



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Dicembre 2025

# **Riprogettazione di un end effector per robot industriale per la produzione mediante tecniche di fabbricazione additiva**

Relatore:

Prof. Andrea Tridello

Candidato:

Dott. Graziano Antonuccio

Tutor aziendale:

Dott. Christian Conigliaro



**Politecnico  
di Torino**

# Sommario

Sommario .....	1
Abstract .....	3
Ringraziamenti .....	4
1 Stato dell'arte .....	5
1.1 Introduzione .....	5
1.2 Funzionalità e geometria dell'assieme .....	7
1.2.1 Robot Cartesiano <i>STAR Seiki India EG800S</i> .....	8
1.2.2 Piastra ( <i>Y12-16</i> ).....	9
1.2.3 Staffe porta-gripper ( <i>Y12-03, Y12-15</i> ) .....	10
1.2.4 Gripper SMC MHZ Series .....	14
1.2.5 Supporto per afferraggio gate ( <i>Y12-02</i> ) .....	18
1.2.6 Supporto per alloggiamento Pad ( <i>Y12-03</i> ).....	19
1.2.7 Pad per l'afferraggio dei componenti prodotti (Eins by STAR Automation Europe, CPUM-01) .....	21
1.2.8 Manifold SMC KM13-04-06-3 .....	22
1.2.9 Moduli relè OMRON G6B-4BND .....	23
1.3 Considerazioni finali sull'assieme di partenza.....	24
1.4 Simulazioni sull'assieme di partenza .....	25
1.4.1 Semplificazioni geometriche.....	25
1.4.2 Analisi strutturale statica.....	27
1.4.3 Analisi Modale .....	31
2 Redesign.....	36
2.1 Introduzione al redesign .....	36
2.2 Meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio .....	39
2.2.1 Funzionamento del cinematismo.....	40

2.2.2	Geometria corpo centrale – struttura esterna.....	45
2.3	Braccetti laterali .....	58
2.3.1	Funzionamento meccanismo dei braccetti laterali .....	60
2.3.2	Geometria braccetti porta gate .....	62
2.3.3	Geometria braccetti porta componenti .....	68
2.4	Costruzione dell'accoppiamento tra braccetti e meccanismo principale .....	75
2.5	Funzionamento del meccanismo complessivo .....	79
2.6	Posizionamento dei gripper e ottimizzazione topologica.....	85
2.7	Considerazioni finali sul redesign .....	89
2.8	Simulazioni sul redesign .....	91
2.8.1	Semplificazioni sulla geometria .....	91
2.8.2	Analisi strutturale statica .....	92
2.8.3	Analisi Modale .....	95
3	Confronto tra l'assieme di partenza e la proposta di redesign .....	100
3.1	Considerazioni sul numero totale di componenti .....	100
3.2	Considerazioni sul peso.....	100
3.3	Considerazioni sui costi .....	100
3.4	Considerazioni sull'impatto ambientale.....	102
3.5	Confronto performance meccaniche .....	103
4	Conclusioni .....	107
	Bibliografia.....	109



## Abstract

In questo elaborato viene proposta una soluzione di redesign di un end-effector accoppiato al robot ad alte prestazioni, prodotto da Star Seiki India Private Limited, “*EG800S*” progettato per l’automazione in ambiente industriale. Nel caso specifico il braccio robotico viene adottato per lo spostamento di componentistica prodotta tramite stampaggio ad iniezione. Sulla piattaforma dell’end-effector, oggetto di redesign, sono montate, oltre ai componenti ausiliari per la distribuzione dell’aria compressa, dodici pinze pneumatiche prodotte dall’azienda giapponese SMC Corporation, le quali hanno il compito di movimentare le parti appena prodotte per stampaggio ad iniezione e i relativi materiali di scarto rappresentati dai canali di alimentazione (gate).

L’obiettivo della tesi è di sfruttare le peculiarità delle tecnologie di additive manufacturing per ridurre: il peso complessivo della struttura, il numero complessivo di componenti, il costo e i tempi di produzione. In via preliminare, con l’ausilio del software Altair Inspire 2025.1, è stato importato il disegno CAD complessivo dell’assieme in modo da svolgere le analisi modali e strutturali condotte con il solutore OptiStruct. È stata successivamente svolta l’ottimizzazione topologica della struttura principale con l’obiettivo di massimizzarne la rigidità. Le preesistenti pinze pneumatiche vengono sostituite con delle innovative pinze passive, che consentono l’afferraggio e il rilascio dei componenti da movimentare, sfruttando il solo movimento del braccio robotico. L’intero assieme proposto è ottimizzato per la produzione mediante tecnologia additiva “HP Multi Jet Fusion”. Infine, vengono confrontate le performance della soluzione proposta con quelle del preesistente gripper, mettendo in luce i benefici introdotti dalla soluzione prodotta in additive manufacturing e le principali criticità connesse alla sua adozione.

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare la divisione *Valeo ISC* per avermi dato la possibilità di svolgere il progetto di tesi all'interno della propria realtà, permettendomi di approfondire aspetti tecnici e operativi che hanno arricchito in modo significativo il mio percorso formativo.

Ringrazio il mio tutor aziendale dott. Christian Conigliaro per il tempo dedicato e per la disponibilità offerta.

Un ringraziamento sincero va, inoltre, a tutto il personale del reparto *ISC Quality* e del *TestLAB*. Oltre alla loro disponibilità e competenza, ho apprezzato la loro simpatia e la naturalezza con cui hanno saputo creare un clima piacevole. La loro umanità ha reso l'esperienza quotidiana più serena e piacevole, lasciandomi un ricordo che mi accompagnerà anche in futuro.

Infine, desidero esprimere un grazie generale a tutto il personale dell'azienda, anche ai reparti non direttamente coinvolti nel mio lavoro, per l'ambiente positivo, cordiale e collaborativo che ho trovato. Ognuno, a modo suo, ha contribuito a rendere questo percorso significativo e ricco dal punto di vista umano.

# 1 Stato dell'arte

## 1.1 Introduzione

L'automazione delle linee produttive al giorno d'oggi riveste un ruolo strategico per la riduzione dei tempi di produzione, in quanto consente di rendere efficienti, ripetibili e molto più rapide alcune attività che in passato venivano ricoperte dall'uomo. In questo contesto i sistemi robotici offrono soluzioni particolarmente apprezzate per la loro velocità di esecuzione, per la precisione nel movimento e per l'affidabilità che riescono a garantire [1]. In commercio esistono varie tipologie di sistemi di movimentazione robotica tra cui: robot antropomorfi, SCARA e robot cartesiani. Questi ultimi sono particolarmente indicati quando sono richieste precisione, ripetibilità e rapidità nelle operazioni di manipolazione, grazie al loro controllo molto più semplice rispetto ai robot antropomorfi. Inoltre i robot cartesiani consentono una migliore integrabilità all'interno della linea produttiva oltre ad essere più economici sia per quanto riguarda il prezzo di acquisto che riguardo ai costi legati alla manutenzione [2]. L'impiego di robot cartesiani permette un'elevata personalizzazione del volume di lavoro e del layout, il che li rende adatti a celle che richiedono traiettorie lineari e più gripper montati sul supporto principale [3]. Proprio queste caratteristiche giustificano nel caso in esame l'adozione del robot *Star Seiki India EG800S* che nello specifico è stato scelto per la movimentazione di oggetti appena prodotti per stampaggio ad iniezione [4]. La movimentazione avviene attraverso l'unità di controllo, integrato al braccio robotico, prodotta dalla stessa *Star Seiki India, STEC-NC3* che coordina i servoassi del braccio robotico e ne sincronizza il ciclo operativo con la pressa ad iniezione, garantendo precisione, sicurezza e ripetibilità [5]. Come avremo modo di osservare all'interno di questo elaborato, l'end-effector, accoppiato al robot cartesiano, ricopre un ruolo fondamentale all'interno del ciclo produttivo, in quanto ha il compito di garantire un collegamento stabile tra il braccio robotico e i componenti da sollevare. L'efficienza di afferraggio e rilascio dei componenti è strettamente collegata alla qualità e all'affidabilità dell'intero processo produttivo. I gripper pneumatici a pinza parallela rappresentano una soluzione ad oggi molto utilizzata perché garantiscono affidabilità, ripetibilità e rapidità di apertura e chiusura, oltre a una importante forza di presa in spazi molto ridotti, per questi motivi, come nel caso in esame vengono spesso utilizzati in contesti quali le celle di stampaggio ad iniezione dove la robustezza e la precisione sono essenziali [6]. Nel caso specifico i gripper

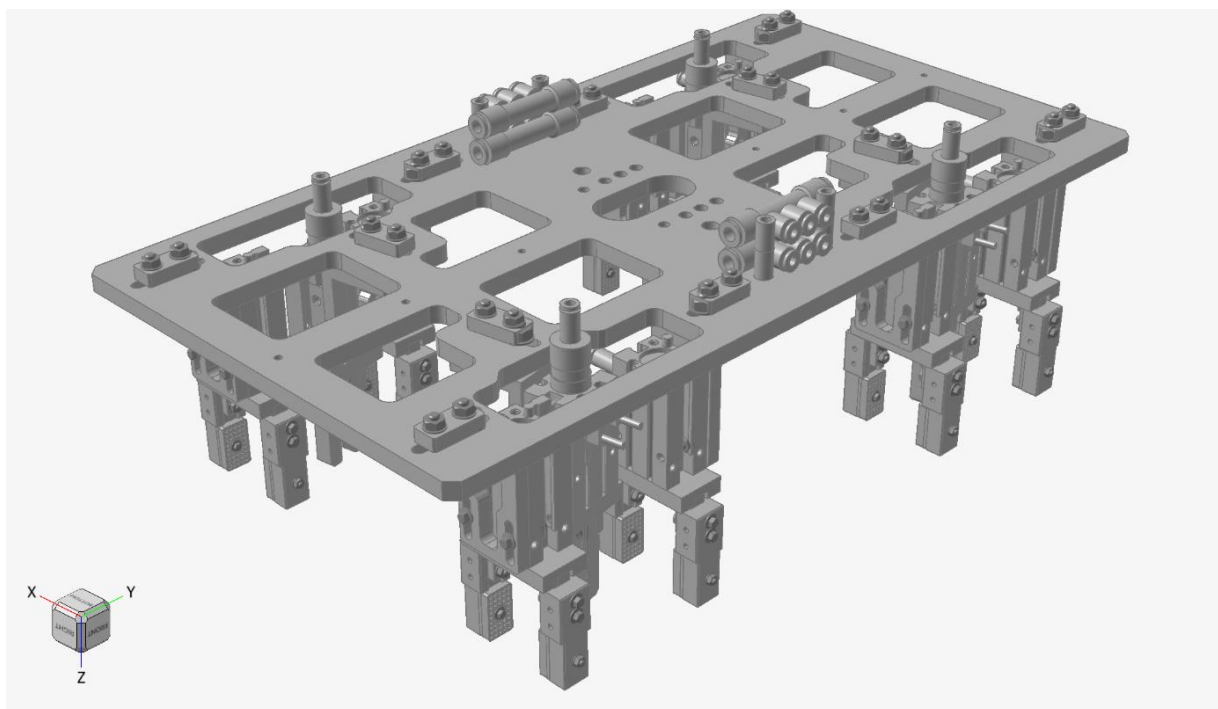
adottati fanno parte della serie *MHZ* del produttore giapponese *SMC Pneumatics* [7]. La movimentazione dei componenti appena stampati per iniezione risulta essere quindi una fase particolarmente delicata a causa dei vincoli che il sistema di afferraggio deve garantire. I pezzi, infatti, al completamento del ciclo di stampaggio, presentano una temperatura ancora elevata, questo potrebbe generare, anche a causa di una eccessiva pressione, una deformazione irreversibile del componente e quindi comprometterne il suo utilizzo. Allo stesso tempo il gripper deve essere in grado di manipolare i pezzi il più velocemente possibile per non rallentare il ciclo produttivo [8] [9] [10]. Sebbene i moderni gripper rappresentino una soluzione efficace e affidabile per la movimentazione dei componenti, è importante focalizzare l'attenzione sul fatto che, molto spesso, le strutture e gli elementi ausiliari che ne consentono l'accoppiamento al braccio robotico presentano un costo monetario rilevante ed un peso complessivo molto elevato. Questi particolari supporti, infatti, vengono prodotti con tecnologie tradizionali, per cui non è possibile ottimizzare opportunamente la struttura, oltre alla necessità di dover ricorrere all'utilizzo di elementi ausiliari di collegamento come: staffe, bulloni e dadi. Le criticità appena elencate possono incidere negativamente sulle prestazioni dinamiche del braccio robotico, mettendo a rischio l'affidabilità dell'intero sistema [11]. Da qui nasce l'esigenza di riprogettare l'intera struttura al fine di massimizzare le performance in termini di rigidità, leggerezza ed integrazione funzionale. Il lavoro presentato in questo elaborato è stato svolto in collaborazione con *Valeo SpA* realtà internazionale attiva nel settore automotive.

## 1.2 Funzionalità e geometria dell'assieme

In questa sezione vengono illustrate la geometria, le caratteristiche e il funzionamento dei componenti da cui è costituito l'end-effector in esame. Vengono inoltre introdotte le proprietà dei materiali utilizzate per modellare l'assieme con l'utilizzo del software Altair Inspire (*Figura 1*).

Gli elementi da cui è formato l'assieme sono i seguenti:

- 1 Piastra (*Y12-16*)
- 8 Staffe porta gripper (*Y12-03*)
- 4 Staffe porta gripper (*Y12-15*)
- 12 Gripper (*SMC MHZ Series*)
- 4 Supporti per afferraggio gate (*Y12-02*)
- 8 Supporti per l'alloggiamento dei pad (*Y12-03*)
- 8 Pad (*Eins by STAR Automation Europe – CPUM-01*)
- 4 Manifold (*SMC KM13-04-06-3*)
- 3 Moduli Relè (*Omron G6B-4BND*)



**FIGURA 1: ASSIEME DI PARTENZA**

I componenti appena elencati vengono accoppiati al robot *STAR Seiki India EG800S* grazie ad una staffa, che consente il collegamento alla piastra.

Risulta necessario, data la complessità della geometria e il numero di elementi, soffermarsi per stabilire con chiarezza le modalità di accoppiamento e le funzionalità dei principali componenti.

### 1.2.1 Robot Cartesiano *STAR Seiki India EG800S*

Il robot cartesiano *STAR Seiki India EG800S* in *Figura 2* è un robot cartesiano utilizzato in ambiente industriale[4]. Risulta particolarmente adatto ad applicazioni quali la movimentazione di componenti prodotti attraverso stampaggio ad iniezione grazie alla struttura meccanica ad alta rigidezza



**FIGURA 2: STAR SEIKI INDIA EG800S**

concepita per supportare movimenti rapidi con vibrazioni ridotte. Il controllo del braccio robotico avviene attraverso il controller prodotto dalla stessa *STAR Seiki India*, *STEC-NC3* (*Figura 3*) che oltre alla programmazione per la movimentazione attraverso un'interfaccia particolarmente intuitiva, consente: il rilevamento delle collisioni, il monitoraggio

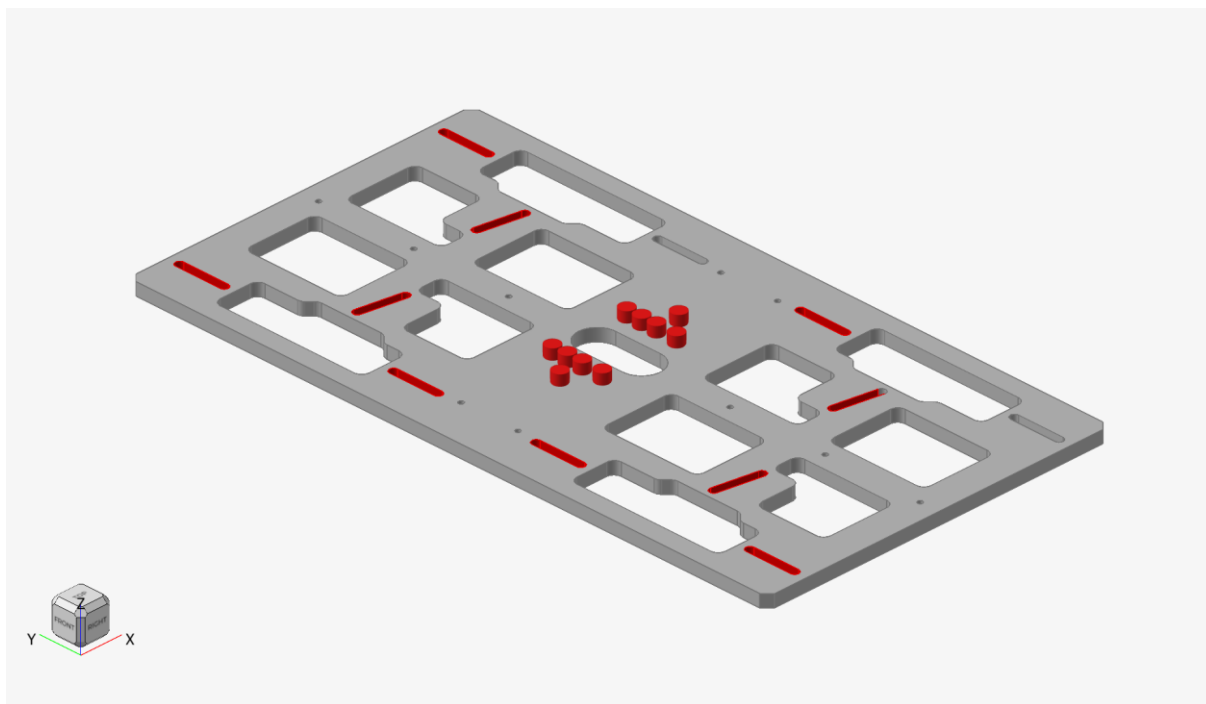
dell'efficienza energetica e la sincronizzazione automatica con il ciclo della pressa ad iniezione[5].



**FIGURA 3: STAR SEIKI INDIA STEC-NC3**

### 1.2.2 Piastra (Y12-16)

La principale funzione della piastra è quella di garantire un collegamento stabile tra i dodici gripper e il braccio meccanico del robot “Star Seiki India EG800S”. In *Figura 4* sono evidenziati i punti in cui è previsto un accoppiamento con bulloni. In particolare, nel settore centrale, segnati con dei cilindri rossi, sono indicati i fori di accoppiamento con la testa del robot, mentre le guide evidenziate in rosso consentono l'accoppiamento, tramite le opportune staffe Y12-03 e Y12-15, ai gripper. L'ampiezza delle guide consente inoltre di regolare, a seconda delle necessità, il posizionamento delle staffe. I settori a cui è stato rimosso il materiale, sono necessari per garantire il posizionamento degli ingombri dei gripper.



**FIGURA 4: PIASTRA (Y12-16)**

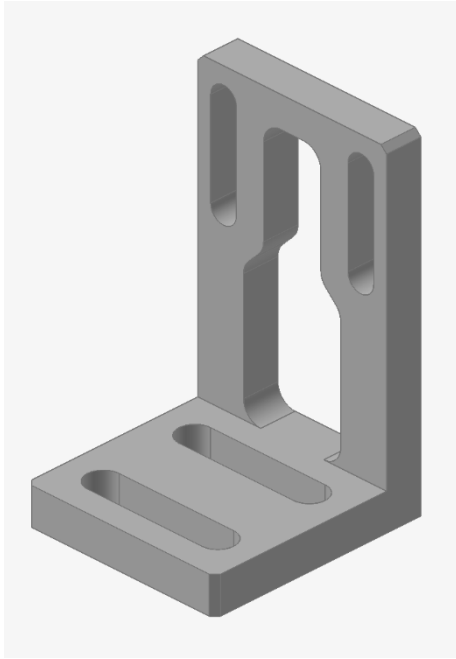
La piastra *Y12-16* presenta le seguenti caratteristiche:

- Numero di componenti: 1
- Materiale: Alluminio 6061
- Peso: 1,3 kg
- Volume: 480,8 cm<sup>3</sup>

### 1.2.3 Staffe porta-gripper (*Y12-03*, *Y12-15*)

La principale funzione delle staffe porta-gripper - nelle varianti *Y12-03* e *Y12-15* mostrate in *Figura 5-6* - è di garantire un collegamento stabile tra il singolo gripper e la piastra centrale. Inoltre, le peculiari scanalature presenti in corrispondenza sia dell'accoppiamento con la piastra che dell'accoppiamento al gripper consentono, il corretto posizionamento dei gripper, in relazione al posizionamento dei componenti da sollevare.





**FIGURA 5: STAFFA Y12-03**

La minore altezza della staffa porta-gripper *Y12-15* rispetto alla tipologia *Y12-03* consente, di poter posizionare il gripper adibito alla movimentazione del gate, ad un'altezza inferiore rispetto ai gripper che movimentano i componenti stampati ad iniezione.

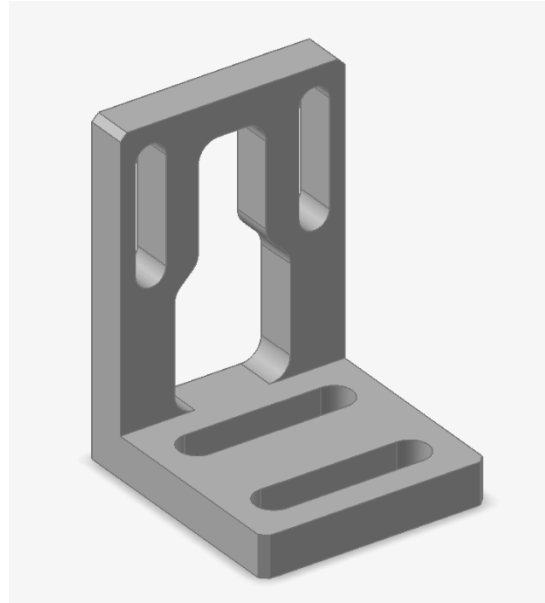
In *Figura 7* viene mostrato il posizionamento delle staffe sulla piastra principale. Notiamo come è possibile suddividere l'intero end-effector in quattro settori, ognuno dei quali presenta la possibilità di installare due

gripper per la movimentazione dei componenti appena prodotti tramite stampaggio ad iniezione ed uno per la movimentazione del gate di stampaggio.

Le due staffe presentano le seguenti caratteristiche:

#### **Staffa Y12-03**

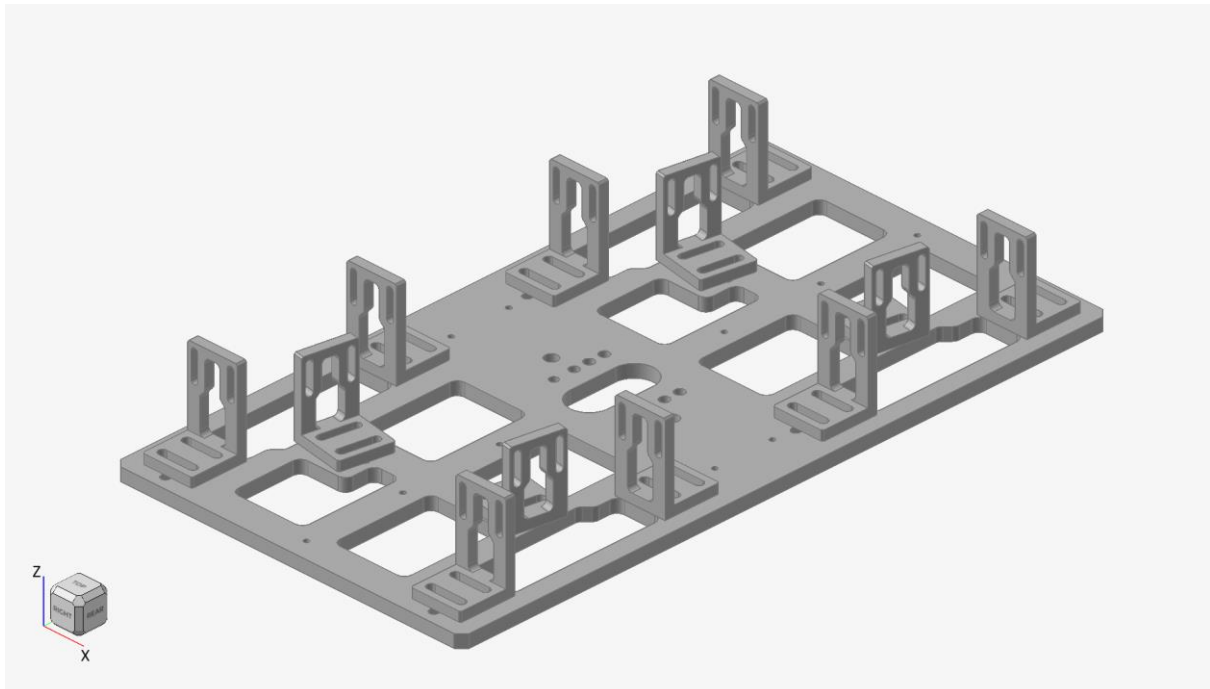
- Numero componenti: 8
- Materiale: Alluminio 6061-T6
- Peso: 28,6 g
- Volume: 10,59 cm<sup>3</sup>



**FIGURA 6: STAFFA Y12-15**

#### **Staffa Y12-15**

- Numero componenti: 4
- Materiale: Alluminio 6061-T6
- Peso: 26,56 g
- Volume 9,84 cm<sup>3</sup>



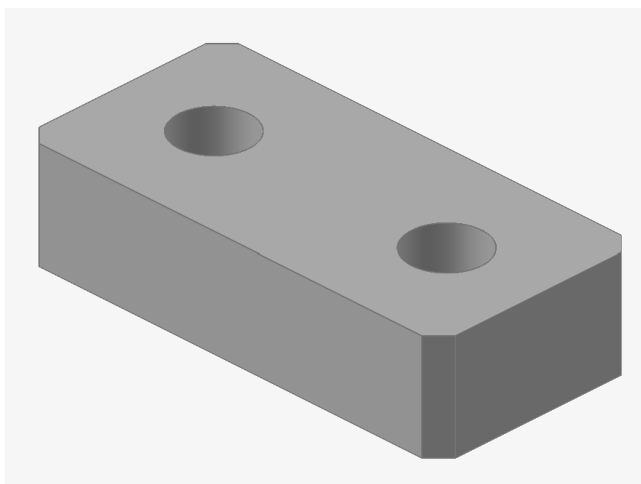
**FIGURA 7: POSIZIONAMENTO STAFFE SU PIASTRA PRINCIPALE**

Le dodici staffe vengono accoppiate alla piastra principale attraverso degli opportuni spessori, i quali presentano due fori passanti sulla faccia principale (*Figura 8*) ed hanno il compito di

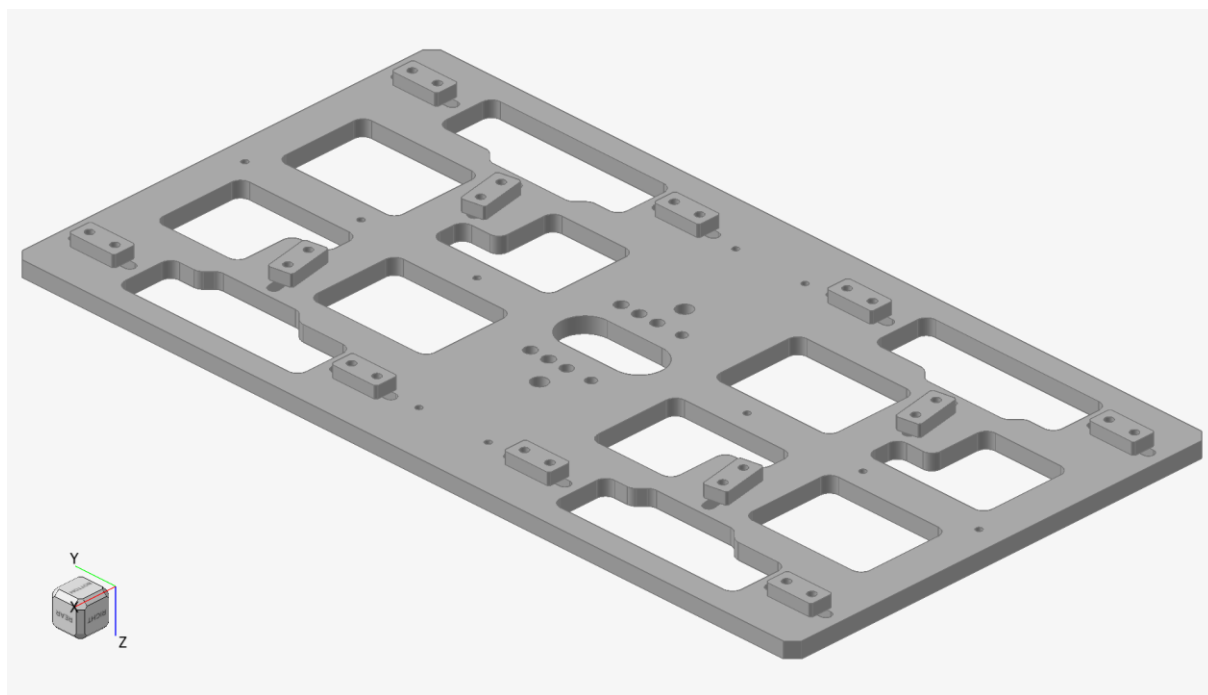
ampliare la superficie di pressione dei collegamenti bullone-dado. In *Figura 9* viene mostrato il posizionamento dei dodici spessori sulla piastra principale

Nel seguito vengono elencate le caratteristiche dell'elemento:

- Numero di componenti: 12
- Materiale: Alluminio 6061-T6
- Peso: 4g
- Volume: 1,62 cm<sup>3</sup>



**FIGURA 8: SPESSORE PER L'INSTALLAZIONE DELLE STAFFE**



**FIGURA 9: POSIZIONAMENTO SPESSORI PER STAFFE**

### 1.2.4 Gripper SMC MHZ Series

I gripper montati sull'assieme di partenza sono stati scelti tra quelli presenti nel catalogo di *SMC Pneumatics*, azienda facente parte del gruppo giapponese SMC Corporation, attiva nel settore dell'automazione industriale[7]. In particolare, per garantire una presa sicura in relazione ai componenti da movimentare, sono state scelte le pinze pneumatiche della serie *MHZ* costituite da un corpo centrale in lega di alluminio. Al loro interno è presente un cilindro di diametro 16 mm, che, grazie ad un sistema di leve a guida lineare, trasforma il movimento rettilineo del pistone lungo l'asse principale del corpo, in un movimento traslatorio in direzione della guida delle due "dita", il cui asse è perpendicolare all'asse di movimento del pistone (*Figura 10*). Questa tipologia di attuatore può lavorare sia in "presa esterna" che in "presa interna".



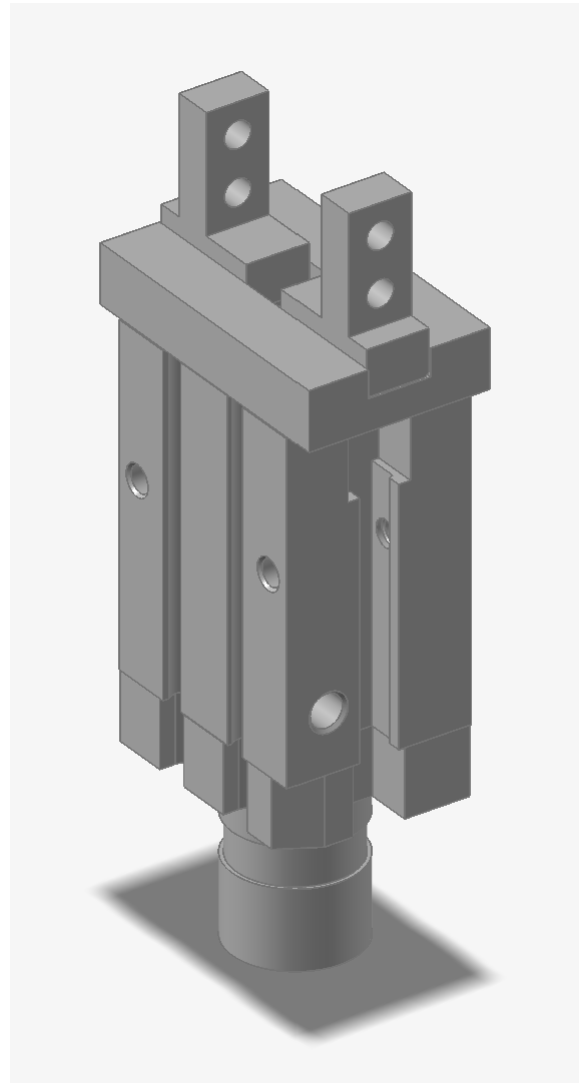
**FIGURA 10: GRIPPER SMC MHZ-16D**

Pur facendo parte della stessa serie, le pinze adottate per la movimentazione dei componenti e del gate presentano alcune differenze di layout.

#### 1.2.4.1 Pinze movimentazione gate: *SMC MHZ2-16S2M-M9NVM*

La pinza pneumatica per la movimentazione dei gate, che costituiscono materiale di scarto, come anticipato precedentemente, fa parte della serie *MHZ* e si distingue per le seguenti caratteristiche che è possibile desumere dalla sigla del prodotto *MHZ2-16S2M-M9NVM* (*Figura 11*)[7]:

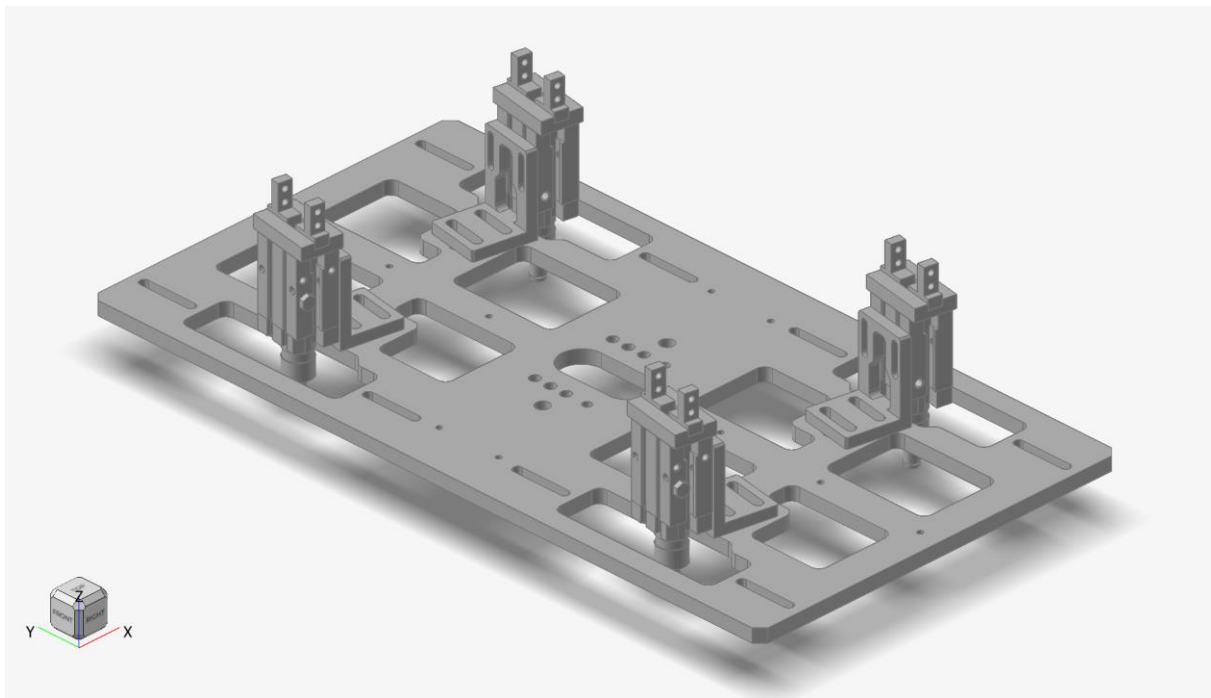
- *MHZ2*: Questa sigla indica la tipologia di gripper, nello specifico siamo di fronte ad un gripper a presa parallela a doppio pistone.
- *16*: indica il diametro del cilindro che aziona le dita
- *S*: descrive il funzionamento, in questo caso è “*single action point*”, quindi è una tipologia del tipo NO (Normally Open), infatti l’azionamento pneumatico garantisce il solo movimento di chiusura del gripper e non anche l’apertura, che avviene tramite molla.
- *2*: indica la presenza di due fori su entrambe le dita, con asse parallelo alla direzione del movimento, che consentono l’installazione di dispositivi pensati ad hoc per la movimentazione di un particolare oggetto, in questo caso stiamo parlando quindi del gate.



- *M*: caratterizza il tipo di attacco dell’aria compressa, che nel caso specifico avviene assialmente con filettatura M5
- *M9N*: indica la tipologia di sensore, che in questo caso è allo stato solido NPN, il quale rileva la posizione tramite campo magnetico.
- *V*: sigla per identificare la direzione verticale del cavo. Il cavo esce dunque in linea con il corpo del gripper
- *M*: quantifica gli auto switch all’interno del gripper, in questo caso è soltanto uno.

**FIGURA 11: SMC MHZ2-16S2M-M9NVM**

Considerando che ogni due componenti da movimentare è presente un gate, troviamo assemblati sull’assieme analizzato quattro gripper *MHZ2-16S2M-M9NVM* (Figura 12).

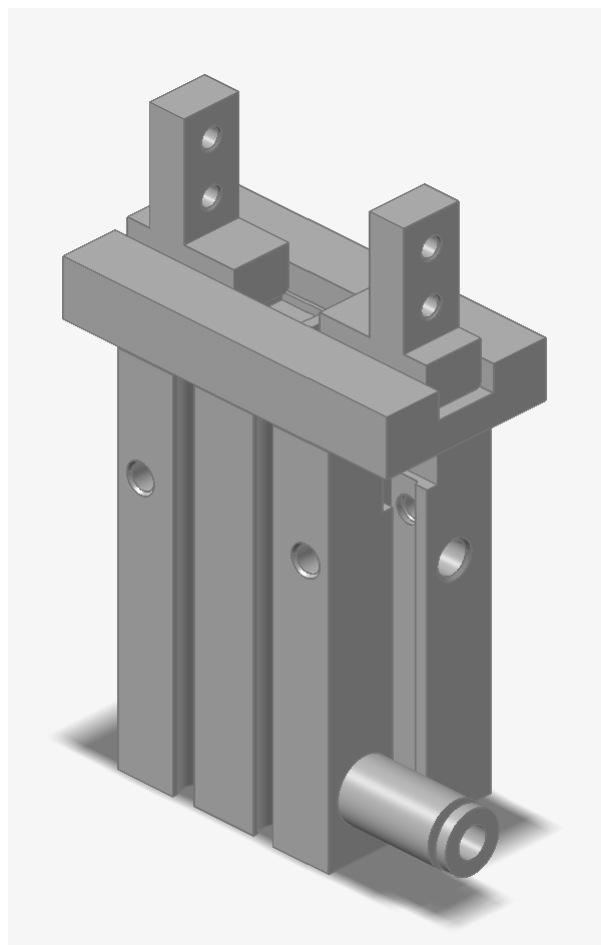


**FIGURA 12: POSIZIONAMENTO GRIPPER *SMC MHZ2-16S2M-M9NVM***

#### 1.2.4.2 Pinze movimentazione componenti: *SMC MHZL2-16S-M9NVM*

Esattamente come nel caso delle pinze per la movimentazione dei gate, i gripper che movimentano i componenti fanno parte della serie *MHZ*. Analizziamo, come nel caso precedente, il significato della sigla di questa tipologia di gripper *MHZL2-16S-M9NVM* (Figura 13):

- *MHZL2*: sigla simile al caso precedente, con la sola differenza della presenza della lettera *L* che identifica la presenza di una corsa delle dita



**FIGURA 13: *SMC MHZL2-16S-M9NVM***

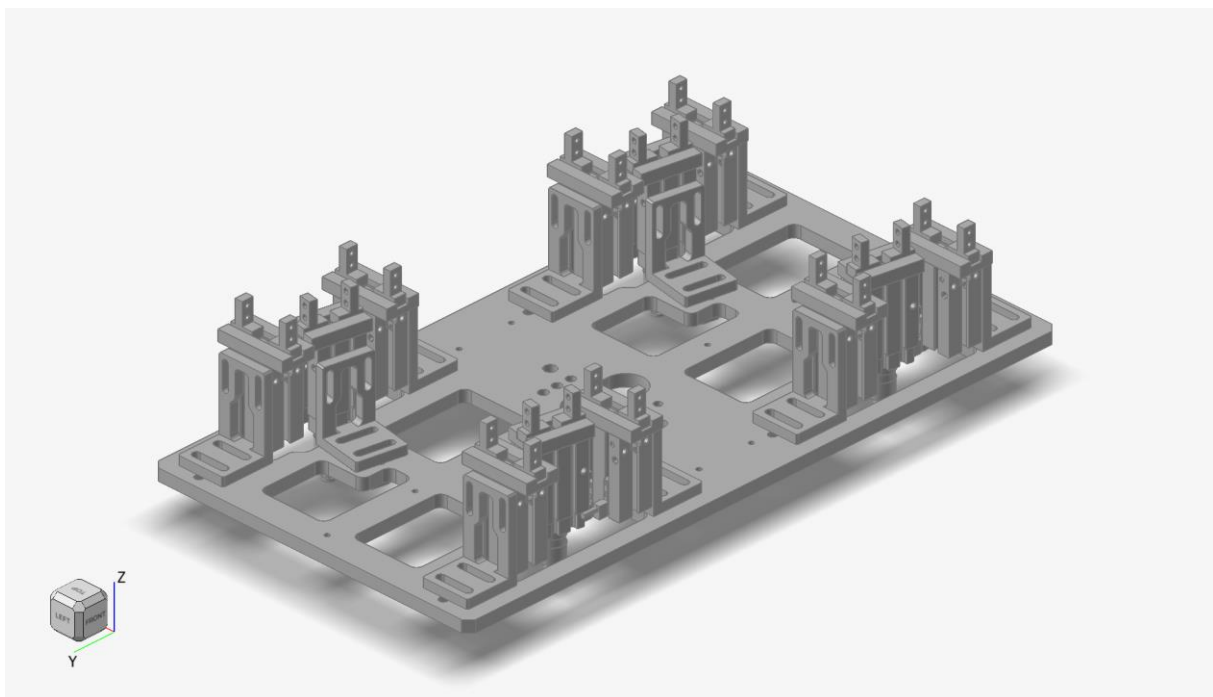
leggermente più lunga, adatta a oggetti più grandi o irregolari

- *16*: come nel caso precedente, il gripper presenta un cilindro di 16 mm
- *S*: identifica la tipologia di gripper ad azione singola, le dita in condizioni di riposo sono aperte.
- *M9NVM*: come nel gripper per la movimentazione dei gate, questa sigla definisce la presenza di un sensore magnetico allo stato solido, NPN, con cavo in linea, montato singolarmente

Focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche dei due diversi modelli di gripper, è possibile notare come il gripper appena esaminato presenta una maggiore corsa delle dita. Inoltre, confrontando le due sigle, possiamo notare come, nella versione *MHZZL2-16S-M9NVM* non sia specificato il posizionamento dell'ingresso dell'aria compressa, che quindi si presenta nella configurazione standard dei modelli MHZ, ovvero con l'ingresso nel fianco del corpo centrale in alluminio del gripper.

Sull'end-effector in esame sono presenti otto gripper *SMC MHZZL2-16S-M9NVM*, per cui sono presenti un totale di dodici pinze pneumatiche.

In *Figura 14* viene illustrato il montaggio completo delle dodici pinze pneumatiche, ognuna delle quali ha un peso di 135 g, al netto della presenza dei raccordi ad innesto rapido per



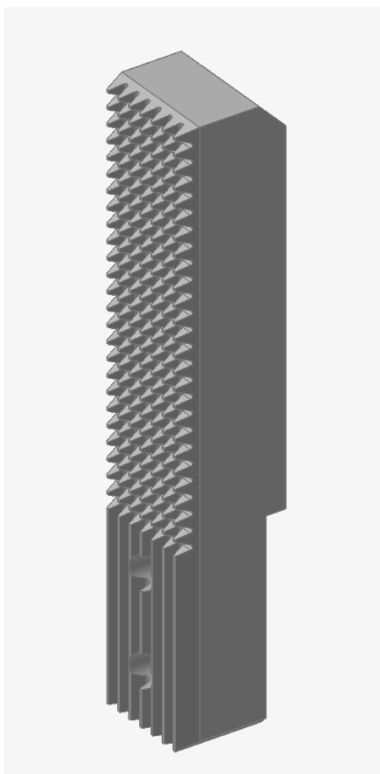
**FIGURA 14: MONTAGGIO COMPLETO GRIPPER SMC**

l'ingresso dell'aria compressa, prodotti dalla stessa *SMC*. Nello specifico, per tutte e dodici le pinze pneumatiche è stata scelta la tipologia KQ2S04-M5A che presenta un raccordo “maschio

con esagono interno per brugola”, adatta ad un diametro esterno del tubo di 4 mm[12]. Lato connessione, il raccordo presenta una filettatura M5 x 0,8 mm con sigillante preapplicato.



**FIGURA 15: SMC KQ2S04-M5A**



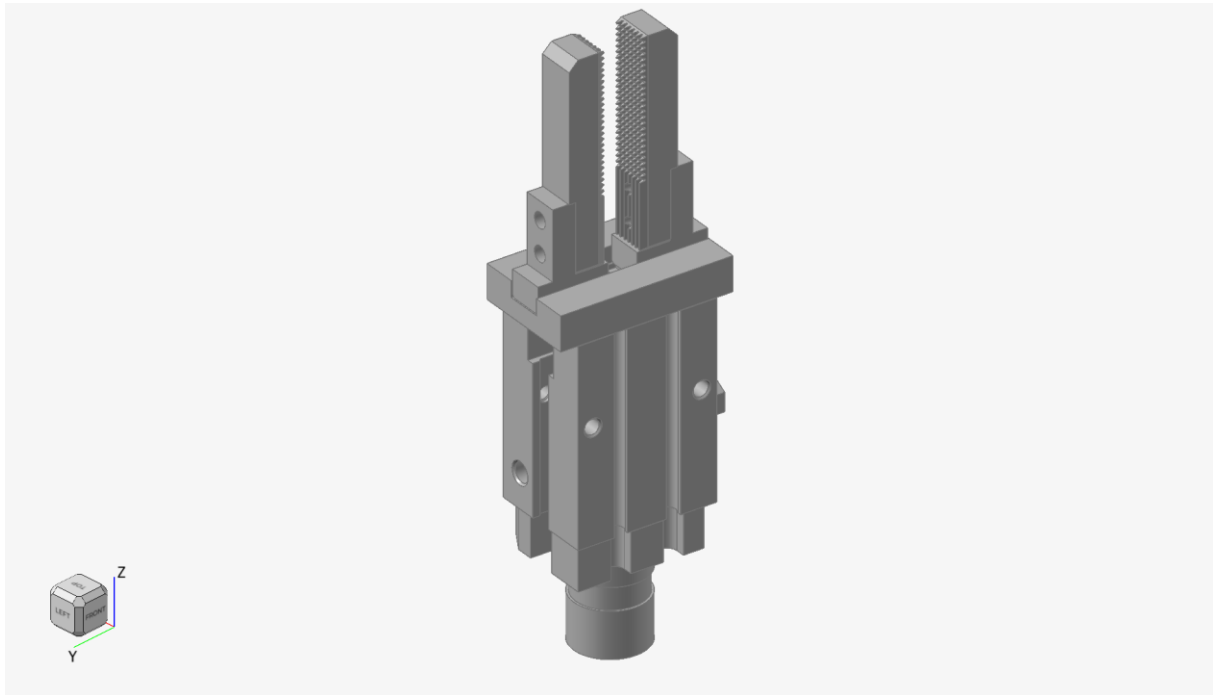
**FIGURA 16: PINZA Y12-02**

### 1.2.5 Supporto per afferraggio gate (Y12-02)

Per l'afferraggio dei canali di alimentazione viene adottata una soluzione ad hoc che assicura, grazie alla peculiare geometria della superficie di afferraggio, una presa efficace in tutte le condizioni operative (*Figura 16*). In *Figura 17* viene mostrato il montaggio sulle pinze pneumatiche *MHZ2-16S2M-M9NVM* ed è possibile notare come il montaggio di questi componenti aggiuntivi avvenga all'interno delle due dita dei gripper SMC,



ciascuna delle quali presenta due fori, grazie ai quali è possibile montare questa tipologia di supporti.



