

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE



**Politecnico
di Torino**



STUDIO DI FATTIBILITA' SULLA REALIZZAZIONE DI GRIFFE PER ROBOT OTTIMIZZATE GEOMETRICAMENTE MEDIANTE ADDITIVE MANUFACTURING

Relatori:

prof.ssa Manuela Galati

Prof. Iuliano Luca

Candidato:

Alessandro Barraco

Anno accademico 2021/2022

SOMMARIO

ABSTRACT	4
INTRODUZIONE	5
L'AZIENDA	7
L'ISOLA ROBOTICA	11
IL ROBOT	18
REVIEW BIBLIOGRAFICA: SISTEMI DI PRESA	22
CASO STUDIO IN AZIENDA	37
DESCRIZIONE PROBLEMA	43
DEFINIZIONE DATI DI PROGETTO	46
CALCOLO DIMENSIONI OBIETTIVO	46
CALCOLO DEI CARICHI	50
MATERIALI E METODI	55
PROGETTAZIONE PROTOTIPO MEDIANTE ADDITIVE MANUFACTURING	60
OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA	61
DEFINIZIONE DESIGN SPACE	64
CARICHI E VINCOLI	66
MATERIALE	67
OTTIMIZZAZIONE	69
DEFINIZIONE DESIGN PROTOTIPO	71
VERIFICA STATICA DEL PROTOTIPO	73
RISULTATI ANALISI FEM	75
SIMULAZIONE ASSEMBLAGGIO	75
REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO	77
TECNICA SLS	77
EOS FORMIGA P 110	78
	79
MATERIALE	80
STAMPA E POST PROCESSING	80
ANALISI DI MONTAGGIO	81
RISULTATI	82

CONCLUSIONI	85
RINGRAZIAMENTI	87
INDICE DELLE FIGURE	89
BIBLIOGRAFIA	91

Abstract

Lo studio proposto è frutto di una collaborazione con l'azienda "O.L.V. Officina meccanica s.r.l.", azienda specializzata nelle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo. Il lavoro è incentrato nello studio di fattibilità per una modifica geometrica delle griffe da un robot operante in una delle isole robotizzate adibite alla tornitura. L'ottimizzazione mira alla riduzione degli ingombri riguardanti le canaline che compongono il modello di vassoio termoformato attualmente previsto e che viene utilizzato come base di appoggio per gli articoli lavorati dal tornio. La riduzione della larghezza di ogni canalina presente nel vassoio consentirebbe l'aggiunta di una quinta unità e quindi una riduzione generale di vassoi utilizzati in magazzino. Questo studio di fattibilità è stato affrontato verificando due modalità di risoluzione: la prima, più rapida ed economica, propone una modifica della geometria attraverso una lavorazione meccanica per asportazione di truciolo sulle griffe originali. Questa soluzione, a valle di una verifica statica dei carichi con esito negativo, è stata tuttavia scartata. La seconda analisi invece, propone un'ottimizzazione della geometria e del materiale della griffa con focus di produzione mediante l'Additive Manufacturing (AM) per metallo. Il componente è stato quindi riprogettato per AM e con lega ISO "18Ni300". La nuova geometria soddisfa le richieste di progetto. Il prototipo del componente per i test di assemblaggio sul robot è stato prodotto con Nylon PA12 (PA2200) mediante tecnologia AM per polimero.

Introduzione

Il lavoro di tesi qui presentato ha come oggetto uno studio di fattibilità sulla realizzazione di griffe per un robot industriale. Tale studio è frutto di una collaborazione con l'azienda "O.L.V. Officina meccanica s.r.l.", specializzata nelle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo. Dopo aver investito in nuove isole robotizzate, l'azienda ha voluto valutare la possibilità di ottimizzare geometricamente le griffe del robot adibito all'asservimento dei torni.

L'obiettivo di tale ottimizzazione è focalizzato sulla **riduzione degli ingombri**. In particolare, questa modifica consentirebbe di incrementare la capacità di accoglienza dei pezzi lavorati o da lavorare all'interno di ogni singolo vassoio contenitore. Essendo il vassoio originale composto da quattro canaline, il fine ultimo dello studio è quindi focalizzato sulla fattibilità di aggiungerne una quinta. L'azienda produttrice dei suddetti vassoi ha suggerito una larghezza di canalina limite al di sotto della quale è possibile **ottenere sufficiente spazio per l'aggiunta della quinta canalina**.

