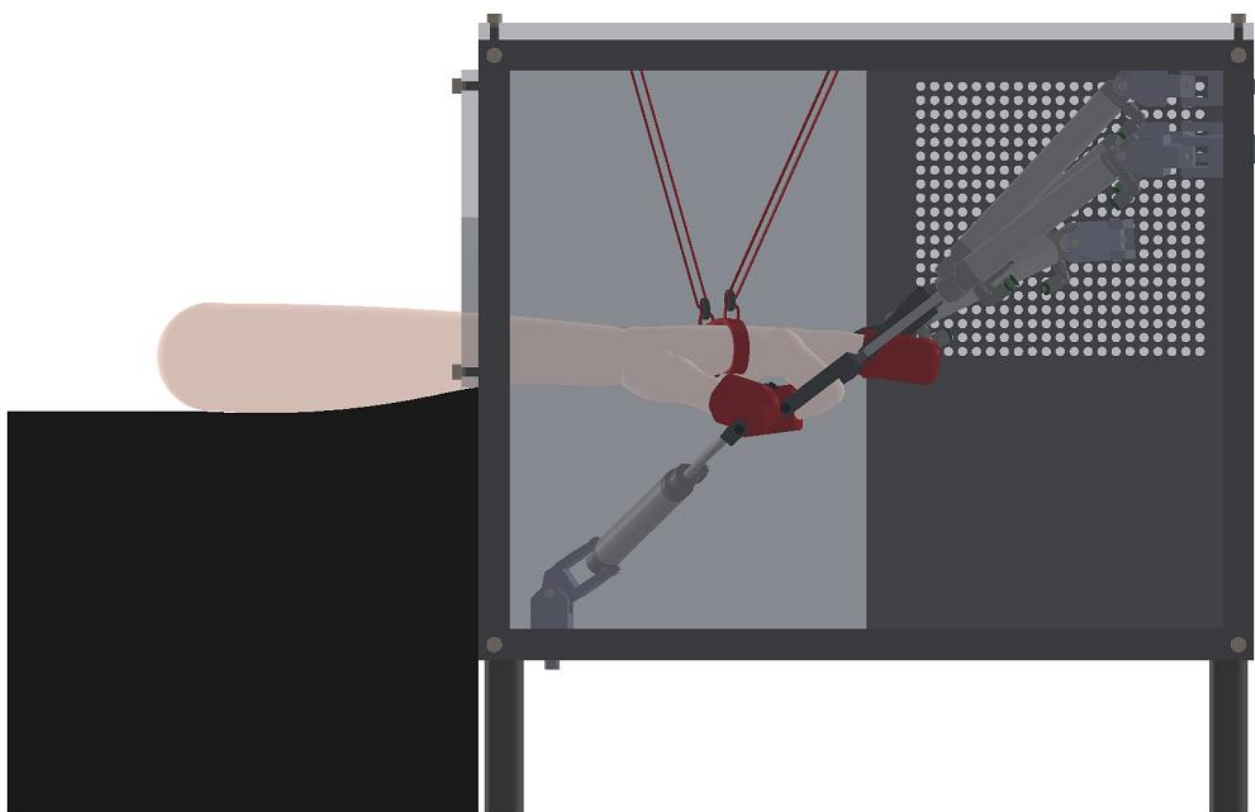


FIGURA 3.6.3) Esempio di azionamento del cilindro pneumatico amagnetico dell'indice, vista laterale

Nelle FIGURE 3.6.4 e 3.6.5 è stato azionato il cilindro pneumatico amagnetico del polso, il quale permette di eseguire la flessione del polso dal basso verso l'alto.