**FIGURA 17: MONTAGGIO Y12-02**

Vengono presentate di seguito le caratteristiche del componente in esame:

- Numero di componenti: 8
- Materiale: Acciaio S136
- Peso: 19 g
- Volume: 2.45 cm<sup>3</sup>

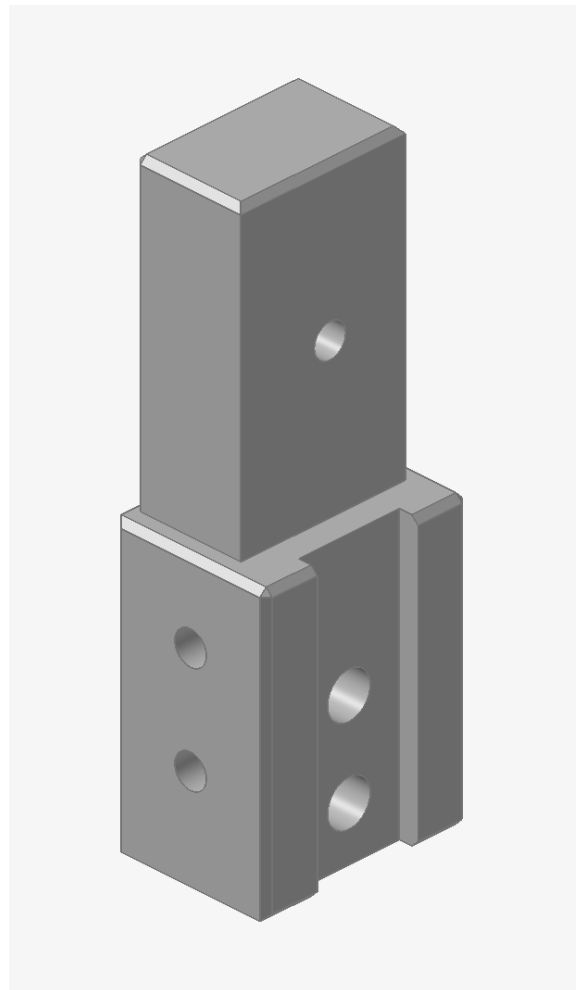
### 1.2.6 Supporto per alloggiamento Pad (Y12-03)

Il supporto in *Figura 18* consente di poter installare appositi pad per il sollevamento dei componenti prodotti per stampa ad iniezione, garantendo un solido collegamento con le dita presenti nella pinza pneumatica *MHZL2-16S-M9NVM*. Come nel caso dei supporti per il sollevamento dei canali di alimentazione, il collegamento tra le dita delle pinze pneumatiche e il componente *Y12-01* è garantito da due coppie di collegamenti bullone-dado che è possibile installare grazie alla presenza di opportuni fori nei componenti da accoppiare.

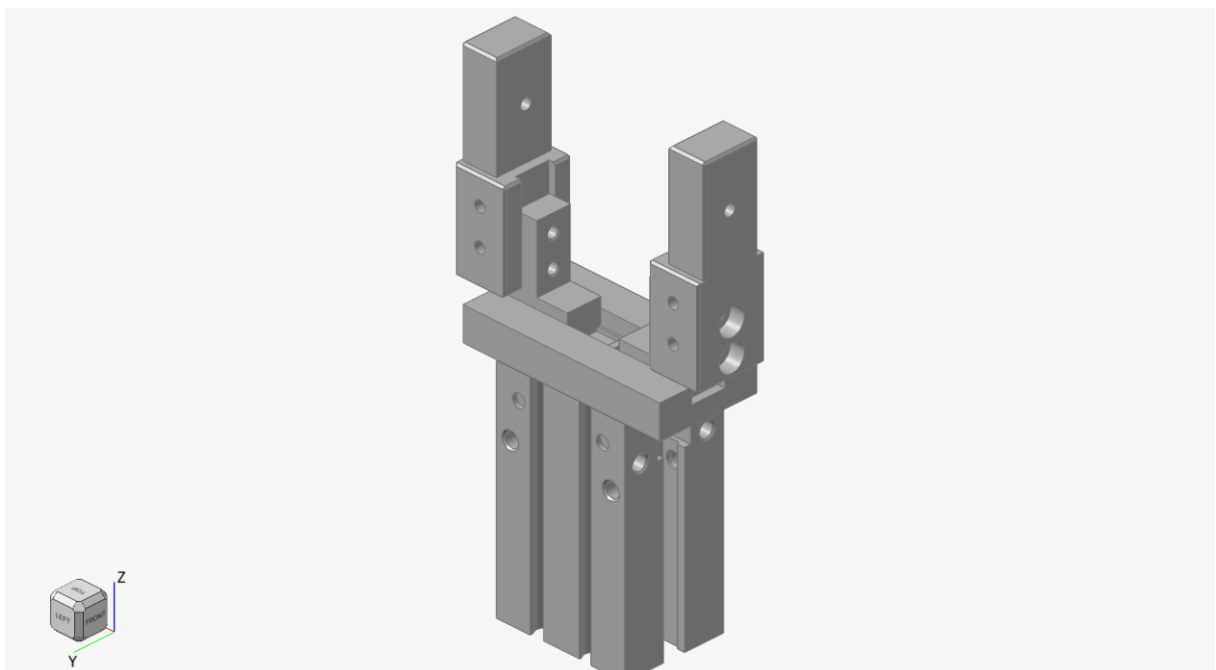
In *Figura 19* è mostrato il posizionamento rispetto alle dita del gripper, che, a differenza del caso precedente, avviene esternamente e non più internamente.

Nel seguito vengono illustrate le caratteristiche del pezzo:

- Numero di componenti: 16
- Materiale: Alluminio 6061-T6
- Peso: 15.8 g
- Volume: 5.86 cm<sup>3</sup>



**FIGURA 18: SUPPORTO *Y12-01***



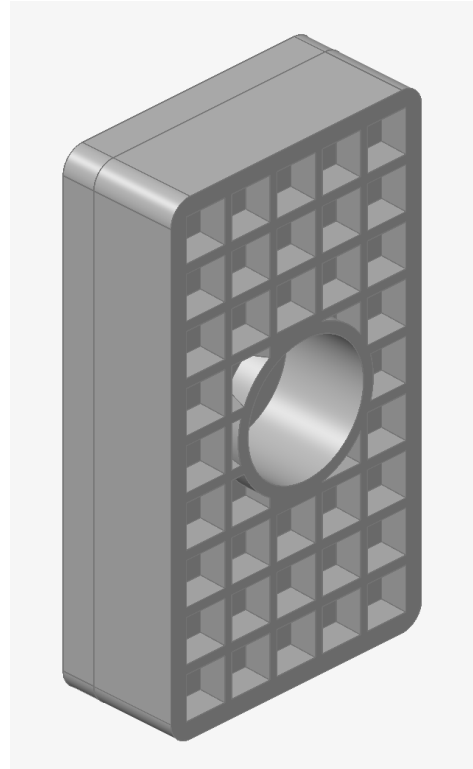
**FIGURA 19: POSIZIONAMENTO SUPPORTI SU GRIPPER**

### 1.2.7 Pad per l'afferraggio dei componenti prodotti (Eins by STAR Automation Europe, CPUM-01)

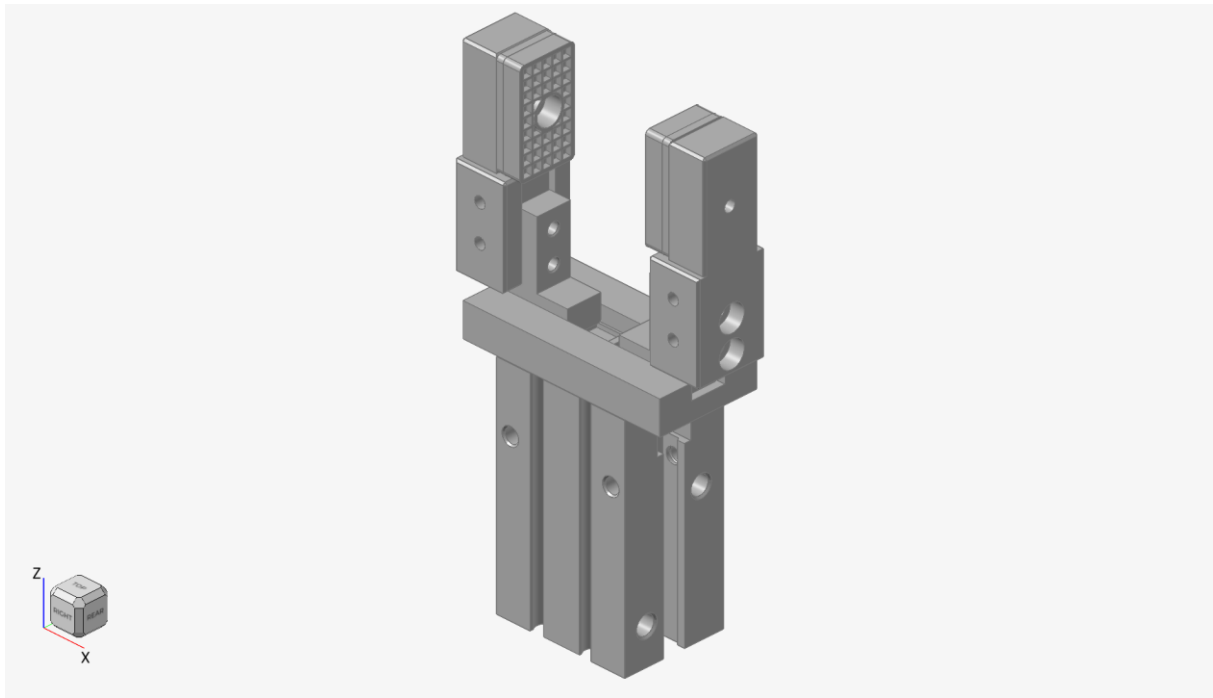
I pad per l'afferraggio dei componenti, prodotti da *Eins by STAR Automation Europe*, modello *CPUM-01*[13], vengono installati sui supporti visti al Paragrafo 1.1.5 ed hanno il compito di assicurare una presa efficace sui componenti stampati ad iniezione (*Figura 20*). La particolare geometria e il materiale polimerico consentono una presa sicura anche in presenza di superfici lisce. Il montaggio sul relativo supporto anche in questo caso avviene attraverso un collegamento bullone-dado (*Figura 20*).

Caratteristiche del componente:

- Numero di componenti: 16
- Materiale: Black Nitrile Rubber (NBR)
- Peso 5 g
- Volume: 1.41 cm<sup>3</sup>



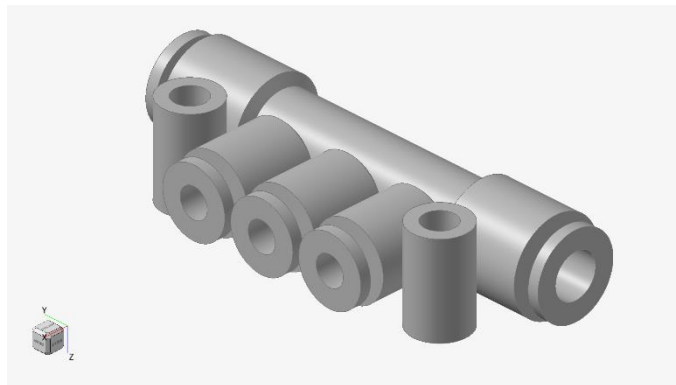
**FIGURA 20: PAD EINS CPUM-01**



**FIGURA 21: POSIZIONAMENTO PAD SUL GRIPPER**

### 1.2.8 Manifold SMC KM13-04-06-3

Nella parte superiore della piastra di supporto sono installati quattro manifold *SMC KM13-04-06-3* che hanno il compito di accogliere il condotto dell'aria compressa al fine di distribuirli per alimentare tutti i dodici gripper dell'assieme (*Figura 22*) [14].



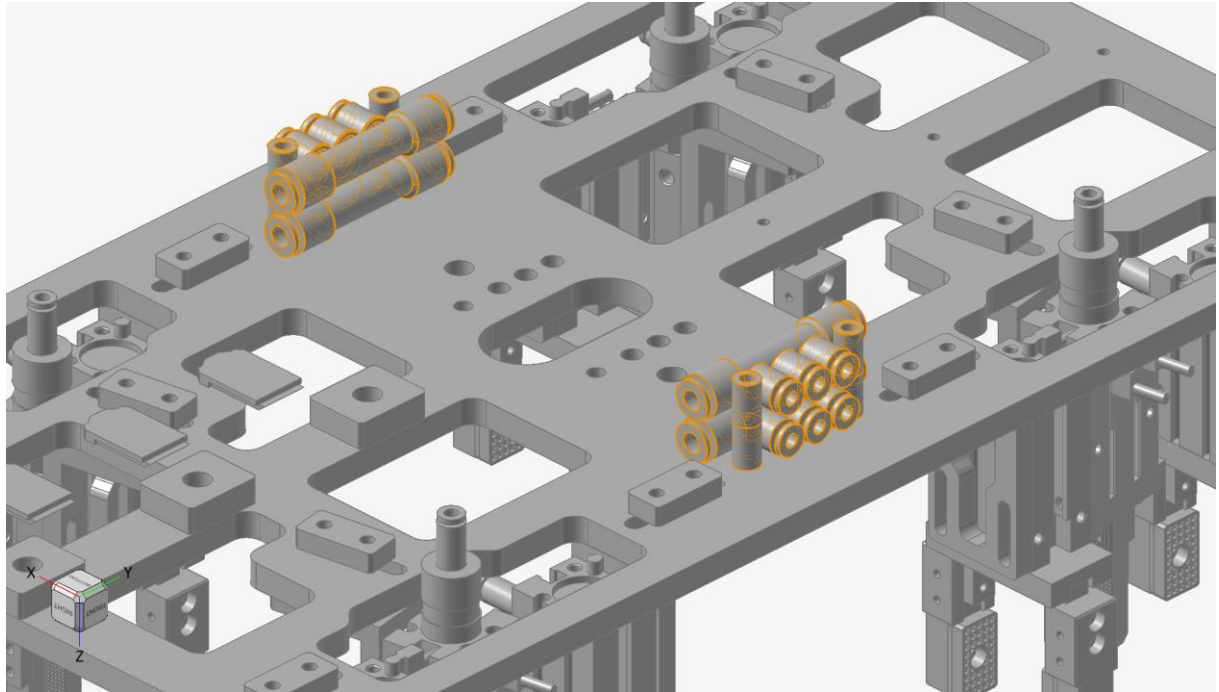
**FIGURA 22: MANIFOLD *SMC KM13-04-06-3***

La porta d'ingresso dell'aria compressa presenta un diametro di sei millimetri, mentre il diametro dei tre condotti di uscita è di quattro millimetri. Il collegamento alla piastra principale anche in questo caso è garantito da due coppie di accoppiamenti bullone-dado grazie ai supporti forati con asse verticale presenti sul componente (*Figura 22-23*)

Le caratteristiche di questo componente sono le seguenti:

- Numero di componenti: 4

- Materiale: PBT (PolyButylene Terephthalate)
- Peso: 11g
- Volume: 8,08 cm<sup>3</sup>



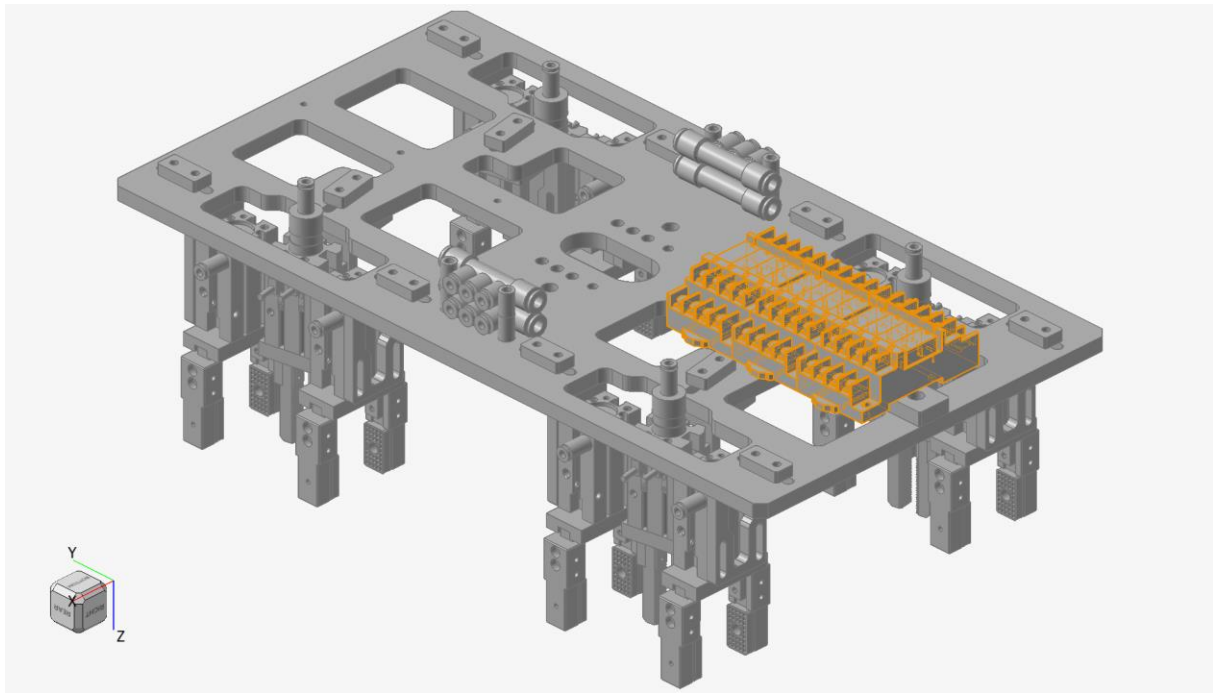
**FIGURA 23: POSIZIONAMENTO MANIFOLD SU PIASTRA**

### 1.2.9 Moduli relè OMRON G6B-4BND

Sono presenti nell'assieme di partenza tre moduli relè prodotti da *Omron*, modello *G6B-4BND*, ciascuno dei quali è equipaggiato con quattro relè *Omron G6B-1114-FD-US*, per un totale di dodici elementi (*Figura 24*)[15], [16]. Collegati al controller, i relè hanno il compito di alimentare in sicurezza le valvole pneumatiche che consentono di attivare o disattivare i gripper.



**FIGURA 24: RELÈ OMRON G6B-4BND**



**FIGURA 25: POSIZIONAMENTO RELÈ**

### 1.3 Considerazioni finali sull'assieme di partenza

Come è stato possibile osservare, l'assieme di partenza presenta un numero molto rilevante di componenti, che appesantiscono il braccio robotico. Nello specifico:

- Elementi da assemblare: 77
- Elementi di collegamento: 168

per un totale di duecentoquarantacinque elementi. Il peso totale dell'end-effector è di 3,73 kg al netto degli elementi di collegamento, è facile quindi immaginare che si raggiungano oltre 4 kg. Il peso della struttura è dunque rilevante soprattutto in relazione al peso esiguo degli elementi da movimentare, soli 35 g.

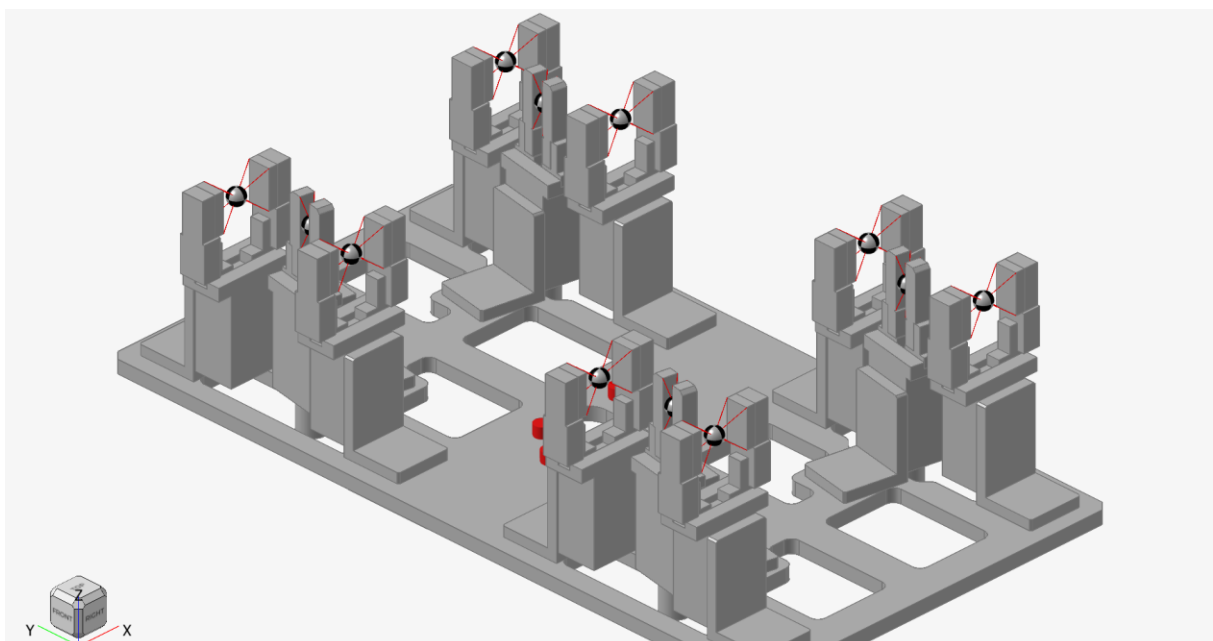
## 1.4 Simulazioni sull'assieme di partenza

In questa sezione vengono svolte alcune simulazioni utili per la caratterizzazione meccanica sull'assieme di partenza, in modo da descriverne i modi di vibrare e valutare la resistenza e le deformazioni sotto carico. Le analisi sono state svolte con il software *Altair Inspire 2025.1*, software dedicato alla progettazione meccanica e alle verifiche strutturali basate sul metodo agli elementi finiti. Il software integra, oltre alle analisi strutturali e modali grazie al solutore *OptiStruct*, anche la possibilità di svolgere l'ottimizzazione topologica del componente, il che lo rende particolarmente adatto alla progettazione per la fabbricazione additiva[17].

### 1.4.1 Semplificazioni geometriche

È importante, al fine di ridurre notevolmente l'onere computazionale, semplificare la geometria dell'assieme da esaminare. Risulterebbe, infatti, difficile giungere ad una soluzione esaminando la geometria originale a causa della presenza di pattern e peculiarità che rallenterebbero, o renderebbero perfino impossibile, la conclusione della stessa.

In *Figura 26* viene mostrato il complessivo con le semplificazioni adottate. Gli interventi hanno riguardato l'appiattimento di tutti i pattern degli elementi di presa di tutti i dodici gripper. Sono stati rimossi i manifold, gli spessori per il collegamento delle piastre ed i relè sulla parte

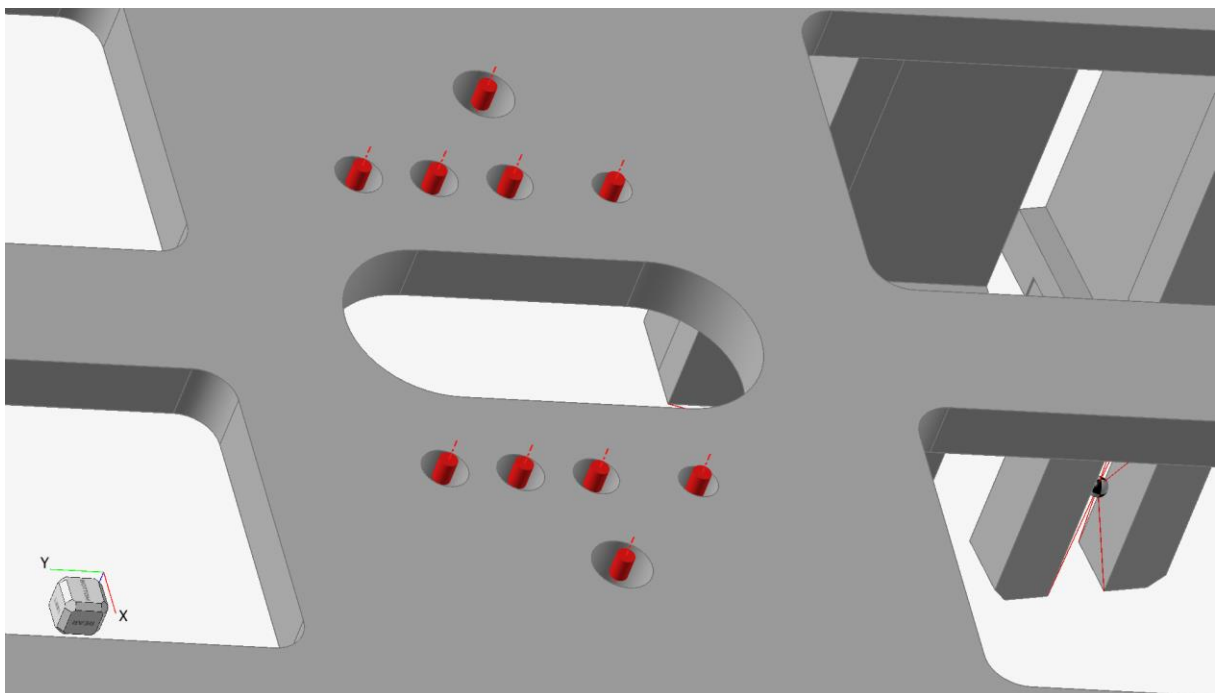


**FIGURA 26: SEMPLIFICAZIONI DELL'ASSIEME COMPLESSIVO**

superiore dell'assieme, in quanto si è ritenuto, grazie al loro peso molto contenuto, fossero elementi non particolarmente influenti sui risultati delle simulazioni. Inoltre sono stati sostituiti i collegamenti bullone-dado, unendoli in un unico corpo saldato, nei casi in cui il materiale dei componenti accoppiati risultava lo stesso (es. accoppiamento piastra-staffe). Sono stati previsti, invece, contatti superficiali saldati nei casi in cui era necessario garantire un collegamento solido tra i corpi, mantenendo la possibilità, tuttavia, di impostare un materiale differente tra i componenti a contatto. È il caso ad esempio del collegamento pad-supporto, dove i due materiali presentano caratteristiche molto differenti che rendono necessaria questa soluzione. Sono stati semplificati i fori e le guide di collegamento in cui erano inseriti gli elementi di collegamento ad eccezione dei fori per l'accoppiamento con il braccio robotico.

Non sono state fornite informazioni sulla geometria dei componenti da movimentare, che in questo contesto vengono considerati come masse concentrate, dal peso di 3 g per i pezzi prodotti e 2.75 g per i canali di alimentazione, applicate all'intero elemento di contatto (pad e supporto Y12-02).

Il collegamento con il braccio robotico avviene attraverso dieci fori passanti presenti nella parte centrale della piastra (Figura 27), mentre l'asola passante al centro è presumibilmente utilizzata per i collegamenti elettrici e/o il passaggio dei condotti dell'aria compressa.

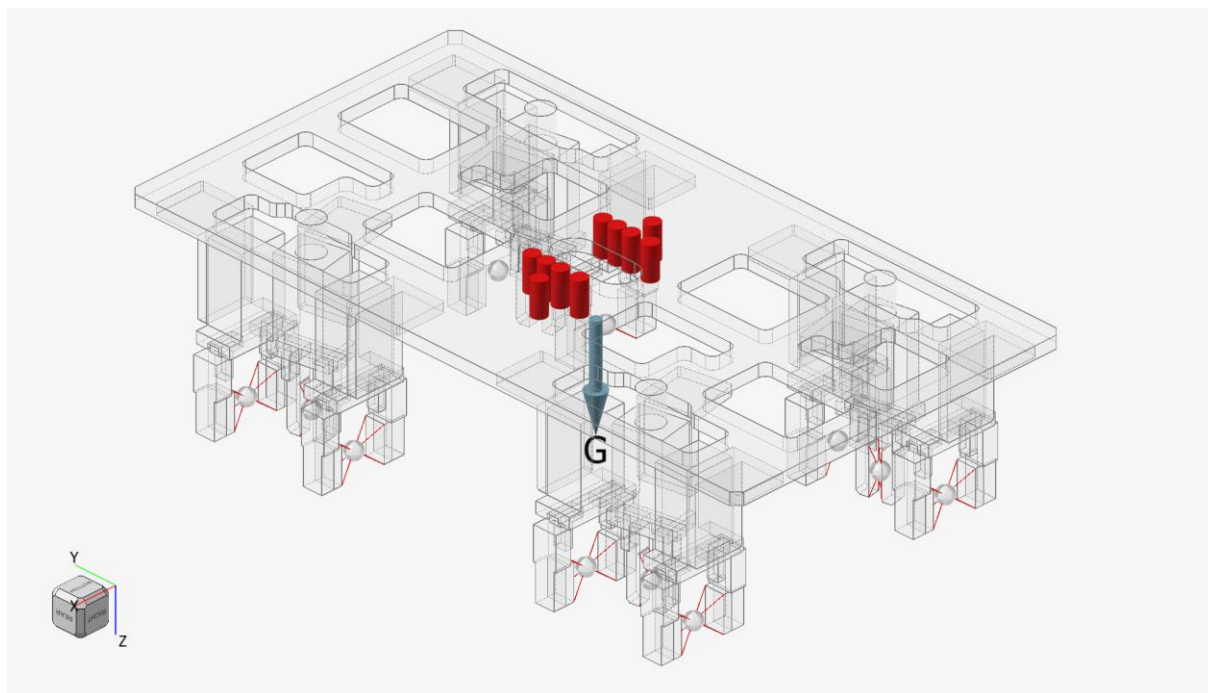


**FIGURA 27: FORI PER L'ACCOPIAMENTO PIASTRA - BRACCIO ROBOTICO**



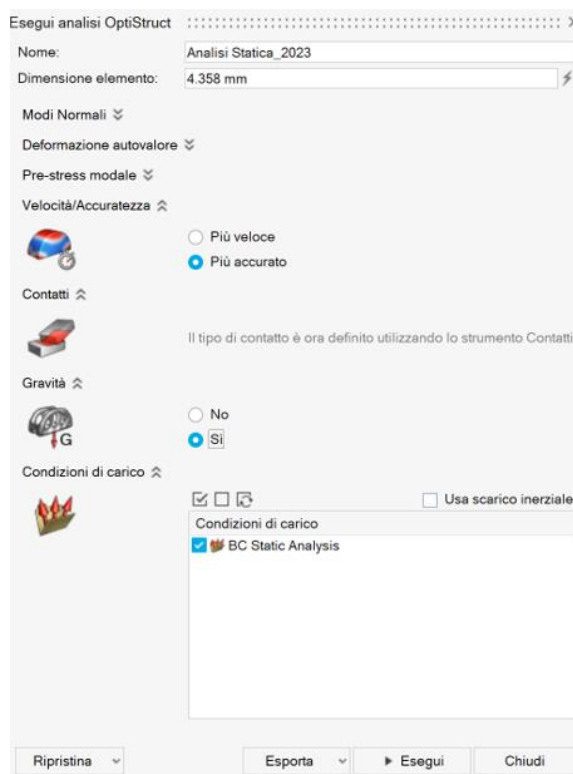
### 1.4.2 Analisi strutturale statica

Questa sezione è dedicata alla presentazione dei passaggi eseguiti per giungere alla soluzione della simulazione svolta sulla struttura, caricata dalla sola forza peso sugli elementi dell'assieme, in assenza quindi di forzanti esterne. In *Figura 28* viene esplicitata la direzione



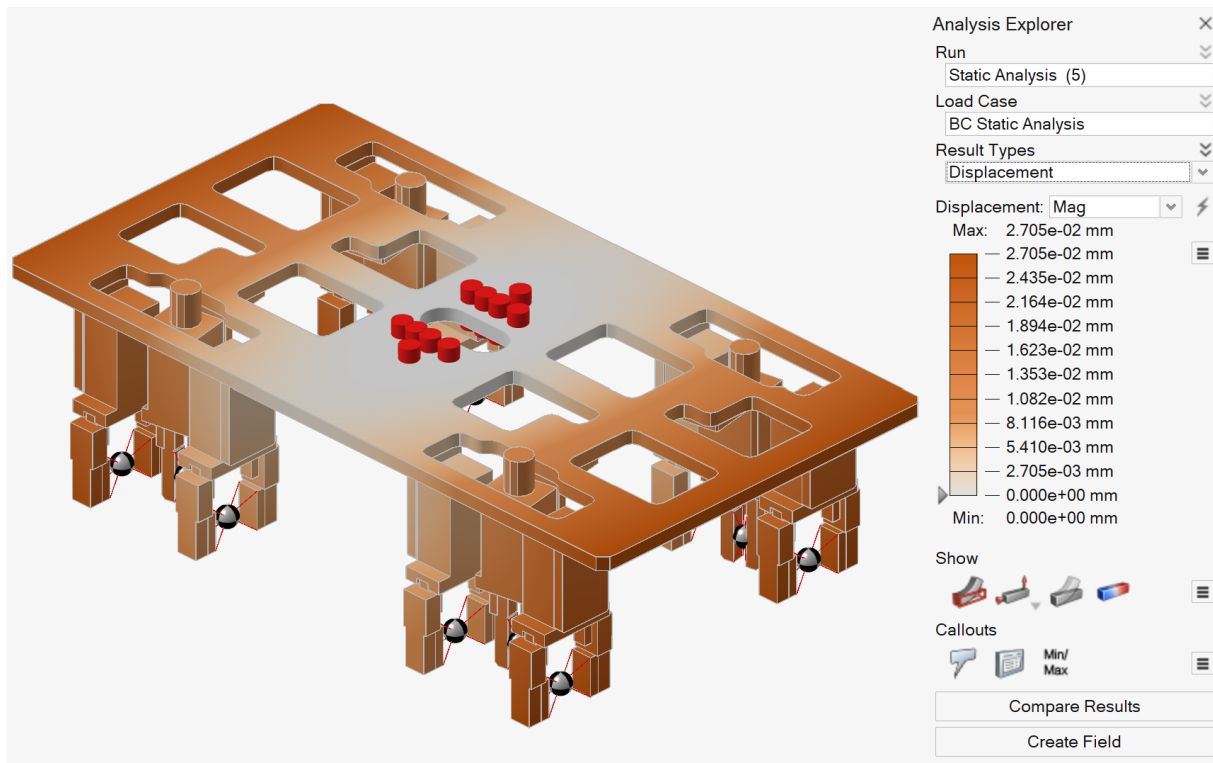
**FIGURA 28: DIREZIONE DI APPLICAZIONE DELL'ACCELERAZIONE GRAVITAZIONALE**

di applicazione dell'accelerazione gravitazionale. I vincoli imposti nelle condizioni di carico sono rappresentati dai dieci fori presenti sulla parte centrale della piastra, mentre l'unico carico imposto è quello relativo alla forza gravitazionale dei corpi. In *Figura 29* vengono esplicitate le impostazioni per l'esecuzione dell'analisi strutturale con *Optistruct*.



**FIGURA 29: PARAMETRI ANALISI STATICA**

In *Figura 30* viene mostrato il risultato dell'analisi in termini di spostamento. A fianco dell'animazione è presente la legenda che in relazione alla tonalità del colore, identifica un preciso valore di spostamento.

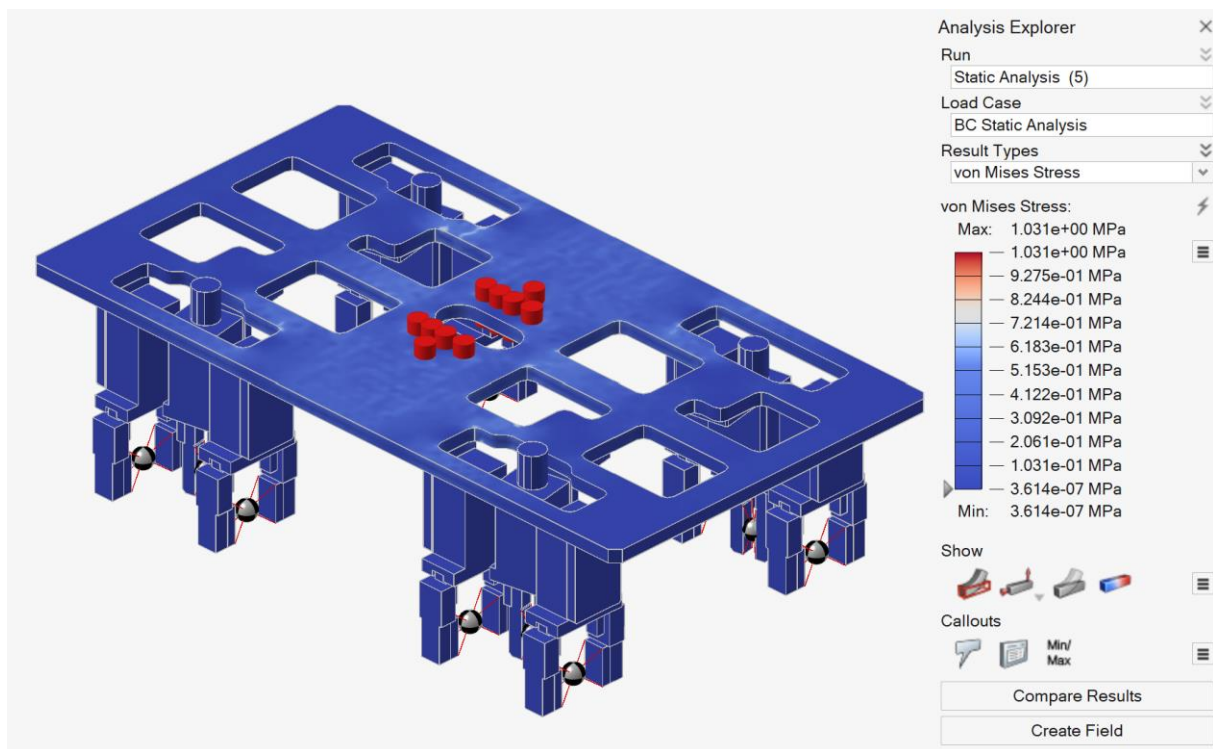


**FIGURA 30: GRAFICO DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI**

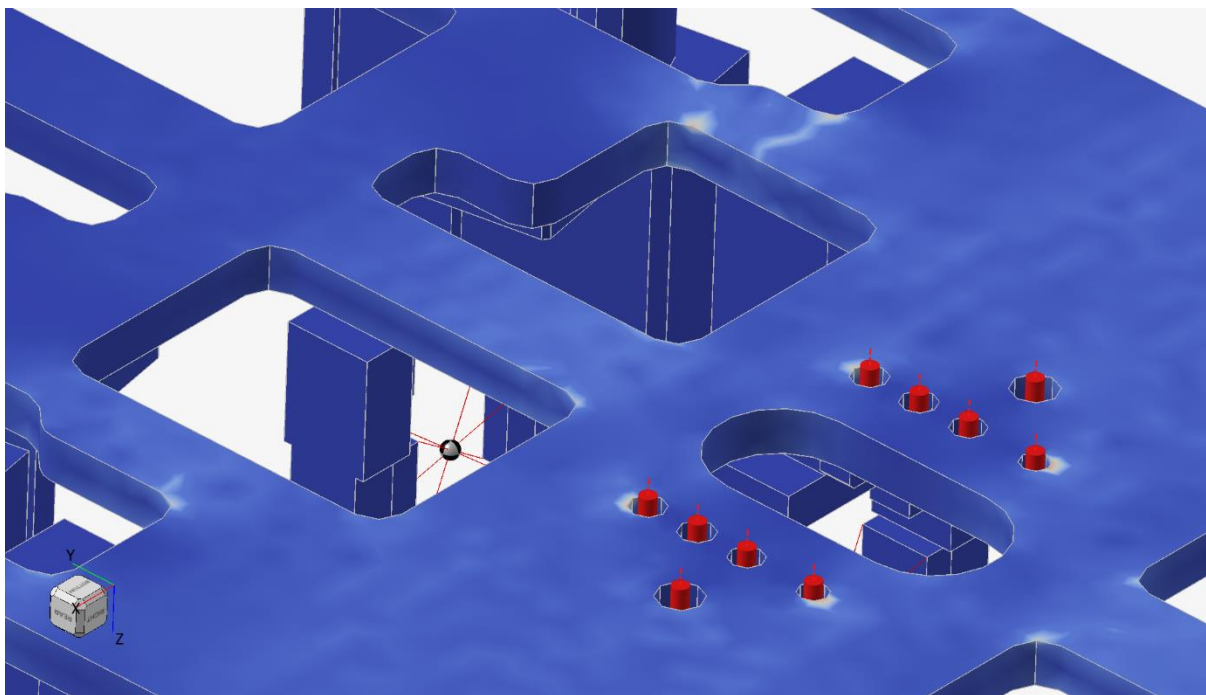
Com'era facilmente prevedibile la struttura non subisce deformazioni particolarmente elevate. Il valore massimo di deformazione locale, riscontrabile nei punti più periferici rispetto al punto di collegamento nella parte centrale con il braccio robotico, è di soli  $2.70 \cdot 10^{-2}$  mm.

In *Figura 31* sono rappresentati i valori di tensione equivalente secondo Von Mises.

Gran parte della struttura risulta stressata in modo esiguo in relazione alla resistenza dei materiali. Da segnalare che sulla piastra, nei punti in cui sono presenti geometrie come spigoli, raggi di raccordo ridotti o fori, sono presenti degli accumuli di tensione che portano la tensione locale di Von Mises fino ad un valore massimo di 1.031 MPa (*Figura 32*), valore comunque molto al di sotto della tensione a snervamento dell'alluminio 6061 che si attesta intorno ad 80 MPa per un alluminio ricotto, fino a raggiungere valori ben superiori se vengono eseguiti trattamenti superficiali. Considerando il valore di tensione di snervamento pari ad 80 MPa, otteniamo un valore di coefficiente di sicurezza pari a 77,6.



**FIGURA 31: DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI EQUIVALENTI DI VON MISES**

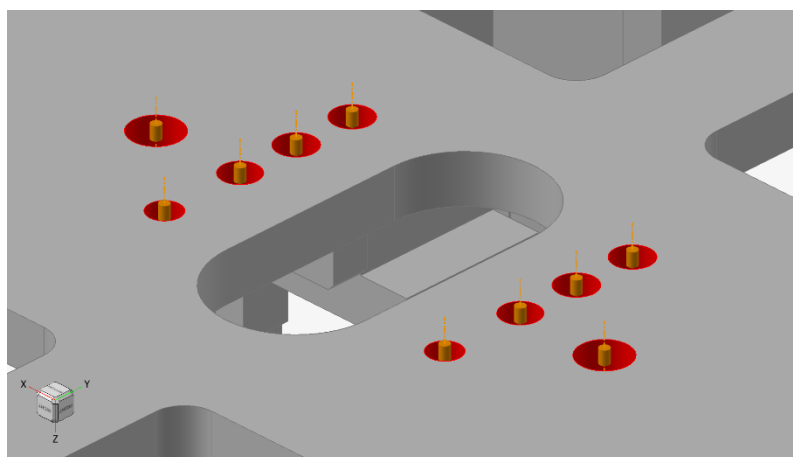


**FIGURA 32: LOCALIZZAZIONE CONCENTRAZIONI DI TENSIONE**

### 1.4.3 Analisi Modale

In questa sezione è svolta l'analisi modale della struttura per valutare i modi di vibrare dell'intero assieme.

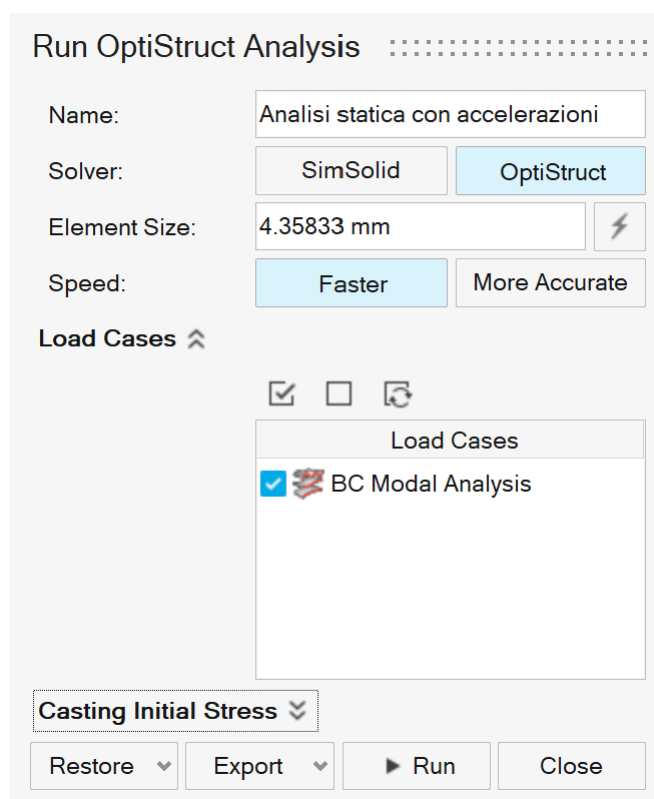
I vincoli imposti rimangono gli stessi rispetto alla precedente simulazione; dunque, localizzati nei dieci fori centrali (Figura 33).