Si è tenuto presente, inoltre, che il vassoio è caratterizzato da ingombri esterni vincolati (1000mm x 800mm). La successione logica che ha portato alla modifica delle suddette griffe è la seguente:

Riduzione spessore griffe



Riduzione larghezza canalina



Aggiunta quinta canalina grazie al recupero degli ingombri

La descrizione di questo studio è stata suddivisa in cinque parti:

1. **Panoramica sull'azienda:** Organizzazione aziendale, descrizione sulle motivazioni inerenti all'introduzione di reparti automatizzati e breve descrizione sui robot utilizzati.
2. Review bibliografica sui **sistemi di presa per robot** prodotti in modo tradizionale ed in modo additivo.
3. Descrizione del Caso studio con calcolo dei **vincoli** utili allo sviluppo di un nuovo modello:
 - **Riduzione dello spessore della griffa** $\geq 13,40 \text{ mm}$
 - Lunghezza sottoposta alla riduzione di spessore $\geq 55 \text{ mm}$
 - **Forza applicata** per la chiusura della pinza robot $\cong 5500 \text{ N}$
4. Descrizione della **fase progettuale** ipotizzando dapprima una lavorazione tradizionale e successivamente l'uso della fabbricazione additiva. Fase comprensiva della scelta dei materiali e delle tecniche utilizzate per lo sviluppo del nuovo modello. Nel caso specifico si ricorre all'**ottimizzazione topologica** per ridurre l'uso di materiale ed alleggerire la parte. Individuata una possibile soluzione di design si passa ad un'analisi FEM per validarne la resistenza statica ai carichi in gioco.
5. **Realizzazione di un prototipo** in materiale plastico (PA2200), mediante la tecnica di Additive Manufacturing (AM) detta "SLS" (selective Laser Sintering). Con lo scopo di tale prototipo è verificare che il nuovo design di griffa sia idoneo all'assemblaggio sul braccio robotico.

L'intero studio, inoltre, presenta come ulteriore vincolo l'esigenza da parte del titolare dell'azienda di trovare una possibile soluzione in tempi particolarmente ridotti. Questa restrizione è stata necessaria per evitare eventuali Ritardi nell'avvio del nuovo reparto robotizzato e per la riduzione di costi aggiuntivi.

L'Azienda

Il lavoro di tesi da me svolto presso l'azienda "O.L.V. Officina meccanica s.r.l." situata in san Carlo canavese (TO) è stato possibile a valle di un tirocinio formativo presso quest'ultima, il quale mi ha dato la possibilità di visionare sia in generale che in particolare le diverse caratteristiche e peculiarità dell'azienda. La "O.L.V. Officina meccanica s.r.l." Si occupa principalmente di lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo di elevata precisione per lo più per il settore dell'automotive, in particolare la produzione è focalizzata nella produzione di componenti per le trasmissioni meccaniche, in particolare di: Alberi di trasmissione, pignoni conici, alberi cambio, alberi presa di forza, dentature di scanalati, mozzi e semiassi. Ad oggi il suo parco macchine comprende più di 80 unità che negli anni ha visto un notevole incremento in termini di numero ma anche di qualità. Il layout del reparto di produzione ha come parametro di suddivisione la tipologia di lavorazione, in particolare l'intero parco macchine è composto da:

- Reparto di Centro-Intestatura (Figura 1)
- Reparto di Tornitura/fresatura
- Reparto di foratura profonda
- Reparto di isole robotizzate per tornitura e Centro-Intestatura



Figura 1: centrartice-intestatrice [1]

Già da diversi anni i dirigenti, nonché i proprietari, di “O.L.V. Officina meccanica s.r.l.” hanno deciso di intraprendere la transizione verso l’industria 4.0 investendo molto quindi sulla digitalizzazione di dati. Il passaggio a questa nuova forma di produzione ha implicato l’adozione di sistemi informatici utili alla gestione e all’analisi della catena produttiva in generale ma anche nell’acquisizione di dati preziosi come, ad esempio, i tempi di lavorazione e quelli di fermo macchina. In particolare, ad ogni macchina presente nei diversi reparti è stato collegato un tablet permettendo l’interfaccia tra operatore e sistema 4.0. Tutto il parco macchine, grazie ad una rete WI-FI comune, raccoglie e invia dati verso un data center attraverso il quale si effettuano analisi e stime sulla produzione. Questo sistema permette quindi di migliorare in modo significativo l’organizzazione delle risorse, delle commesse, dei tempi e di conseguenza consente una pianificazione più accurata ed efficiente.