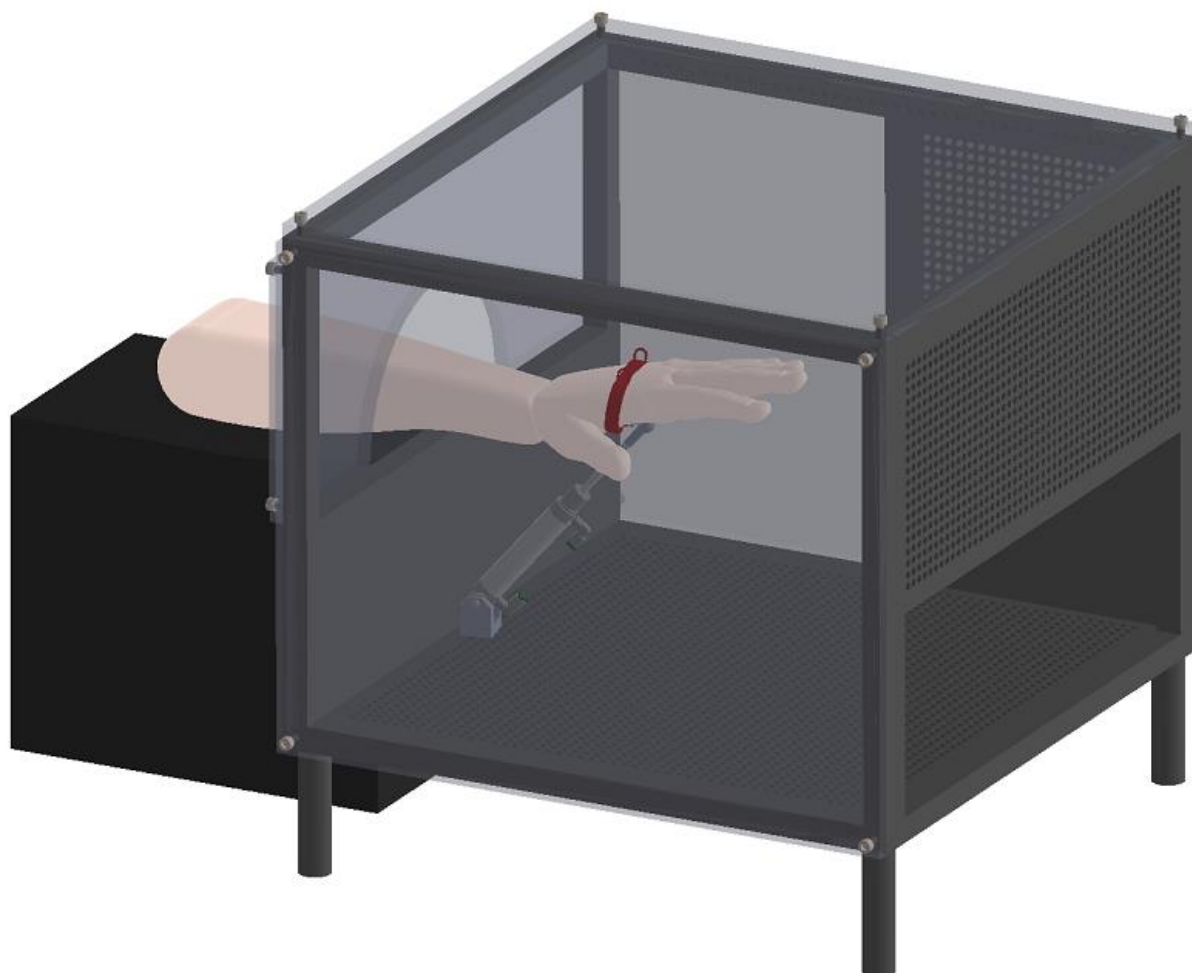


FIGURA 3.6.4) Esempio di azionamento del cilindro pneumatico amagnetico che permette la flessione del polso, vista tridimensionale