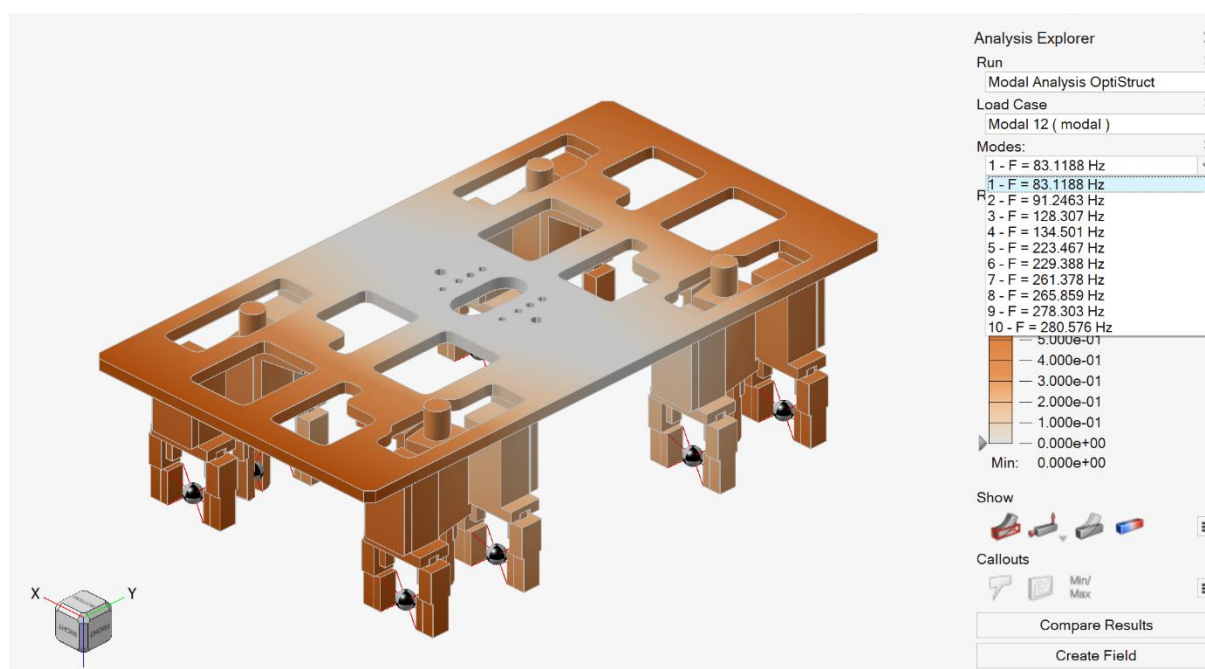
**FIGURA 33: POSIZIONAMENTO VINCOLI ANALISI MODALE**

In *Figura 34* sono mostrati i parametri impostati per l'esecuzione dell'analisi modale.

I risultati dell'analisi modale sono mostrati in *Figura 35*. Sul lato destro della figura, sono elencate le frequenze dei modi di vibrare della struttura calcolate dal solutore, questo consente di rilevare come la frequenza delle vibrazioni è abbastanza distante dal valore della frequenza del braccio robotico, che possiamo considerare intorno nell'intorno di 1-2 Hz.

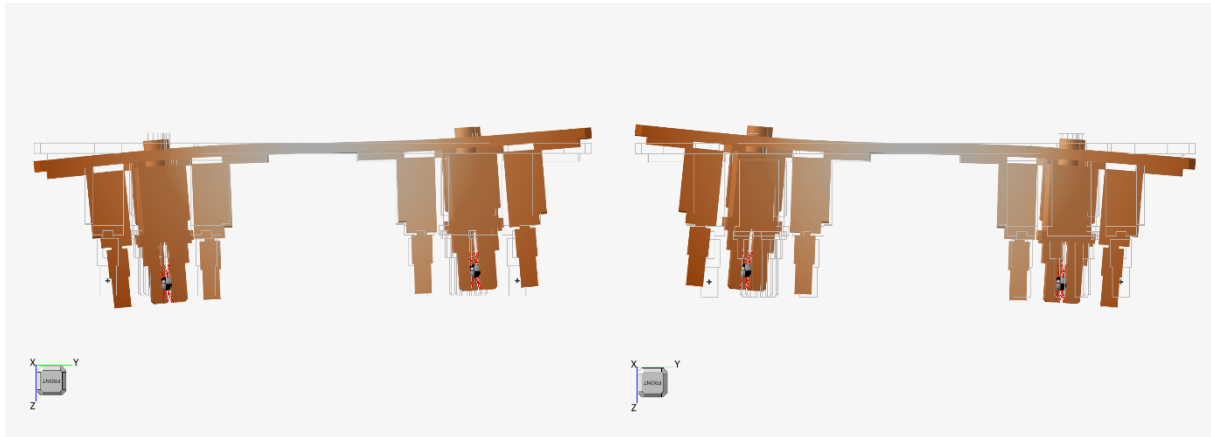


**FIGURA 34: PARAMETRI ANALISI MODALE**



**FIGURA 35: RISULTATI ANALISI MODALE E FREQUENZE DI VIBRAZIONE**

In *Figura 36-37* viene mostrato il movimento della struttura nei due modi di vibrare a frequenza più bassa (83.1188 Hz e 91.2463 Hz).



**FIGURA 36: MODO DI VIBRARE 83.1188 Hz**

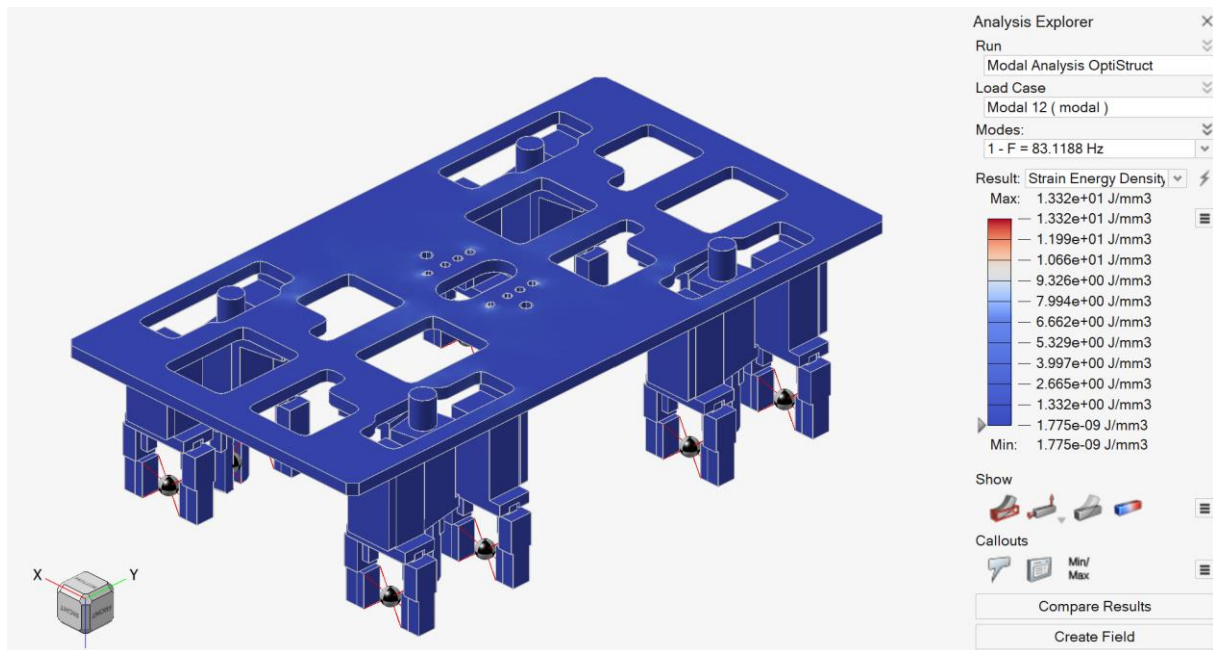


**FIGURA 37: MODO DI VIBRARE 91.2463 Hz**

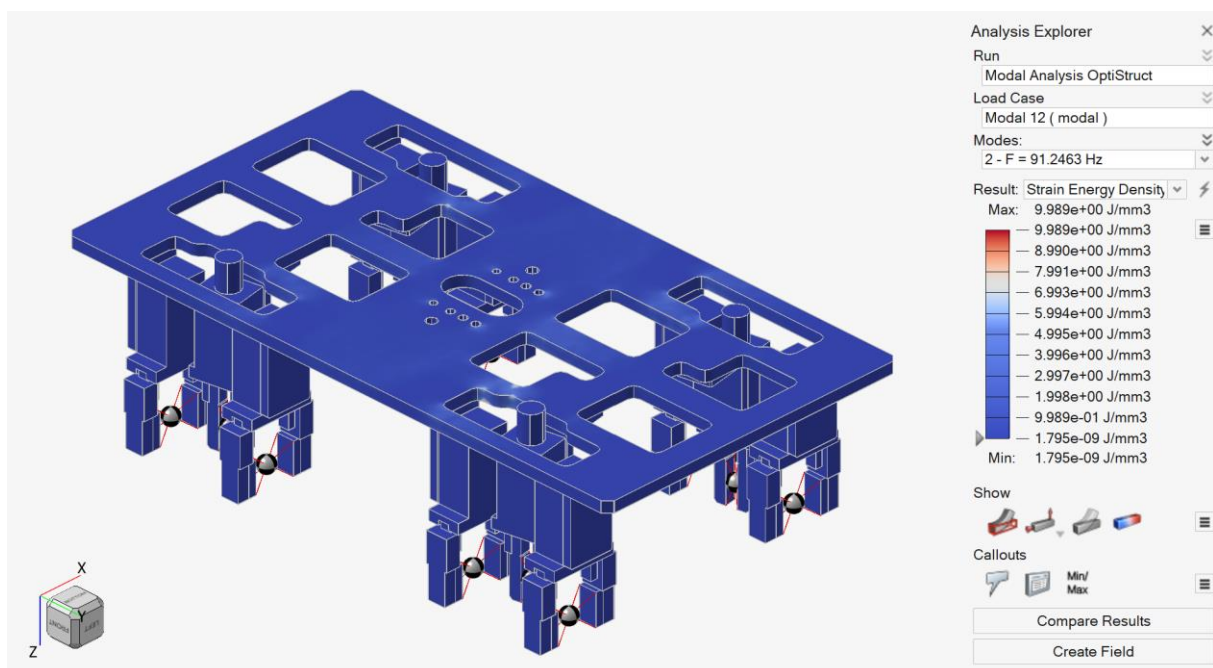
I risultati in *Figura 38-39* mostrano invece la distribuzione della densità di energia elastica immagazzinata dal materiale durante la deformazione per le due frequenze considerate



precedentemente.



**FIGURA 38: STRAIN ENERGY DENSITY PER FREQUENZA 83.1188 Hz**

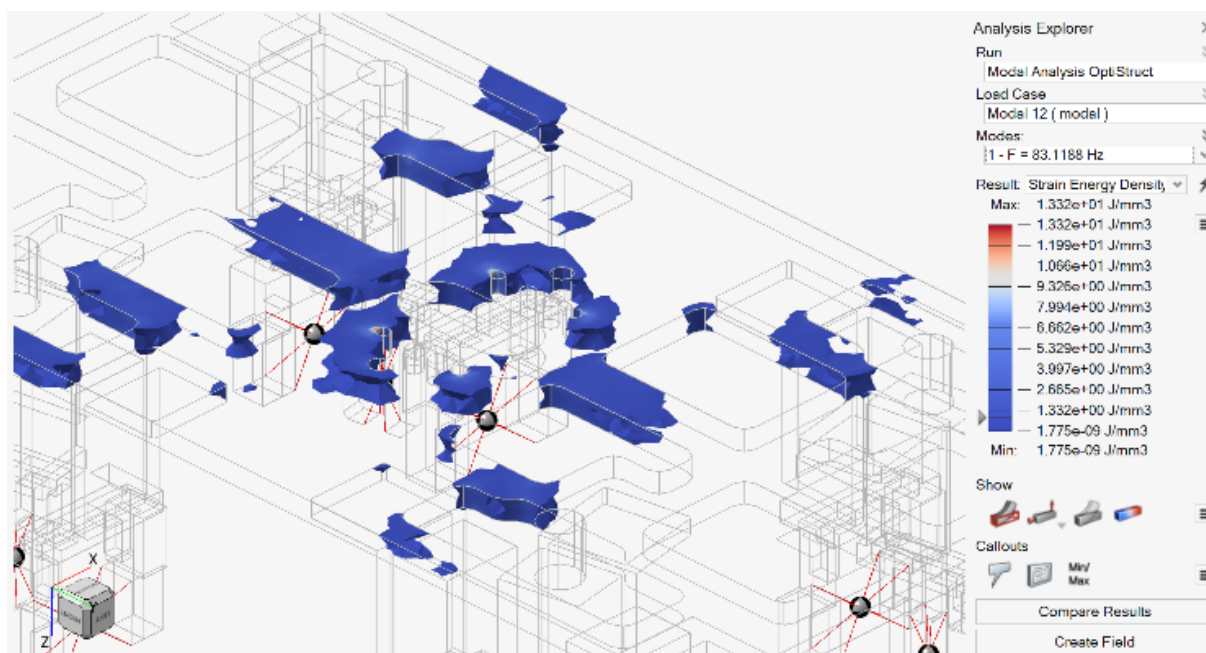


**FIGURA 39: STRAIN ENERGY DENSITY PER FREQUENZA 91.2463 Hz**

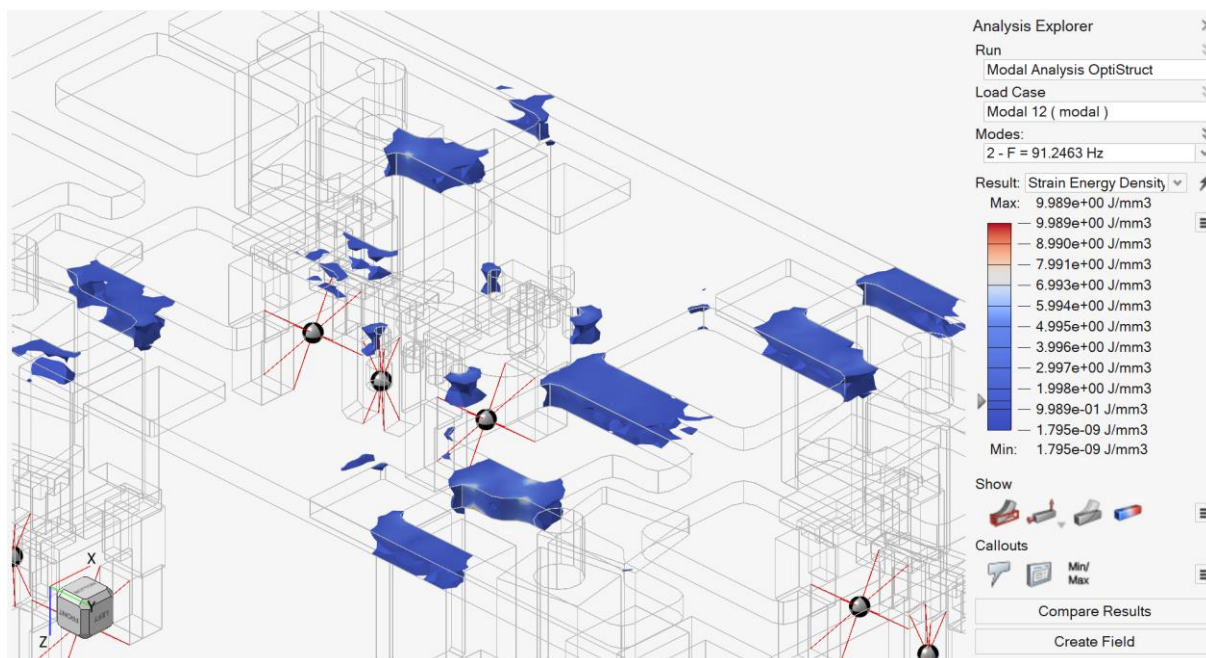
Nel contesto dell'analisi modale, la densità di energia elastica immagazzinata consente di individuare le regioni della struttura maggiormente coinvolte nei modi di vibrare che nel caso



specifico sono rappresentati: dal collegamento della piastra con il braccio robotico e dai settori in cui la sezione longitudinale della piastra si riduce notevolmente.



**FIGURA 40: ZONE CON PIÙ ALTO VALORE DI STRAIN ENERGY DENSITY PER 83.1188 Hz**



**FIGURA 41: ZONE CON PIÙ ALTO VALORE DI STRAIN ENERGY DENSITY 91.2463 Hz**

## 2 Redesign

### 2.1 Introduzione al redesign

L'elevato numero di componenti dell'attuale end-effector ed il peso molto rilevante in relazione al peso dei pezzi stampati da movimentare, giustificano la necessità di alleggerire la struttura e di ridurre in modo significativo il numero di componenti.

L'idea di partenza è quella di sfruttare i principi del *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* con l'obiettivo di proporre una soluzione di end-effector pensata per la produzione attraverso tecnologie additive, come ad esempio la soluzione proposta da *HP Multi Jet Fusion (MJF)* [18]. Inoltre, grazie alla possibilità di svolgere sul software *Altair Inspire 2025.1* l'ottimizzazione topologica è possibile ridurre notevolmente la massa della struttura portante, massimizzando la rigidità del componente.

La letteratura recente sugli end-effector industriali evidenzia come le complesse geometrie ottenibili tramite le tecnologie additive consentano una significativa evoluzione nella progettazione di sistemi di presa robotici[19] [20].

Rappresenta, dunque, un ruolo cruciale nel redesign la capacità di sfruttare appieno le libertà geometriche della fabbricazione additiva per integrare più funzioni ed eliminare parti di materiale che risultano superflue riducendo così gli ingombri. Le metodologie DfAM proposte in letteratura forniscono linee guida utili per la riprogettazione di componenti tradizionali in strutture ottimizzate per la produzione additiva con particolare attenzione all'ottimizzazione della distribuzione delle masse e all'eliminazione di materiale superfluo [21].

La scelta del processo *MJF* (Figura 42) è giustificata dal fatto che questa tecnologia consente di produrre componenti polimerici ad elevata densità e con ottima stabilità dimensionale[22]. Diversi studi mostrano come la tecnologia di *HP* fornisca prestazioni superiori rispetto



**FIGURA 42: HP MULTI JET FUSION (MJF)**

**FONTE: 3DNATIVES.COM [21]**

ad altre tecnologie additive per materiali polimerici come il *Selective Laser Sintering (SLS)* in termini di resistenza, precisione e ripetibilità, rendendolo particolarmente adatto ad applicazioni come la produzione dell'intero end-effector in esame [23]. Inoltre, sono stati svolti studi che evidenziano come la correlazione tra parametri di processo e proprietà del PA12 - uno dei materiali più adottati per la produzione mediante *MJF* - permetta una progettazione più predittiva e orientata alle prestazioni finali del componente [24].

Il PA12 risulta inoltre adatto alla produzione di parti che coniughino un peso ridotto ad ottime prestazioni meccaniche, studi specifici sulla caratterizzazione di questo particolare polimero, infatti, hanno evidenziato ottima resistenza alla frattura, ottima tenacità e un comportamento stabile sotto sollecitazioni dinamiche [25]. Sono state, inoltre, studiate delle soluzioni di rinforzo con fibre aramidiche che possono ulteriormente migliorare le prestazioni meccaniche del materiale[26].

La possibilità di creare geometrie complesse riducendo significativamente il peso mantenendo inalterate le performance meccaniche in termini di rigidità[27], la necessità di studiare una soluzione che consenta di ridurre drasticamente il numero di componenti in gioco e di semplificare l'intero assieme, hanno portato allo sviluppo di una proposta di end-effector con gripper passivi integrati, che sfruttano il solo movimento del braccio robotico per afferrare e rilasciare i componenti da movimentare. È possibile suddividere lo sviluppo della soluzione alternativa di end-effector in due fasi: progettazione dei gripper e redesign della struttura principale sfruttando l'ottimizzazione topologica.

Il design del nuovo gripper nasce dall'idea di sfruttare il semplice meccanismo che presenta il cavatappi in *Figura 43*, il cui cinematismo prevede un corpo centrale, vincolato cilindricamente al telaio (consente traslazione lungo z e rotazione attorno allo stesso asse), accoppiato, grazie alla dentatura presente su di esso, a due bracci laterali che ruotano rispetto ad un riferimento perpendicolare all'asse z. Si vuole dunque progettare un corpo centrale che,

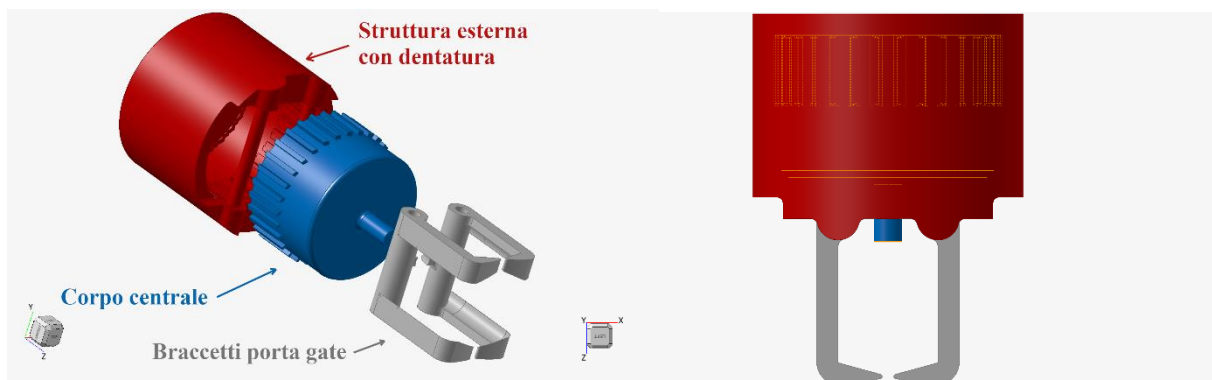


**FIGURA 43: CAVATAPPI CON BRACCETTI**

in assenza di forze esterne sia spinto dalla forza peso a posizionarsi al fine corsa inferiore, quindi con i braccetti in configurazione aperta.

Il solo posizionamento del robot cartesiano nella posizione originale di afferraggio degli elementi da movimentare, fa sì che il corpo centrale trasli verticalmente avvolgendo lateralmente con i braccetti il componente. A questo punto risulta fondamentale progettare un sistema in cui con il primo movimento di discesa e risalita vengano chiusi e bloccati in posizione di afferraggio i braccetti e con un secondo movimento di discesa e risalita vengano riaperti, rilasciando i componenti nella posizione desiderata. Viene quindi progettato un meccanismo simile a quello presente nelle comuni penne a scatto, che prevede l'alternanza di due posizioni stabili, consentite, nel caso della penna a scatto dalla rotazione di un cricchetto. Nel caso in esame si ha, tuttavia, la necessità di ridurre al minimo i componenti da produrre, evitando elementi come molle o elementi aggiuntivi che aumenterebbero il numero di componenti e che comporterebbero la necessità di installazione successiva allo stampaggio. Nei successivi capitoli verranno illustrati i passaggi che hanno portato alla creazione design di due tipologie di gripper, uno per la movimentazione dei canali di alimentazione e uno per la movimentazione dei componenti, rappresentati in *Figura 44-45*, dove sul lato sinistro è rappresentato l'esploso mentre, sulla destra, il gripper assemblato. Su entrambi i gripper possiamo distinguere quattro elementi:

- Struttura esterna con dentatura interna (in rosso in *Figura 44-45*)
- Corpo cilindrico centrale (in blu in *Figura 44-45*), che, come si vedrà nel seguito, potrà ruotare e traslare verticalmente rispetto al proprio asse
- Due braccetti laterali (in grigio in *Figura 44-45*) a cui sarà consentito di ruotare attorno al supporto della struttura estera, appositamente creato per l'alloggiamento degli stessi



**FIGURA 44: REDESIGN GRIPPER PER LA MOVIMENTAZIONE DEI COMPONENTI**



**FIGURA 45: REDESIGN GRIPPER PER LA MOVIMENTAZIONE DEI CANALI DI ALIMENTAZIONE**

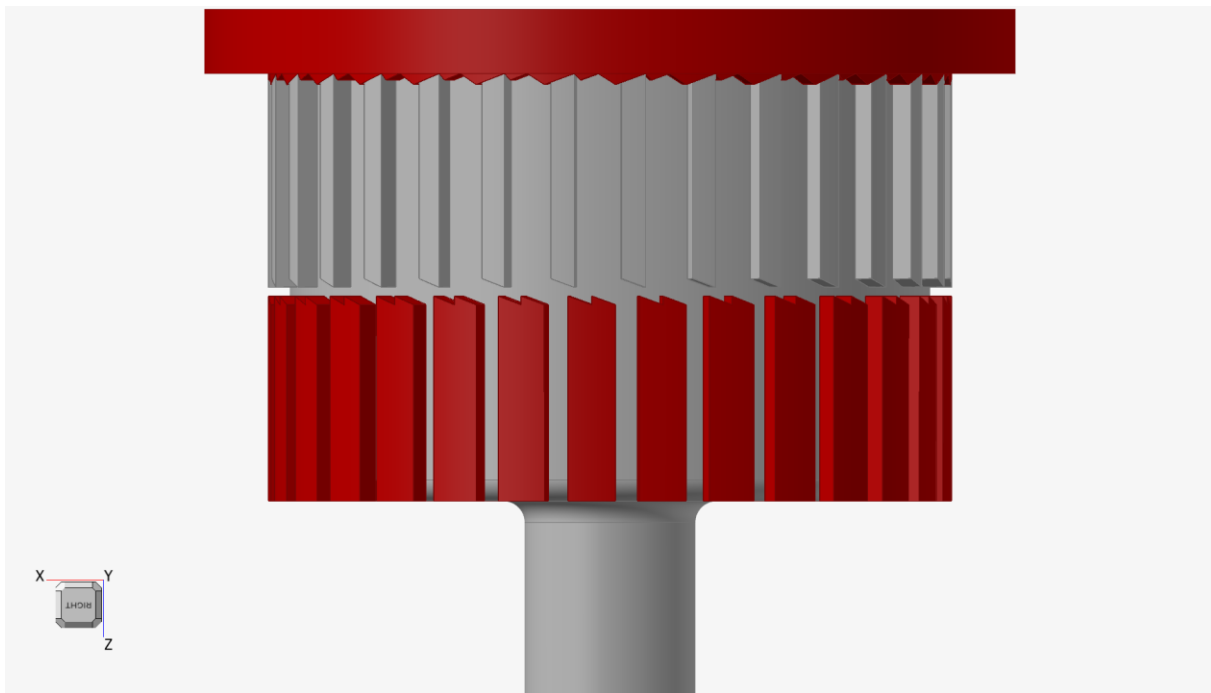
## 2.2 Meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio

Il meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio rappresenta il sistema su cui si basa il funzionamento dell'intero gripper. I parametri geometrici scelti in fase di progettazione di questo cinematismo, infatti, influenzano in modo rilevante le prestazioni di afferraggio e rilascio degli oggetti da movimentare.

Dalla *Figura 46* possiamo distinguere due elementi fondamentali:

- Dentatura sulla struttura (in rosso): insieme alla copertura esterna (in figura non presente per rendere leggibile il disegno) fa parte del telaio dell'end-effector

- Corpo centrale con dentatura superiore



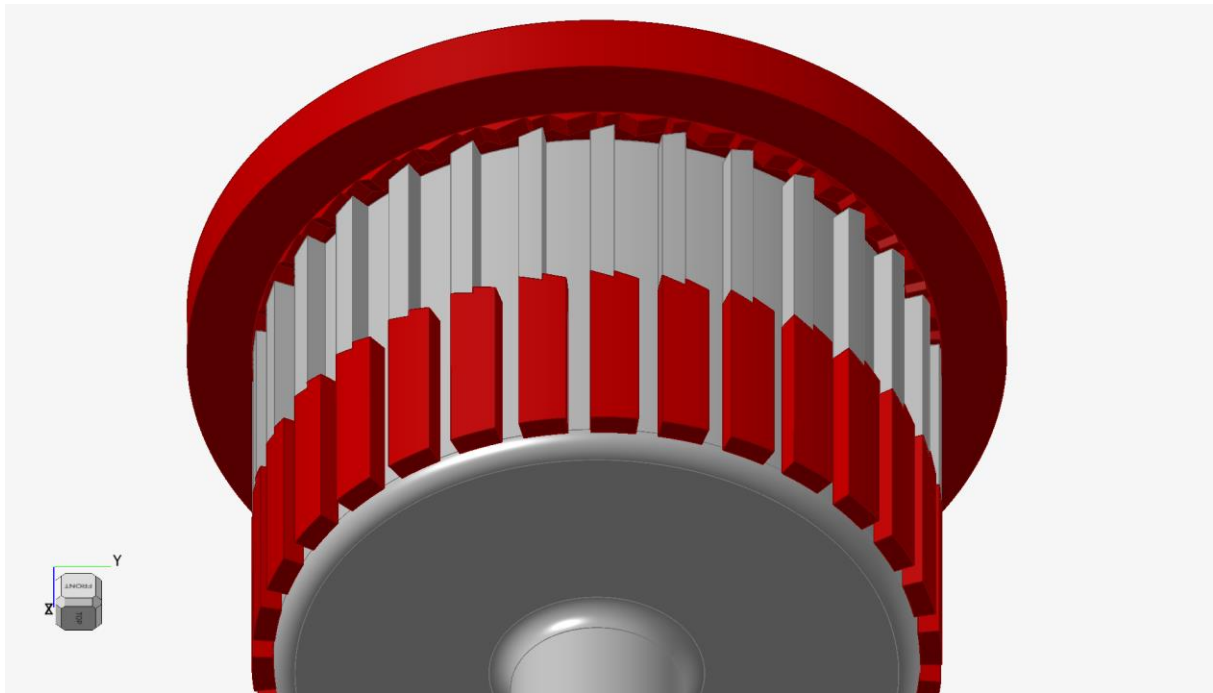
**FIGURA 46: ELEMENTI DEL MECCANISMO**

Nel seguito verrà mostrato il funzionamento del meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio.

### 2.2.1 Funzionamento del cinematismo

L'elemento su cui si basa il funzionamento del meccanismo è il rappresentato dal corpo cilindrico centrale che grazie, alla possibilità di ruotare attorno all'asse di simmetria e traslare lungo lo stesso asse, consente di passare facilmente da una configurazione stabile in cui il cilindro è vincolato alla struttura esterna, ad un'altra in cui invece è libero di traslare lungo l'asse z. Sulla superficie laterale superiore del cilindro è presente una peculiare dentatura che, accoppiata ad un'altra specifica dentatura presente nella struttura esterna, consentirà il bloccaggio e lo sbloccaggio del cinematismo (*Figura 47*).





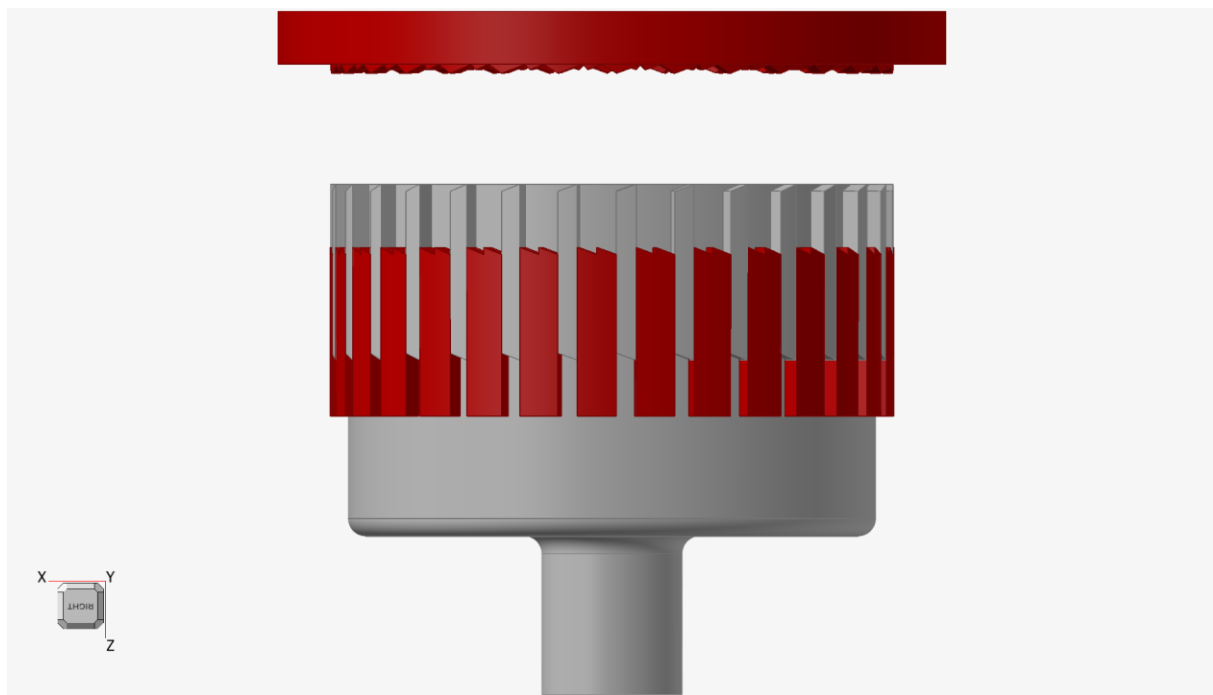
**FIGURA 47: ELEMENTI PER IL FUNZIONAMENTO DEL MECCANISMO DI BLOCCAGGIO-SBLOCCAGGIO**

È possibile quindi nel movimento del corpo cilindrico centrale quattro fasi:

- Fase 1: Meccanismo sbloccato
- Fase 2: Sollevamento con rotazione
- Fase 3: Rilascio con rotazione e bloccaggio
- Fase 4: Sollevamento con rotazione

### **Fase 1 – Meccanismo sbloccato**

Il corpo cilindrico si trova libero di poter traslare in direzione parallela al suo asse, grazie al fatto che la dentatura presente sulla superficie laterale si innesta nei binari creati dalla distanza presente tra un elemento e quello adiacente della dentatura della superficie esterna (*Figura 47*). Il punto di fine corsa inferiore sarà esplicitato nei capitoli successivi quando verranno introdotti i braccetti di presa.

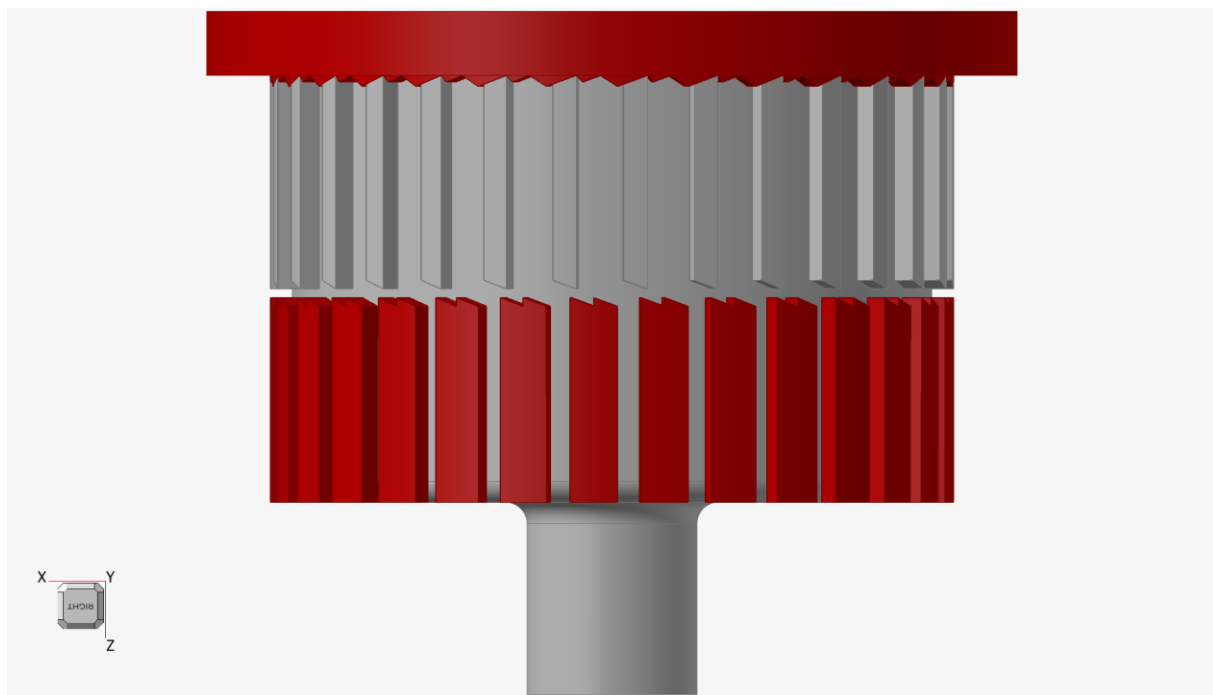


**FIGURA 48: FASE 1 - CILINDRO LIBERO DI TRASLARE**

### **Fase 2 – Sollevamento con rotazione**

Il corpo centrale viene spinto, grazie all'applicazione di una forza esterna diretta verso l'alto che, come si vedrà in seguito, sarà garantita dall'azionamento del braccio robotico. Subito dopo aver sfilato la dentatura dai “binari” in cui è libero di traslare, la dentatura presente sul cilindro è forzata a scivolare lungo il fianco della dentatura superiore della struttura. In questo modo, il corpo centrale è obbligato a ruotare innestandosi nel fine corsa superiore in *Figura 49*.

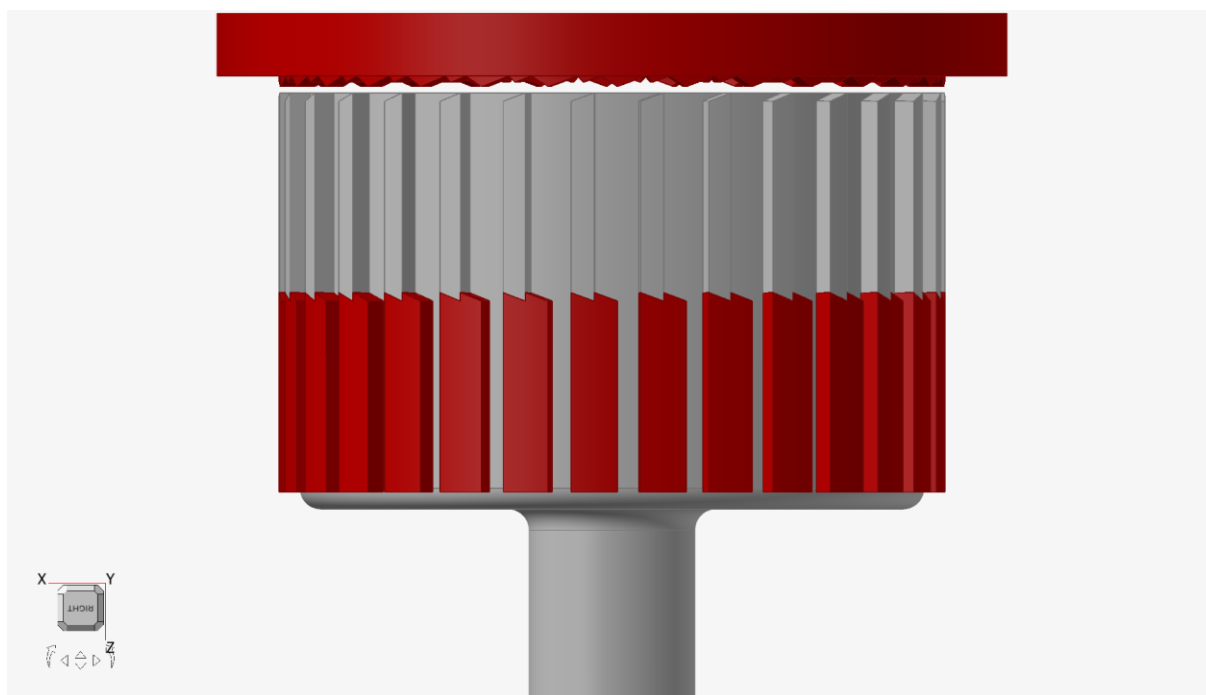




**FIGURA 49: FASE 2 – SOLLEVAMENTO CON ROTAZIONE**

### **Fase 3 – Rilascio con rotazione e bloccaggio**

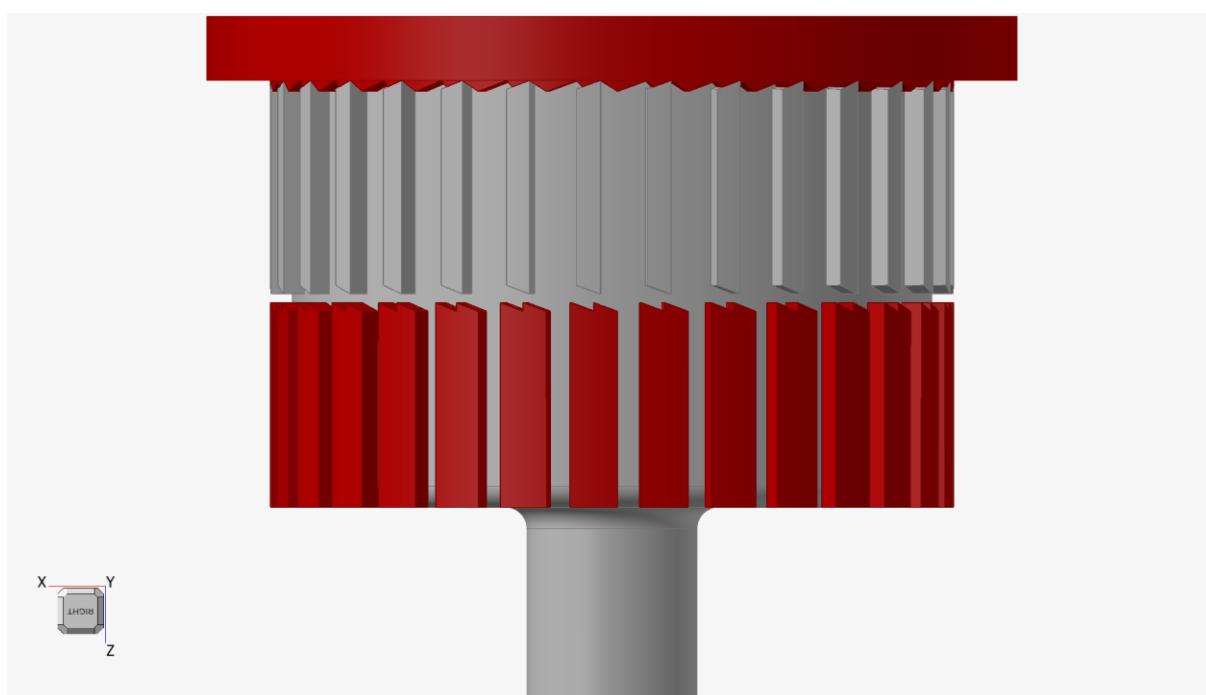
Dalla posizione in Figura 49, viene rimossa l'applicazione della forza esterna, ciò implica che il corpo centrale è nuovamente spinto verso il basso dalla forza peso. Una volta che la dentatura inferiore entra in contatto con la dentatura della struttura, il cilindro è forzato nuovamente a ruotare in senso orario, innestandosi nel gradino creato dalla geometria della dentatura in *Figura 50* in rosso.



**FIGURA 50: FASE 3 - RILASCIO CON ROTAZIONE E BLOCCAGGIO**

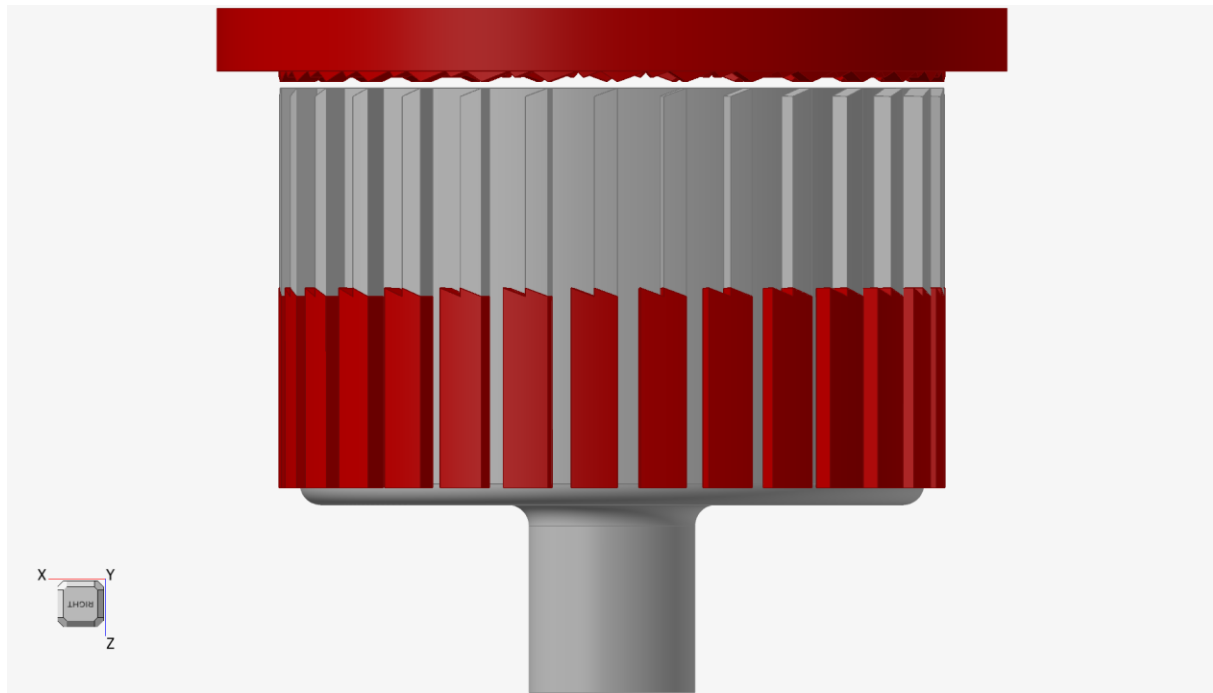
#### **Fase 4 – Sollevamento con rotazione**

A questo punto, con l'applicazione nuovamente di una forza esterna, che spinga il cilindro verso l'alto, anche stavolta, incontrando la dentatura superiore della struttura, il corpo è obbligato a scivolare lungo il fianco incastrandosi al fine corsa superiore (*Figura 51*).



**FIGURA 51: FASE 4 – SOLLEVAMENTO CON ROTAZIONE**

A questo punto, eliminando la forza esterna, il cilindro viene spinto dalla forza peso a scivolare lungo il fianco della dentatura inferiore (Figura 52). In questo modo i denti vengono guidati dalla geometria ad innestarsi nel binario in cui si troverà libero di traslare.



**FIGURA 52: TRANSIZIONE FASE 4-1**

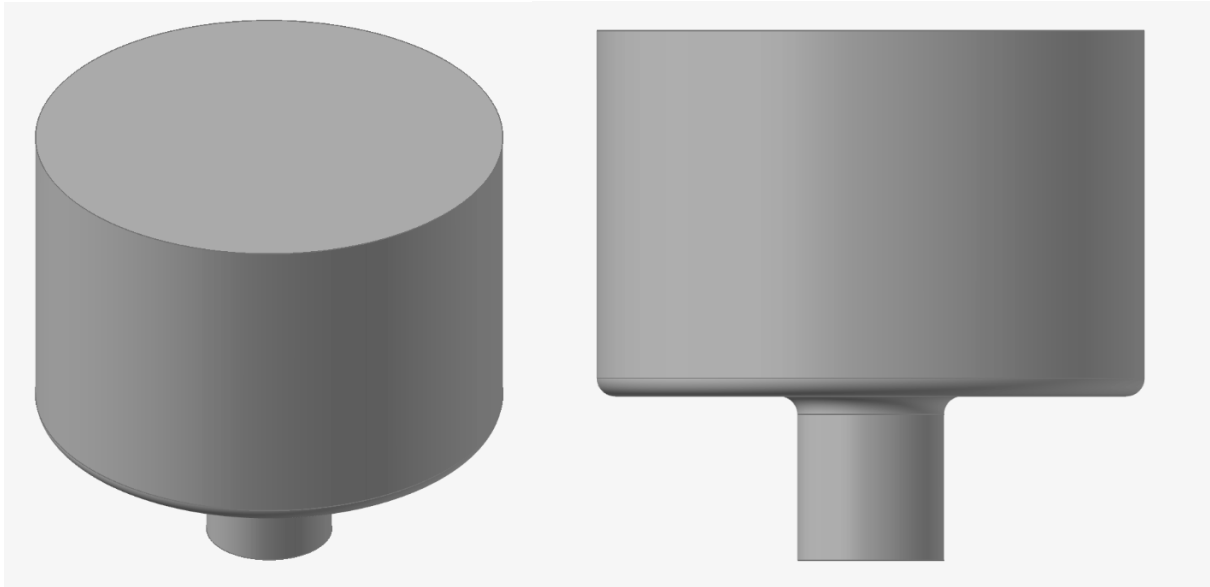
### 2.2.2 Geometria corpo centrale – struttura esterna

Il corpo centrale, all'interno del cinematismo, ricopre un ruolo cruciale per il funzionamento. Grazie al suo peso, infatti, deve garantire il corretto posizionamento al fine corsa inferiore in assenza di forze esterne. È stato necessario svolgere contemporaneamente la progettazione per la struttura esterna ed il corpo centrale. La geometria e le dimensioni della dentatura del corpo centrale sono strettamente legate infatti a quelle della struttura esterna e viceversa.