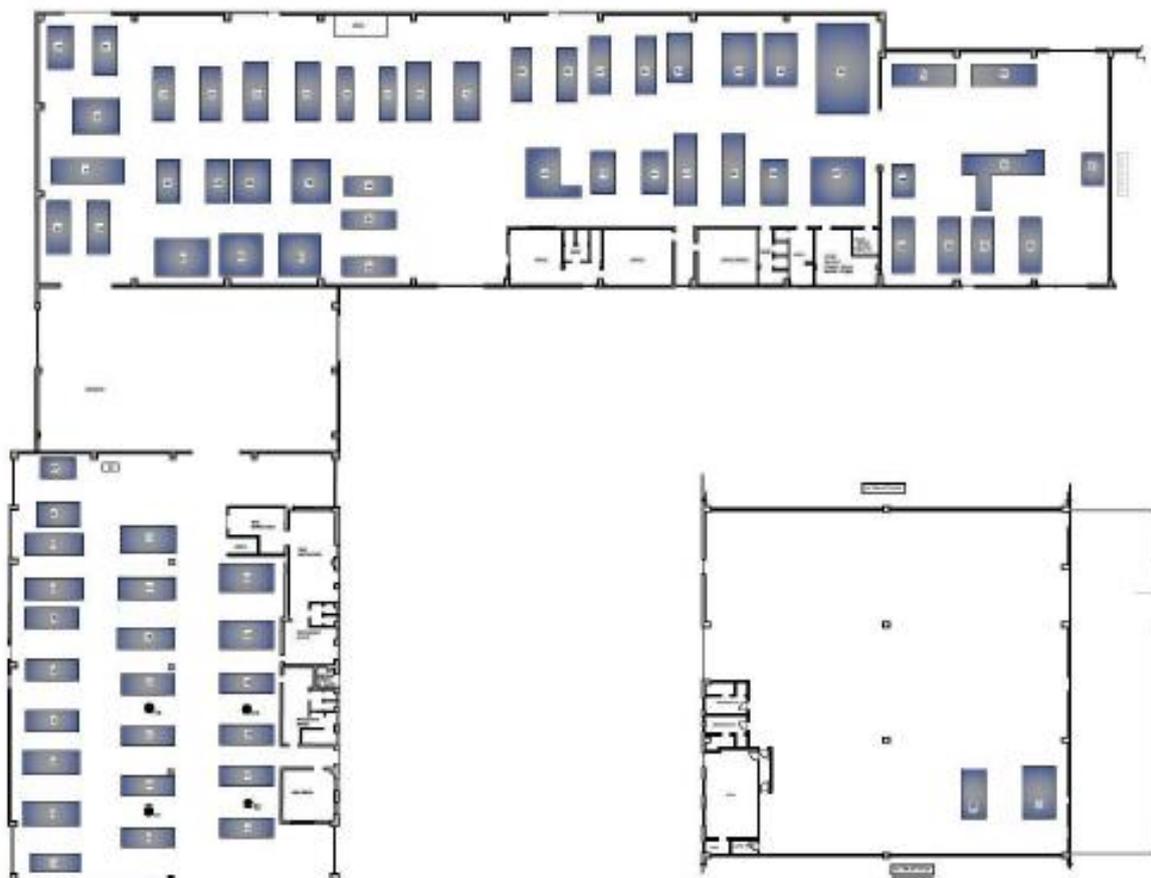


Figura 2:Layout azienda "O.L.V. srl" [2]

Nella

Figura 2 sono rappresentate con dei rettangoli colorati le macchine presenti ed il sito dove recentemente sono state aggiunte le nuove isole robotizzate (il riquadro in basso a destra). Ogni operatore è in possesso di un codice di identificazione che all'inizio del turno in una qualsiasi macchina deve utilizzare per effettuare il login al sistema di monitoraggio gestito dal software "OverOne", Ciò consente di attribuire i dati raccolti sulle lavorazioni in corso e passate all'operatore che le ha effettuate.

Per quanto riguarda i due software, sopra citati, utilizzati per l'acquisizione e l'analisi dei dati aziendali possiamo innanzi tutto descriverne in modo riassuntivo gli scopi:

- **OverOne:** è un software MES "Manufacturing Execution System", nel caso in questione fornito da OSL s.r.l. [3] , ha come scopo principale la raccolta dati. Queste informazioni vengono raccolte direttamente a bordo macchina mediante dei tablet che fungono da interfaccia tra operatore, macchina ed il server dati. Attraverso questo software è infatti possibile analizzare nel dettaglio la produttività grazie a parametri come tempi di lavorazione, tempi di fermo macchina e numero pezzi completati (Figura 3). Mettendo i dati raccolti da ogni macchina in un unico data center risulta quindi particolarmente vantaggioso e strategico visualizzare l'efficienza della produzione, ad esempio, del reparto, del singolo operatore o di tutto l'impianto.