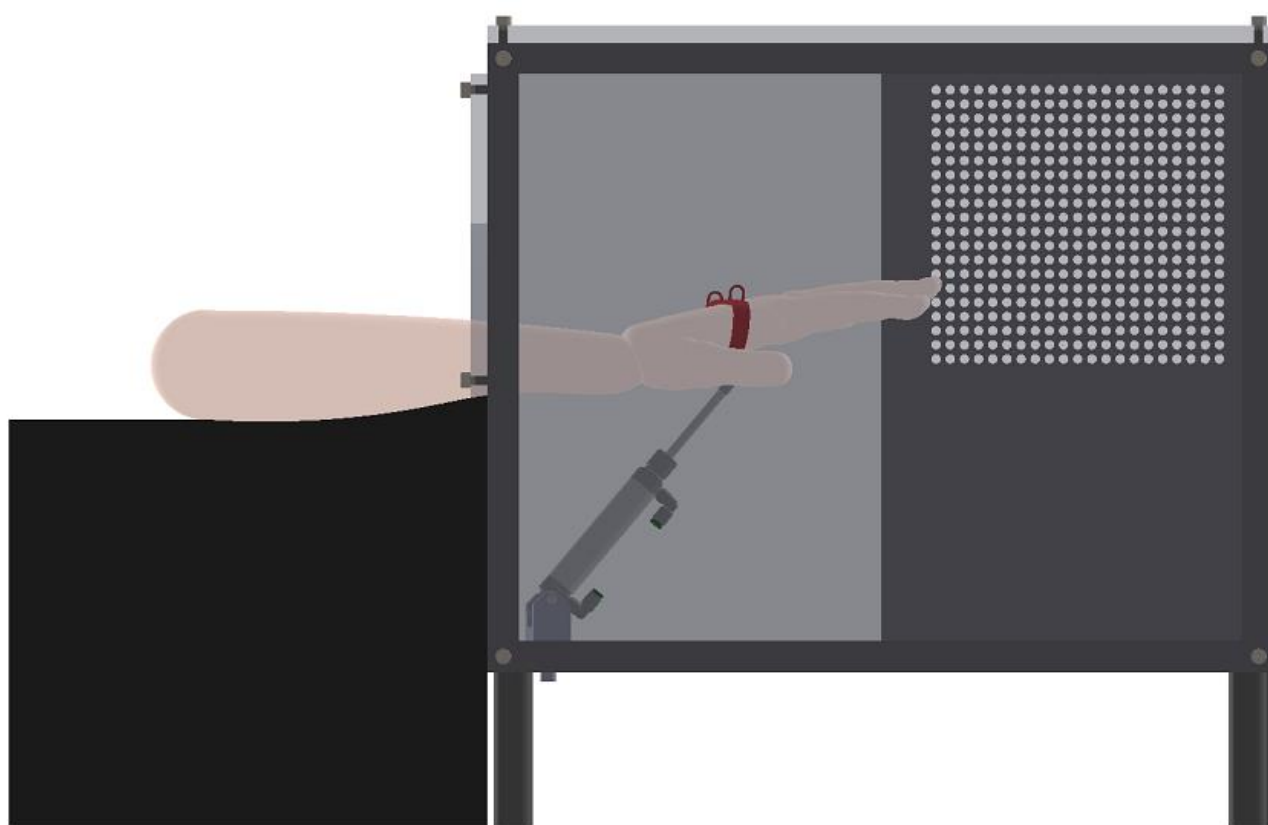


FIGURA 3.6.5) Esempio di azionamento del cilindro pneumatico amagnetico che permette la flessione del polso, vista laterale

Conclusioni: Commenti e confronti delle soluzioni studiate

L'obiettivo della tesi è stato lo studio e il progetto di tre dispositivi differenti per la movimentazione della mano e del polso del paziente durante l'analisi fMRI.

Questi strumenti sono stati pensati e sviluppati per l'impiego durante la fase di studio e ricerca dell'attività cerebrale. Durante il test, al paziente vengono fatti svolgere semplici esercizi di movimento delle articolazioni delle dita della mano e del polso. L'attività neurale associata a questi movimenti è rilevata mediante il confronto tra la fase di riposo e la fase attiva.

Questi dispositivi non sono stati studiati per la fase di riabilitazione del paziente.