Il corpo centrale è rappresentato da un cilindro, con variazione di sezione nella parte inferiore (*Figura 53*).

Nel seguito sono elencate le dimensioni del corpo cilindrico:

- Diametro sezione superiore: 30 mm
- Diametro sezione inferiore: 4 mm
- Altezza cilindro superiore: 20 mm

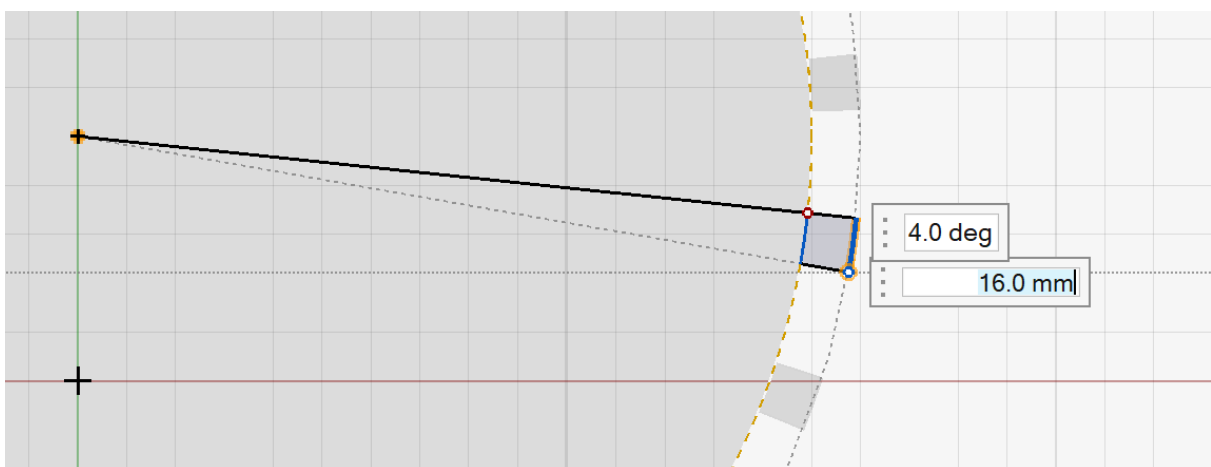


**FIGURA 54: CORPO CILINDRICO CENTRALE DI PARTENZA**

- Altezza cilindro inferiore: 6,7 mm per gripper porta gate, 9 mm per gripper porta componenti
- Raggi di raccordo: 1 mm

Le dimensioni del corpo centrale sono state scelte tenendo in considerazione il fatto che, come vedremo in seguito, il corpo centrale con la sua forza peso deve garantire l'apertura in assenza di forze esterne, dei braccetti laterali.

Vediamo adesso il design del meccanismo che porterà a definire anche la geometria della struttura esterna. Partendo dalla superficie circolare in *Figura 54* viene disegnato il dente di partenza le cui dimensioni sul piano in esame sono:

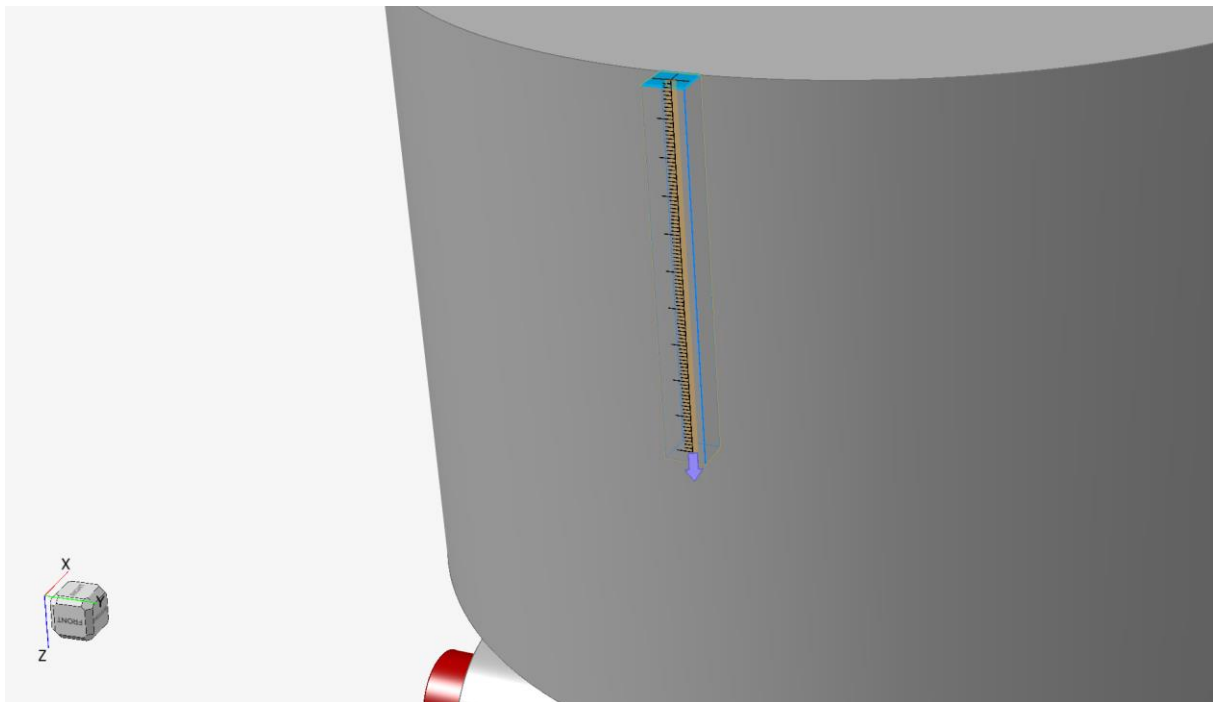


**FIGURA 53: DIMENSIONAMENTO DENTE CORPO CENTRALE**

- Spessore in direzione radiale: 1 mm
- Angolo spazzato:  $4^\circ$

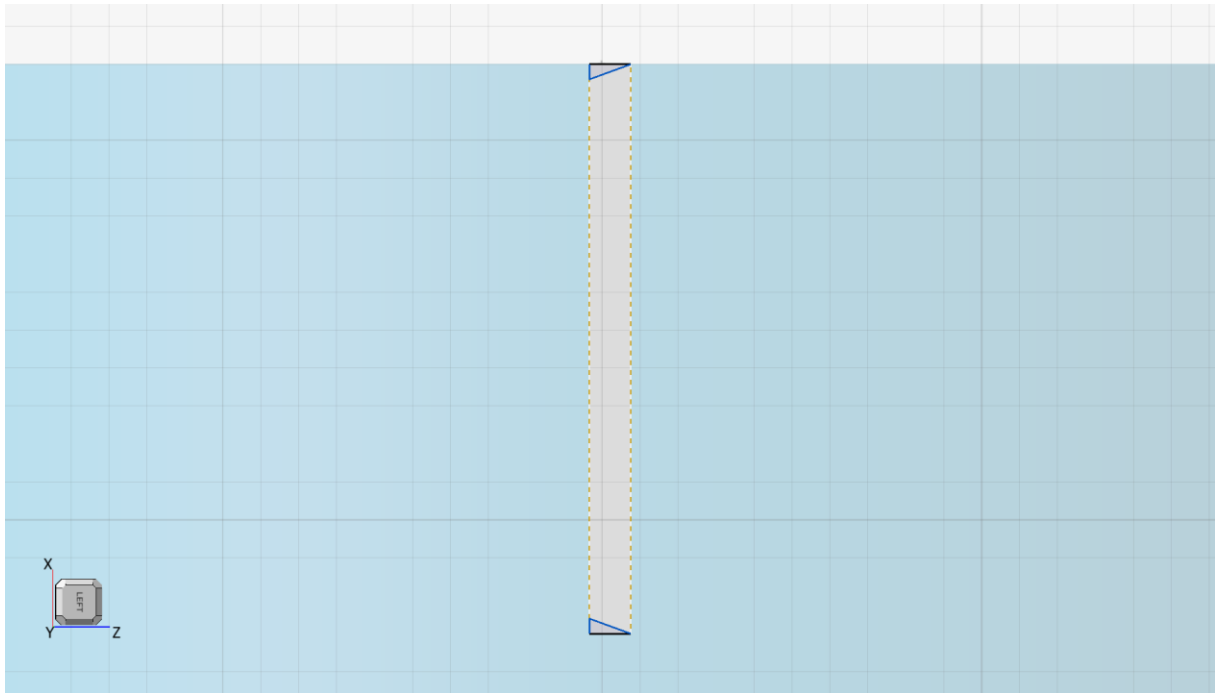
La scelta dell'angolo spazzato del dente è giustificata dal fatto che si vogliono creare trenta denti equi spaziati, con spaziatura pari a due volte lo spessore del dente. Le motivazioni di queste assunzioni saranno più chiare una volta definita l'intera geometria.

A questo punto, lo schizzo in *Figura 54* viene estruso lungo l'asse parallelo all'asse principale del cilindro per 10 mm (*Figura 55*).



**FIGURA 55: ESTRUSIONE SCHIZZO**

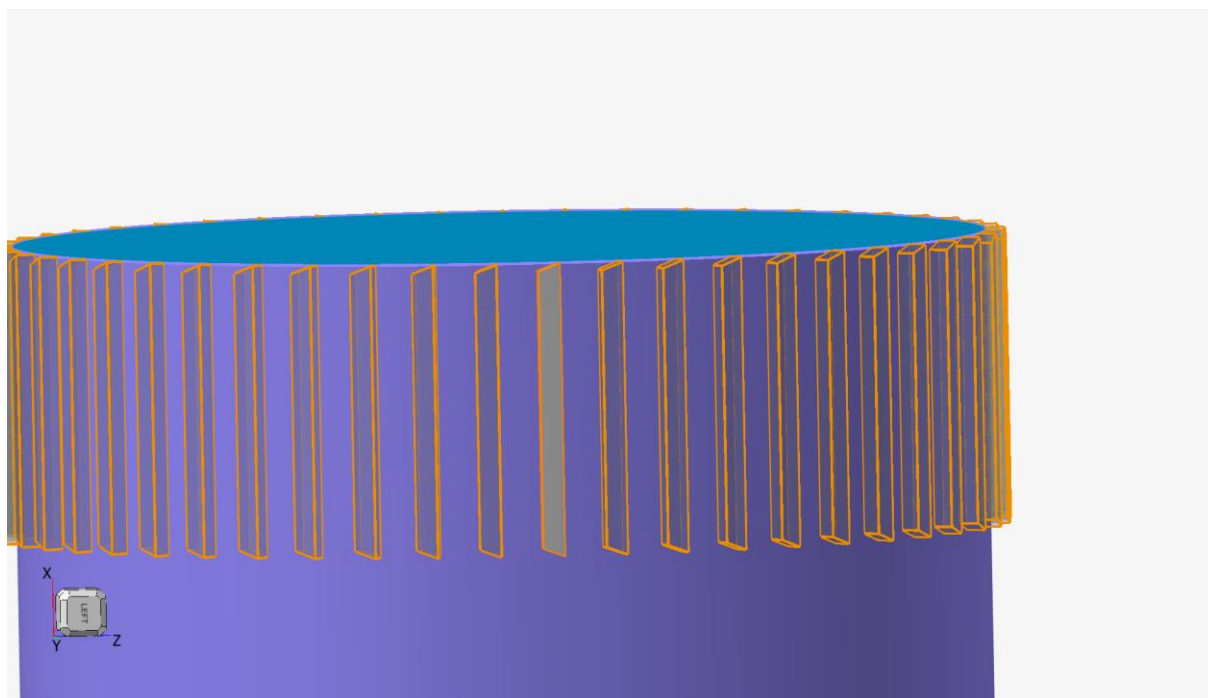
La geometria del dente di partenza necessita a questo punto di due modifiche nella parte superiore ed inferiore, che saranno utili al funzionamento del meccanismo (*Figura 56*).



**FIGURA 56: ELIMINAZIONE MATERIALE PER CREARE LA GEOMETRIA DEL MECCANISMO**

Vengono rimossi dalla geometria appena creata, due distinte parti di sezione triangolare. I due triangoli contrassegnati in *Figura 56*, che presentano entrambi l'ipotenusa inclinata di  $20^\circ$  rispetto ad un riferimento perpendicolare all'asse di simmetria del corpo centrale. Questa rimozione consentirà di ottenere la geometria del dente finale.

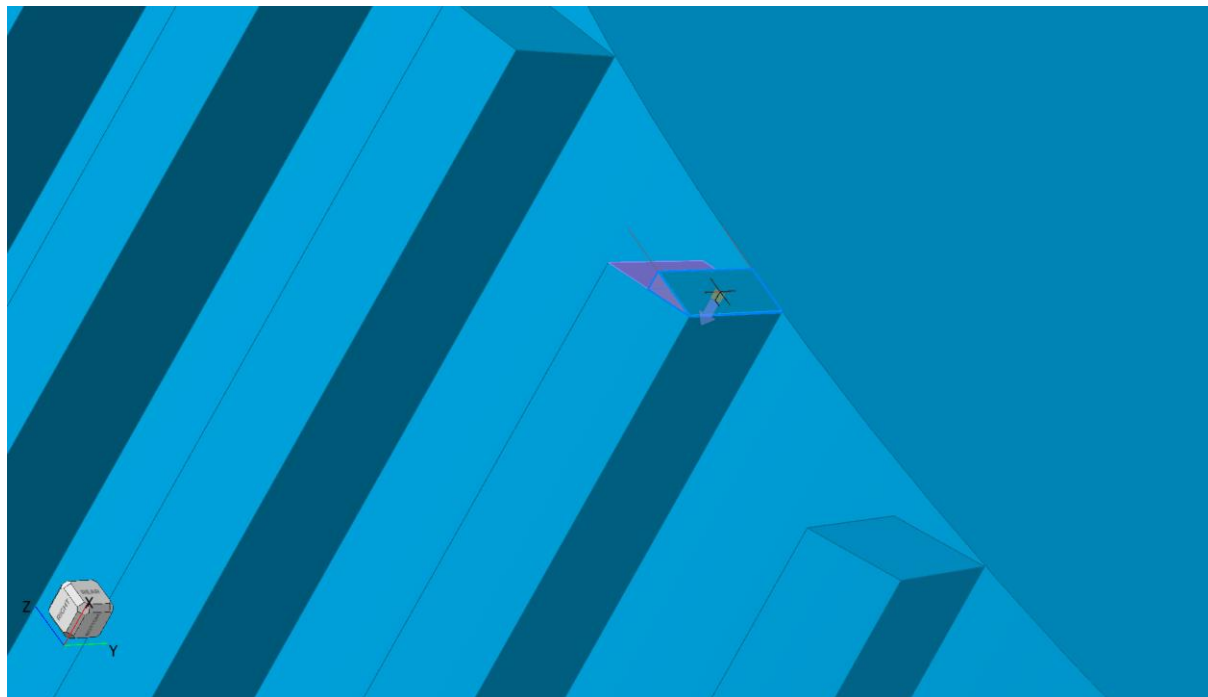
In *Figura 57* dente appena creato viene replicato in trenta elementi equi spazati lungo tutta la superficie del corpo principale.



**FIGURA 57: CREAZIONE DENTATURA SUL CORPO CENTRALE**

Dalla creazione della dentatura sul corpo centrale è possibile introdurre la creazione della dentatura sulla struttura principale. Viene creato uno schizzo di posizione analoga allo schizzo visto in *Figura 54*, di uguale spessore radiale mentre in direzione circonferenziale l'angolo spazzato è di  $2^\circ$ , quindi la metà rispetto al dente visto precedentemente. Lo schizzo viene

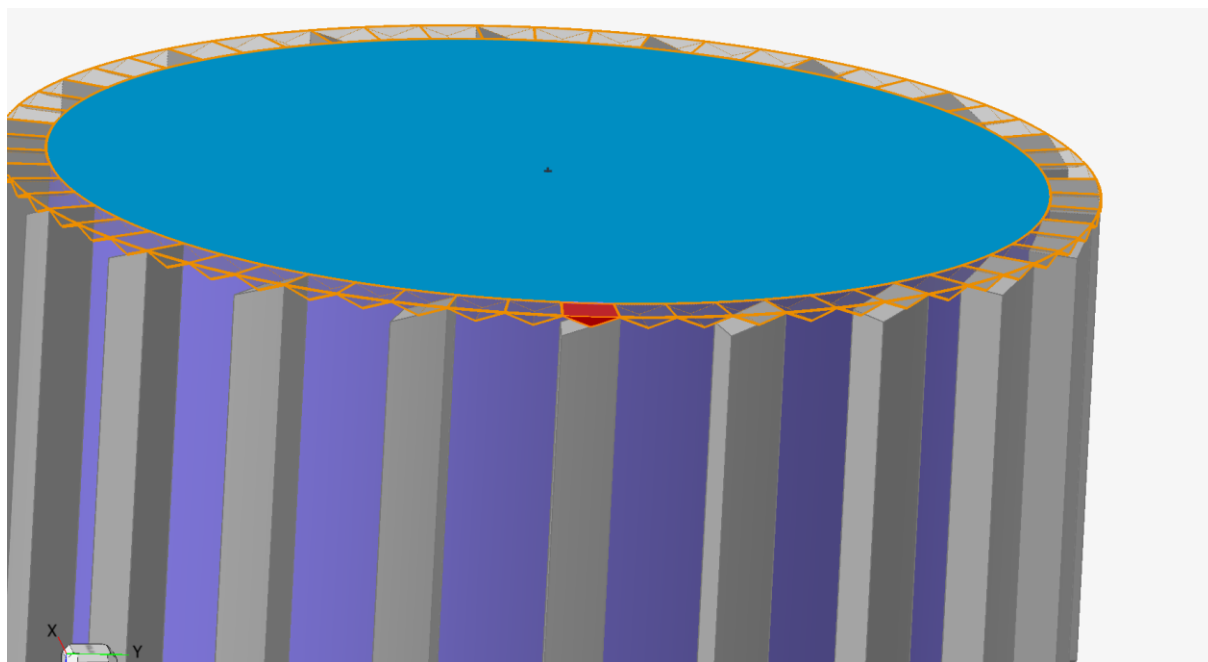
proiettato fino alla superficie inclinata superiore del dente del cilindro (*Figura 58*). L'elemento appena creato farà parte della dentatura sulla struttura esterna.



**FIGURA 58: CREAZIONE DENTATURA SUPERIORE DELLA STRUTTURA ESTERNA**



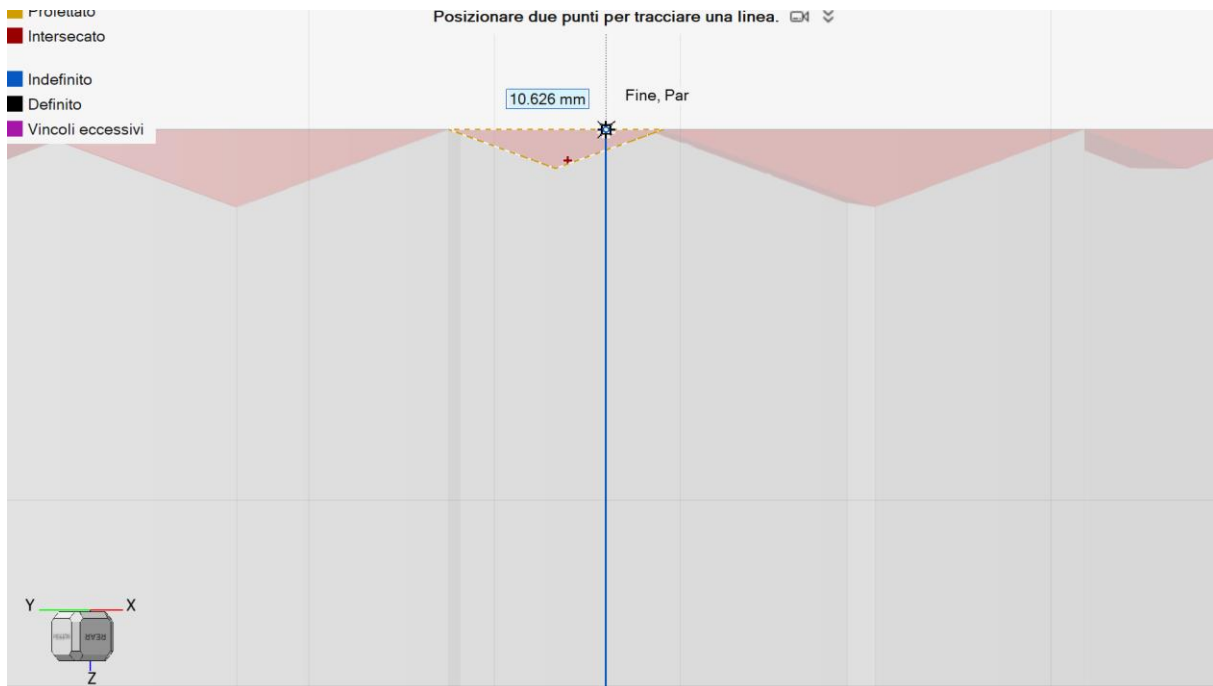
La parte appena creata viene specchiata rispetto ad un piano parallelo all'asse di simmetria del cilindro e passante per la faccia interna della stessa parte. La geometria risultante viene poi ripetuta lungo tutta la circonferenza, ottenendo la geometria in *Figura 59*.



**FIGURA 59: PATTERN DENTATURA SUPERIORE**

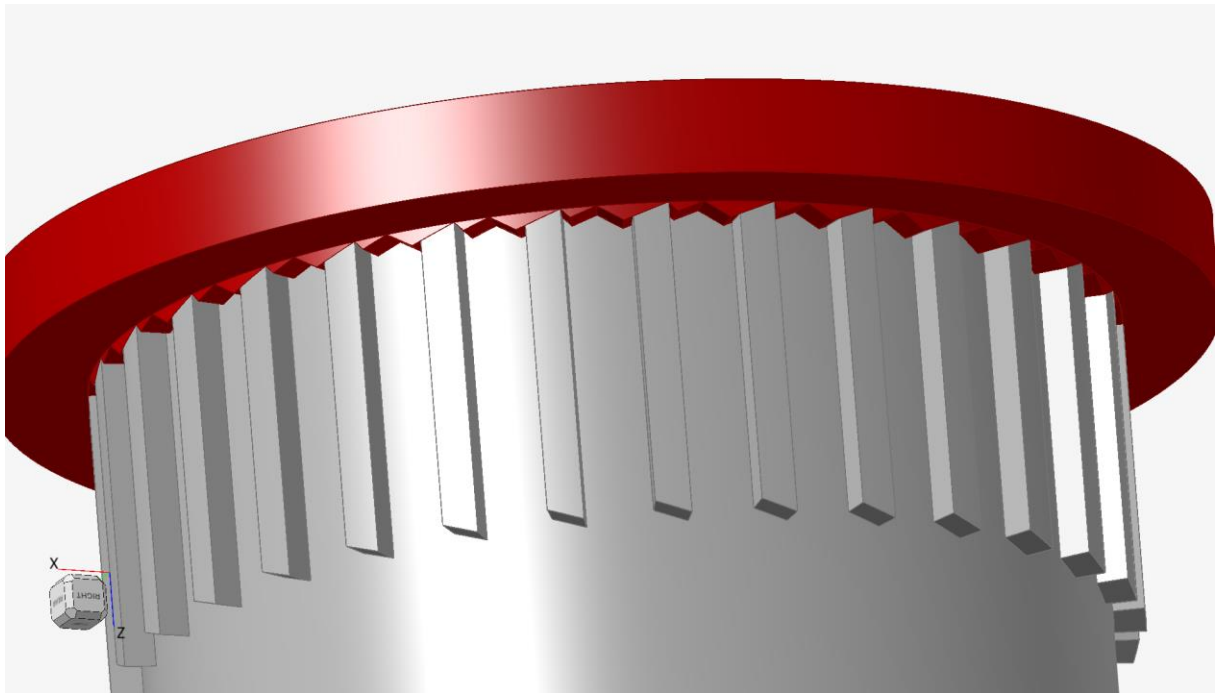
Partendo dalla geometria della dentatura superiore appena vista, sono possibili alcune piccole modifiche che, come si vedrà, renderanno il meccanismo più performante, limitando in modo determinante possibili sfasamenti.

In maniera alternata, è possibile unire due elementi triangolari adiacenti in un unico elemento triangolare più grande (*Figura 60*).



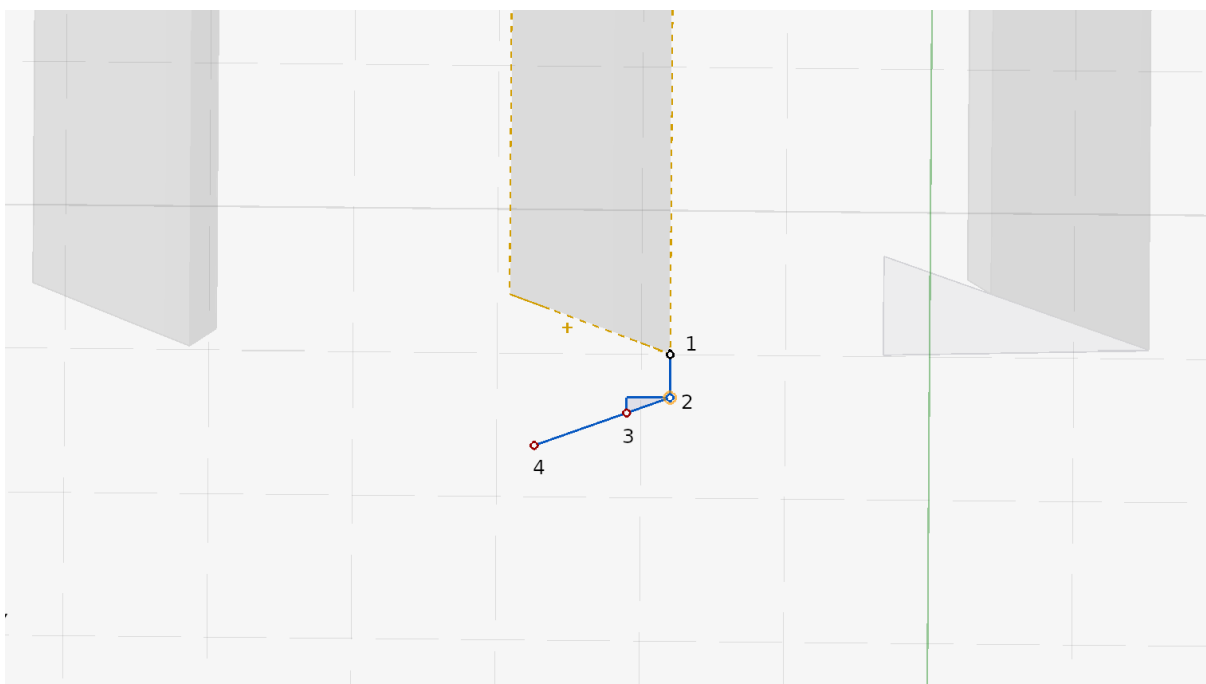
**FIGURA 60: MODIFICA ALLA DENTATURA**

È possibile inoltre modificare la geometria di tutti i denti semplicemente spostando il vertice inferiore dei denti a forma triangolare, lungo una retta parallela al fianco destro inclinato a  $20^\circ$  del dente. La stessa *Figura 61* aiuta a chiarire meglio questo aspetto, mostrando così il design finale della dentatura superiore, che come detto in precedenza, farà parte della struttura principale.



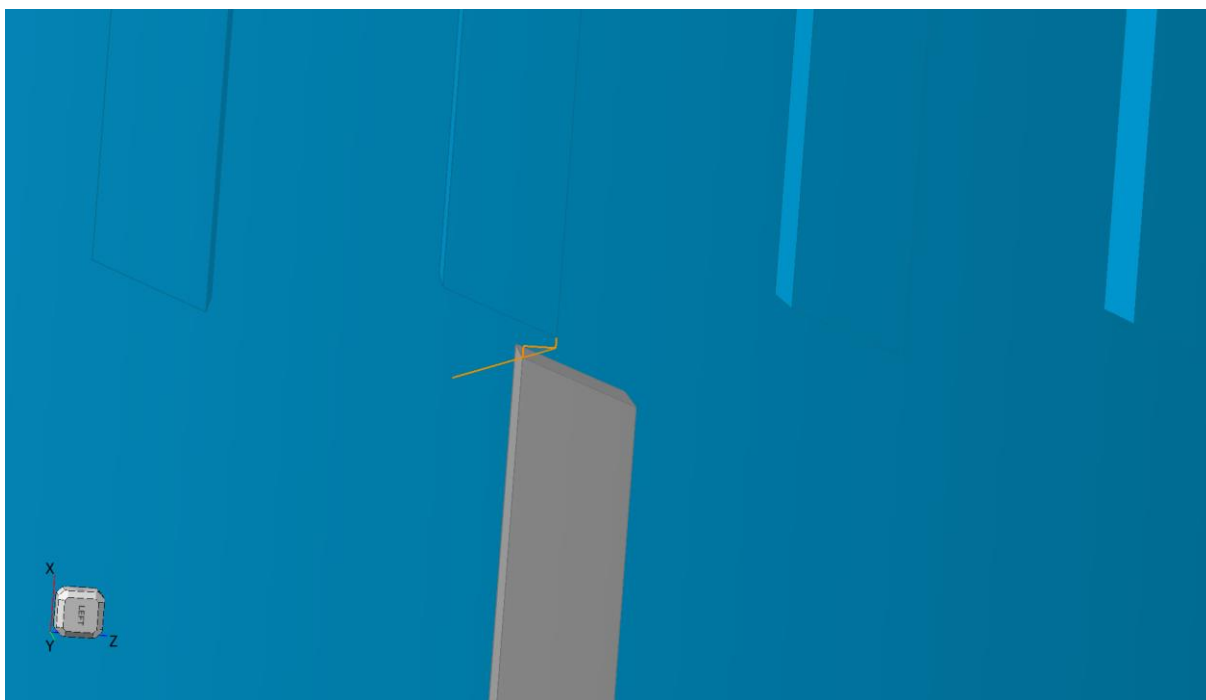
**FIGURA 61: DENTATURA SUPERIORE FINALE**

La progettazione della dentatura inferiore deve tener conto della necessità di consentire la rotazione e la traslazione verticale del corpo centrale in modo opportuno. Per questo motivo risulta utile considerare il riferimento del vertice inferiore della dentatura del corpo centrale come punto di partenza. In *Figura 62* il vertice inferiore è segnato con il numero 1. Si considera una distanza di sicurezza (segmento 1-2) di 0,3 mm. Questa distanza deve essere garantita per tutta la corsa rototraslazione verso l'alto del corpo centrale, la cui dentatura è guidata dalla dentatura superiore vista in precedenza, grazie all'inclinazione del dente di  $20^\circ$ , per questo motivo viene disegnato, a partire dal punto 2, un segmento 2-4 inclinato di  $20^\circ$ . Il segmento 2-4 rappresenta il luogo dei punti in cui posizionare il vertice superiore della dentatura inferiore della struttura esterna. All'interno di questo segmento è stato assunto il punto 3 come punto di partenza per il disegno della dentatura inferiore che si trova ad una distanza di 0.3 mm in direzione orizzontale dal punto 2.



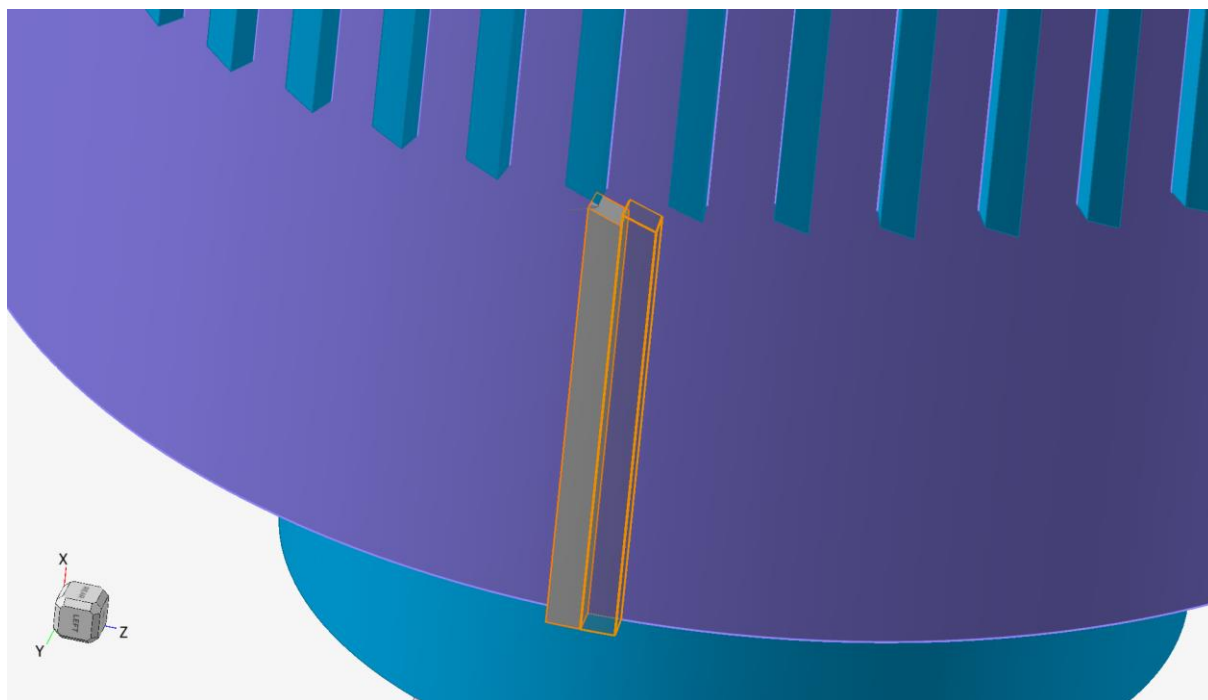
**FIGURA 62: RIFERIMENTI PER LA COSTRUZIONE DELLA DENTATURA INFERIORE**

A partire dal punto 3, viene disegnata la dentatura inferiore della struttura esterna, che presenta lo spessore circonferenziale e radiale pari allo spessore del dente del cilindro centrale mentre superiormente presenta uno spigolo inclinato a  $20^\circ$  in direzione quindi parallela al lato inferiore della dentatura del cilindro. La *Figura 63* mostra quanto appena descritto.



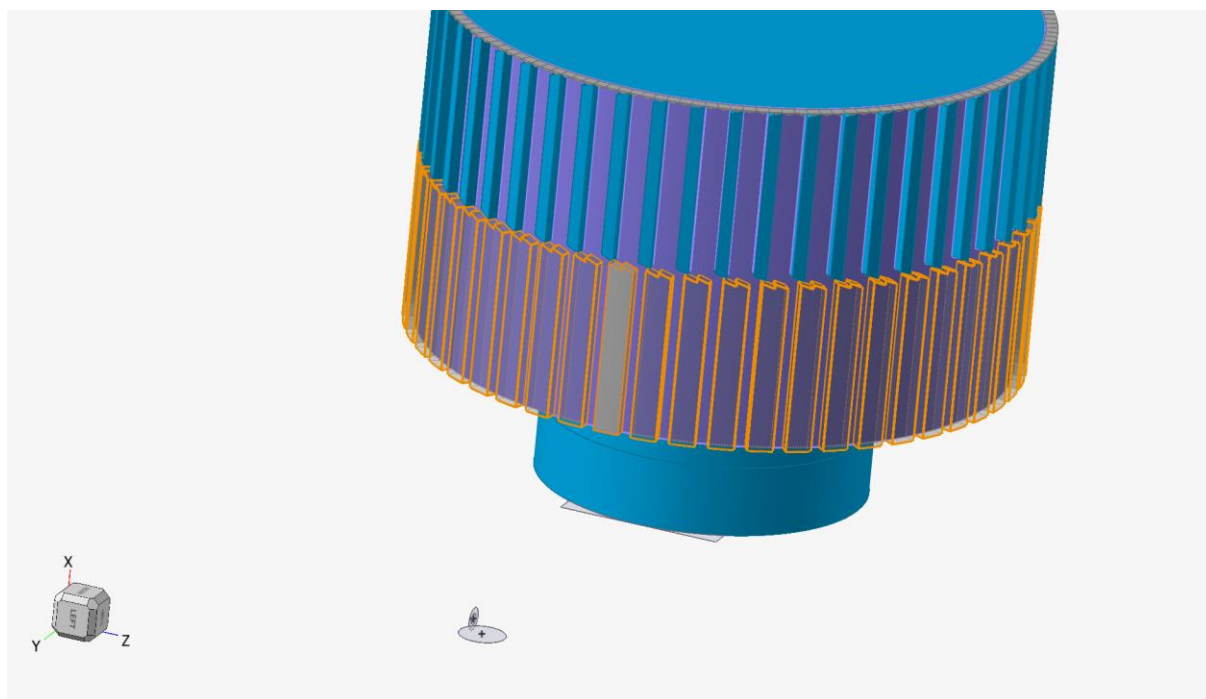
**FIGURA 63: PRIMA FASE DI CREAZIONE DENTATURA INFERIORE**

A questo punto viene specchiato il dente appena creato rispetto al piano passante per il lato destro del dente stesso (*Figura 64*).



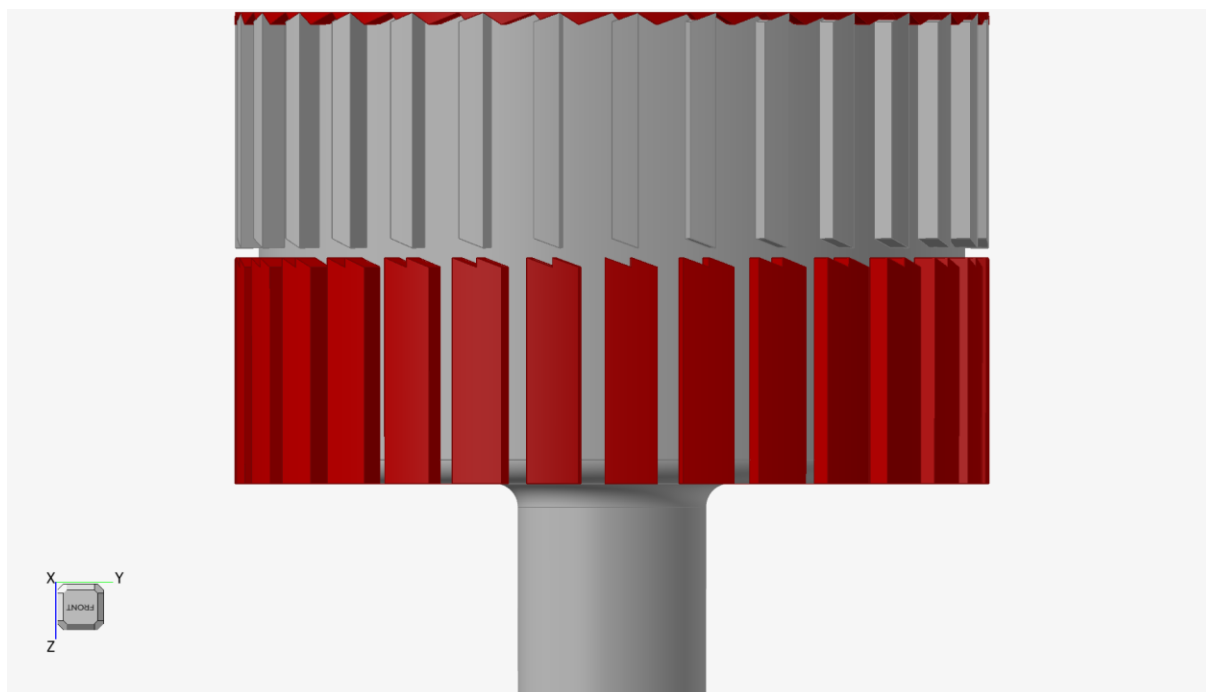
**FIGURA 64: SECONDA FASE DI CREAZIONE DELLA DENTATURA INFERIORE**

La geometria appena creata viene a questo punto ripetuta lungo tutta la circonferenza in 30 copie totali (*Figura 65*).



**FIGURA 65: FASE FINALE CREAZIONE DENTATURA INFERIORE**

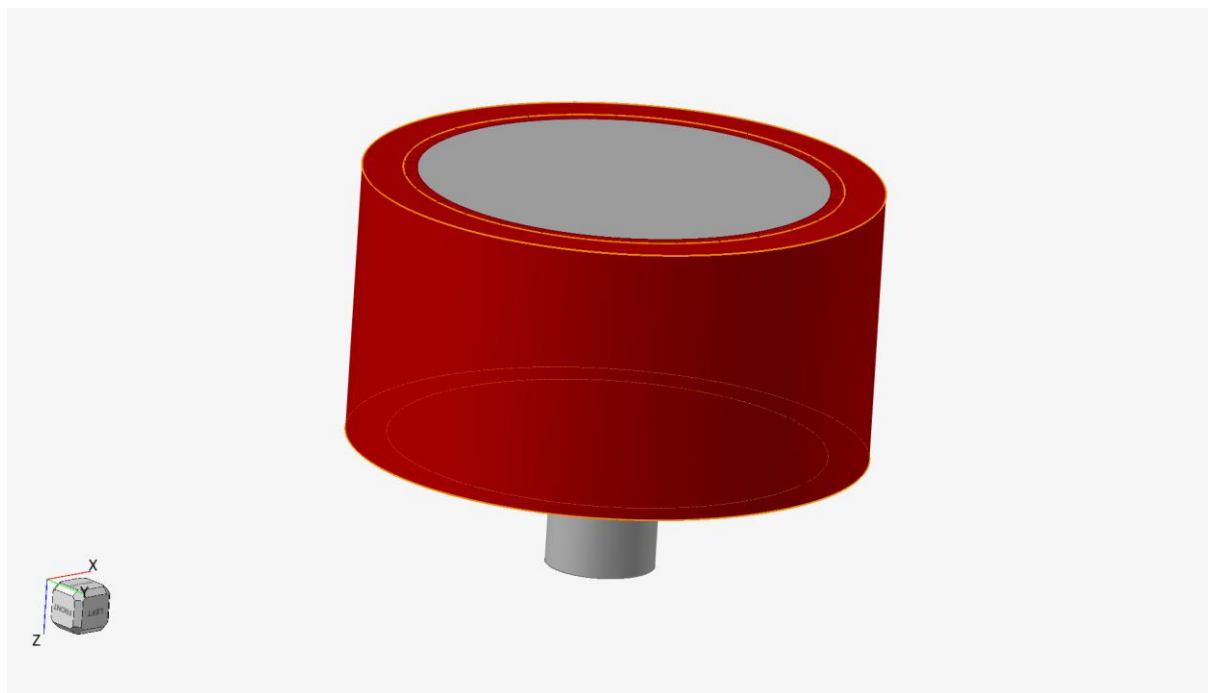
La progettazione del meccanismo di apertura e chiusura del sistema è adesso completa e mostrata in *Figura 66*.



**FIGURA 66: DESIGN DEL MECCANISMO COMPLETO**

In rosso è rappresentata la struttura che sarà parte, insieme all'opportuna copertura, del telaio principale dell'end-effector, mentre in grigio è rappresentato il corpo roto-traslante.

Lateralmente è stata prevista una copertura del meccanismo di spessore pari a 3 mm (*Figura 67*), che verrà unita con il comando “Boolean” alla dentatura superiore ed inferiore precedentemente viste.



**FIGURA 67: COPERTURA LATERALE**

Mentre, superiormente, il meccanismo viene coperto con uno spessore di materiale sempre di 3 mm lungo tutto il diametro (*Figura 68*).



**FIGURA 68: COPERTURA SUPERIORE**

La progettazione di questa specifica parte può ritenersi conclusa, ricordando come, entrambi gli elementi visti in questa sezione sono presenti - ad eccezione del diametro inferiore del corpo mobile centrale che differisce di qualche millimetro – su tutti e dodici i gripper.

## 2.3 Braccetti laterali

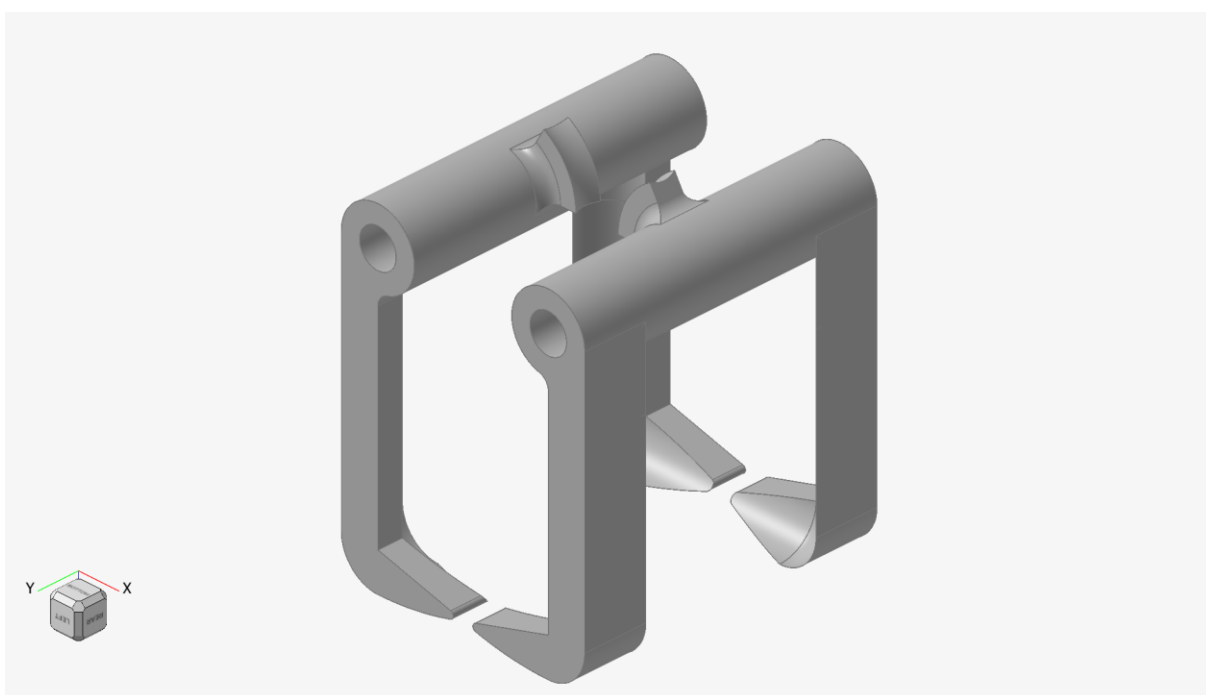
Vengono adesso introdotti gli elementi il cui compito è quello di sostenere il peso dei componenti da movimentare, garantendo lungo tutta l'operazione di spostamento che l'oggetto rimanga saldamente in presa.