Figura 3: Schermata del software "OverOne" della sezione "produzione"[2]

La Figura 3 mostra una delle schermate principali alle quali chi gestisce l'analisi dei dati accede più spesso. In particolare, nella sezione "Produzione" è possibile visionare le principali funzioni garantite da questo software MES ovvero monitorare le macchine nel loro corretto funzionamento, analizzare i tempi registrati da ogni macchina connessa al sistema ed inoltre è possibile gestire in tempo reale gli ordini in esecuzione e confrontarli con quelli passati. Ciò fornisce in modo chiaro una panoramica completa della produzione in corso e di quella passata.

- **Workplant:** Trattasi di un software detto ERP ovvero "Enterprise Resource Planning". La O.L.V. ha acquistato la licenza presso l'azienda "Vero Project" [4] sempre in ambito di sviluppo nel mondo dell'industria 4.0. Le funzioni principali di questo programma gestionale riguardano, come dice la parola stessa, nella gestione dell'intera catena produttiva. Di fatto la sua utilità spazia dalla gestione delle risorse come magazzini, fornitori e clienti fino alla gestione della produzione stessa con la creazione dei cartellini.

Il grande vantaggio di questo programma è quello di tenere sotto controllo tutti gli aspetti fondamentali in un'azienda in quanto, grazie ai dati raccolti, si instaura uno storico digitale utile sia ad una migliore visione dei costi ma anche, ad esempio, ad implementare tipologie di scheduling più efficienti e flessibili. Workplant, infatti, possiede informazioni relative alle macchine registrate nello stabilimento ed a tutte le fasi di lavorazione necessarie per ogni articolo già realizzato. Grazie ad algoritmi opportunamente scelti in base all'obiettivo voluto, il software genera automaticamente una pianificazione della produzione mettendo insieme tutti gli articoli processati contemporaneamente in un dato periodo di tempo ed ottimizzando la distribuzione delle lavorazioni in base, ad esempio, alla priorità o alle macchine libere (Figura 4). L'obiettivo generale di questo calcolo è fondamentalmente, come già detto, massimizzare l'efficienza abbattendo i tempi morti o semplicemente avere un'idea preliminare del grado di saturazione della produzione attuale o futura.



Figura 4: Esempio di una schermata raffigurante una programmazione della produzione all'interno del software "Workplant"[5]

Gli investimenti fatti, come già accennato, non riguardano soltanto la digitalizzazione dei dati e l'introduzione dei software di gestione ma in una grossa percentuale si focalizzano sull'introduzione di nuove isole robotiche quasi del tutto automatizzate. In particolare, il processo di automazione ha riguardato due settori dell'impianto:

- Centro-intestatura
- Tornitura

L'isola Robotica

La decisione di investire nell'automazione è frutto di attente analisi da parte del titolare dell'azienda, le quali hanno dato come esito un incremento della produttività e di conseguenza un bilancio costi benefici particolarmente favorevole all'introduzione di due reparti automatizzati (Figura 5). I reparti si compongono quindi di:

- Due isole robotizzate per la centro-intestatura
- Un'isola robotizzata per la tornitura

I vantaggi che riguardano quest'investimento oltre ad essere di natura economica consentono di limitare il lavoro manuale da parte di uno o più operatori, ciò minimizza di conseguenza anche il rischio di infortuni e consente un ritmo di lavoro costante eliminando la variabile della produttività di ogni lavoratore.