Le tre soluzioni studiate sono state:

- 1) Guanto ad elasticità differenziata con attuatori pneumatici costruiti in materiale siliconico
- 2) Guanto ad elasticità differenziata con muscoli pneumatici
- 3) Struttura a box con cilindri pneumatici amagnetici

Questi tre dispositivi studiati permettono i seguenti movimenti:

- Flessione di un dito alla volta della mano del paziente
- Flessione contemporanea di indice, medio, anulare, mignolo, lasciando il pollice fermo e disteso
- Flessione del polso, lasciando le dita distese

I due dispositivi realizzati con il guanto ad elasticità differenziata con attuatori morbidi costruiti in materiale siliconico e con muscoli pneumatici sono confrontabili tra di loro. Questi due strumenti permettono di eseguire le analisi sull'attività cerebrale del paziente in modo attivo, perché il guanto viene inserito nella mano sinistra del paziente. Azionando le valvole di alimentazione, che alimentano i cilindri pneumatici costruiti in materiale siliconico e i muscoli pneumatici, si possono ottenere i movimenti precedentemente descritti.

La soluzione migliore è il guanto ad elasticità differenziata con attuatori morbidi costruiti in materiale siliconico perché permette una flessione completa delle dita della mano, permettendo di arrivare a toccare con i polpastrelli il palmo della mano stessa.

La soluzione con i muscoli pneumatici non è ottimale, perché per ogni dito della mano sono necessari due muscoli che lavorano con il principio agonista-antagonista. Per ciascun dito, i muscoli

pneumatici sono cuciti sul dorso e sul palmo del dito stesso. La presenza di questi dispositivi sul palmo del dito non rende possibile una piegatura completa delle dita, non riuscendo ad arrivare a toccare con i polpastrelli il palmo della mano. Per questo motivo questa soluzione non è stata approfondita nel dettaglio.

Il dispositivo realizzato con la struttura a box con cilindri amagnetici permette di eseguire tutti i movimenti richiesti in modo rapido e preciso utilizzando cilindri pneumatici tradizionali, purché non contengano componenti in materiale ferromagnetico. Per la flessione del polso bisogna rimuovere i cilindri pneumatici installati per il movimento della mano e i relativi cordini in kevlar di sostegno, che mantengono il polso fermo in posizione orizzontale durante la piegatura delle dita, per posizionare quello per il movimento del polso. Nel guanto ad elasticità differenziata con cilindri pneumatici costruiti con materiali siliconici non bisogna rimuovere nessun componente installato. Per questo motivo la soluzione con il guanto permette di eseguire analisi più rapide a differenza del box con cilindri pneumatici amagnetici.

Entrambi i dispositivi permettono di eseguire movimenti precisi e ripetitivi delle articolazioni e soprattutto sicuri per la salute del paziente.

Sviluppi futuri di quest'analisi, potrebbe essere l'introduzione di nuovi movimenti. Ad esempio chiudere contemporaneamente tutte le dita della mano oppure muovere simultaneamente il pollice più un altro dito (indice, medio, anulare, mignolo) fino a raggiungere la condizione in cui i polpastrelli di queste due dita arrivano a toccarsi.

Per quanto riguarda il polso, si potrebbe prevedere la flessione di quest'articolazione con la mano chiusa a pugno. Potrebbe essere aggiunto come movimento la rotazione del polso verso destra e verso sinistra, sia con le dita distese, che con le dita chiuse a pugno.

Altri sviluppi potrebbero essere un approfondimento della soluzione con muscoli pneumatici, l'inizio della costruzione dei prototipi, il dimensionamento del circuito pneumatico di controllo e l'introduzione di sensori di fine corsa.