In *Figura 69-70* è mostrata la geometria dei supporti appena menzionati.





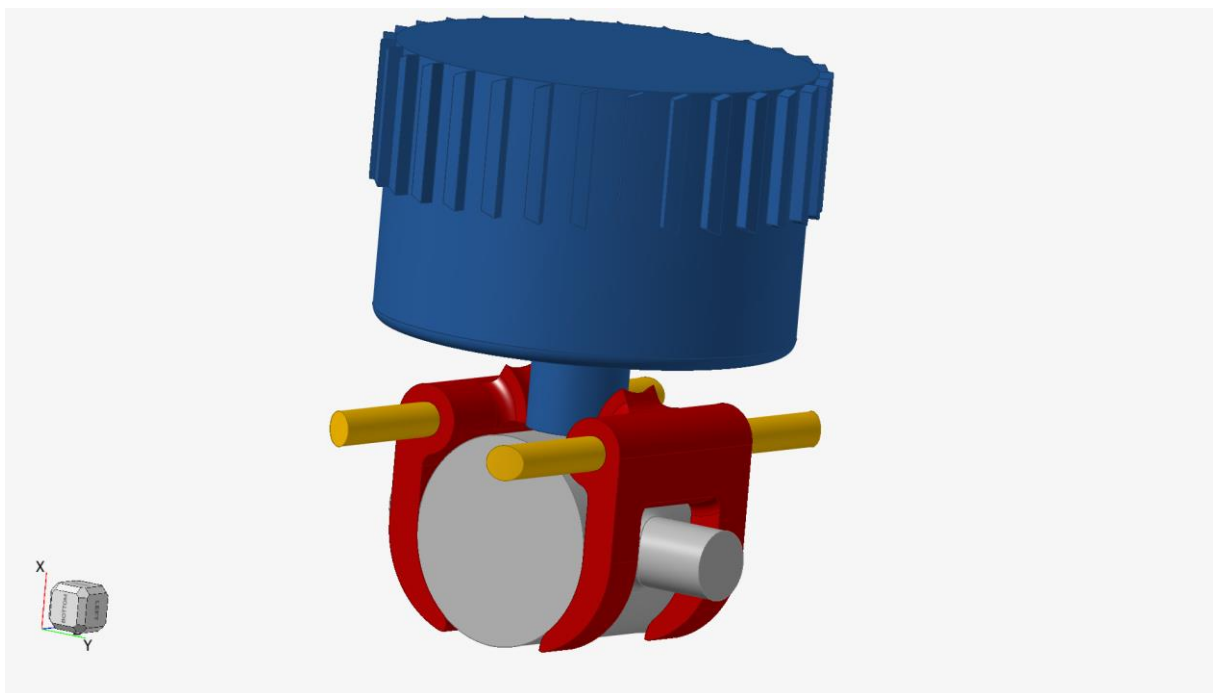
**FIGURA 69: BRACCETTI PORTA GATE**



**FIGURA 70: BRACCETTI PORTA COMPONENTI**

### 2.3.1 Funzionamento meccanismo dei braccetti laterali

Per analizzare il cinematismo che consente ai braccetti laterali di aprirsi ruotando, grazie alla presenza della filettatura attorno all'asse dello spinotto su cui sono montati, è utile analizzare la *Figura 71* in cui sono rappresentati: in blu il corpo centrale già visto nei precedenti capitoli, in rosso i braccetti, in grigio il componente da movimentare ed in giallo gli spinotti che faranno parte della struttura esterna. Nel caso specifico stiamo analizzando il gripper per la movimentazione del canale di alimentazione, ma, sebbene la geometria dei braccetti differisca tra le due versioni, il funzionamento è il medesimo.

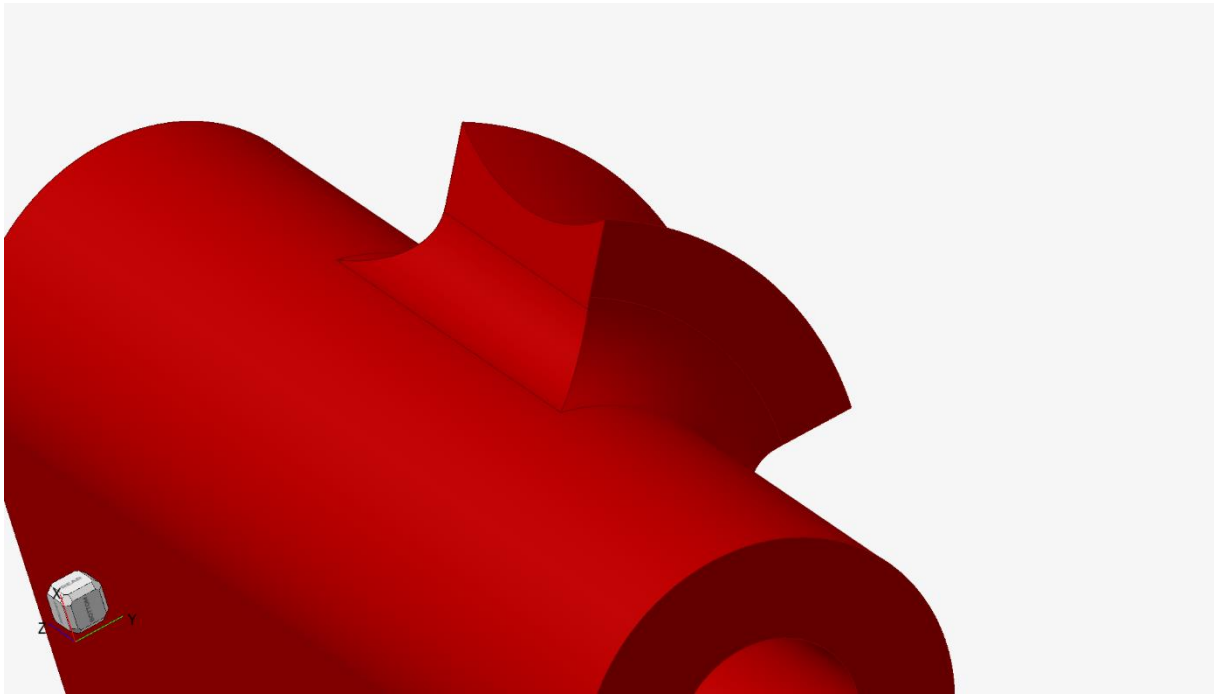


**FIGURA 71: MECCANISMO APERTURA BRACCETTI**

Il corpo centrale (in *Figura 71* in blu) ed i braccetti (in *Figura 71* in rosso) sono tra loro vincolati da un meccanismo filettato, che, esattamente come nel caso del cavatappi, a seguito del movimento traslatorio in direzione verticale del corpo centrale, impone ai braccetti di ruotare attorno al loro spinotto. L'accoppiamento appena descritto consente, tuttavia, al corpo centrale libertà di rotazione attorno al suo stesso asse. È importante soffermarsi sul fatto che dalle immagini non è visibile la filettatura appena descritta in quanto non è stata oggetto di modellazione. Questa scelta è giustificata dalla esigua sollecitazione a cui, come vedremo in seguito, è sottoposto il meccanismo e dalla sostanziale

impossibilità, all'interno del software *Altair Inspire 2025.1*, di modellare qualsiasi tipo di filettatura.

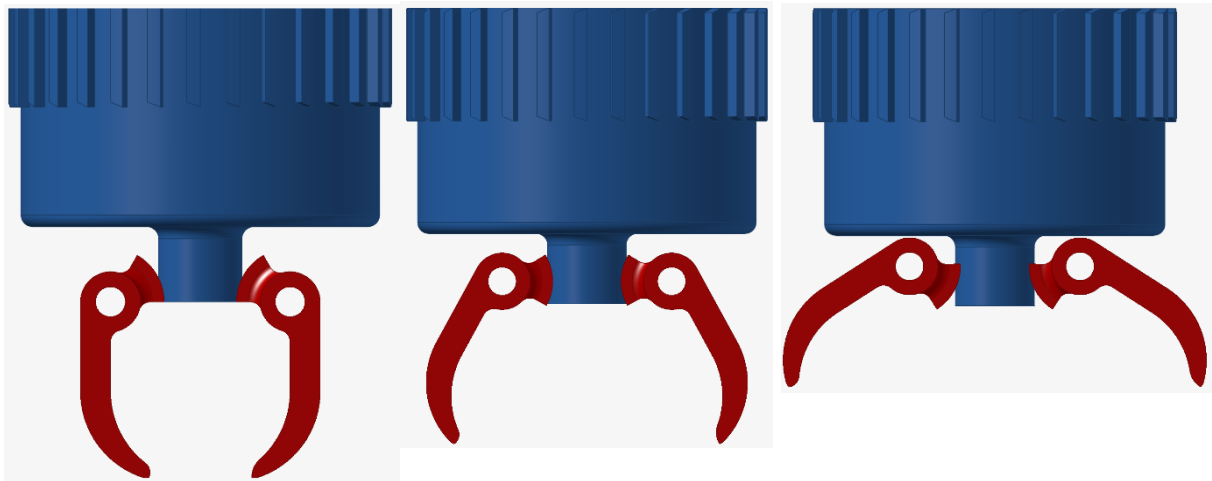
In corrispondenza del collegamento filettato è stato previsto un elemento che farà parte del braccetto stesso che aumenta la superficie di applicazione della forza scambiata tra il cilindro e il braccetto, incrementando, inoltre, localmente il raggio della sezione cilindrica presente sul braccetto in corrispondenza dell'accoppiamento con il corpo centrale (*Figura 72*).



**FIGURA 72: ELEMENTO DI CONNESSIONE TRA BRACCETTO E CILINDRO**

Grazie al collegamento filettato appena descritto, è possibile ottenere un cinematismo in cui il cilindro centrale è libero di ruotare sul proprio asse (come nel caso del cavatappi) mentre è vincolato ai braccetti attraverso un collegamento che impone il rotolamento dei braccetti sul fianco del cilindro.

In *Figura 73* viene mostrato il comportamento appena descritto.



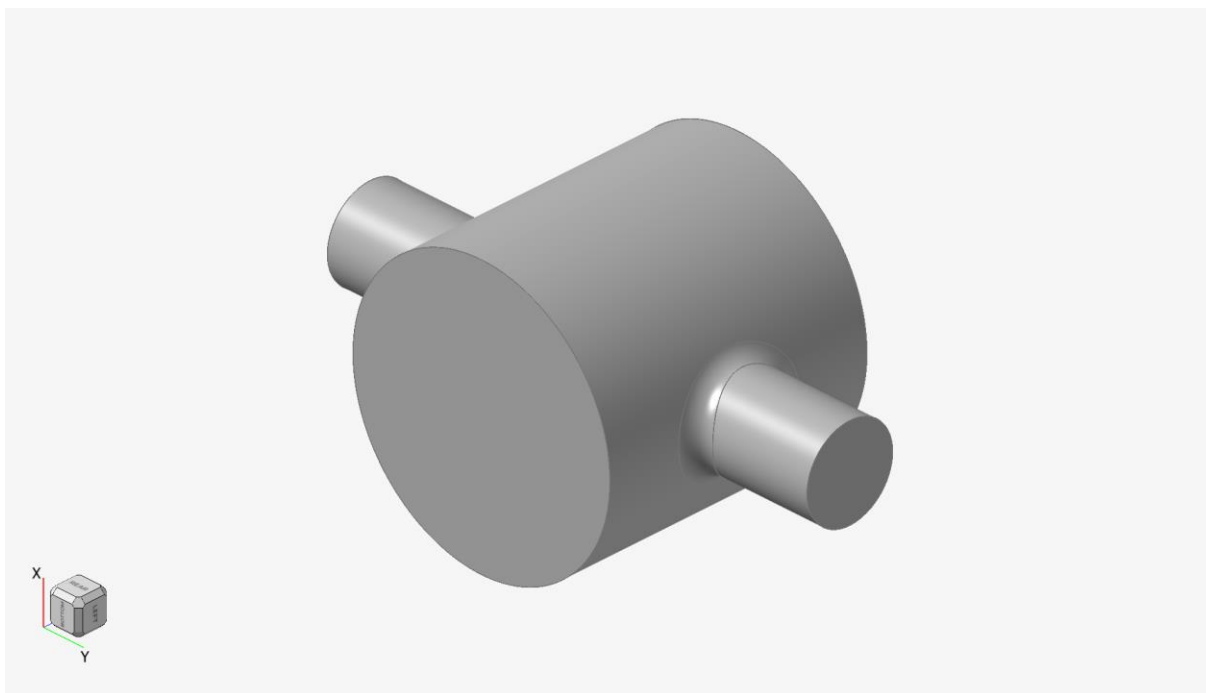
**FIGURA 73: MECCANISMO DI APERTURE DEI BRACCETTI**

Possiamo notare come il fine corsa inferiore del corpo centrale sia rappresentato dagli stessi braccetti che impediscono al cilindro di sfilarsi dalla sede inferiormente.

### 2.3.2 Geometria braccetti porta gate

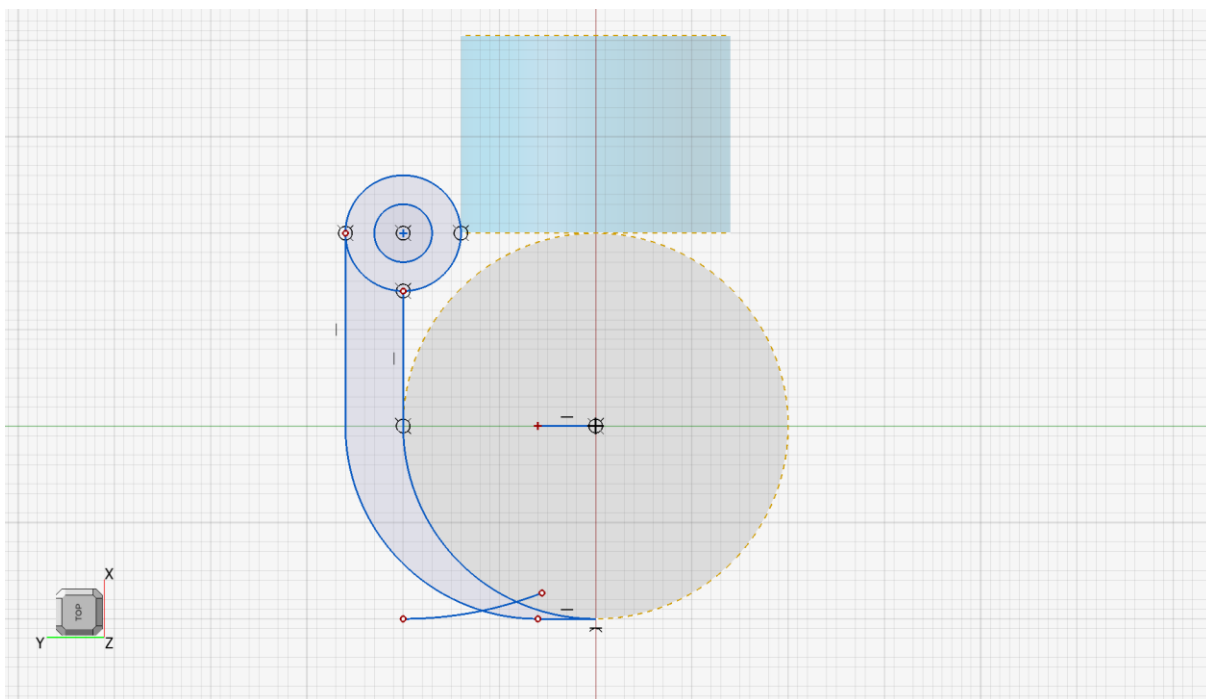
Vediamo adesso nel dettaglio i passaggi necessari alla creazione della geometria attraverso il software *Altair Inspire 2025.1* dei braccetti per la movimentazione dei canali di alimentazione.

Non essendo stata fornita alcuna informazione relativamente alle dimensioni dei componenti da movimentare, è stata assunta una geometria cilindrica con diametro 15 mm, con la presenza di due ramificazioni sulla superficie laterale che simulano le caratteristiche geometriche dei canali di alimentazione per la stampa ad iniezione (*Figura 74*).



**FIGURA 74: GEOMETRIA CANALE DI ALIMENTAZIONE**

Partendo dalla geometria in *Figura 74* è possibile disegnare una geometria personalizzata che consenta di avvolgere il corpo, sfruttando la forma peculiare di questi elementi (*Figura 75*).

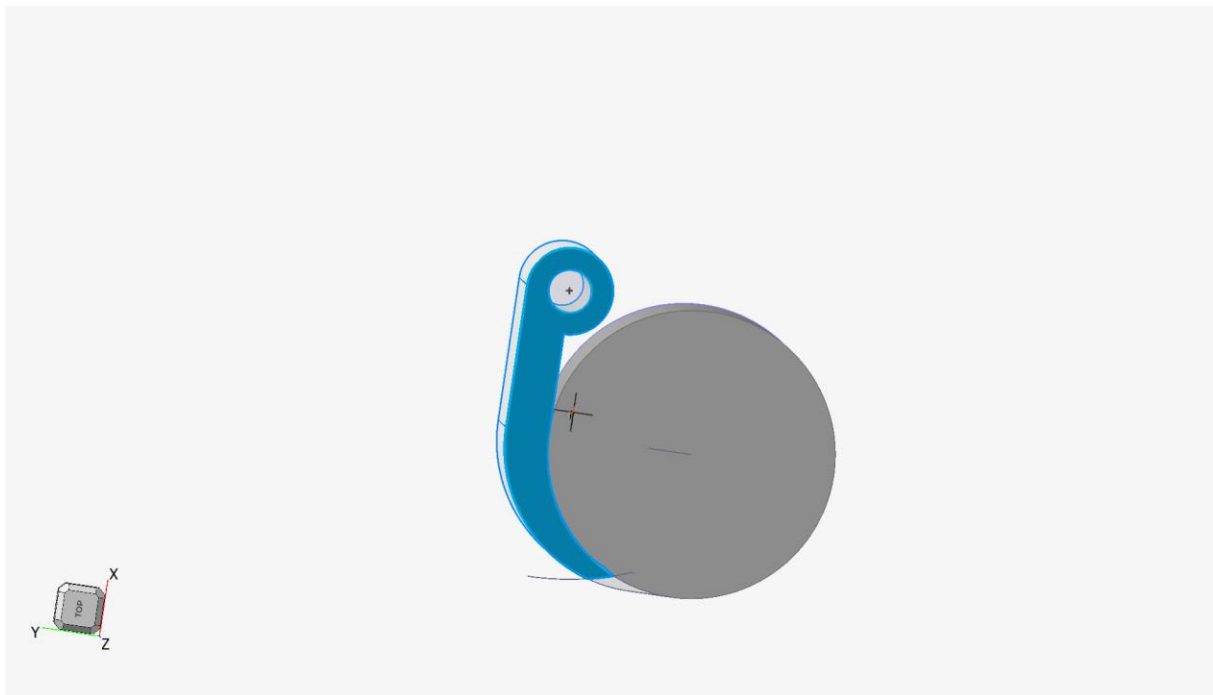


**FIGURA 75: COSTRUZIONE GEOMETRICA BRACCETTO PORTA-GATE**

Il disegno in *Figura 75* mostra in maniera chiara i riferimenti considerati per la generazione della nuova geometria. Superiormente è stata disegnata la sezione cilindrica dell'elemento che rotolerà sul corpo centrale del meccanismo visto precedentemente. Il centro dei due cerchi disegnati si trova in corrispondenza della coordinata y dell'estremo laterale sinistro del gate, mentre la coordinata x si trova in corrispondenza del piano su cui giace la faccia inferiore del corpo centrale (in *Figura 75* in azzurro). Il raggio del cerchio interno è di 1,5 mm, mentre il raggio esterno è di 3 mm.

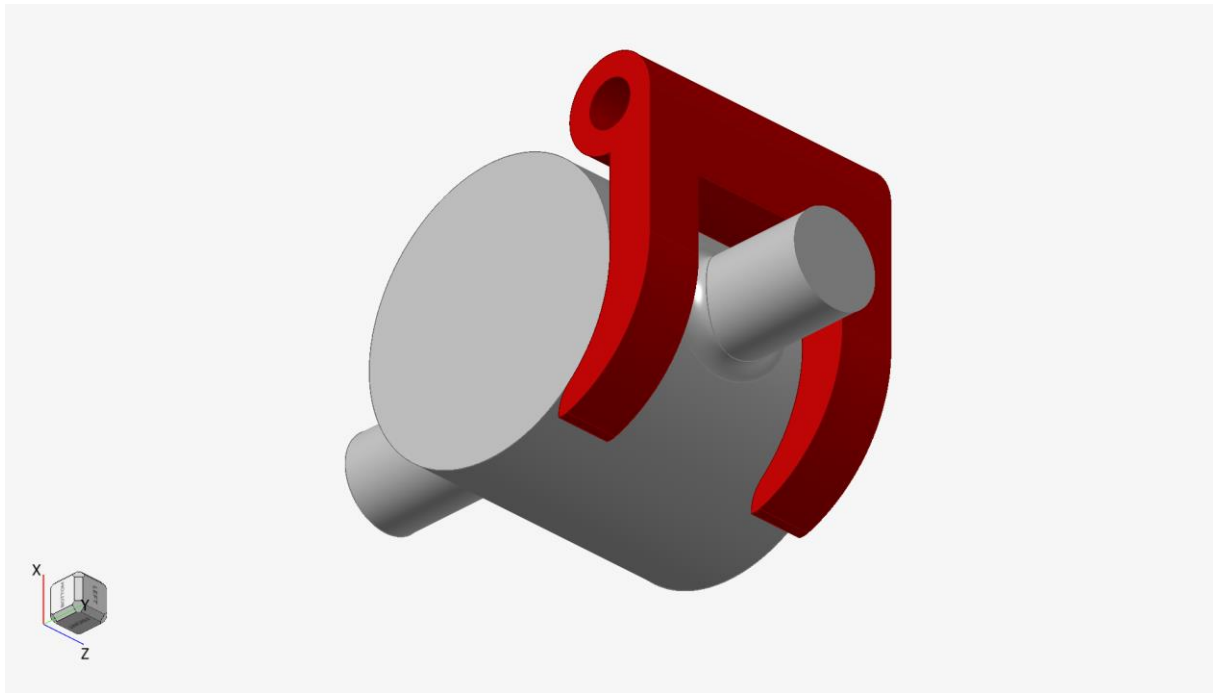
Inferiormente la geometria è rappresentata da un offset del quadrante inferiore sinistro della sezione circolare del gate. È possibile notare, inoltre, che è presente nella parte inferiore dello schizzo un arco di circonferenza, il quale ha per origine il centro dei due cerchi visti precedentemente con raggio pari alla distanza in direzione x dello stesso centro dalla superficie su cui è poggiato il corpo da movimentare. L'arco appena descritto rappresenta il limite inferiore per cui è garantita l'assenza di collisione con la superficie lungo tutto il percorso di rotazione del braccio.

A questo punto, come mostrato in *Figura 76* viene eseguita l'estrusione della sezione.



**FIGURA 76: CREAZIONE GEOMETRIA BRACCETTO**

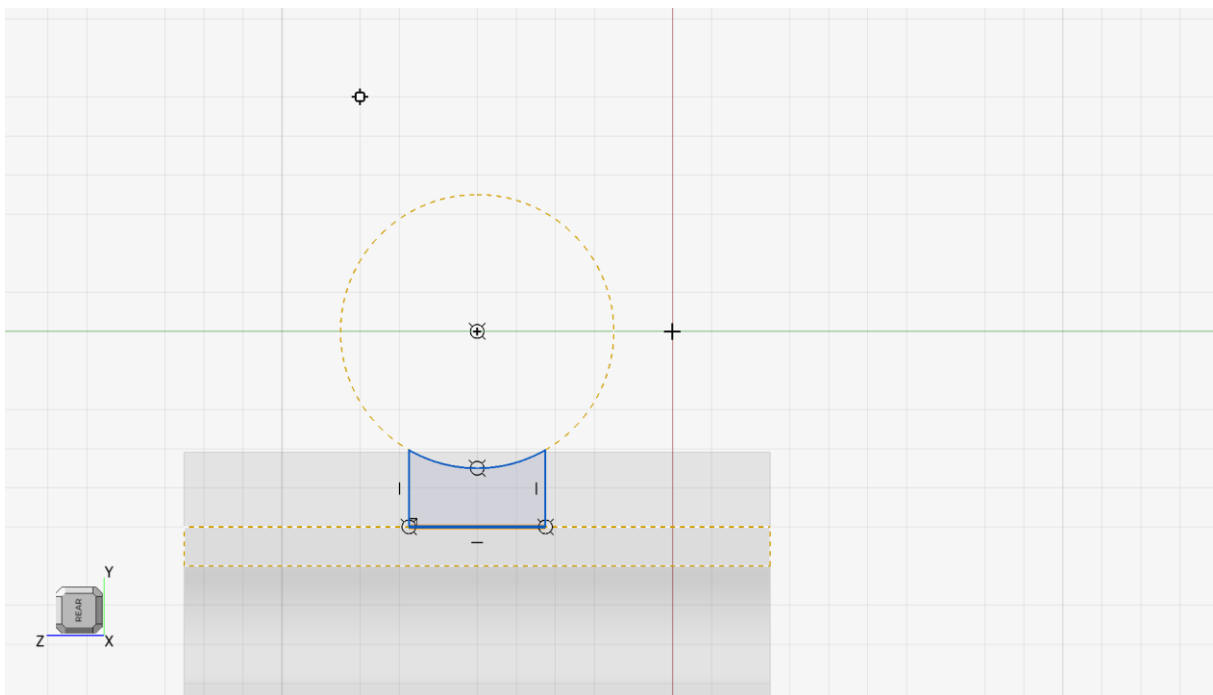
La presenza della ramificazione sul canale di alimentazione può essere sfruttata per creare una geometria che vincoli lungo l'asse z il movimento del componente (*Figura 77*).



**FIGURA 77: GEOMETRIA PERSONALIZZATA PER GATE**

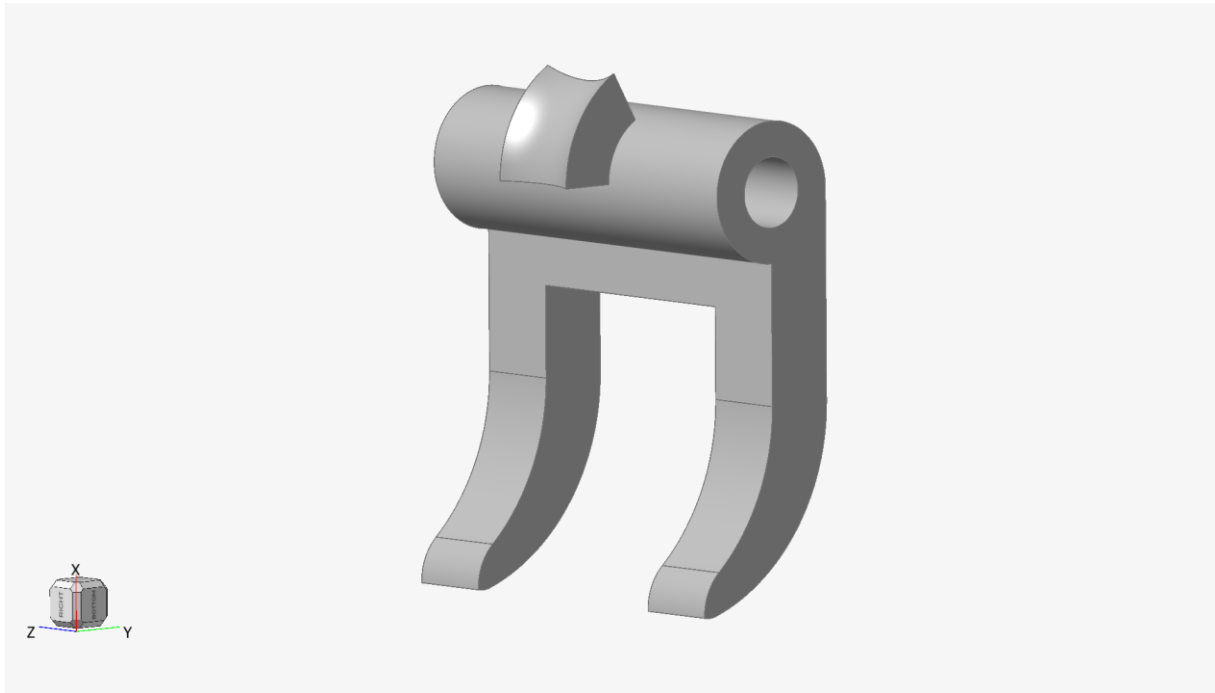
In *Figura 77* è inoltre possibile notare come sia stata leggermente smussata lo spigolo inferiore del braccetto per facilitare il rilascio come vedremo più avanti.

Sulla superficie della sezione cilindrica del braccetto viene integrato un elemento (*Figura 78-79*) che si estende lungo la superficie cilindrica per  $60^\circ$  che ha la duplice funzione di estenderne



**FIGURA 78: DISEGNO ELEMENTO INTEGRATIVO SULLA SUPERFICIE DEL BRACCETTO**

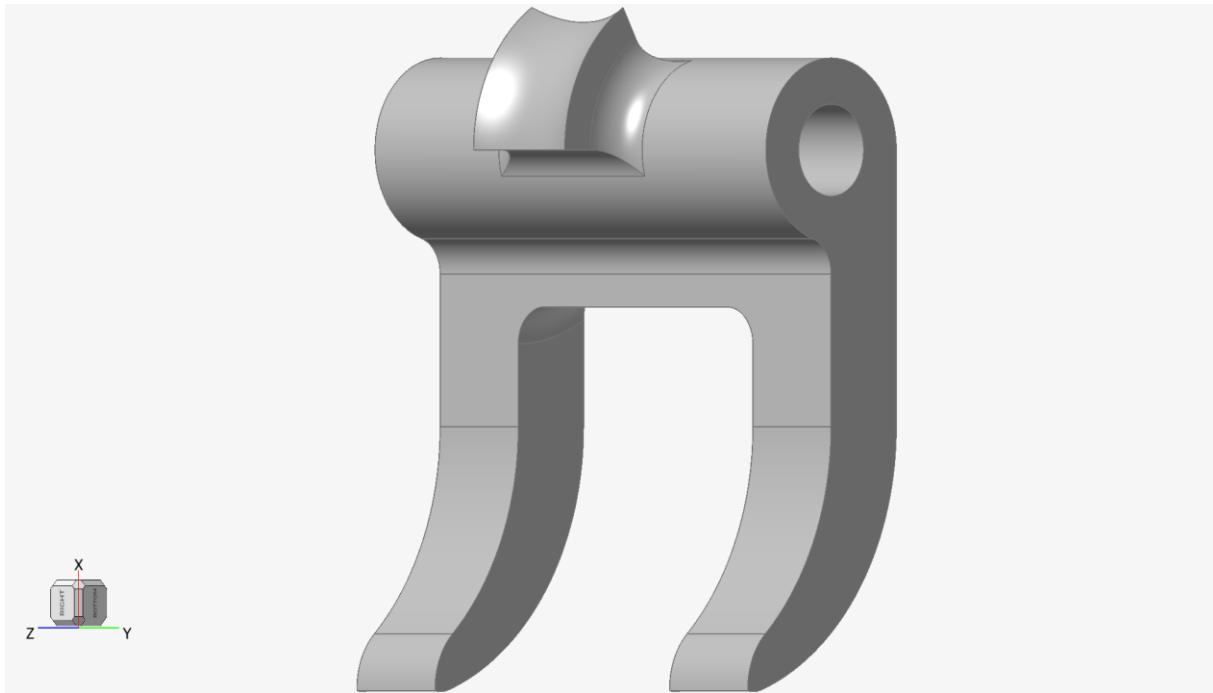
localmente il raggio fino a 5,5 mm - la cui utilità sarà più chiara una volta mostrato il funzionamento completo del meccanismo – e di aumentare la superficie su cui viene scambiata la forza.



**FIGURA 79: ELEMENTO INTEGRATIVO SULLA SUPERFICIE DEL BRACCETTO**

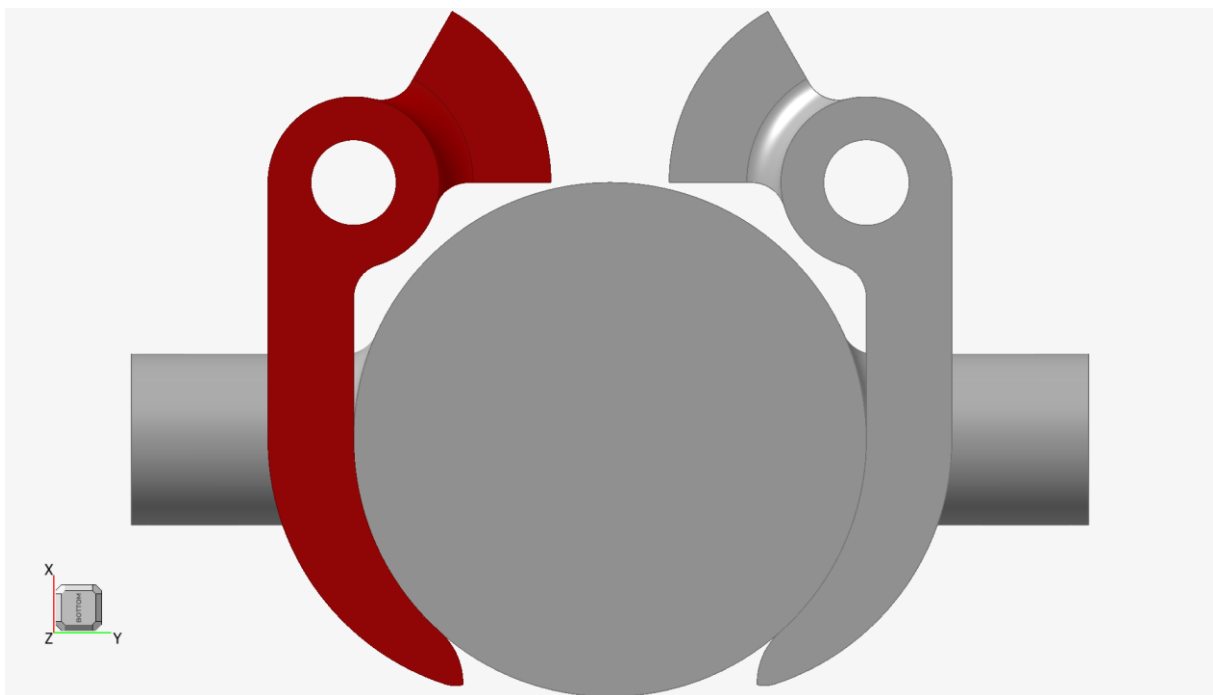
Viene completato il disegno prevedendo dei raccordi per addolcire gli spigoli presenti al fine di evitare accumuli di tensioni (*Figura 80*).





**FIGURA 80: BRACCETTO FINALE CON RAGGI DI RACCORDO**

A questo punto è possibile generare l'altro braccetto semplicemente grazie al comando “Mirror” che consente di creare un nuovo elemento specchiando un componente rispetto al piano desiderato, che nel caso specifico è rappresentato dal piano mediano del gate parallelo al piano  $xz$  (Figura 81).



**FIGURA 81: SPECCHIATURA DEL BRACCETTO**

### 2.3.3 Geometria braccetti porta componenti

In questa sezione vengono mostrati i passaggi per giungere alla geometria dei braccetti per la movimentazione dei componenti stampati ad iniezione. Anche in questo caso è necessario fare un'assunzione sulla geometria del componente da movimentare, che è stavolta rappresentato da un cubo di lato 20 mm con raggi di raccordo su tutti gli otto spigoli di 3 mm (*Figura 82*).

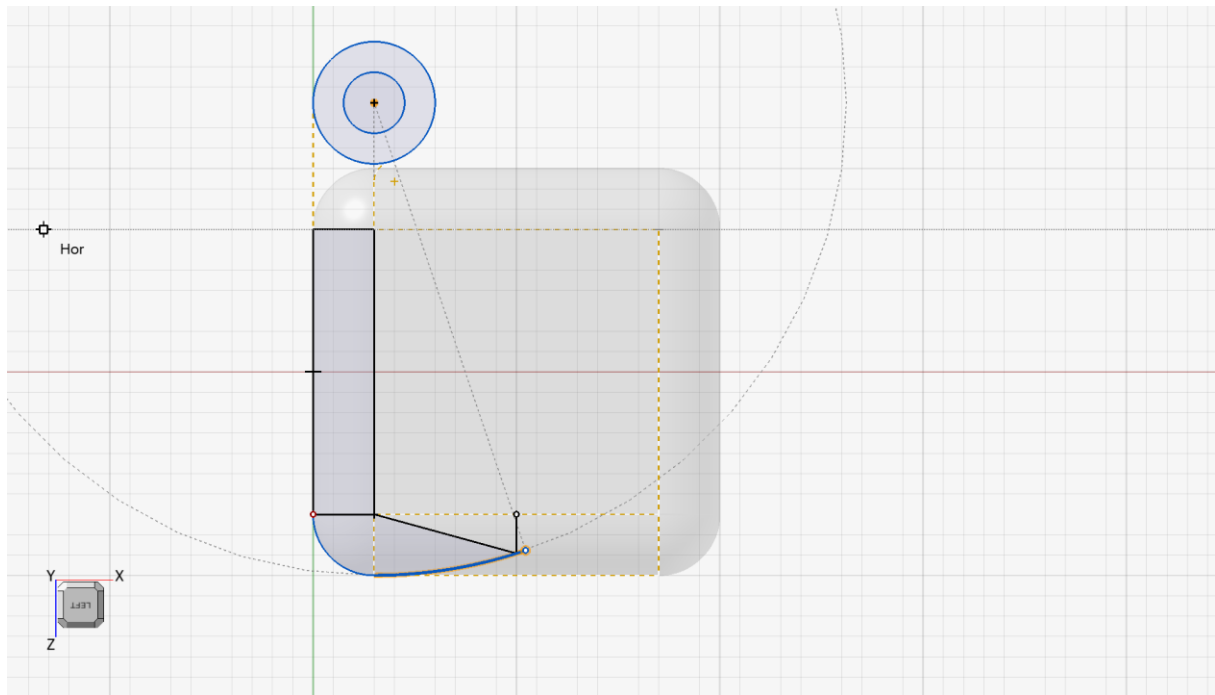


**FIGURA 82: ASSUNZIONE SULLA GEOMETRIA DEL COMPONENTE**

A partire dalla geometria in *Figura 82*, esattamente come nel caso del braccetto per la movimentazione del canale di alimentazione, è possibile creare una geometria che abbracci il componente sfruttandone le caratteristiche geometriche. Risulta quindi utile, per il caso in esame, sfruttare gli spigoli raccordati dell'elemento in questione per creare dei supporti personalizzati. In *Figura 83* viene mostrata la prima fase di creazione della geometria che prevede la generazione di uno schizzo su un piano parallelo ad una delle quattro facce laterali del cubetto, distante 2 mm da esso.

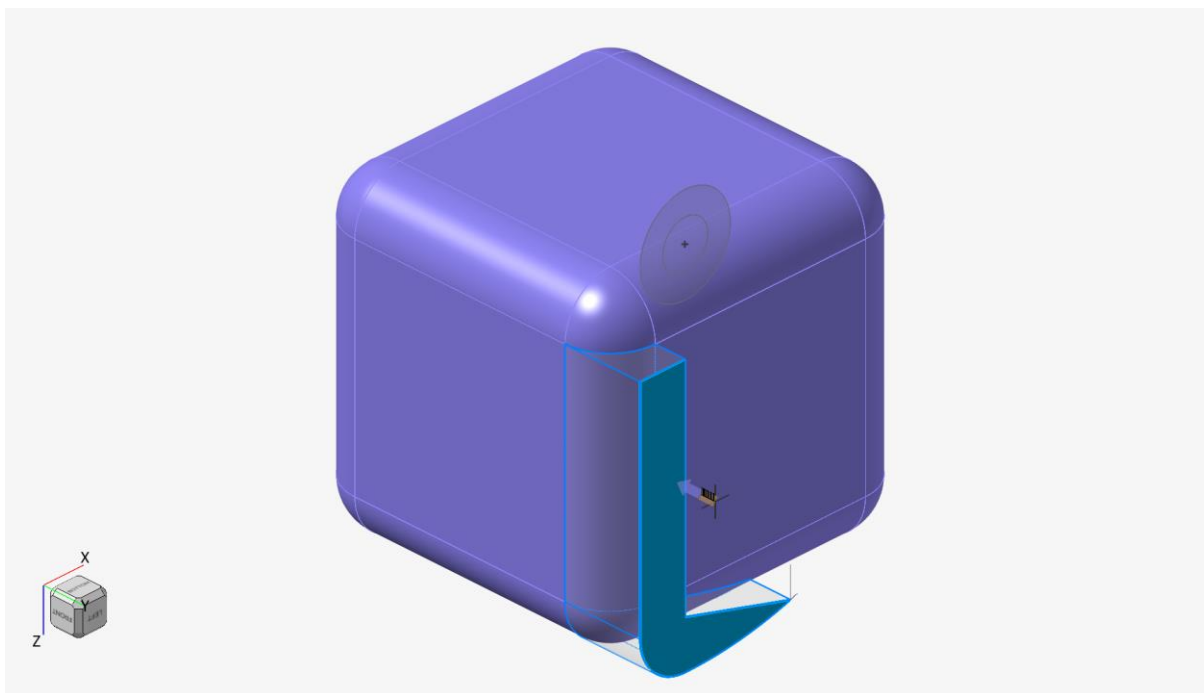
I due cerchi concentrici presenti nella parte superiore della *Figura 83* presentano: il cerchio di dimensioni inferiori 3 mm di diametro, mentre il cerchio più grande 6 mm. Nella parte centrale è stata generata una geometria rettangolare il cui lato inferiore si trova a 3 mm dal piano su cui poggia il cubetto e si estende in direzione z per 14 mm.

Inferiormente è presente la particolare geometria che sarà deputata a sostenere il cubetto lungo tutto il percorso di movimentazione. L'arco di circonferenza presente in basso in *Figura 83* con rispetto ad un riferimento corrispondente al centro dei due cerchi rappresenta, come nel caso dei braccetti, il limite inferiore per la progettazione dei supporti. Al di sotto di questo limite si incorrerebbe, infatti, nella collisione con la superficie su cui giace il cubetto. Il segmento inclinato, invece, nella geometria finale faciliterà lo scivolamento del cubetto in fase di rilascio del cubetto.



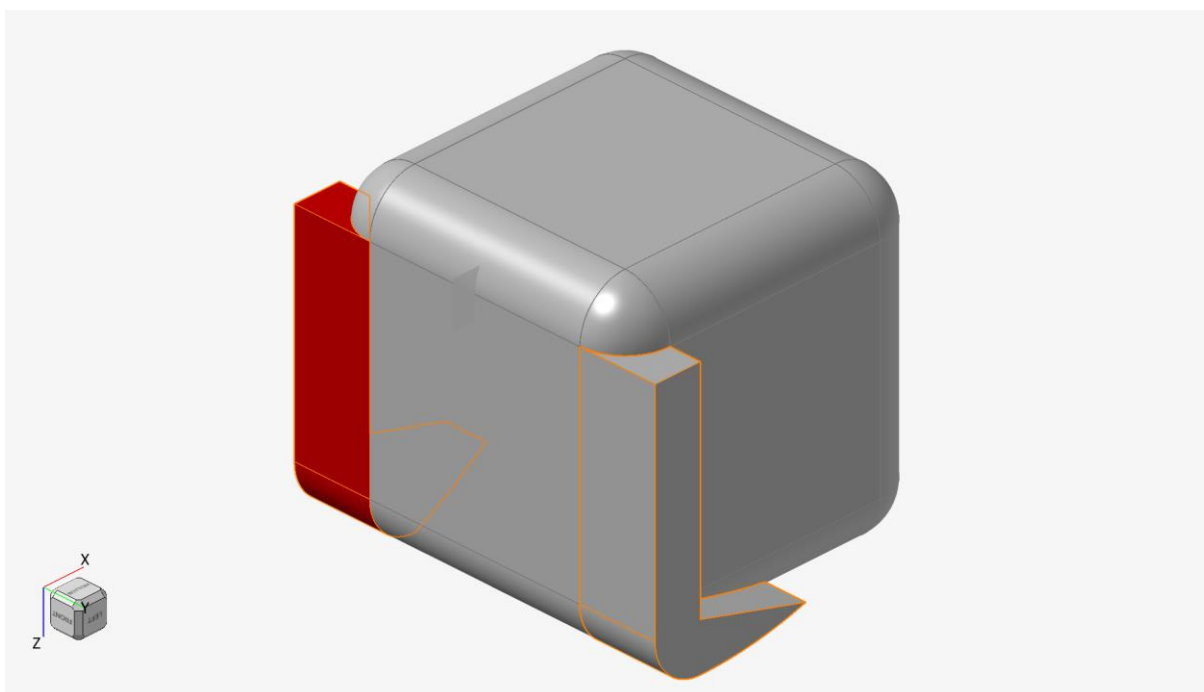
**FIGURA 83: SCHIZZO DI PARTENZA PER LA COSTRUZIONE DEL BRACCETTO PORTA COMPONENTE**

Il rettangolo insieme alla figura sottostante presente in *Figura 83* vengono estrusi in direzione y fino alla superficie del cubetto (*Figura 84*).



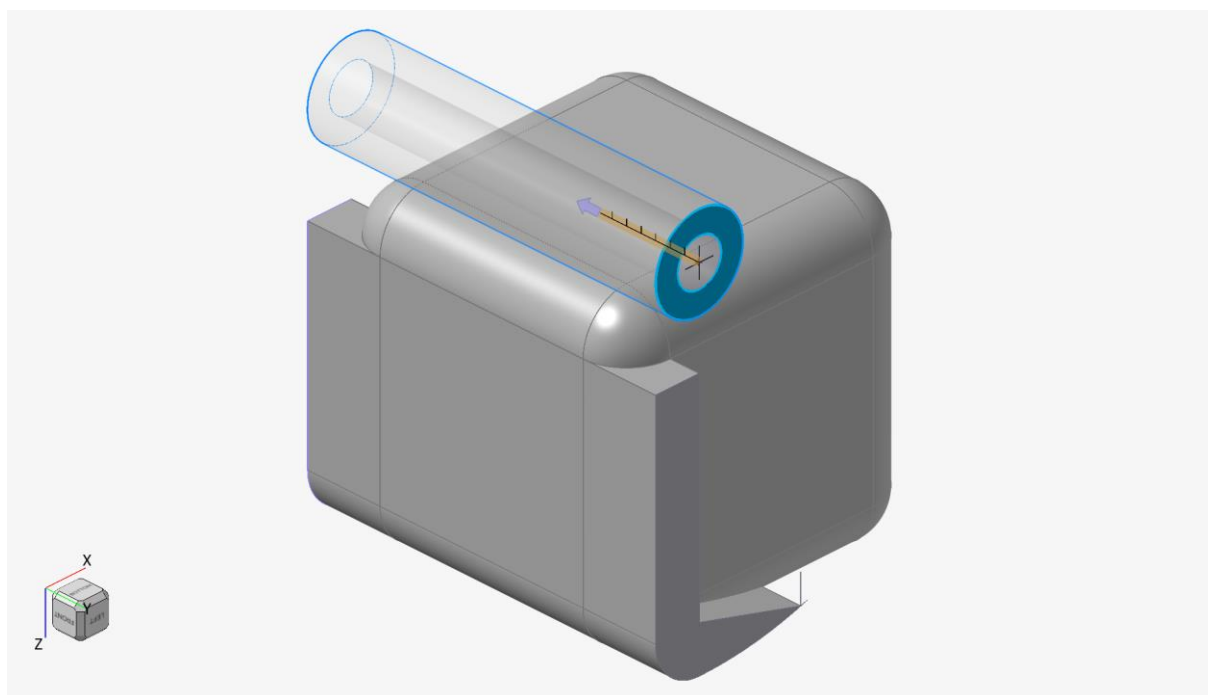
**FIGURA 84: ESTRUSIONE SCHIZZO FINO ALLA SUPERFICIE DEL CUBETTO**

L'elemento appena creato viene a questo punto specchiato grazie al comando "Mirror" rispetto ad un piano parallelo al piano xz che divide in due parti uguali il cubetto (*Figura 85*).



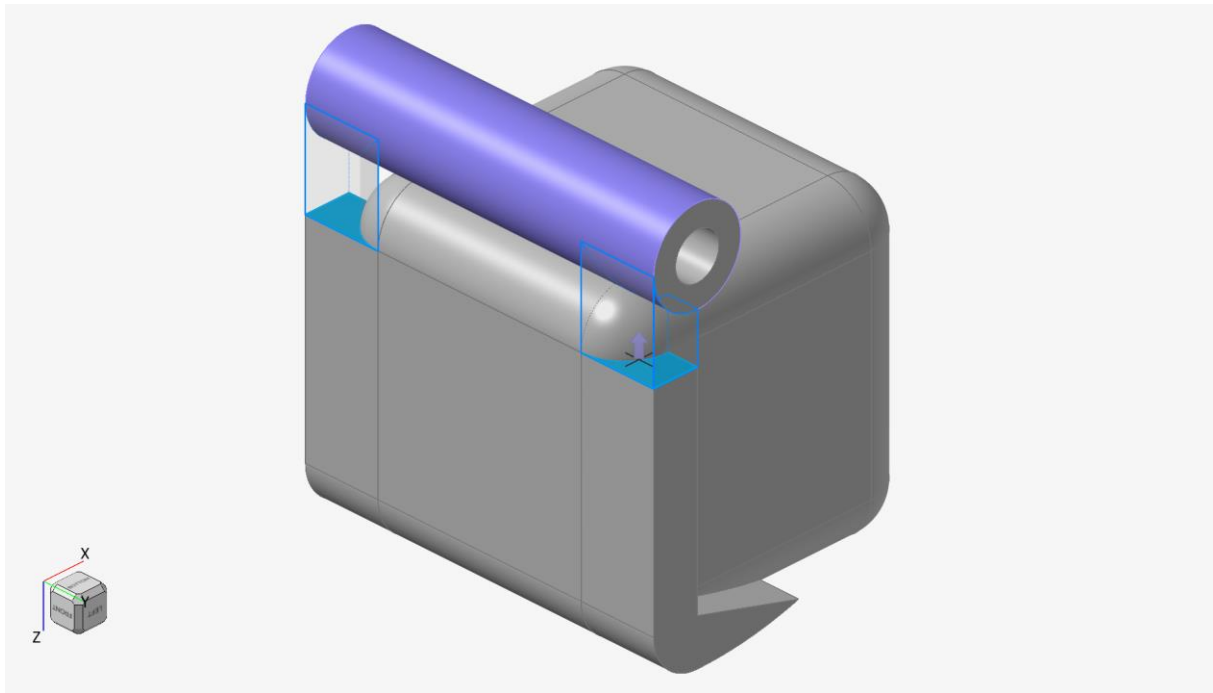
**FIGURA 85: SPECCHIATURA GEOMETRIA**

Viene adesso mostrata in *Figura 84* l'estrusione per la creazione del cilindro forato rispetto al cui asse ruoterà l'intero braccetto, la cui sezione corrisponde alla geometria dei due cerchi concentrici visti in *Figura 83*.



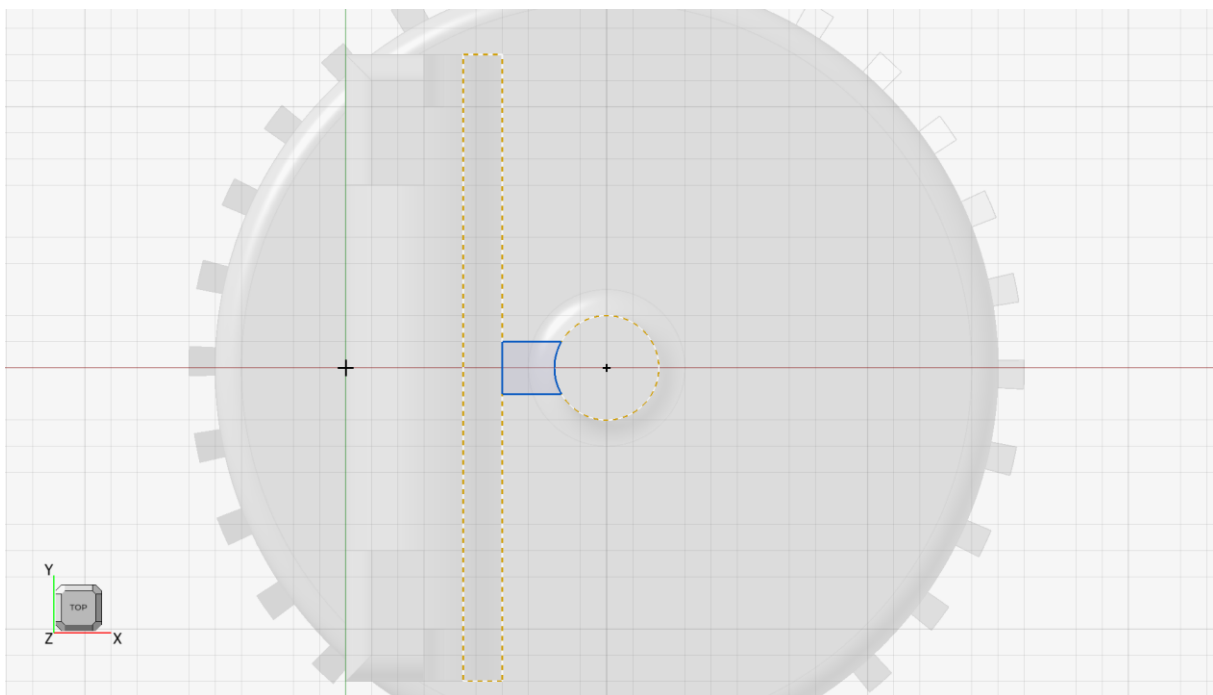
**FIGURA 86: ESTRUSIONE PER LA GENERAZIONE DEL CILINDRO**

Per unire le tre parti appena create viene estrusa la superficie superiore dei due rami fino alla superficie del cilindro (*Figura 87*).

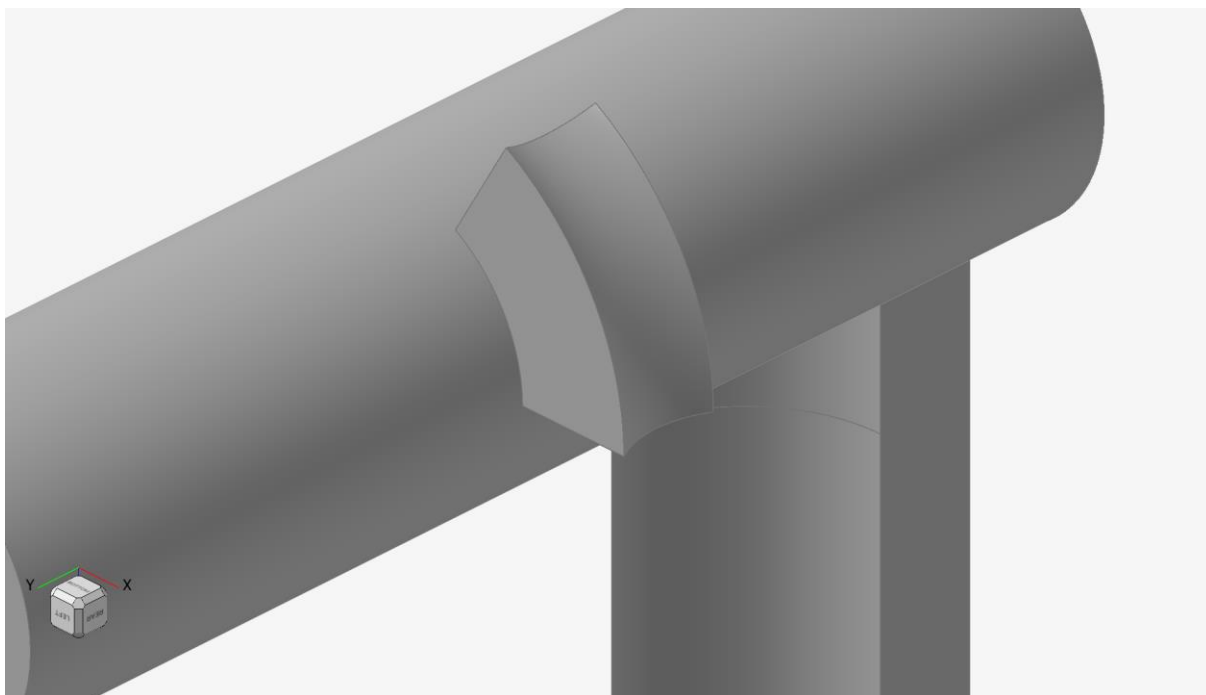


**FIGURA 87: ESTRUSIONE PER UNIRE I TRE ELEMENTI**

Esattamente come nel caso dei braccetti porta gate, viene costruita un ulteriore elemento che ha la duplice funzione di ampliare localmente il raggio del cilindro fino a 5 mm, garantendo, inoltre, una superficie maggiore di applicazione delle forze di ingranamento (*Figure 88-89*).



**FIGURA 88: CREAZIONE SEZIONE DELL'ELEMENTO AGGIUNTIVO**



**FIGURA 89: ELEMENTO AGGIUNTIVO**

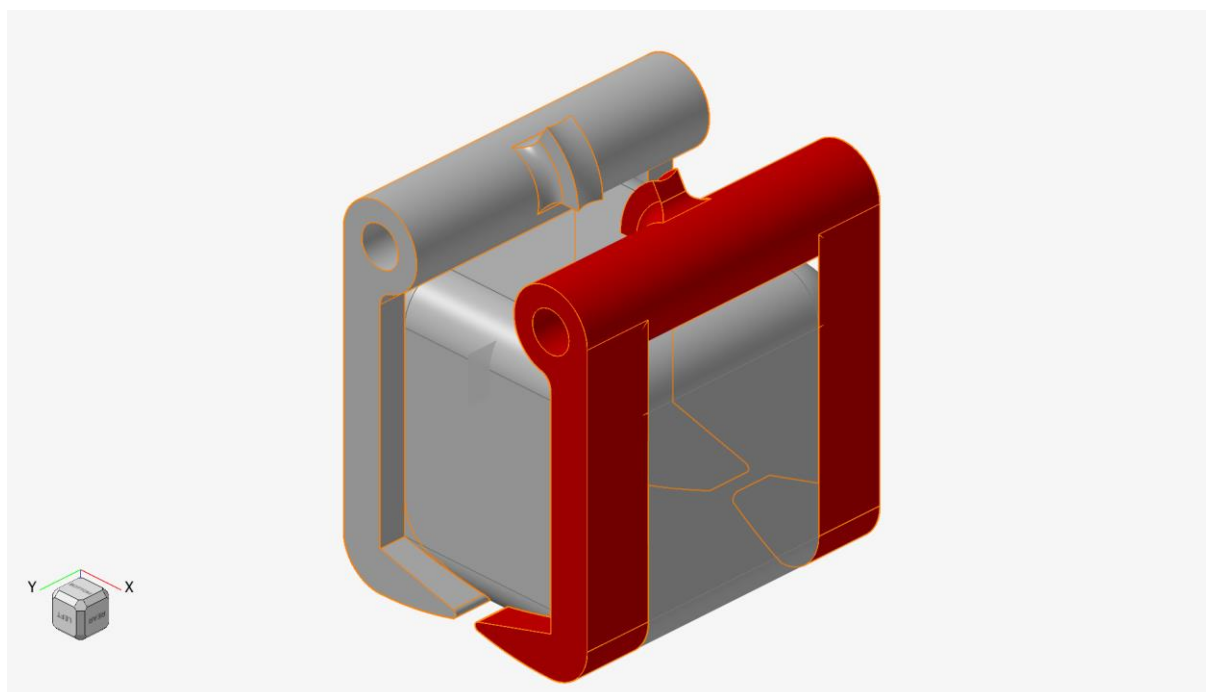
È necessario ricordare che l'accoppiamento tra il braccetto e il corpo centrale cilindrico del meccanismo è garantito da una filettatura, sebbene la stessa non sia rappresentata nelle immagini.

Siamo giunti a questo punto alla geometria finale del braccetto porta componenti, a cui viene apportata un'ulteriore modifica che prevede l'arrotondamento di spigoli in modo da evitare accumuli di tensione (*Figura 90*).



**FIGURA 90: GEOMETRIA FINALE BRACCETTO PORTA GRIPPER**

Con l'utilizzo del comando "Mirror" viene specchiato rispetto ad un piano parallelo al piano yz che divide in due parti uguali il cubetto (*Figura 91*).



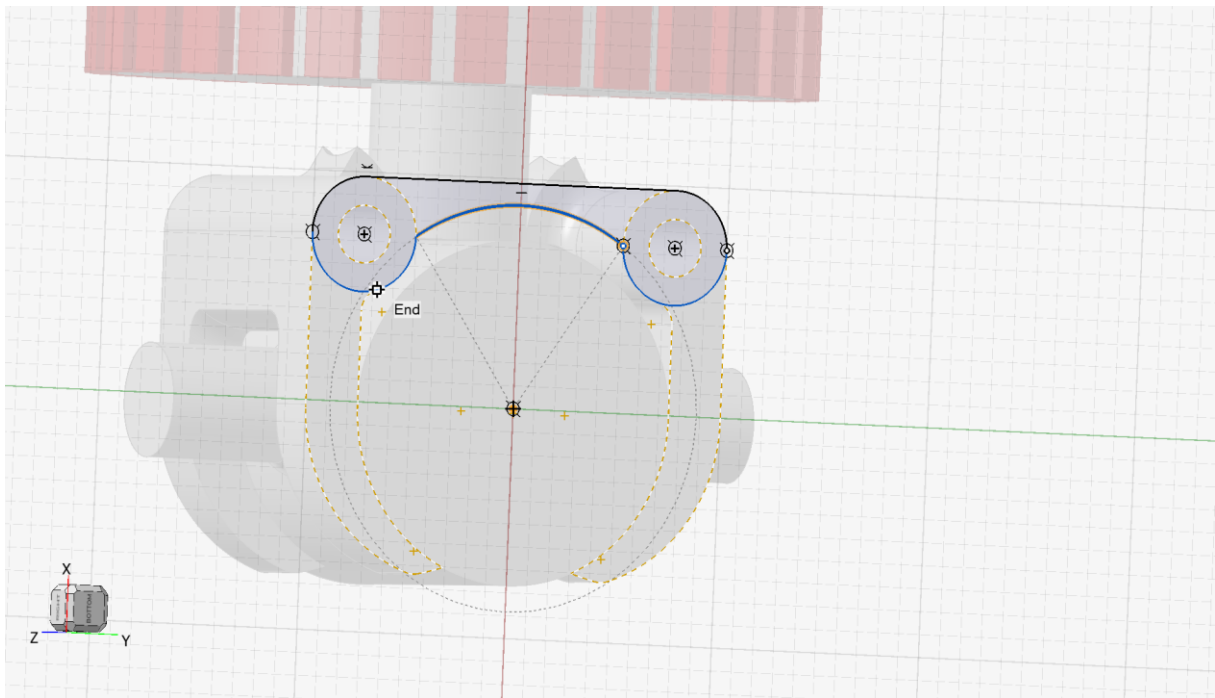
**FIGURA 91: BRACCETTI FINALI**



## 2.4 Costruzione dell'accoppiamento tra braccetti e meccanismo principale

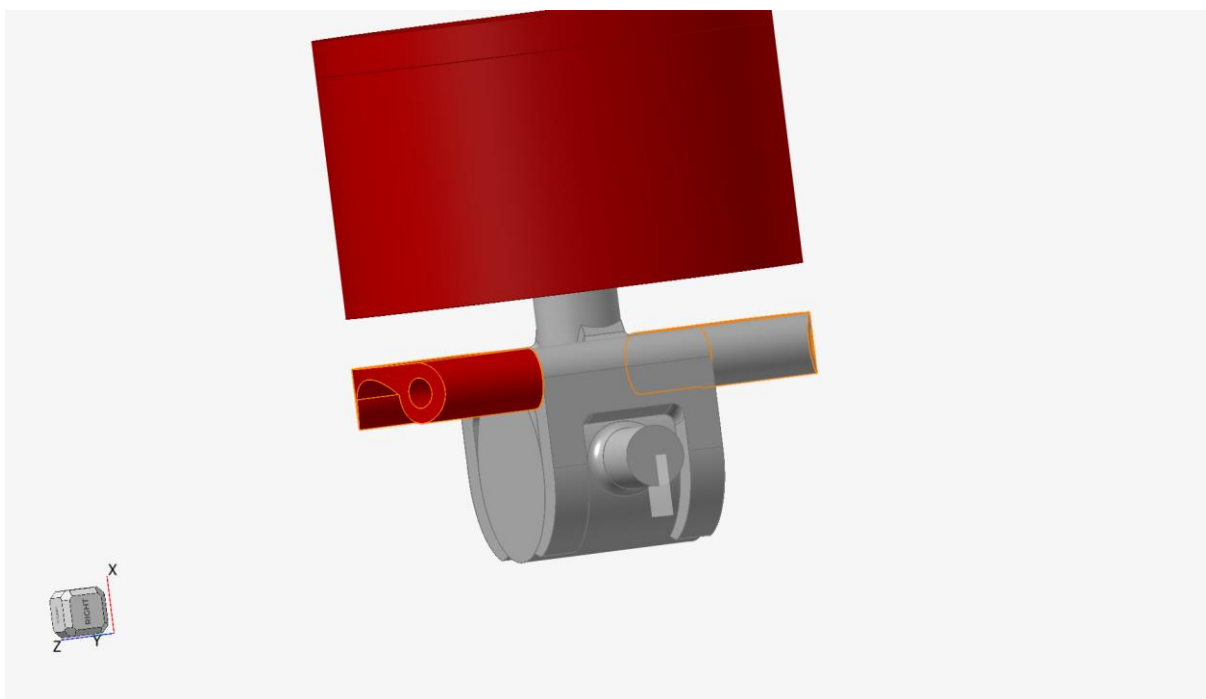
In questa sezione vengono mostrati invece i passaggi per unire i braccetti al meccanismo principale. Si prende in esame il collegamento previsto per i braccetti porta gripper ma la procedura è la stessa per entrambe le varianti di pinza.

In *Figura 92* è raffigurato lo schizzo di partenza per la costruzione del primo elemento.



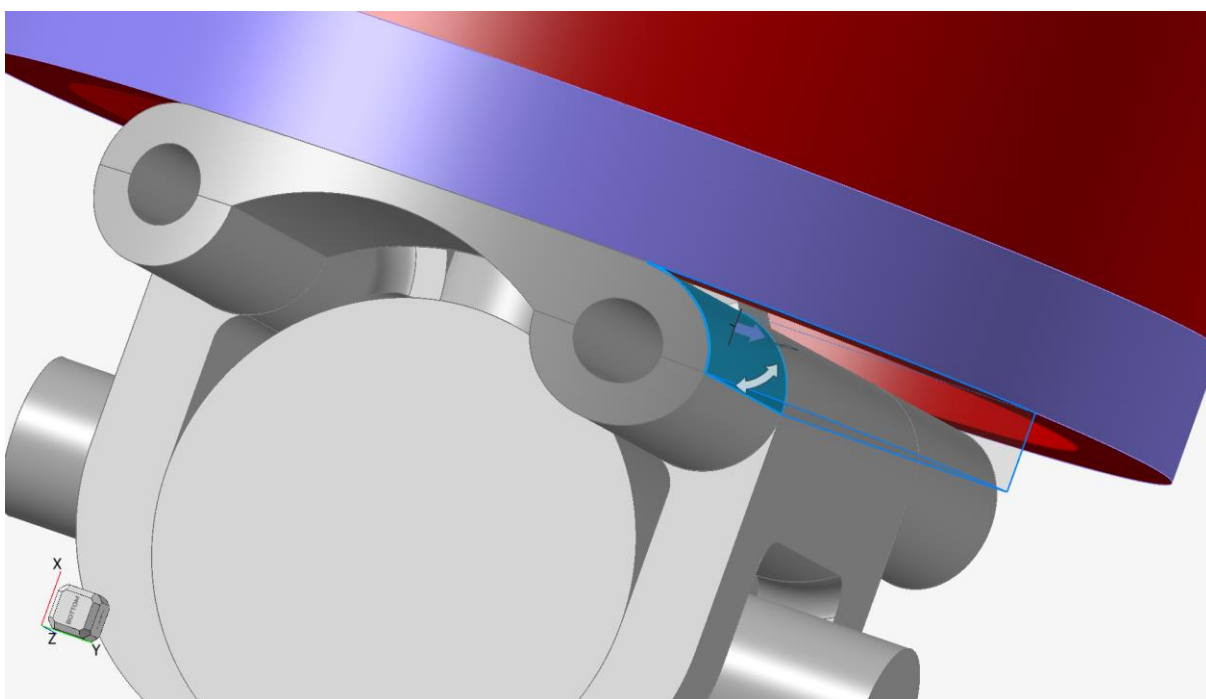
**FIGURA 92: SCHIZZO DEL SUPPORTO INIZIALE**

La geometria creata viene estrusa in direzione z fino alla superficie esterna della struttura vista in *Figura 67* e successivamente specchiata rispetto ad un riferimento parallelo al piano xy passante per l'asse di simmetria del corpo centrale. La *Figura 93* aiuta a chiarire meglio questi passaggi.



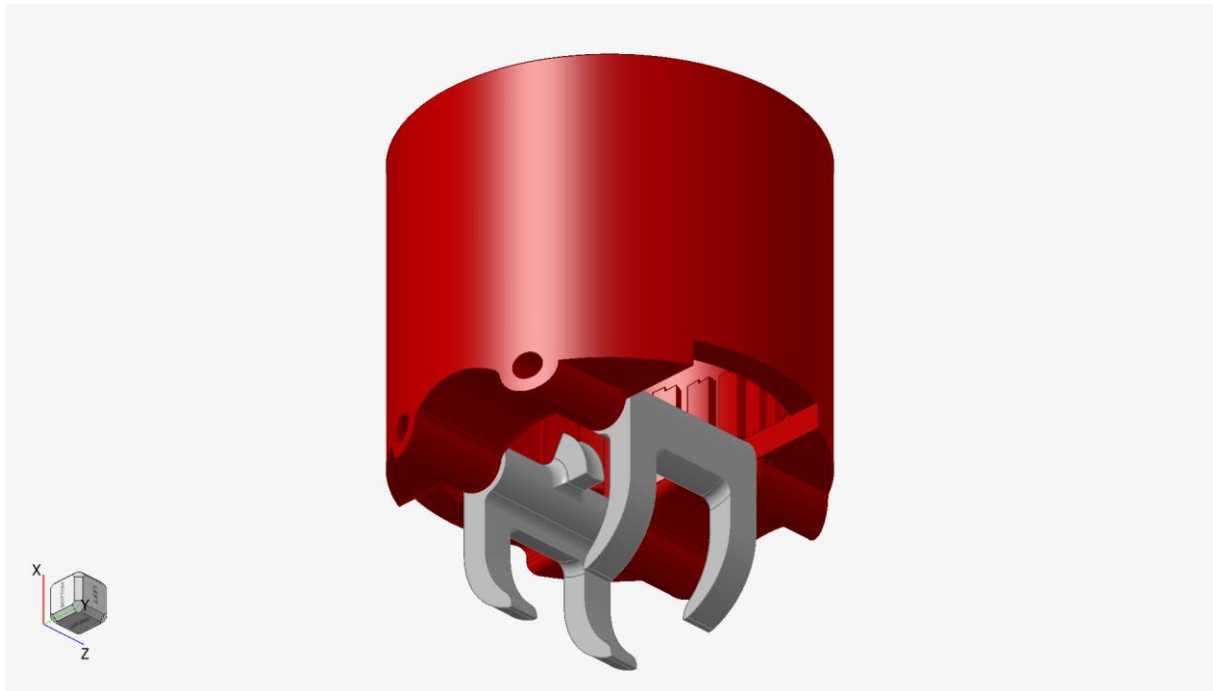
**FIGURA 93: CREAZIONI SUPPORTI PER L'ALLOGGIAMENTO DEI BRACCETTI**

A questo punto, in *Figura 94* la copertura laterale della struttura esterna viene proiettata fino ai supporti appena creati e unita ad essi.



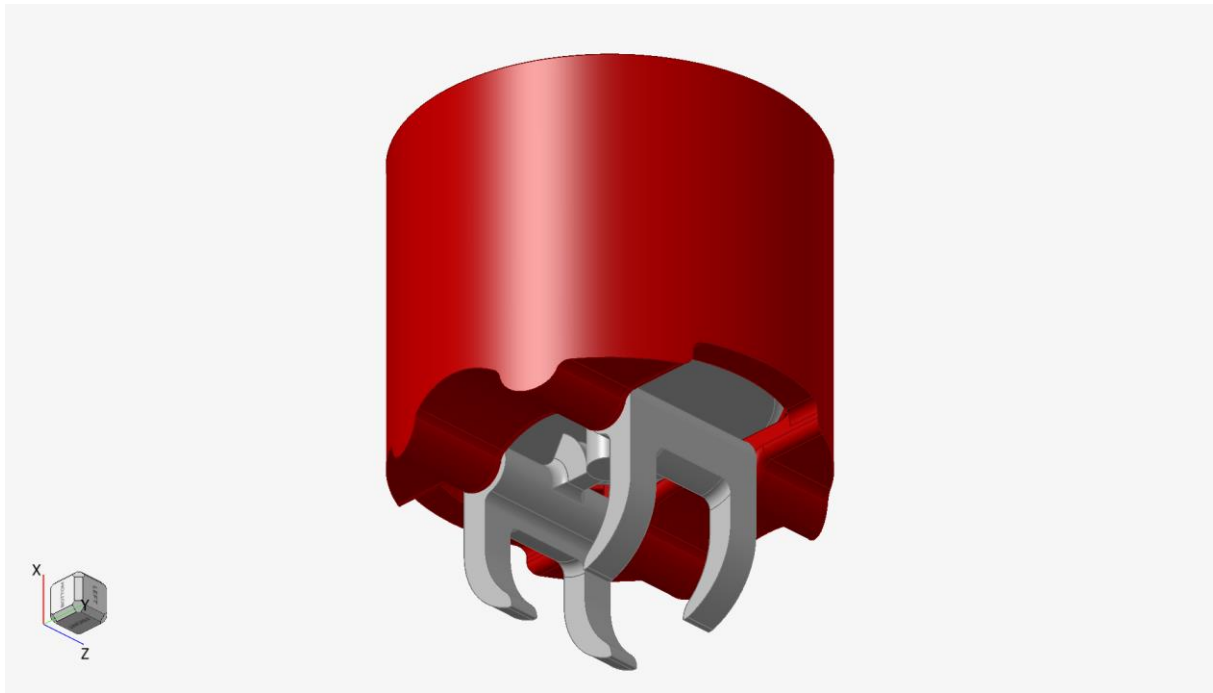
**FIGURA 94: PROIEZIONE DELLA SUPERFICIE LATERALE AL FINE DI UNIRLA AI SUPPORTI**

È utile rimuovere, dalla geometria appena creata, parte del materiale per consentire ai braccetti libertà di movimento (*Figura 95*).



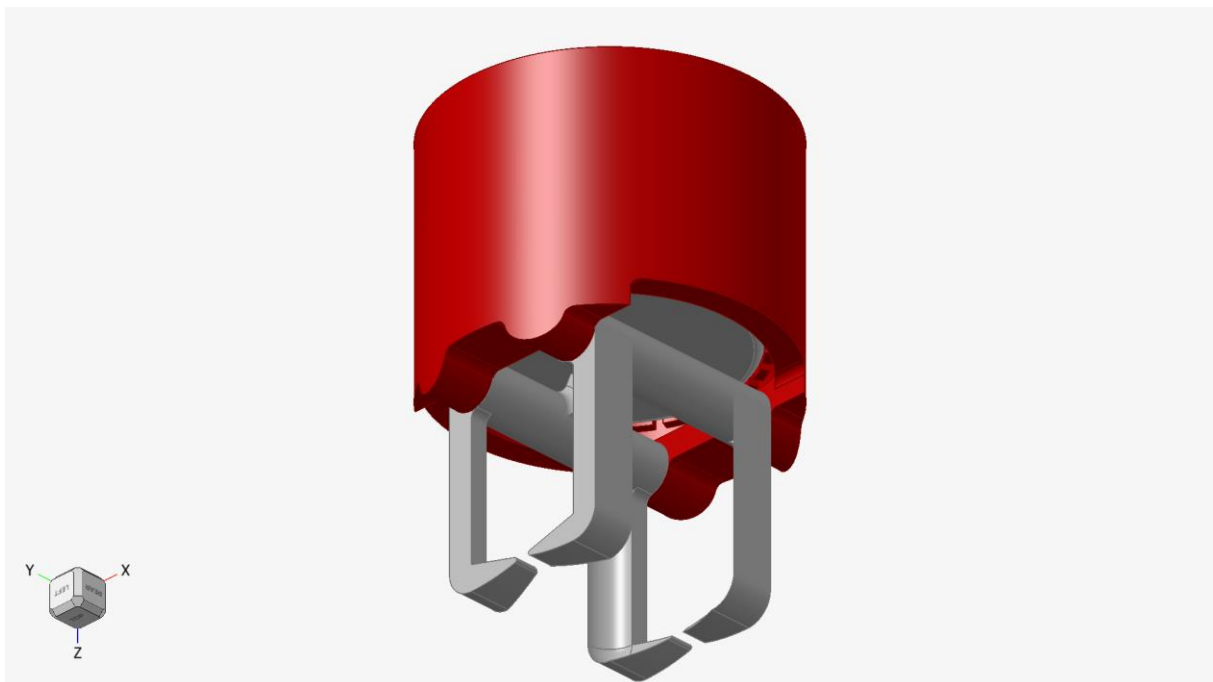
**FIGURA 95: RIMOZIONE MATERIALE DALLA SUPERFICIE ESTERNA PER CONSENTIRE L'APERTURA DEI BRACCETTI**

A questo punto restano da installare due spinotti che vincolano i braccetti alla struttura. Entrambi gli spinotti verranno uniti alla struttura principale attraverso un'operazione “booleana” di unione. In *Figura 96*, in aggiunta a quanto appena descritto vengono smussati gli spigoli vivi attraverso il comando “fillets”.



**FIGURA 96: GRIPPER PORTA GATE FINALE**

Il redesign del gripper per la movimentazione dei canali di alimentazione può dirsi concluso. Per completezza, in *Figura 97*, viene mostrato il redesign completo del gripper porta componenti.



**FIGURA 97: GRIPPER PORTA COMPONENTI FINALE**

## 2.5 Funzionamento del meccanismo complessivo

Viene illustrato adesso il funzionamento del cinematismo completo il cui movimento è suddiviso in quattro fasi:

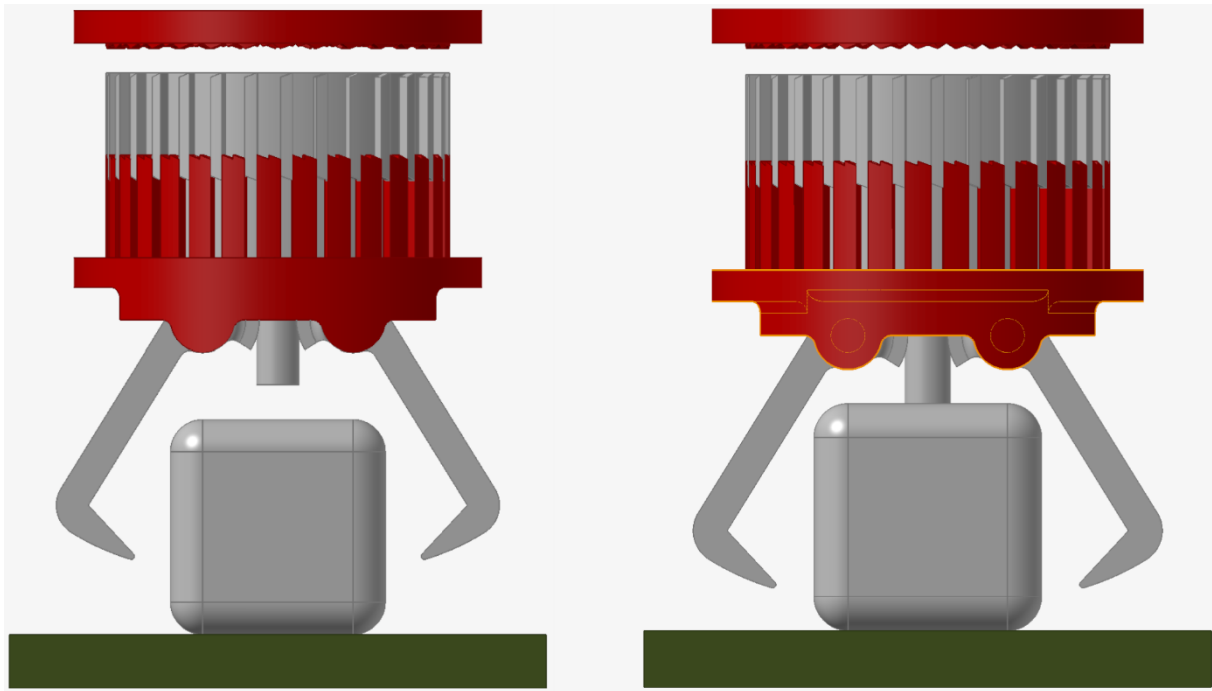
- Meccanismo aperto: il componente è posizionato sulla superficie di partenza
- Avvolgimento e bloccaggio del meccanismo
- Movimentazione
- Riposizionamento e sbloccaggio

Per facilitare la lettura delle immagini verrà rimossa la superficie laterale che copre il meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio.

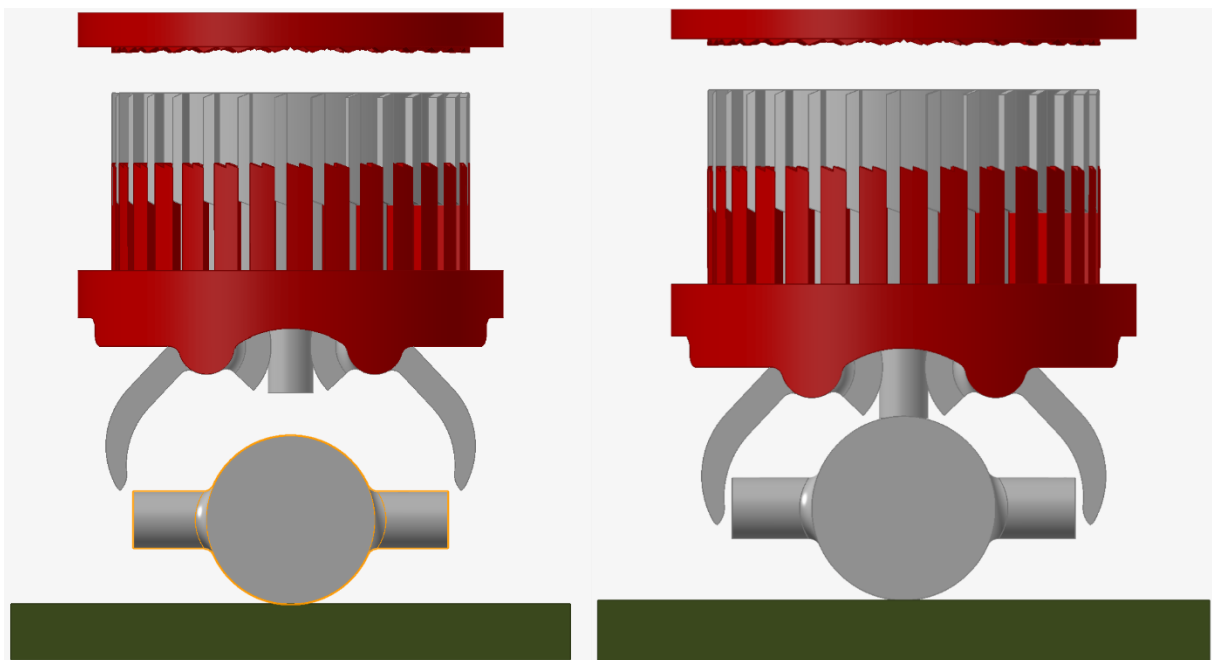
### **Fase 1 – Meccanismo aperto: il componente è posizionato sulla superficie di partenza**

Come visto in precedenza, in assenza di forza esterne, il corpo centrale è spinto dalla forza peso a posizionarsi al fine corsa inferiore, costringendo i due braccetti laterali, il cui peso complessivo è notevolmente inferiore rispetto al corpo centrale, ad aprirsi completamente.

In *Figura 98-99* viene mostrata la fase iniziale in cui il componente si trova sulla superficie di partenza ed il gripper, guidato dal movimento del braccio robotico si avvicina al componente da movimentare. Il primo contatto avviene tra il corpo centrale e il componente da movimentare.



**FIGURA 98: AVVICINAMENTO GRIPPER AL COMPONENTE**



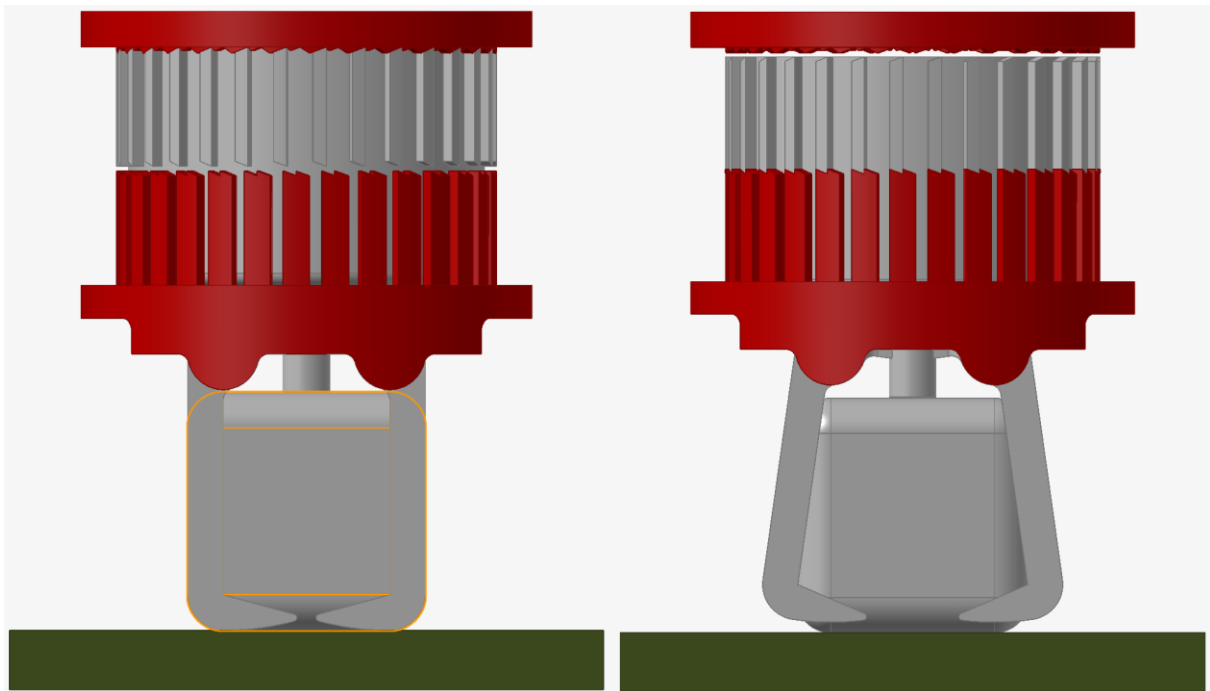
**FIGURA 99: AVVICINAMENTO GRIPPER AL CANALE DI ALIMENTAZIONE**

## **Fase 2 – Avvolgimento e bloccaggio del meccanismo**

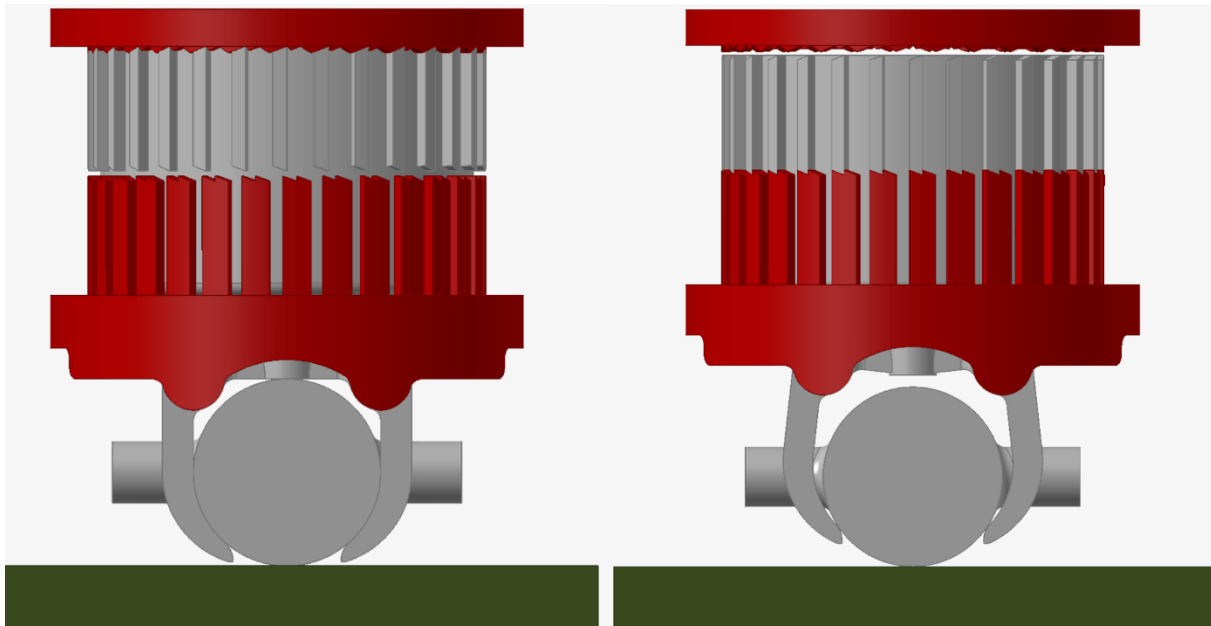
Il corpo centrale, dal momento in cui viene in contatto con l'elemento da movimentare viene forzato a risalire fino al fine corsa superiore, con una piccola rotazione in senso orario imposta dalla dentatura superiore come visto al *Paragrafo 2.2.1*. La traslazione del corpo centrale

impone, inoltre, ai due braccetti di richiudersi avvolgendo il corpo (a sinistra della *Figura 100-101*).

Dal punto in cui il corpo centrale raggiunge il fine corsa superiore inizia il moto di risalita del braccio robotico che dà il via all'operazione di movimentazione. In questa fase avviene il bloccaggio del meccanismo, che comporta una piccola rotazione di ritorno dei braccetti ( $10,27^\circ$  per il gripper porta componenti e  $8,5^\circ$  per il gripper porta gate). Da questo punto in poi, mostrato a sinistra della *Figura 100-101*, il peso del componente non grava più sulla superficie ma sui braccetti.



**FIGURA 100: BLOCCAGGIO GRIPPER PER MOVIMENTAZIONE COMPONENTI**



**FIGURA 101: BLOCCAGGIO GRIPPER MOVIMENTAZIONE GATE**

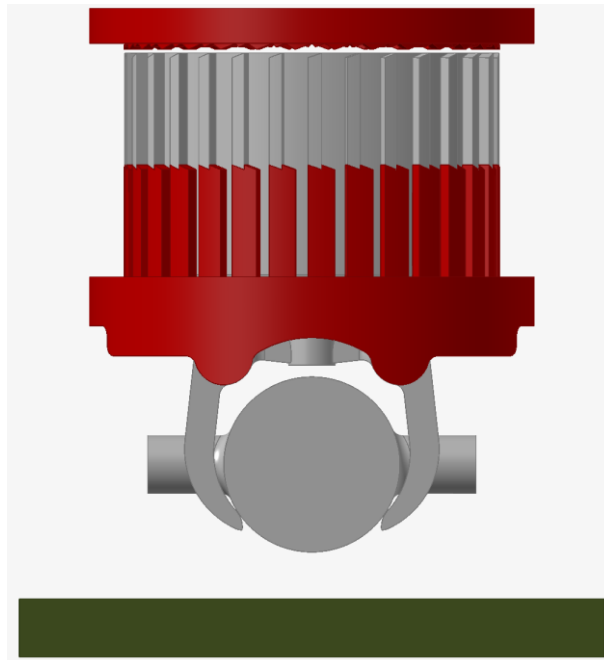
### **Fase 3 – Movimentazione**

Durante il tragitto in cui gli elementi vengono movimentati, essi sono vincolati in tutte le direzioni dalla geometria dei braccetti. All'interno dei braccetti sono consentiti piccoli movimenti a causa della piccola corsa di ritorno in seguito al bloccaggio che non costituiranno tuttavia una criticità e che, se presenti saranno, come si vedrà in seguito, compensati in fase di riposizionamento (*Figura 102-103*).