Bibliografia e sitografia

- [1] Abc degli aghi per la macchina da cucire, [Online] Available: <https://www.cucitomania.it/labc-degli-aggi-la-macchina-cucire/>
- [2] Apparecchiature e tecnologie di risonanza magnetica per immagini, Francesco Paolo Sellitti, [Online] Available: <http://consultatsrm.altervista.org/wp-content/uploads/2014/05/Apparecchiature-e-tecnologie-RM-Sellitti-FP.pdf>
- [3] Apparecchiature RM, Andrea Forneris, [Online] Available: <http://www.andreaforneris.com/appunti-rm/2009/pdf/A-Parte2Apparecchiature.pdf>
- [4] Capitolo 1: Risonanza magnetica funzionale: fMRI, [Online] Available: http://arpg-serv.ing2.uniroma1.it/arpg-site/images/ARPG_MEDIA/Tesi/tesi_finale_Andellini.pdf
- [5] Catalogo cilindri pneumatici Pneumax, [Online] Available: <https://www.pneumaxspa.com/repository/ebook/IT/CATGEN-IT/800/index.html>
- [6] Cos'è il Jersey?, [Online] Available: <https://www.wavefutura.com/it/blog/jersey>
- [7] Dragon Skin 10 slow, [Online] Available: <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-10-slow/>
- [8] Dragon Skin 30, [Online] Available: <https://www.smooth-on.com/products/dragon-skin-30/>
- [9] Ecoflex 00-30, [Online] Available: <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-30/>
- [10] Elastosil M4601 a/b, [Online] Available: <https://www.wacker.com/h/en-us/silicone-rubber/room-temperature-curing-silicone-rubber-rtv-2/elastosil-m-4601-ab/p/000018458>
- [11] “Elastic inflatable actuators for soft robotic applications”, Benjamin Gorissen, Dominiek Reynaerts, Satoshi Konishi, Kazuhiro Yoshida, Joon-wan Kim, Michael De Volder
- [12] “Evoluzione tecnologica delle apparecchiature di risonanza magnetica”, Francesco Paolo Sellitti, [Online] Available: <https://iris.unito.it/retrieve/handle/2318/1559097/132335/SELLITTI-%20Evoluzione%20Tecnologie%20Apparecchiature%20RMN.pdf>
- [13] “Exploratory study on the effects of a robotic hand rehabilitation device on changes in grip strength and brain activity after Stroke”, Daniela Pinter, Sandra Pegritz, Christa Pargfrieder, Gudrun Reiter, Walter Wurm, Thomas Gattringer, Regina Linderl-Madrutter, Claudia Neuper, Franz Fazekas, Peter Grieshofer, Christian Enzinger, 2013
- [14] Fiber-reinforced actuators, soft robotics toolkit, [Online] Available: <https://softroboticstoolkit.com/book/fiber-reinforced-bending-actuators>
- [15] Flessione ed estensione del polso, [Online] Available: <https://golf.com/instruction/putting/ulnar-deviation-putting-stroke-fix-jankowski/>
- [16] “Flexion angles of finger joints in two-finger tip pinching using 3D bone models constructed from X-Ray computed tomography (CT) images”, Satoshi Shimawaki, Yoshiaki Nakamura, Masataka Nakabayashi and Hideharu Sugimoto, 10 settembre 2020

- [17] fMRI functional magnetic resonance imaging lab, [Online] Available: <https://home.csulb.edu/~cwallis/482/fmri/fmri.html>
- [18] Gli attuatori pneumatici, [Online] Available: <http://consuelorodriguez.it/wp-content/uploads/2018/01/ATTUATORI-E-VALVOLE-PNEUMATICHE.pdf>
- [19] Gli “Shorimetri” per la determinazione della durezza di plastiche e gomme, [Online] available: <https://arwmisure.com/gli-shorimetri-la-determinazione-della-durezza-plastica-gomme/>
- [20] Hand and forearm functions, [Online] Available: https://www.reddit.com/r/GripTraining/comments/emnozz/rgriptraining_daily_feature_110_hand_and_forearm/
- [21] Imaging a risonanza magnetica, [Online] Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Imaging_a_risonanza_magnetica
- [22] Interphalangeal joints of the hand, [Online] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Interphalangeal_joints_of_the_hand
- [23] Jersey di cotone garzato tinta unita – blu acciaio, [Online] Available: https://www.tessuti.com/81-5470-006_jersey-di-cotone-garzato-tinta-unita-blu-acciaio.html
- [24] La risonanza magnetica: come funziona – Introduzione alla psicologia, [Online] Available: <https://www.stateofmind.it/2017/05/risonanza-magnetica/>
- [25] Mano e polso, [Online] Available: <https://www.my-personaltrainer.it/salute-benessere/mano.html>
- [26] Manuale di pneumatica, G. Belforte, Tecniche Nuove, Milano, 2005
- [27] “Modeling the constraints of human hand motion”, John Lin, Ying Wu, Thomas S. Huang, Beckman Institute, University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana, IL 61801
- [28] “MRC-Glove: A fMRI Compatible Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation Application”, Hong Kai. Yap, Jeong Hoon. Lim, Fatima. Nasrallah, Fan-Zhe. Low, James C.H. Goh, Raye C.H. Yeow, 2015
- [29] “Novel fMRI-compatible wrist robotic device for brain activation assessment during rehabilitation exercise”, H. Sharini, N. Riyahi Alamb, H. Khabiri, H. Arabalibeik, H. Hashemi, A.R. Azimi, S. Masjoodi, 2020
- [30] Nylon e fibre in HPPE: la protezione nei confronti dei rischi di tipo meccanico, [Online] Available: <http://www.technica.net/NT/Applicazioni/rischiomeccanico.htm>
- [31] Ossa della mano, [Online] Available: <https://www.my-personaltrainer.it/fisiologia/ossa-della-mano.html#:~:text=Le%20ossa%20della%20fila%20prossimale,%2C%20trapezoide%2C%20capitato%20e%20uncinato>
- [32] PMMA colato – plexiglas, [Online] Available: <https://www.plasterspa.it/pmma-plexiglass-colato/>
- [33] Principi fisici della risonanza magnetica e semiotica generale, [Online] Available: <http://www.fisiokinesiterapia.biz/download/principirm.pdf>