**FIGURA 102: MOVIMENTAZIONE GRIPPER PER COMPONENTE**



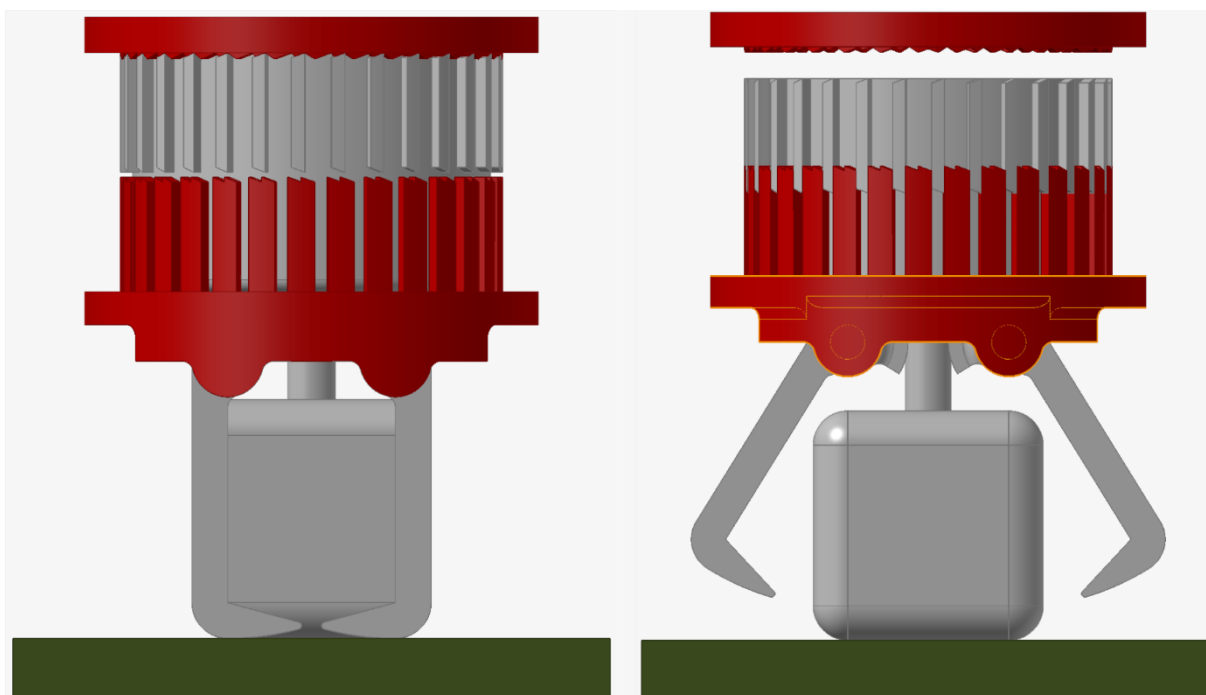


**FIGURA 103: MOVIMENTAZIONE GATE**

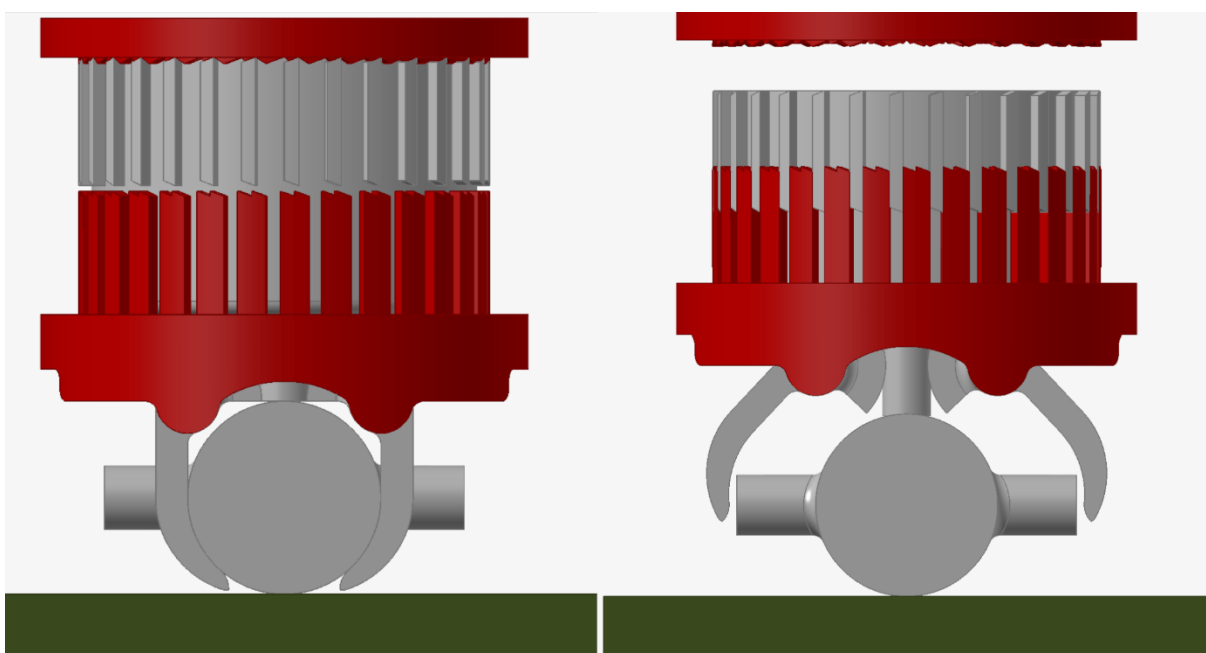
#### **Fase 4 – Posizionamento e sbloccaggio**

Il componente movimentato viene guidato nel punto esatto di posizionamento finale dove a seguito di una pressione sul componente, dovuta al movimento del braccio robotico, il corpo centrale viene nuovamente spinto verso il fine corsa superiore e forzato a eseguire una piccola rotazione in senso orario. I braccetti, a seguito del movimento del corpo centrale sono nuovamente guidati a riavvolgere il componente, compensando possibili piccoli movimenti che potrebbero essere avvenuti durante la movimentazione.

A seguito della risalita del braccio robotico, il corpo centrale viene nuovamente spinto verso il basso dalla forza peso e, a seguito di una piccola rotazione sul suo stesso asse imposta dalla dentatura, viene guidato al binario in cui è libero di traslare verticalmente, sbloccando l'intero meccanismo e rilasciando nella corretta posizione gli elementi movimentati (*Figure 104-105*).



**FIGURA 104: POSIZIONAMENTO E SBLOCCAGGIO GRIPPER PORTA COMPONENTI**



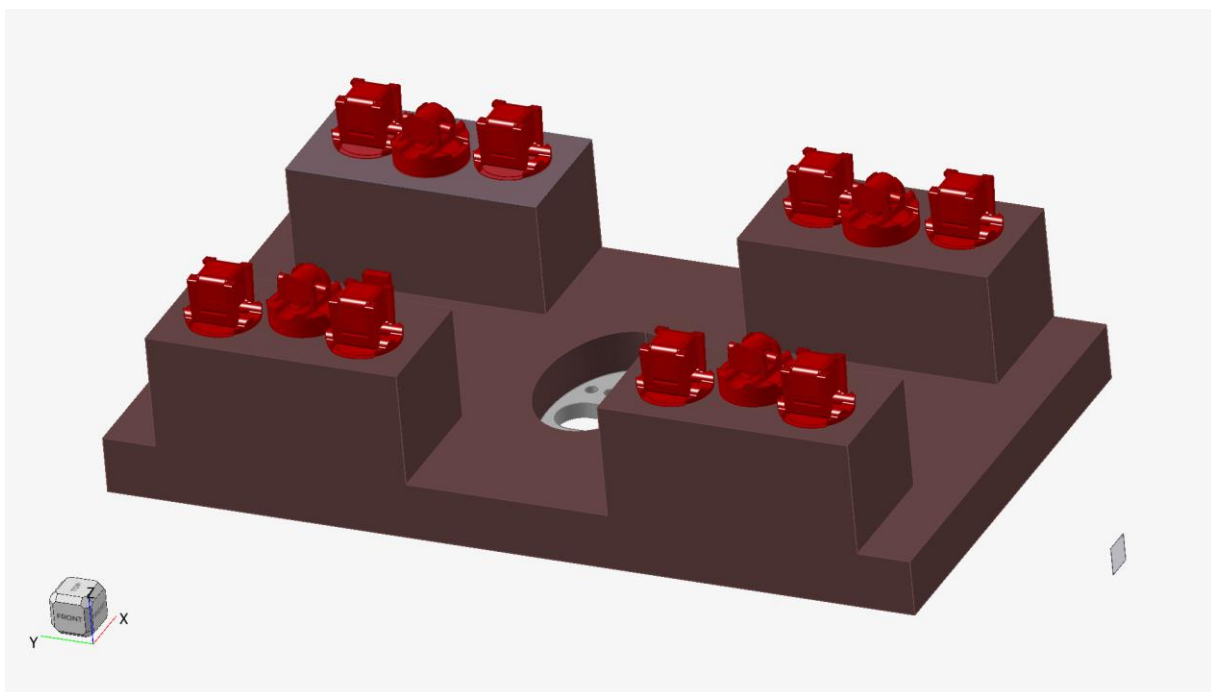
**FIGURA 105: POSIZIONAMENTO E SBLOCCAGGIO GRIPPER PORTA GATE**

## 2.6 Posizionamento dei gripper e ottimizzazione topologica

In questo paragrafo vengono mostrati i passaggi necessari ad ottenere la geometria finale dell'intero end-effector.

In primo luogo, vengono posizionati i nuovi gripper - a cui sono integrati i componenti da movimentare al fine di ottenere risultati il più precisi possibile - considerando come riferimento il punto esatto dove erano collocati i corpi da movimentare rispetto alla piastra di collegamento al braccio robotico nell'end-effector iniziale. Questa operazione consente di non lasciare inalterato il percorso del braccio robotico. Viene inoltre garantita l'orientazione iniziale di apertura di tutti i gripper.

La *Figura 106* mostra, oltre al posizionamento dei gripper, in bordeaux lo spazio di progettazione oggetto di ottimizzazione topologica, mentre centralmente viene mantenuta inalterata la geometria del settore in cui sono presenti i fori per l'accoppiamento della struttura con il braccio robotico. Lo spessore dello spazio di progettazione è di 30 mm al netto del materiale necessario al collegamento con i gripper.



**FIGURA 106: POSIZIONAMENTO GRIPPER E DEFINIZIONE SPAZIO DI PROGETTAZIONE**

Definiti i vincoli, che corrispondono ai dieci fori dell'end-effector di partenza, e definiti i carichi rappresentati dalla forza peso che grava sui gripper e la struttura, viene eseguita l'ottimizzazione del volume dello spazio di progettazione, ponendo come obiettivo la massimizzazione della rigidità (Figura 107).

In Figura 108 vengono mostrati i risultati dell'ottimizzazione topologica.

Run Optimization

Name: END-EFFECTOR

Type: Topology

Objective: Maximize Stiffness

Mass Targets: % of Total Design Space Volume

5 10 15 20 25 30 35 40 45 50%

30.0

Frequency Constraints

None

Maximize frequencies

Minimum: 20.0 Hz Apply to lowest 10 modes

Use supports from load case: No Supports

Thickness Constraints

Minimum: Auto

Maximum: Auto

Speed/Accuracy

Contacts

The contact type is now defined using the Contacts tool.

Gravity

No

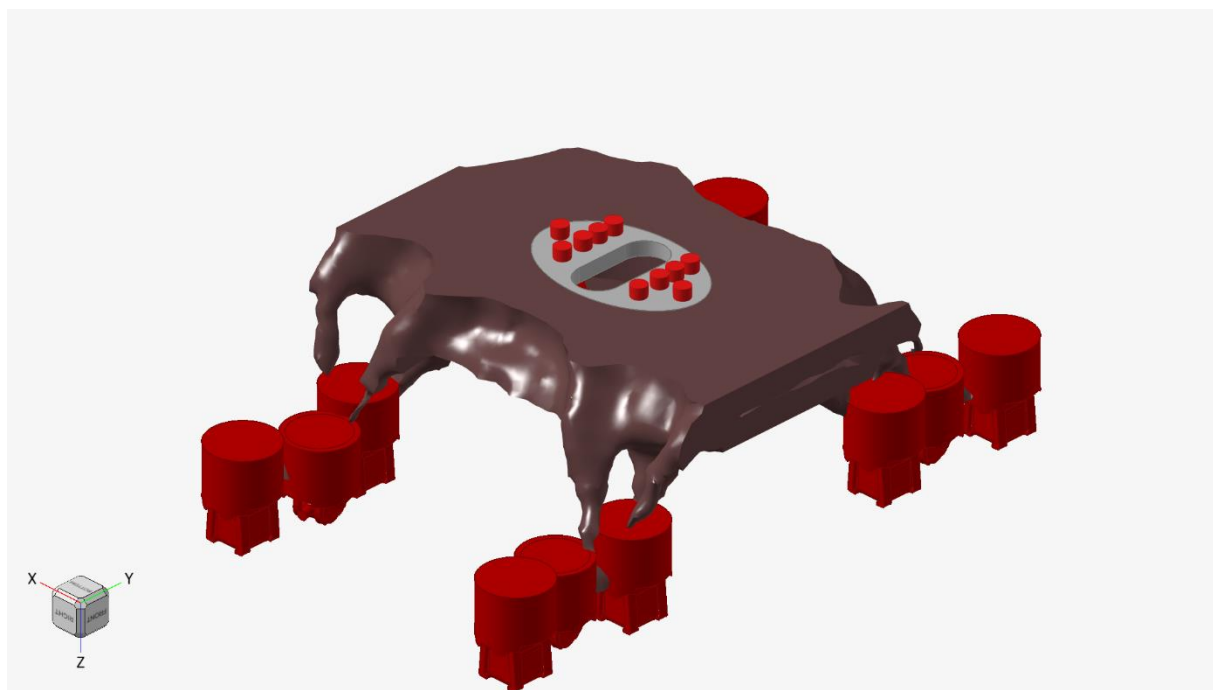
Yes

Load Cases

Restore

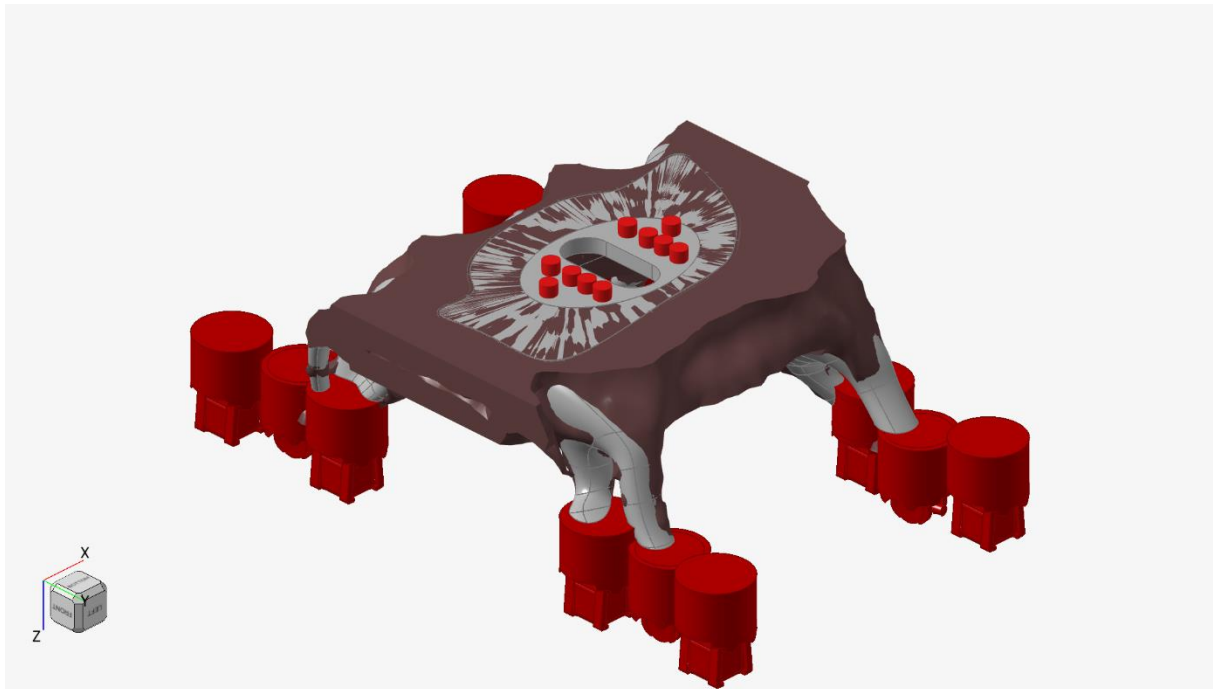
Export Run Close

**FIGURA 107: PARAMETRI PER L'OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA**



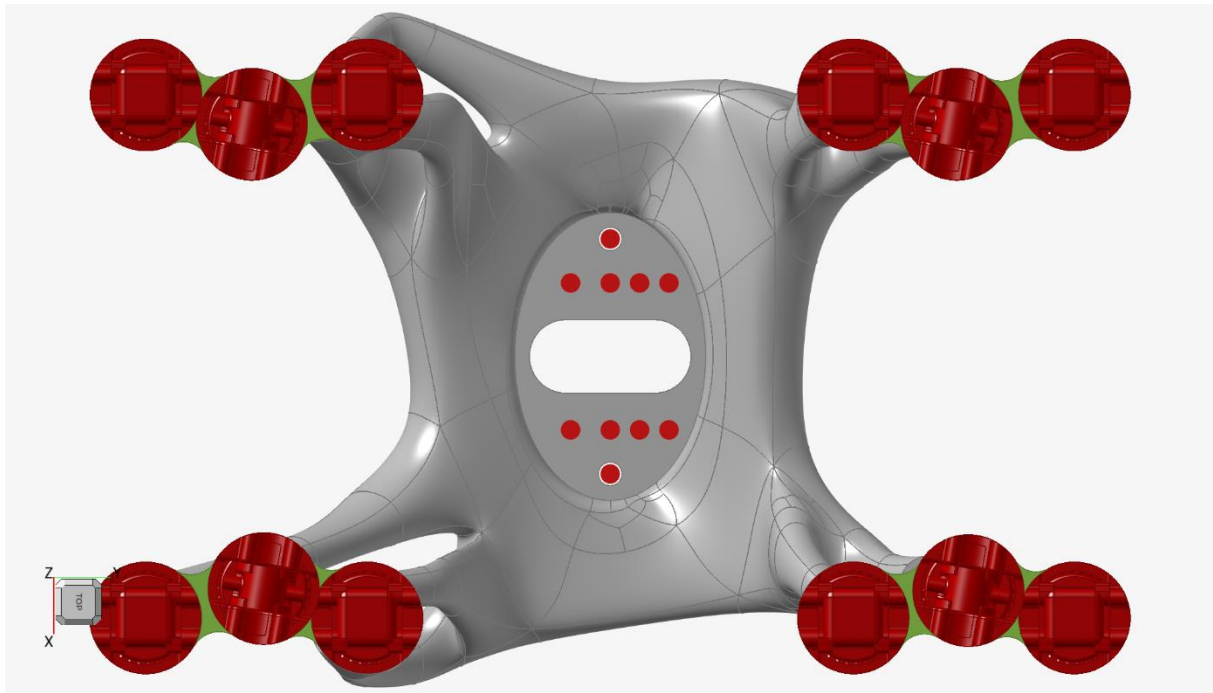
**FIGURA 108: RISULTATI OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA**

La geometria appena creata viene ricalcata grazie al comando “*Wrap*” nella sezione “*PolyNURBS*” del software *Altair Inspire 2025.1* in modo da ridisegnare i settori in cui è necessario mantenere il materiale cercando di addolcire il più possibile la geometria finale. In *Figura 109* viene mostrato il risultato di questa operazione.



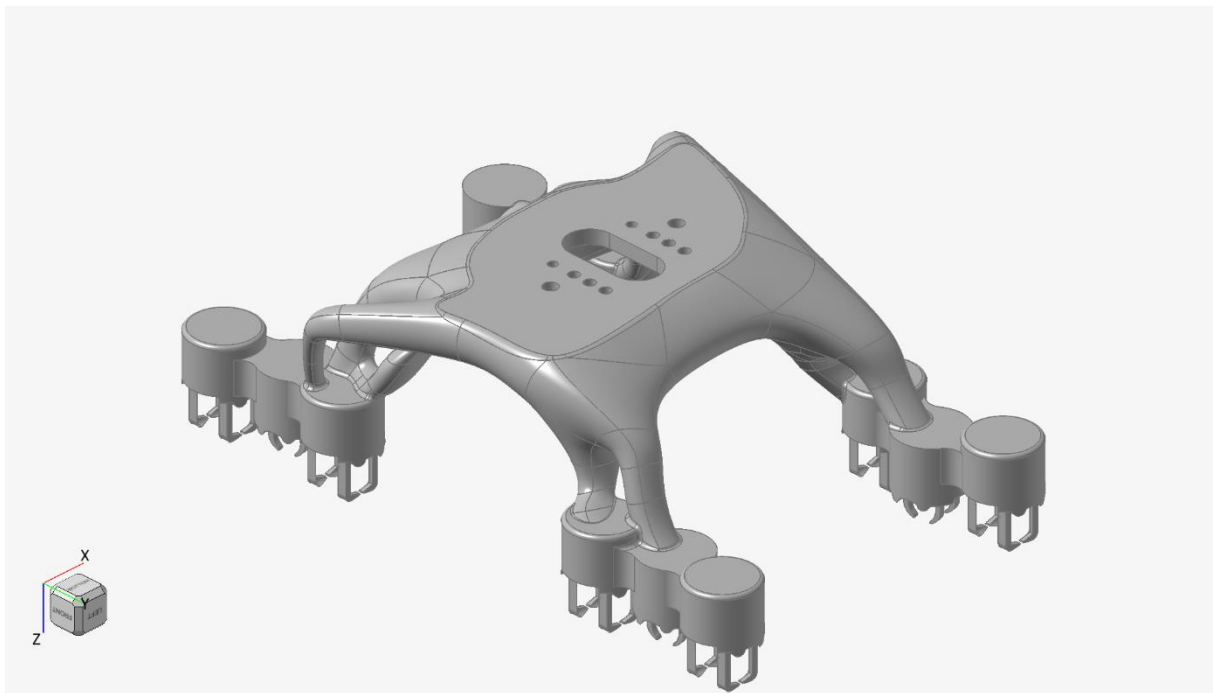
**FIGURA 109: CREAZIONE GEOMETRIA TELAIO**

Vengono inoltre inseriti degli inserti, che verranno considerati parte della struttura, di volume molto contenuto, che hanno il ruolo di unire in modo ottimale i gripper tra loro (in verde in *Figura 110*).



**FIGURA 110: ELEMENTI DI COLLEGAMENTO TRA GRIPPER**

La geometria dell'intero end-effector riprogettato a questo punto viene leggermente modificata eliminando gli spigoli presenti nel collegamento tra telaio e gripper. In *Figura 111* è mostrato il redesign finale.



**FIGURA 111: REDESIGN END-EFFECTOR FINALE**

## 2.7 Considerazioni finali sul redesign

Nell'ottica della valutazione delle prestazioni del redesign dell'end-effector appena proposto, è importante soffermarsi sul fatto che l'assieme presentato nei precedenti paragrafi rappresenta una soluzione relativa alla movimentazione di componenti la cui geometria è stata oggetto di assunzioni e potrebbe non essere rappresentativa della reale forma degli oggetti reali. Tuttavia, è altrettanto importante notare come il sistema in esame si presti molto bene a modifiche geometriche. Infatti, sebbene non sia nota la reale geometria dei componenti da movimentare, dalle caratteristiche delle pinze pneumatiche preesistenti possiamo desumere che il volume di questi componenti non si discosti di molto dal volume ipotizzato, quindi le modifiche necessarie ad ottimizzare il meccanismo di presa potrebbero riguardare la sola forma dei braccetti e l'altezza del cilindro inferiore del corpo centrale roto-traslante, mantenendo inalterati tutti gli altri elementi.

Un altro aspetto interessante di questa soluzione riguarda il fatto che modulando opportunamente i parametri geometrici del meccanismo è possibile sviluppare una soluzione basata sugli stessi principi di funzionamento, potenzialmente per qualsiasi geometria. I parametri che influenzano le prestazioni sono i seguenti:

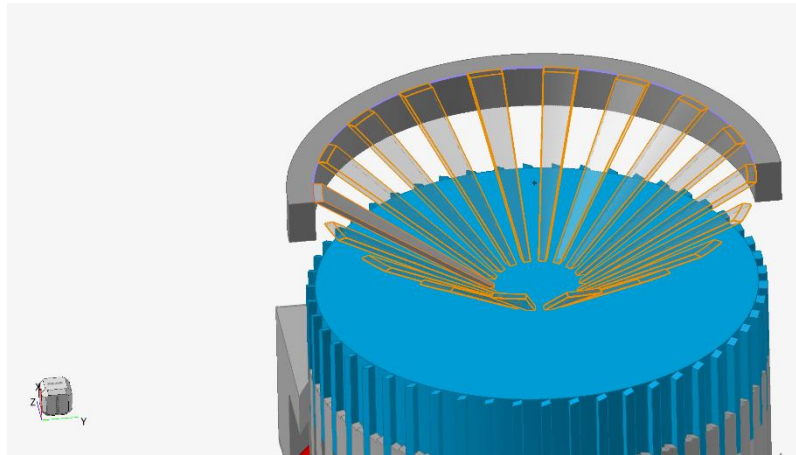
- Numero di denti del meccanismo
- Geometria dei denti del meccanismo
- Diametri inferiore e superiore del corpo centrale
- Raggio di collegamento dei braccetti

Modulando quindi opportunamente i parametri geometrici appena descritti, oltre alle opportune modifiche relative alla morfologia degli elementi di sostegno che vanno ottimizzati in relazione alla geometria da movimentare, è possibile sviluppare una soluzione personalizzata di gripper passivo. Un'altra possibile modifica al meccanismo proposto potrebbe riguardare l'installazione di più di due braccetti, immaginando di saturare la superficie filettata del corpo cilindrico centrale in modo da migliorare e personalizzare il meccanismo di presa in relazione alla geometria dei componenti da movimentare.

È importante, d'altra parte, considerare quali potrebbero essere le criticità di questo modello. Risulta, infatti, opportuno tenere conto degli attriti che certamente saranno presenti sulle superfici di scorrimento (ad esempio le pareti del corpo centrale) che potrebbero causare imprevisti nel funzionamento del gripper. Una soluzione a questo problema potrebbe essere

rappresentata dall'integrazione nella geometria della superficie esterna del gripper, di strutture come quelle mostrate in *Figura 112* il cui comportamento flessionale consentirebbe di incrementare la forza che spinge verso il basso il corpo centrale, rendendo più stabile il comportamento dell'intero meccanismo.

Si potrebbe in alternativa pensare di lubrificare il meccanismo opportunamente per facilitare lo scorrimento tra i corpi. Un'altra criticità potrebbe essere rappresentata ad esempio dall'usura degli spigoli appuntiti della dentatura del meccanismo che



**FIGURA 112: POSSIBILE INTEGRAZIONE SULLA STRUTTURA DEL GRIPPER**

potrebbe influire negativamente sulla durata dell'end-effector.

Per quanto riguarda la produzione dell'end-effector mediante la tecnologia *HP MJF*, è possibile tenere in considerazione la eventualità di produrre l'intero assieme in un unico job, riducendo in modo rilevante i tempi di produzione, eliminando del tutto i tempi di assemblaggio. L'end-effector, in questo specifico caso, dovrà prevedere finestre di accesso al meccanismo per l'eliminazione del materiale di scarto che potrebbe annidarsi, ad esempio, nello spazio che si viene a creare tra il corpo centrale e la superficie superiore.

Infine, è possibile fare alcune considerazioni finali sul numero di componenti e il relativo peso.

Nello specifico gli elementi che compongono l'assieme finale sono:

- Telaio con superficie esterna gripper integrata: 1 componente
- Corpo centrale cilindrico: 12 componenti
- Braccetti: 24 componenti

Per un totale di trentasette componenti

Considerata la densità del PA12 prodotto attraverso *HP MJF* che risulta essere un valore intorno ai  $1,01 \text{ g/cm}^3$ , è possibile valutare il peso finale dei componenti. I componenti pesano rispettivamente:

- Telaio con superficie esterna del gripper integrata: 830 g



- Corpo centrale roto-traslante: 15 g
- Braccetto porta gate: 0,48 g
- Braccetto porta componente: 0,93 g

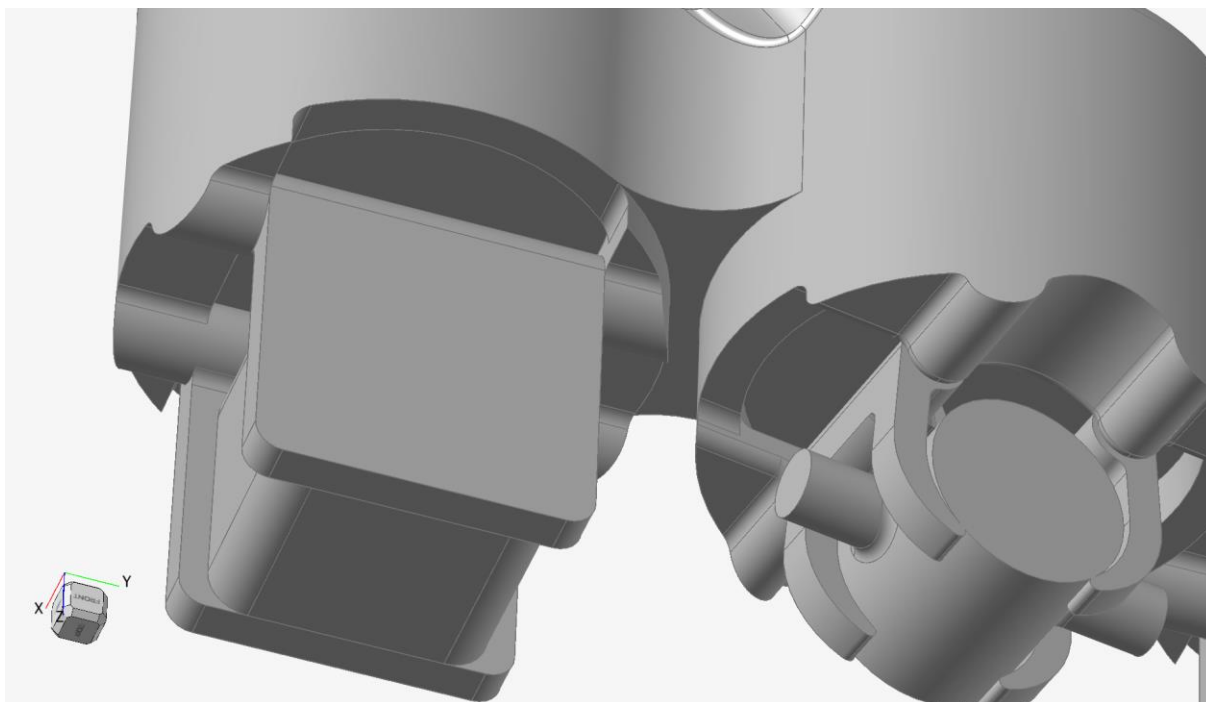
Il peso totale dell'end-effector è di 1,025 kg.

## 2.8 Simulazioni sul redesign

Vengono svolte in questa sezione le analisi strutturali e modali al fine di valutare le performance meccaniche del redesign dell'end-effector. Il solutore scelto per lo svolgimento delle simulazioni è *OptiStruct*, lo stesso adottato per le analisi svolte per l'assieme di partenza.

### 2.8.1 Semplificazioni sulla geometria

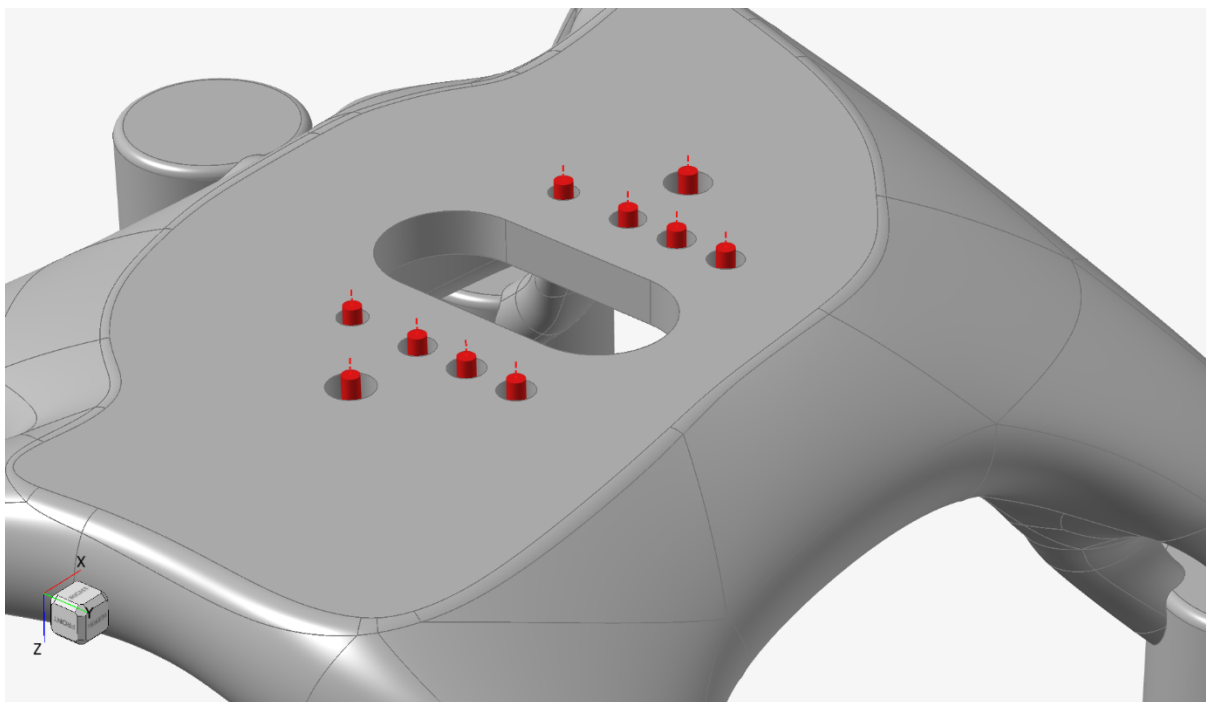
Per rendere più agevole la riuscita di una soluzione in tempi accettabili e per evitare errori di calcolo vengono messe in atto alcune semplificazioni geometriche che non modificano in modo sostanziale le caratteristiche della struttura. I principali interventi riguardano la geometria interna dei gripper in cui sono presenti numerosi spigoli vivi derivanti dalla presenza delle dentature che vengono, dunque, rimosse. Viene semplificata inoltre la geometria dei braccetti del gripper porta componenti.



**FIGURA 113: SEMPLIFICAZIONI ALLA GEOMETRIA DEI GRIPPER**

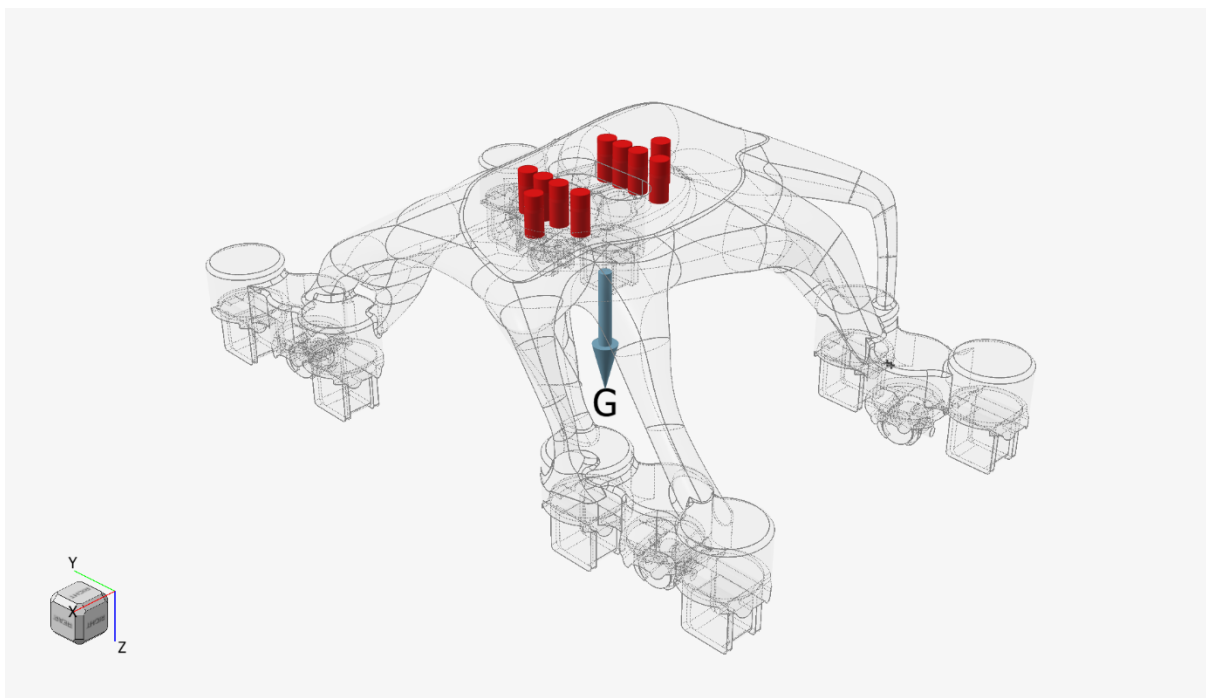
### 2.8.2 Analisi strutturale statica

I vincoli considerati per l'analisi strutturale statica sono rappresentati dai dieci fori presenti sul punto di collegamento con il braccio robotico, esattamente come avvenuto per le simulazioni sull'assieme di partenza (*Figura 114*).



**FIGURA 114: VINCOLI PER L'ANALISI STRUTTURALE STATICA**

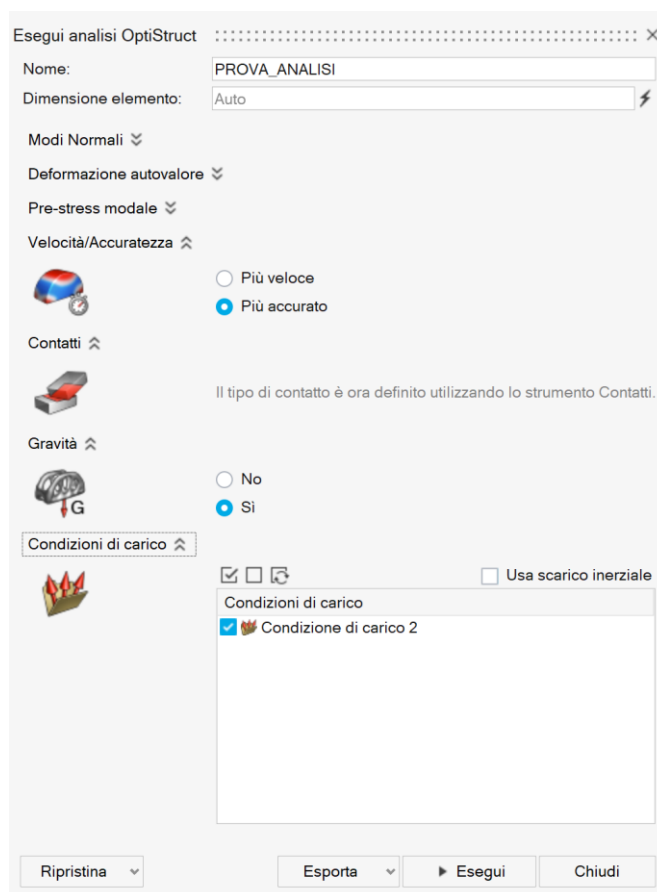
Viene definita a questo punto la direzione di applicazione dell'accelerazione gravitazionale, che costituirà il carico imposto sulla struttura (*Figura 115*).



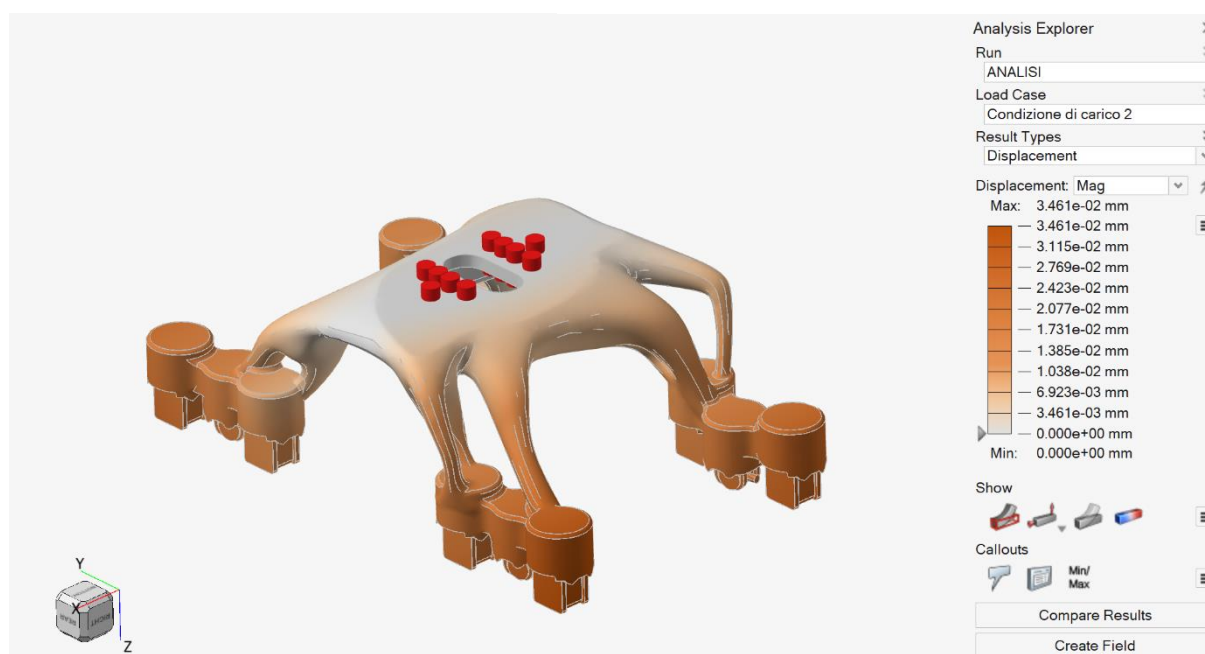
**FIGURA 115: APPLICAZIONE ACCELERAZIONE GRAVITAZIONALE**

A questo punto è possibile avviare la simulazione per la valutazione delle tensioni e delle deformazioni che la struttura presenta a seguito dell'applicazione del carico statico rappresentato dal peso stesso della struttura. In *Figura 116* vengono mostrati i parametri scelti per l'esecuzione dell'analisi.

I risultati della simulazione appena eseguita sono mostrati in *Figura 117* dove vengono mostrati gli spostamenti dell'assieme. Sul lato destro in *Figura 117* è inoltre possibile consultare la legenda che identifica con diverse tonalità di arancio i valori locali degli spostamenti.



**FIGURA 116: PARAMETRI PER L'ESECUZIONE DELL'ANALISI STATICA**



**FIGURA 117: DISTRIBUZIONE DEGLI SPOSTAMENTI**

Il valore massimo raggiunto localmente sulla struttura è di  $3,461 \cdot 10^{-2}$  mm, un valore quindi molto contenuto che garantisce ottima accuratezza per quanto riguarda il controllo del movimento.

A questo punto, in *Figura 118*, viene valutata la distribuzione delle tensioni equivalenti di Von Mises sull'intero end-effector.



**FIGURA 118: DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI EQUIVALENTI DI VON MISES**

Anche in questo caso la struttura è molto lontana dal punto di snervamento che per il PA12 per la produzione mediante *HP Multi Jet Fusion* è di circa 45 MPa, a fronte di un valore massimo riscontrato di  $9,074 \cdot 10^{-2}$  MPa, che, rapportato alla tensione di snervamento del PA12 pari a 50 MPa, comporta un coefficiente di sicurezza pari a 551.

### 2.8.3 Analisi Modale

In questa sezione viene analizzato il comportamento vibrazionale del redesign di end-effector, identificando i modi di vibrare attraverso le simulazioni consentite dal software *Altair Inspire 2025.1*.

I vincoli imposti per l'analisi modale sono gli stessi considerati per l'analisi strutturale. In *Figura 119* vengono mostrati i parametri per l'avvio della simulazione. A lato della *Figura 120* sono presenti i valori delle frequenze dei relativi modi di vibrare.

### Run OptiStruct Analysis

Name:

Solver:

Element Size:

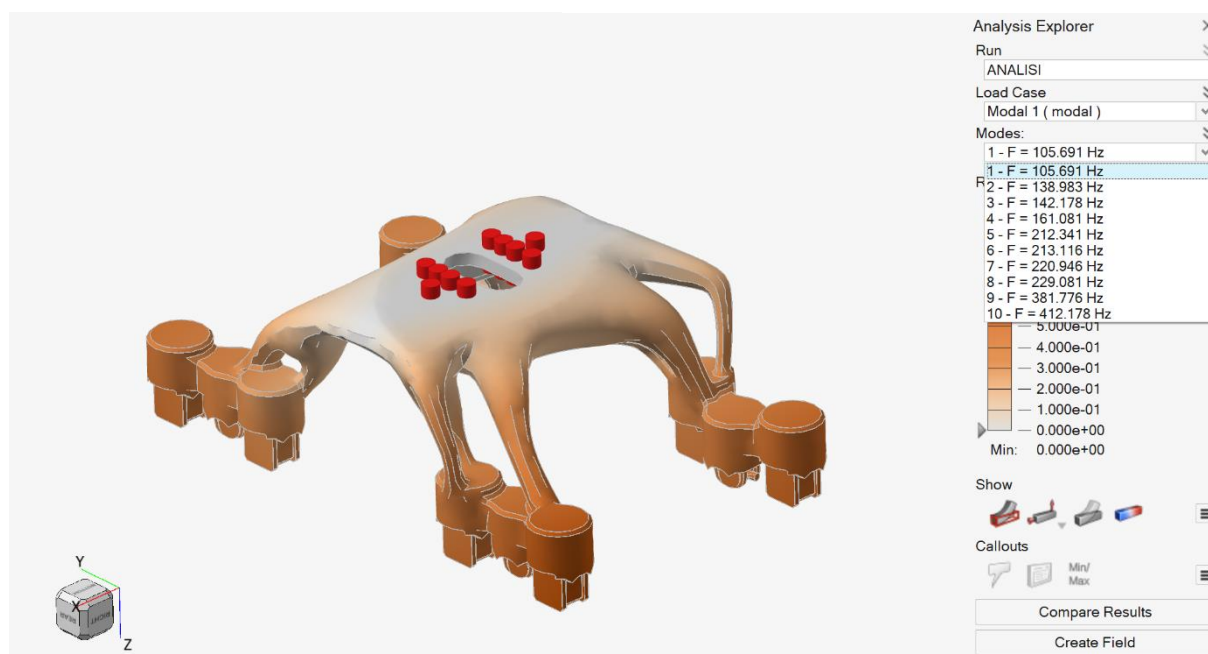
Speed:

Load Cases

☒ Condizione di carico 2  
☒ Modal 1

Casting Initial Stress

**FIGURA 119: PARAMETRI SIMULAZIONE**

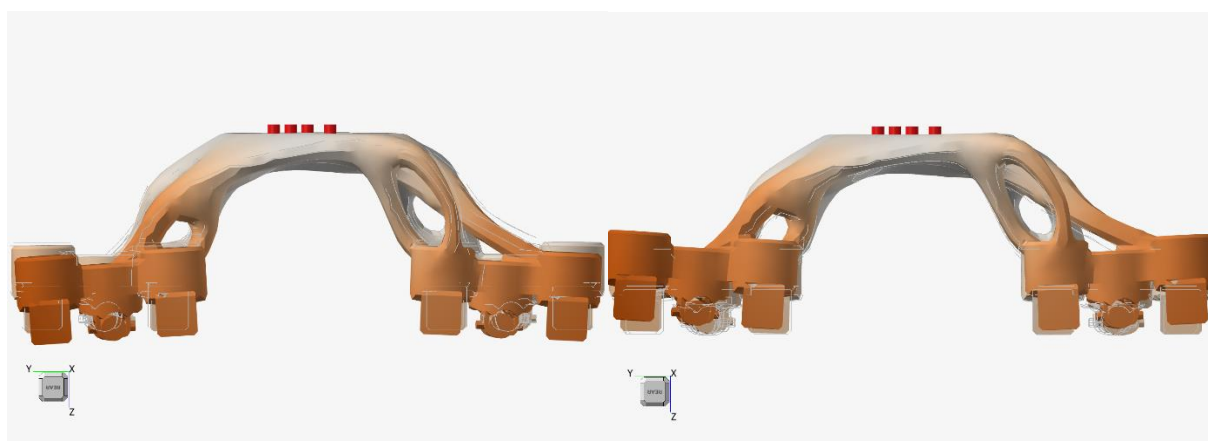


**FIGURA 120: SOLUZIONE ANALISI MODALE SUL REDESIGN**

In *Figura 121-122* viene mostrato il movimento relativo ai due modi di vibrare a frequenza più bassa, rispettivamente 105,691 Hz e 138,983 Hz.



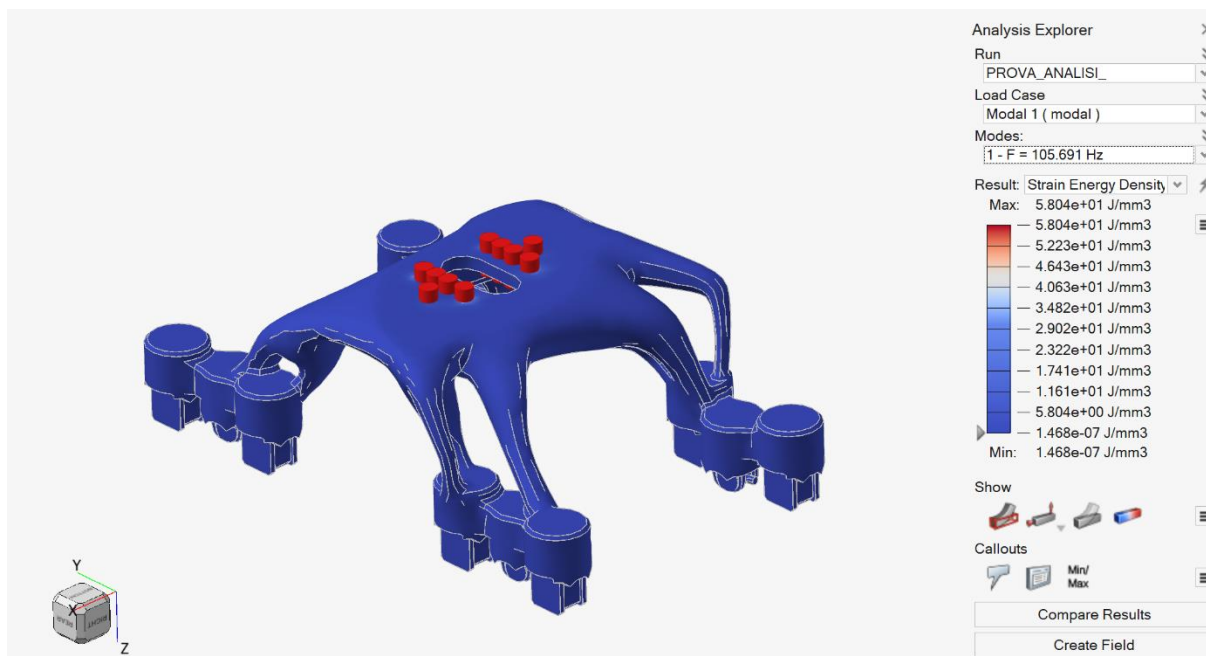
**FIGURA 121: MODO DI VIBRARE A 105,691 Hz**



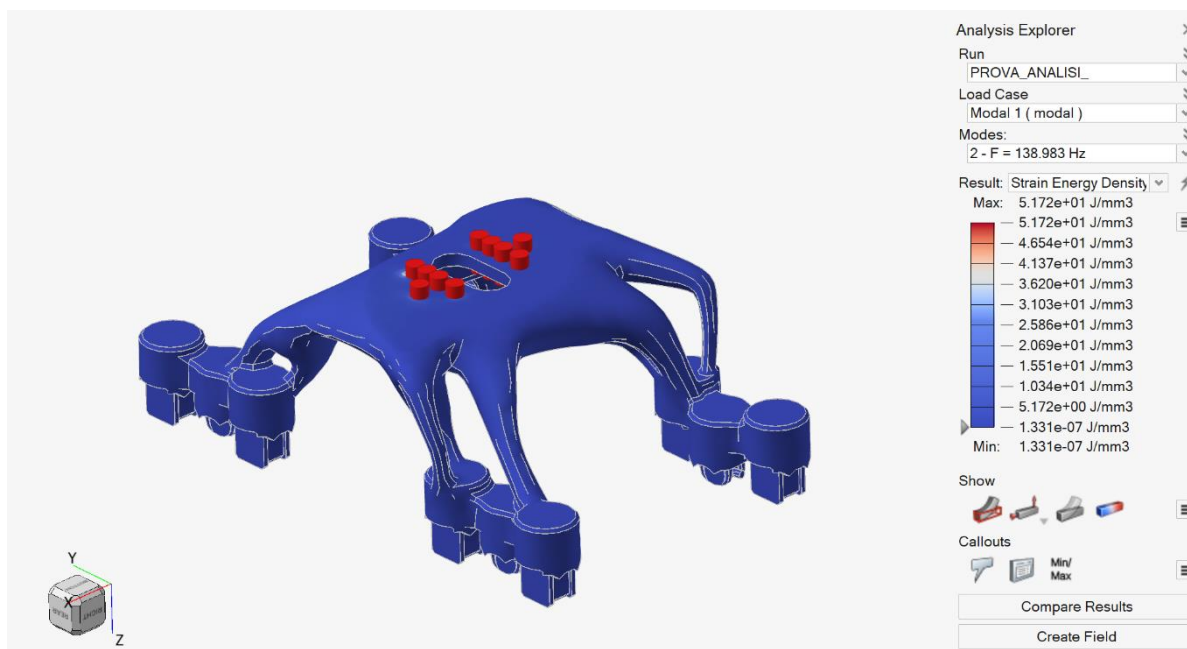
**FIGURA 122: MODO DI VIBRARE A 138,983 Hz**



Per i modi di vibrare appena elencati viene mostrata, in *Figura 123-124*, la distribuzione della densità di energia elastica immagazzinata per le frequenze considerate.



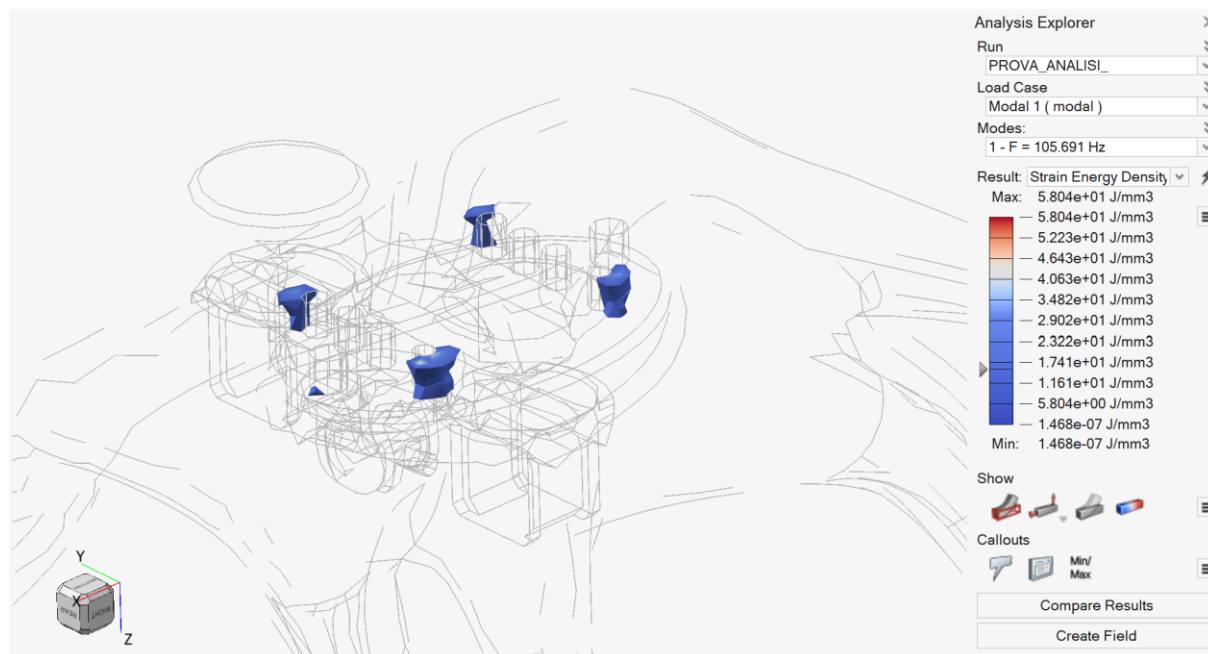
**FIGURA 123: STRAIN ENERGY DENSITY PER 105,691 Hz**



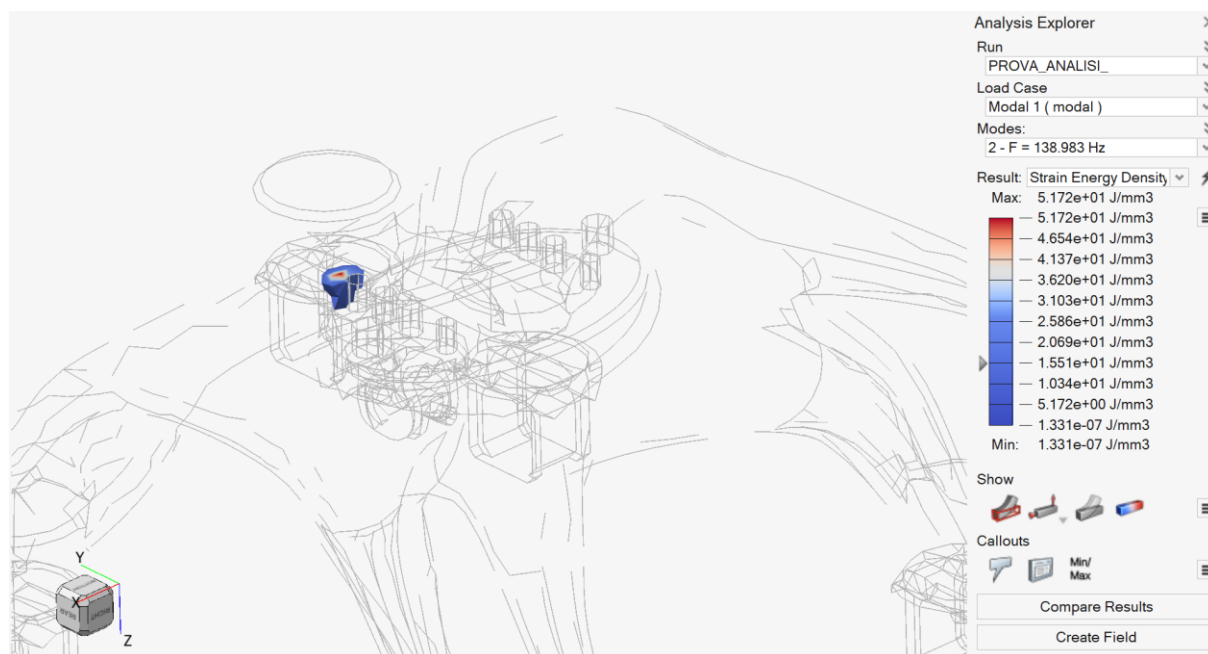
**FIGURA 124: DISTRIBUZIONE STRAIN ENERGY DENSITY PER 139,983 Hz**



Vediamo come la distribuzione dell'energia elastica immagazzinata è distribuita in maniera piuttosto omogenea sul redesign, mentre permangono i picchi in corrispondenza dei fori di accoppiamento che, però, non sono stati oggetto di redesign rappresentando degli elementi fondamentali per il montaggio della struttura (*Figure 125-126*).



**FIGURA 125: PUNTI DI PICCO DI STRAIN ENERGY DENSITY PER 105,691 Hz**



**FIGURA 126: PUNTI DI PICCO DELLA STRAIN ENERGY DENSITY PER 138,983 Hz**

### 3 Confronto tra l'assieme di partenza e la proposta di redesign

In questo capitolo conclusivo dell'elaborato di tesi vengono confrontate le caratteristiche dell'end-effector iniziale con quelle del redesign, mettendo in luce le differenze relative al peso della struttura, al numero di componenti totali e alle performance meccaniche. A tali considerazioni si affiancano valutazioni qualitative relative ai benefici economici e ambientali derivanti dalla produzione mediante *HP Multi Jet Fusion (MJF)*.

#### 3.1 Considerazioni sul numero totale di componenti

La proposta di redesign di end-effector presenta un numero totale di componenti pari a trentasette che, confrontati con i duecentoquarantacinque elementi dell'assieme di partenza, rappresentano una diminuzione di circa l'ottantacinque per cento. Bisogna, inoltre, sottolineare che la proposta di redesign abbia sostanzialmente eliminato i tempi di assemblaggio dell'assieme, che nella versione iniziale presentava ben centosessantasette organi di collegamento. Inoltre, il corretto posizionamento delle pinze pneumatiche sulle guide della piastra e quindi sulle staffe di supporto doveva essere garantito, presumibilmente, dall'addetto al montaggio dell'end-effector. È facile quindi immaginare come questa operazione rappresentasse una fase molto delicata nel processo di assemblaggio per la precisione richiesta. La soluzione proposta, dall'altra parte, invece, non necessita di alcun tipo di assemblaggio.

#### 3.2 Considerazioni sul peso

Come visto al *Paragrafo 2.7*, il peso del complessivo dell'end-effector riprogettato è di 1,024 kg che, confrontati con il valore di 3,73 kg che, come visto precedentemente, non comprende il peso non trascurabile degli elementi di collegamento, comportano una diminuzione di circa il 73%.

#### 3.3 Considerazioni sui costi

Le considerazioni economiche relative alla produzione dell'end-effector in PA12 sfruttando la tecnologia *HP Multi Jet Fusion (MJF)* devono essere interpretate in modo qualitativo, poiché non è stata effettuata una reale produzione fisica dell'assieme. Tuttavia, dalle caratteristiche della stampa mediante *MJF* è possibile fare alcune valutazioni relative ai costi unitari ed ai fattori che lo influenzano.

In primo luogo, la produzione tramite *MJF* presenta costi fissi molto ridotti rispetto ai processi tradizionali. A differenza della fresatura CNC o della costruzione di attrezzaggi dedicati, i metodi di fabbricazione additiva non richiedono utensili, maschere, dime o programmi CAM complessi. Questo aspetto rende particolarmente vantaggiosa la produzione, mediante tecnologie additive, di componenti da produrre in piccola o media serie, dove i costi fissi incidono in modo significativo sul costo unitario.

Per quanto riguarda la valutazione del costo variabile unitario, ossia quello realmente influenzato dal componente da produrre, dipende principalmente da tre fattori:

- Volume di materiale da stampare
- Tempo macchina, che nella *MJF* è correlato soprattutto all'altezza del "build" e non al numero di pezzi presenti nella camera
- Eventuali operazioni di post-processing, che generalmente prevedono la sabbiatura, la pulizia del componente ed eventuale colorazione

Inoltre, la tecnologia *MJF* consente di produrre nello stesso "build" più componenti, il che consente di ridurre il costo unitario per il singolo componente da produrre, senza che l'aggiunta di pezzi incida in maniera significativa sul tempo totale di stampa.

Come visto all'interno del *Paragrafo 2.1*, la produzione mediante *MJF* presenta vantaggi significativi per quanto riguarda i tempi relativi all'assemblaggio di viti e staffe. Ciò non comporta soltanto un risparmio economico diretto, ma anche una riduzione del rischio di errori di assemblaggio.

Infine, la produzione mediante tecnologie additive consente uno sviluppo più efficiente rispetto alle tecnologie di produzione tradizionali. L'aggiornamento della geometria dell'end-effector, infatti, può essere eseguito semplicemente modificando il modello CAD, operazione che con i metodi di fabbricazione tradizionali si sarebbe tradotta in una riprogrammazione CNC o la necessità di realizzare nuove attrezzature.

In sintesi, pur non essendo in grado di fornire una stima economica precisa, dalle caratteristiche della tecnologia *MJF* è possibile affermare che il redesign proposto consente una produzione

economicamente competitiva soprattutto se l'end-effector viene prodotto in tiratura limitata, grazie alla riduzione sia dei costi fissi legati alle attrezzature sia quelli variabili legati al materiale e al tempo macchina.

### 3.4 Considerazioni sull'impatto ambientale

In questa sezione verranno discusse le implicazioni ambientali legate alla produzione dell'end-effector mediante HP Multi Jet Fusion (MJF). Sebbene non siano state svolte analisi specifiche, anche in questo caso è possibile formulare una valutazione qualitativa sulla base delle caratteristiche del processo.

Un primo elemento rilevante riguarda il consumo del materiale, il PA12 impiegato per MJF, infatti, è caratterizzato da un'elevata percentuale di riutilizzo della polvere non fusa, che può essere nuovamente inserita nel "build" successivo a seguito di un opportuno processo di miscelazione. Questa peculiarità del processo riduce in modo significativo gli scarti di produzione rispetto ai metodi di produzione tradizionali nei quali una parte consistente del materiale viene rimossa e non più riutilizzabile. Questo aspetto rappresenta un vantaggio sia economico che ambientale, contribuendo a diminuire l'impatto complessivo del processo.

Dal punto di vista energetico, la tecnologia MJF richiede un consumo pressoché costante indipendentemente dalla complessità geometrica dei componenti. Alla luce di questo aspetto, quando più componenti vengono stampati all'interno dello stesso job è possibile ottimizzare il consumo energetico, riducendo l'impronta ambientale associata alla produzione dei singoli componenti.

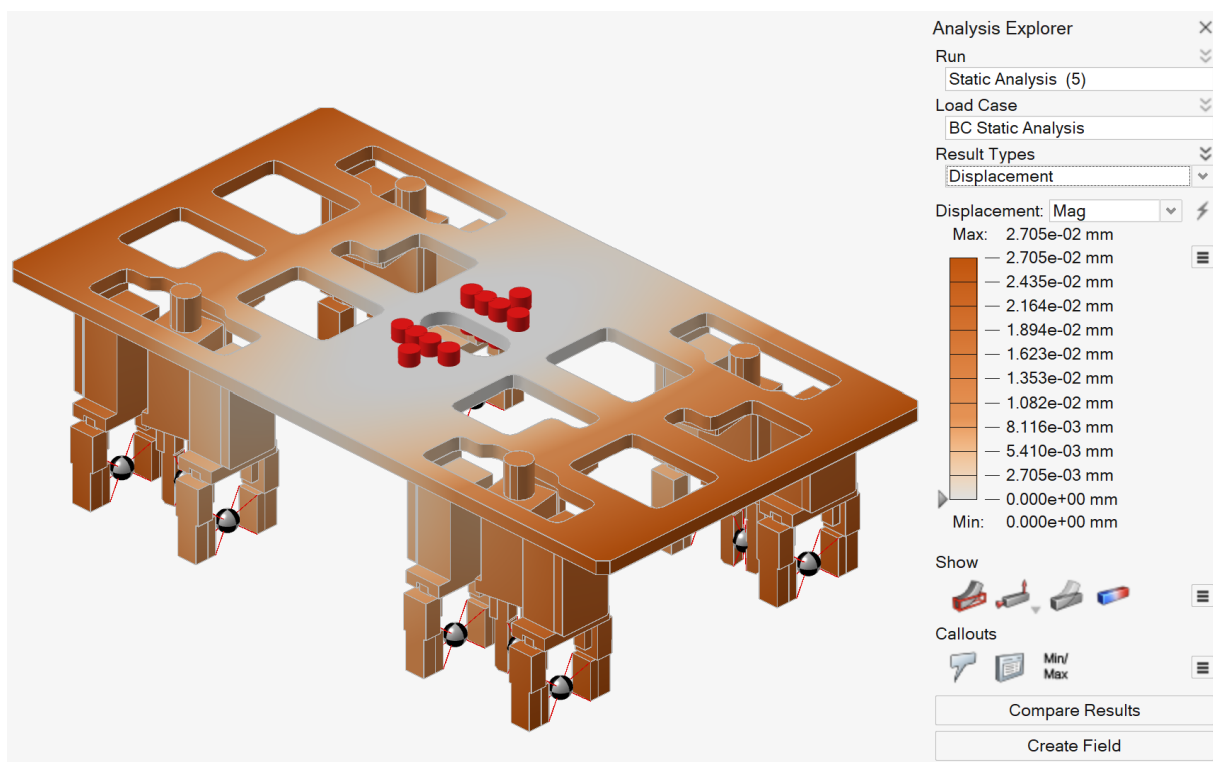
Per quanto riguarda le operazioni di post-processing, come visto in precedenza, queste si limitano ad una semplice sabbiatura o ad un'eventuale colorazione, evitando trattamenti che richiedono molta energia per essere svolte oppure chimicamente invasivi. L'assenza, inoltre, di supporti riduce ulteriormente gli scarti di produzione.

La possibilità di produrre il componente solo quando necessario, inoltre, elimina l'esigenza di mantenere scorte fisiche, riducendo sia l'energia necessaria alla conservazione dei materiali sia il rischio di produrre componenti non più utilizzabili a causa di un'eventuale modifica al progetto.

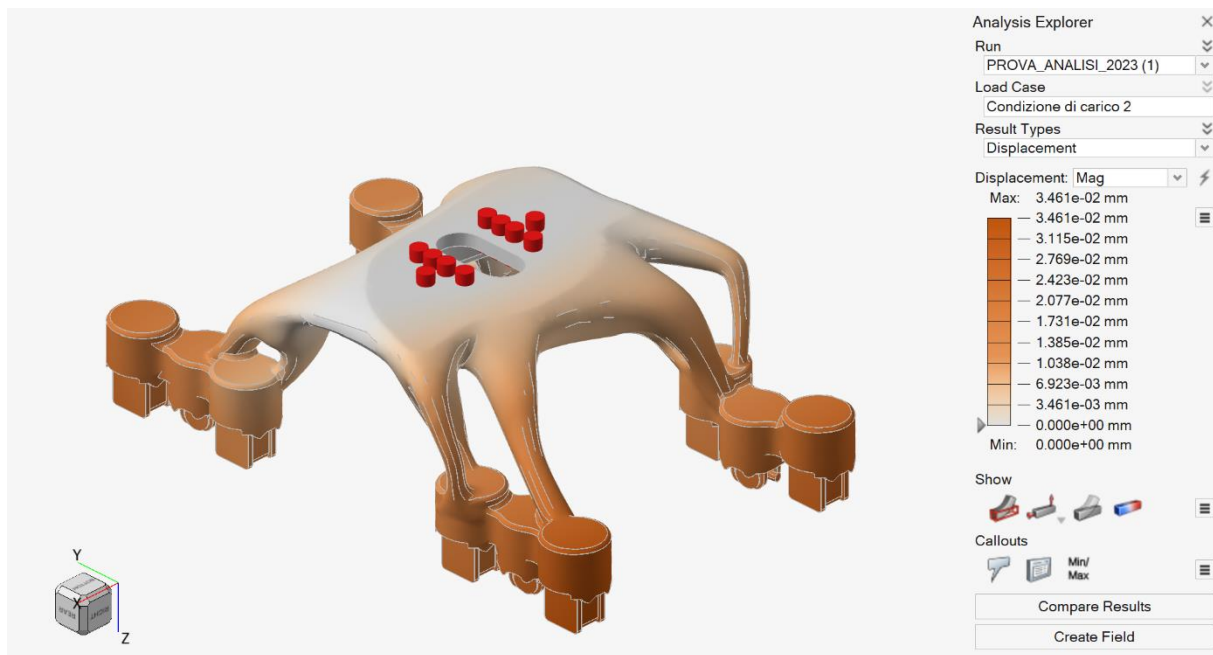
In conclusione, pur non essendo in grado di fornire valutazioni quantitative, è possibile affermare che la produzione dell'end-effector mediante *MJF* presenta diversi vantaggi ambientali rispetto alle tecniche tradizionali: minori scarti, migliore efficienza energetica per la produzione del singolo pezzo e possibilità di produrre all'occorrenza. Questi elementi contribuiscono a rendere la soluzione proposta sostenibile dal punto di vista ambientale.

### 3.5 Confronto performance meccaniche

In questa sezione verranno confrontate le performance meccaniche dei due end-effector sulla base di quanto ottenuto dalle simulazioni svolte. Per quanto riguarda le analisi strutturali statiche notiamo che i risultati degli spostamenti sono in entrambi i casi molto contenuti. In *Figura 127-128*, vengono riproposti i risultati visti in precedenza e, confrontando i valori di picco segnalati nella legenda sul lato destro delle immagini, notiamo come i due valori siano confrontabili. Nel caso dell'end-effector di partenza si raggiungono  $2,7 \cdot 10^{-2}$  mm, mentre il redesign presenta un valore massimo di  $3,5 \cdot 10^{-2}$  mm.



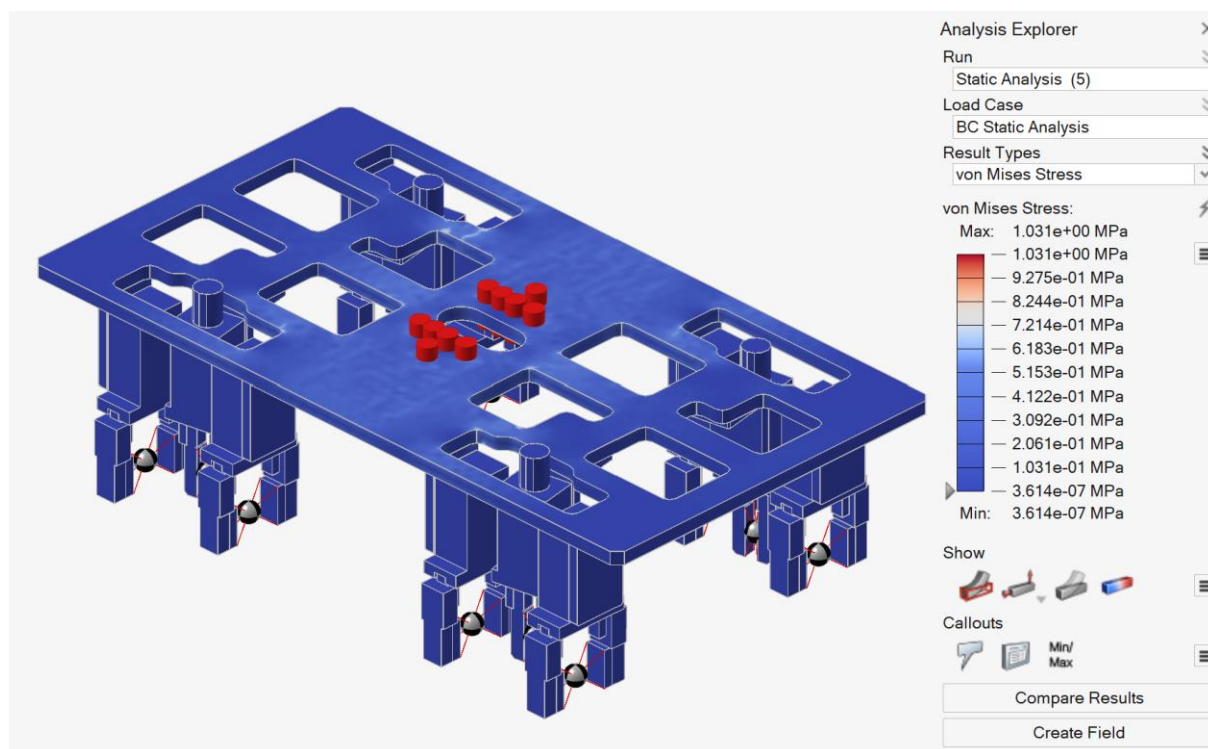
**FIGURA 127: GRAFICO SPOSTAMENTI DELL'END-EFFECTOR DI PARTENZA**



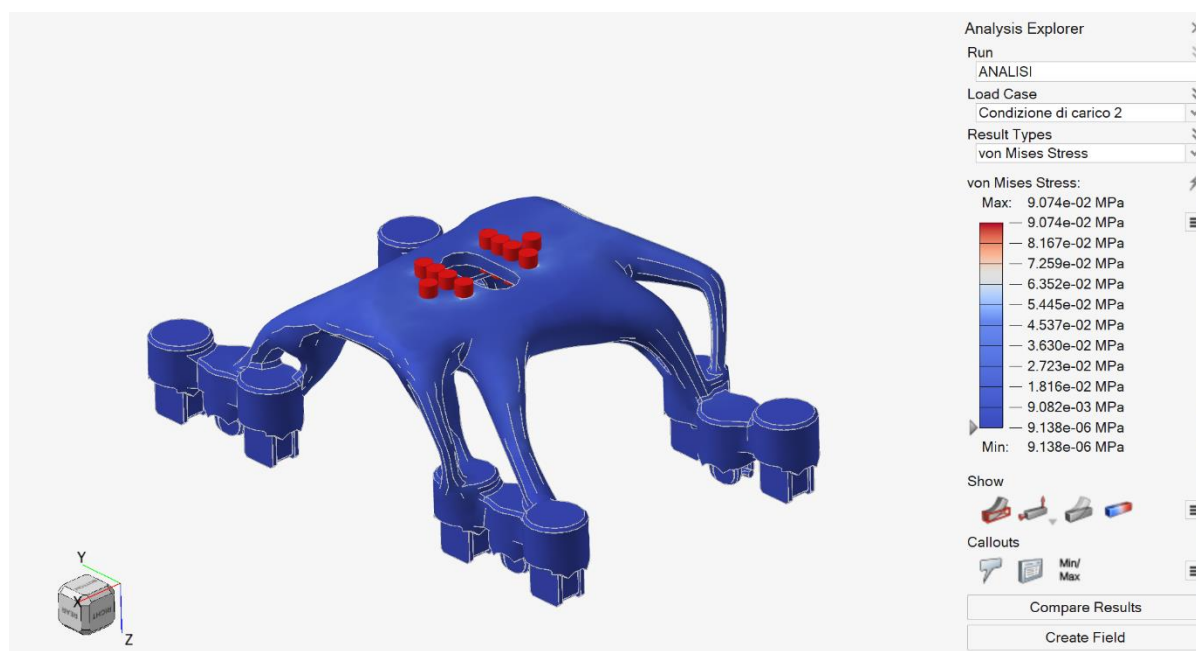
**FIGURA 128: GRAFICO SPOSTAMENTI DEL REDESIGN**

Confrontando i risultati relativi alla distribuzione delle tensioni equivalenti di Von Mises presenti in *Figura 129-130* notiamo importanti differenze tra le due simulazioni. Nello specifico notiamo che, sia riguardo ai valori di picco, sia riguardo ai settori mediamente sollecitati, il gripper riprogettato presenta valori di tensione di due ordini di grandezza inferiori rispetto all'end-effector di partenza. Inoltre, confrontando il coefficiente di sicurezza riscontrato per

l'end-effector, pari a 77,6, con quello relativo al redesign, pari a 551, notiamo un significativo miglioramento delle prestazioni meccaniche in condizioni statiche.



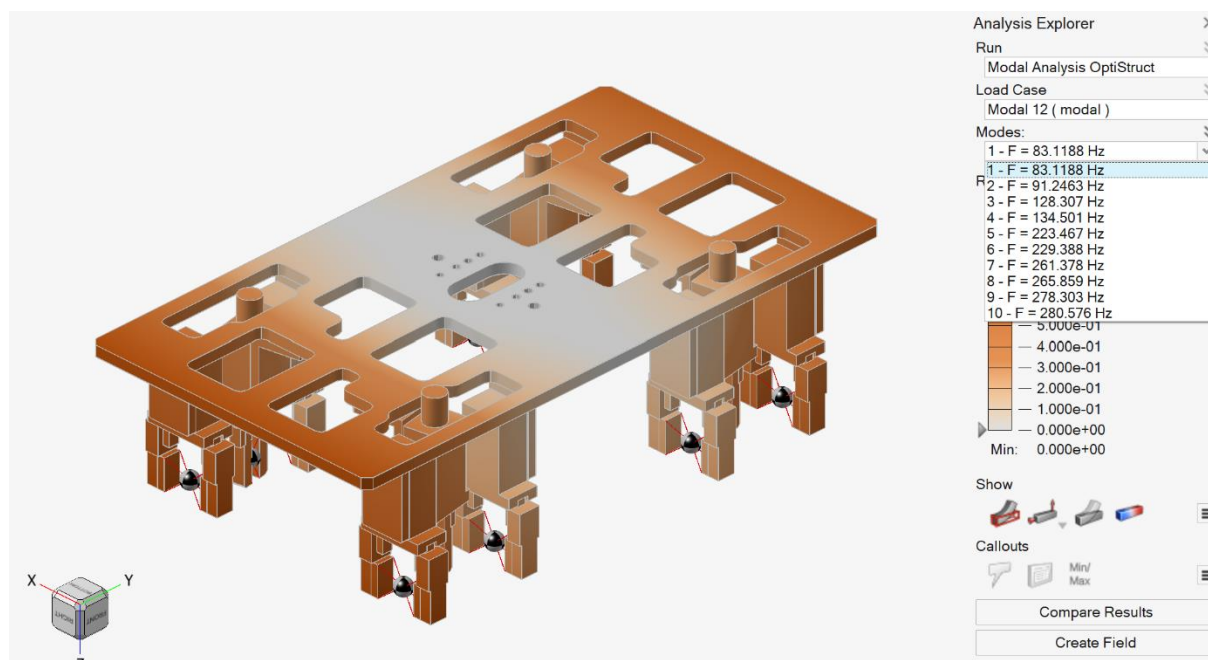
**FIGURA 129: DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI EQUIVALENTI DI VON MISES SULL'ASSIEME DI PARTENZA**



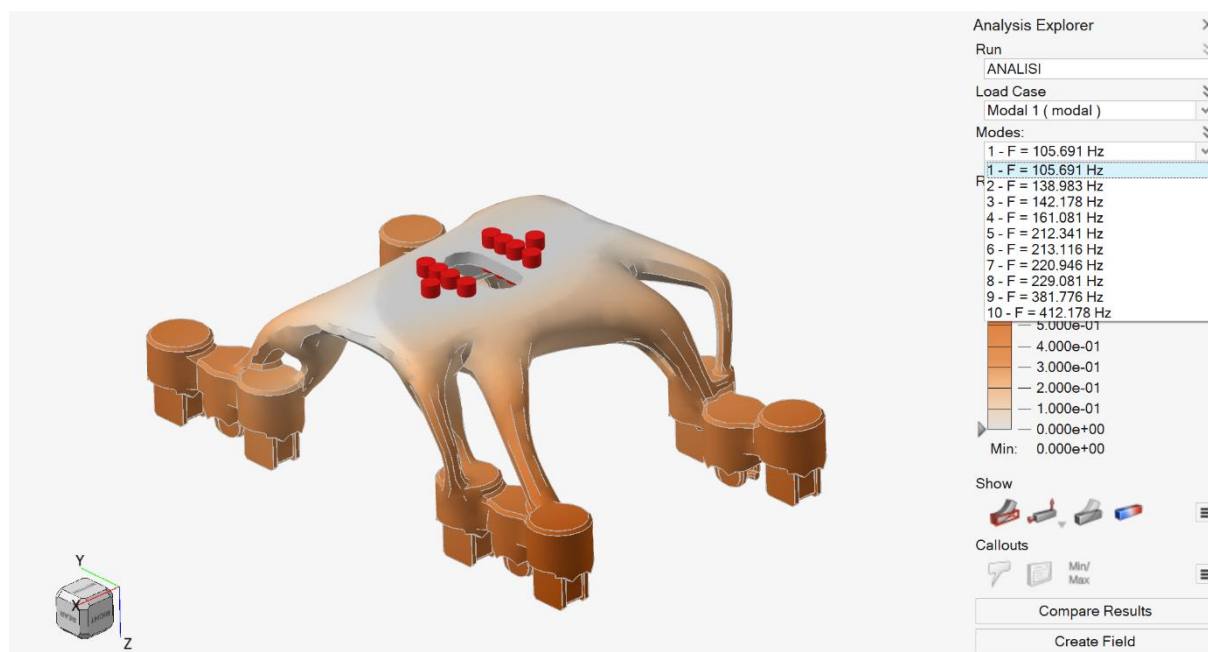
**FIGURA 130: DISTRIBUZIONE DELLE TENSIONI EQUIVALENTI DI VON MISES SUL REDESIGN**



Le analisi riguardanti il comportamento vibrazionale dei due end-effector mostrate in *Figura 131-132* mostrano un aumento della frequenza di vibrazione del primo modo di vibrare da un valore di 83,1188 Hz a 105,691 Hz, con un incremento percentuale del 27%.



**FIGURA 131: ANALISI MODALE SULL'ASSIEME DI PARTENZA**



**FIGURA 132: ANALISI MODALE SUL REDESIGN**



## 4 Conclusioni

L'elaborato di tesi proposto ha affrontato il problema della riprogettazione di un end-effector montato su un robot cartesiano, impiegato all'interno di una cella robotizzata dedicata alla movimentazione di pezzi stampati ad iniezione. La configurazione iniziale dell'end-effector presentava alcune criticità riconducibili principalmente all'elevato peso della struttura, al numero significativo di componenti ed alla complessità geometrica. Tali aspetti influivano negativamente sulla dinamica del robot. È stato per questo motivo, ritenuto necessario sviluppare una soluzione più leggera, compatta e funzionale.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di riprogettare l'intero end-effector nell'ottica del *Design for Additive Manufacturing (DfAM)*, sfruttando le opportunità offerte dalla tecnologia *HP Multi Jet Fusion (MJF)* e dal materiale PA12. Il redesign ha previsto, inoltre, lo svolgimento dell'ottimizzazione topologica della struttura portante dell'end-effector che ha consentito di individuare la distribuzione di materiale più efficiente in relazione ai vincoli geometrici imposti dal posizionamento dei componenti da sollevare in relazione al braccio robotico. Questa operazione ha consentito di ridurre notevolmente la massa della struttura incrementandone la rigidità.

Mediante l'uso del software *Altair Inspire 2025.1* è stato possibile sviluppare, in sostituzione delle pinze pneumatiche preesistenti, un nuovo concept di gripper passivo che ha consentito di eliminare la necessità di alimentazione esterna, oltre ad aver comportato una riduzione significativa del peso.

Il risultato di questo processo è una struttura riprogettata con geometrie più razionali, priva di volumi non necessari e caratterizzata da un numero notevolmente inferiore di parti rispetto alla versione iniziale.

Il confronto tra l'end-effector originale e quello ottenuto dal redesign evidenzia diversi benefici:

- Riduzione della massa complessiva del 73%
- Diminuzione del numero di componenti dell'85%
- Miglioramento della rigidità totale, confrontando il primo modo di vibrare delle due strutture, del 27%

Oltre agli aspetti puramente numerici relativi alle performance strutturali dei due end-effector, il redesign ha consentito l'integrazione funzionale del meccanismo di presa dei gripper con la struttura portante.

Sono state, inoltre, considerate le implicazioni relative alla produzione e ai costi. La tecnologia *MJF* non richiede attrezzaggi o lavorazioni complesse, riducendo i costi fissi rispetto ai metodi di produzione tradizionali. La minore massa del nuovo end-effector comporta un minore impiego di materiale con potenziali risparmi anche sui costi variabili. Allo stesso modo, la possibilità di produrre più componenti all'interno dello stesso "build" consente di ottimizzare il tempo di stampa e di ridurre il costo per il singolo pezzo rendendo la soluzione riprogettata ancora più competitiva in contesti di produzione in piccola serie.

Riguardo alla sostenibilità ambientale, è stato mostrato come la produzione mediante *MJF* con il materiale PA12 presenta un basso livello di scarti grazie alla possibilità di riutilizzare una parte significativa del materiale non fuso. L'assenza di supporti e la riduzione delle fasi di post-processing limitano ulteriormente l'impatto ambientale. La diminuzione del numero di componenti e del peso dell'end-effector contribuisce infine a ridurre le emissioni associate alla fabbricazione, alla manutenzione e alla movimentazione del sistema robotico.

In conclusione, il lavoro di tesi ha dimostrato come la combinazione tra *DfAM*, tecnologia *MJF* e ottimizzazione topologica possa rappresentare un approccio efficace per migliorare la progettazione di end-effector destinati alla manipolazione industriale. Il redesign proposto risponde in modo diretto alle criticità evidenziate nella configurazione iniziale, fornendo una soluzione più leggera, più semplice da produrre e più adatta alle esigenze della cella robotizzata. Ulteriori sviluppi potrebbero includere l'ottimizzazione delle geometrie dell'end-effector per la produzione mediante *MJF* e la validazione sperimentale dell'assieme stampato, con particolare focus sulle criticità relative agli attriti e all'usura di elementi geometrici del meccanismo che potrebbero influire negativamente sulle performance del sistema. Inoltre, potrebbero essere previste valutazioni relative alla risposta dinamica del robot con il nuovo end-effector.

## Bibliografia

- [1] J. Hernandez *et al.*, “Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review,” *Robotics*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.3390/robotics12010005.
- [2] Y. Mehmood, F. Cannella, and S. Cocuzza, “Analytical Modeling, Virtual Prototyping, and Performance Optimization of Cartesian Robots: A Comprehensive Review,” *Robotics*, vol. 14, no. 5, 2025, doi: 10.3390/robotics14050062.
- [3] “The Advantages of Cartesian Robots for Industrial Automation.” <https://www.macrondynamics.com/job-stories/the-advantages-of-cartesian-robots-for-industrial-automation/>
- [4] “Star Seiki India - EG Series.” [https://starseikiindia.com/cartesian\\_robots—EG\\_-robots](https://starseikiindia.com/cartesian_robots—EG_-robots)
- [5] “Star Seiki - STEC-NC3 Controller”, [Online]. Available: <https://www.starseiki.cn/uploads/20221209/de3f11ea52af4c0697e814565982f47d.pdf>
- [6] V. Kumar, P. J. Coelho, and C. Neves, “A systematic review of developments in gripper technologies for rigid fabric parts,” *Heliyon*, vol. 10, no. 22, p. e40387, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40387>.
- [7] “SMC Gripper Series MHZ.” [https://ca01.smcworld.com/catalog/en/rotary\\_airchuck/MHZ\\_2-E/6-3-p0381-0463-mhz\\_en/data/6-3-p0381-0463-mhz\\_en.pdf](https://ca01.smcworld.com/catalog/en/rotary_airchuck/MHZ_2-E/6-3-p0381-0463-mhz_en/data/6-3-p0381-0463-mhz_en.pdf)
- [8] S. Zhou and A. N. Hrymak, “Injection Molding of Polymers and Polymer Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 13, pp. 2–5, 2024, doi: 10.3390/polym16131796.
- [9] L. Bogedale, S. Doerfel, A. Schrodte, and H.-P. Heim, “Online Prediction of Molded Part Quality in the Injection Molding Process Using High-Resolution Time Series,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 4, 2023, doi: 10.3390/polym15040978.
- [10] M. R. Khosravani and S. Nasiri, “Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, no. 4, pp. 847–864, 2020, doi: 10.1007/s10845-019-01481-0.
- [11] P. Kuresangsai, M. O. T. Cole, and G. Hao, “Analysis and design optimization of a

- compliant robotic gripper mechanism with inverted flexure joints,” *Mech. Mach. Theory*, vol. 202, p. 105779, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2024.105779>.
- [12] “SMC Pneumatics One-Touch Fittings Series KQ2.” <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/KQ.pdf>
- [13] “Eins by STAR Automation Europe - CPUM-01.” <https://eins1.eu/product/022797-rectangle-pad-for-micro-mini-cylinder-cpum-01/>
- [14] “SMC Pneumatics Fitting Manifold - KM Series.” <https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/KM.pdf>
- [15] “Relays Omron G6B-4\_\_ND.” [https://www.mouser.com/catalog/specsheets/G6B-4\\_\\_ND.pdf](https://www.mouser.com/catalog/specsheets/G6B-4__ND.pdf)
- [16] “Omron G6B PCB Power Relay.” <https://www.mouser.it/datasheet/3/39/1/K021-E1.pdf>
- [17] “Altair OptiStruct”, [Online]. Available: <https://altair.com/optistruct/>
- [18] “HP Multi Jet Fusion”, [Online]. Available: <https://www.hp.com/it-it/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>
- [19] B. S. Monteiro, F. Rocha, and J. M. Costa, “Topology Optimization of a Robot Gripper with nTopology,” *U.Porto J. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 11–19, 2024, doi: 10.24840/2183-6493\_010-001\_002051.
- [20] P. Georgi, S. Ehnert, K. Güzel, and H.-C. Möhring, “Design and simulation of a multisensory-multi-process end-effector for application to various kinematics,” *Procedia CIRP*, vol. 130, pp. 915–923, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.185>.
- [21] T. Vaneker, A. Bernard, G. Moroni, I. Gibson, and Y. Zhang, “Design for additive manufacturing: Framework and methodology,” *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 2, pp. 578–599, 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.05.006.
- [22] Nunzia A., “HP Multi Jet Fusion (MJF): tutto quello che c’è da sapere,” 2022. <https://www.3dnatives.com/it/guida-stampa-3d-multi-jet-fusion-hp-270820229/#!>
- [23] S. Rosso, R. Meneghello, L. Biasetto, L. Grigolato, G. Concheri, and G. Savio, “In-depth comparison of polyamide 12 parts manufactured by Multi Jet Fusion and Selective Laser Sintering,” *Addit. Manuf.*, vol. 36, p. 101713, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101713>.

- [24] U. Gebhardt, M. Carraturo, A. Raßloff, G. Alaimo, F. Auricchio, and M. Kästner, “Assessing process-property linkages of polyamide 12 manufactured by the multi jet fusion printing process,” *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 10, no. 7, pp. 4227–4238, 2025, doi: 10.1007/s40964-025-01149-7.
- [25] A. Avanzini, M. Tomasoni, Z. Xu, F. Berto, and N. Razavi, “Fracture assessment of polyamide 12 (PA12) specimens fabricated via Multi Jet Fusion™ in the presence of geometrical discontinuities,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 303, p. 110118, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110118>.
- [26] J. Chen, L. Zhao, and K. Zhou, “Improvement in the mechanical performance of Multi Jet Fusion–printed aramid fiber/polyamide 12 composites by fiber surface modification,” *Addit. Manuf.*, vol. 51, p. 102576, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2021.102576.
- [27] T.-P. Dao, “Size-topology optimization design and modeling of a new gripper for precision manipulation robot,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 139, no. 1, pp. 959–982, 2025, doi: 10.1007/s00170-025-15824-0.