- [34] Quali sono le tecniche di neuroimaging?, [Online] Available: <https://trovalarisposta.com/biblioteca/articolo/read/38386-quali-sono-le-tecniche-di-neuroimaging>
- [35] Raccorderia pneumatica Pneumax, [Online] Available: <https://pneumaxspa.com/wp-content/uploads/CAT-GREENLINE-IT-EN.pdf>
- [36] Risonanza magnetica antipánico: massima precisione e maggiore comfort, [Online] Available: <https://www.osp-koelliker.it/risonanza-magnetica-antipánico>
- [37] Risonanza magnetica funzionale, [Online] Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_magnetica_funzionale
- [38] Risonanza magnetica funzionale (fmri), [Online] Available: <https://www.humanitas.it/visite-ed-esami/risonanza-magnetica-funzionale-fmri>
- [39] Risonanza magnetica aperta, [Online] Available: <https://www.crgarbagnate.it/risonanza-magnetica-aperta-a-garbagnate-aggiornamento-di-altissima-qualita-in-3d/>
- [40] “Robotic devices and brain-machine interfaces for hand rehabilitation post-stroke”, Alistair C. McCONNELL, Renan C. MOIOLI, Fabricio L. BRASIL, Marta VALLEJO, David W. CORNEI, Patricia A. VARGAS and Adam A. STOKES, 2017
- [41] Silc pig – pigmenti di base, [Online] Available: <https://www.ferba.it/accessori-per-siliconi/silc-pig-234.php>
- [42] Soft robotic glove, [Online] Available: <https://www.wevolver.com/specs/soft.robotic.glove>
- [43] “Studio di muscoli pneumatici innovativi e loro integrazione in vestiti attivi a scopo riabilitativo”, S.A. Sirolli, Dottorato in meccanica, Politecnico di Torino, Tutori: Prof. G. Belforte, T. Raparelli, Coordinatore: Prof. L. Garibaldi
- [44] The basics of MRI, [Online] Available: <https://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/chap-9/chap-9-i.htm>
- [45] Tessuto a rete, [Online] Available: https://www.tessuti.com/63-07478-003_tessuto-a-rete-borsa-per-la-spesa-blu.html

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti quelli che mi hanno aiutato in questo percorso di studi.

Ringrazio tutti i miei relatori, in modo particolare un sentito ringraziamento alla Professoressa Gabriella Eula, sempre disponibile a fornire chiarimenti e a rispondere alle mie richieste.

Ringrazio la mia famiglia, i miei compagni di corso e i miei amici per avermi sempre sostenuto e supportato in questi anni.