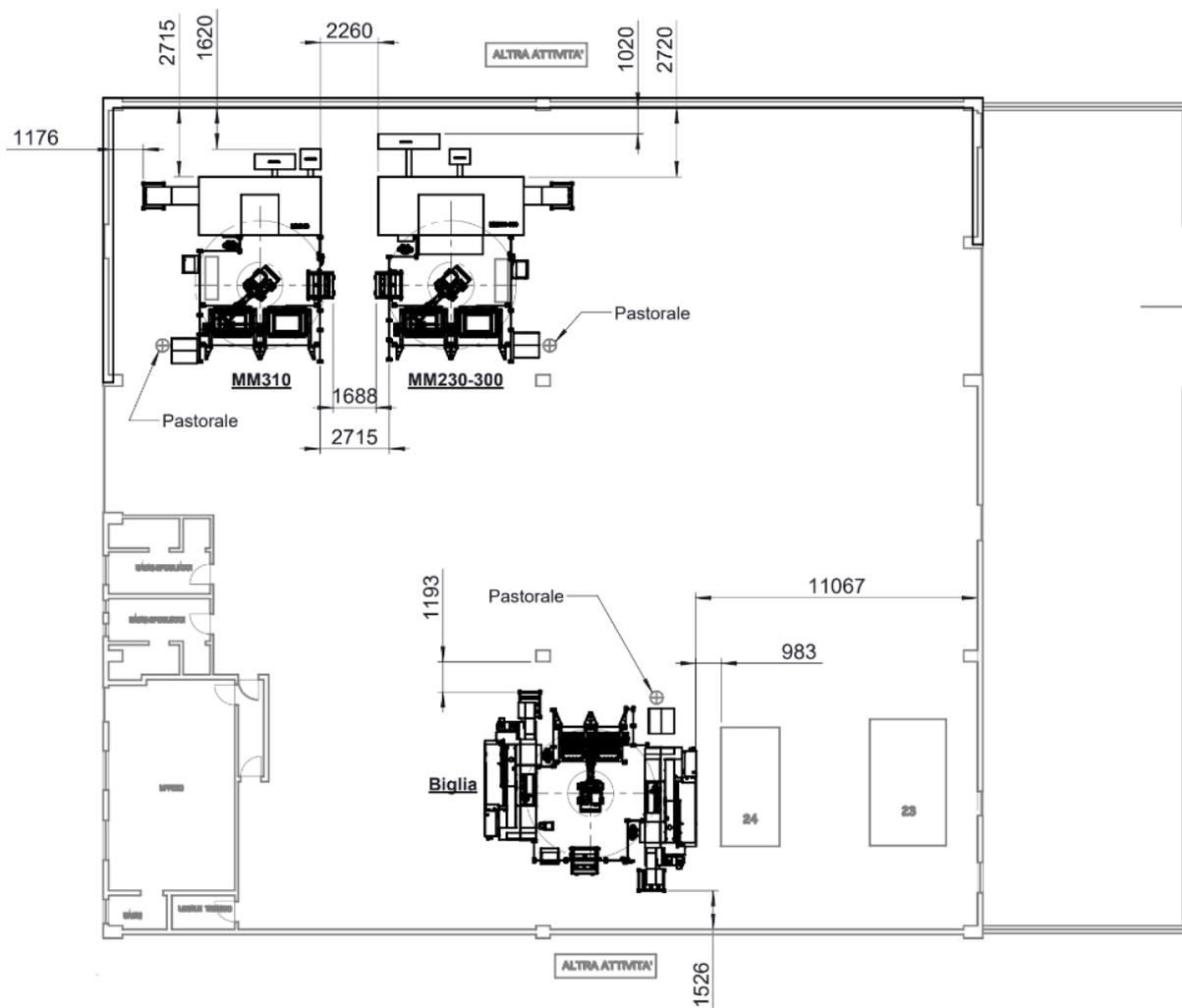


Figura 5: Pianta reparti automatizzati. In alto a sinistra le due isole per la centro-intestatura e in basso per la tornitura (scala 1:200; quote in mm)

Isola Robotica per la Centro-intestatura: L'introduzione di due isole robotiche per l'automazione di questa particolare fase di lavorazione è figlia di una grossa necessità di standardizzare i tempi impiegati. In particolare, la centro-intestatura, è quasi sempre la prima delle fasi presenti sul cartellino ad essere svolta (Figura 6).

Nella tabella rappresentata in Figura 7 vengono riportati i risultati di una analisi detta “OEE” (Overall Equipment Effectiveness), ovvero un indice di efficienza della produzione o KPI. È ottenuto moltiplicando tra loro i coefficienti indicati in tabella:

- Indicatore di disponibilità (ID):

$$ID = \frac{\text{Tempo Disponibile}}{\text{Tempo Totale}}$$

- Indicatore di prestazione (IP):

$$IP = \frac{\text{Tempo Produttivo}}{\text{Tempo Disponibile}}$$

- Indicatore di qualità (IQ):

$$IQ = \frac{\text{Tempo Effettivo}}{\text{Tempo Produttivo}}$$

Si ottiene quindi il valore in tabella:

$$OEE (\%) = ID * IP * IQ * 100$$

L'isola robotizzata consente inoltre l'abbattimento dei tempi morti, situazione non rara quando si lavorano articoli diversi contemporaneamente, in quanto una buona programmazione con dati fissi permette di ottimizzare al meglio tutti i tempi di lavorazione e fermo macchina.

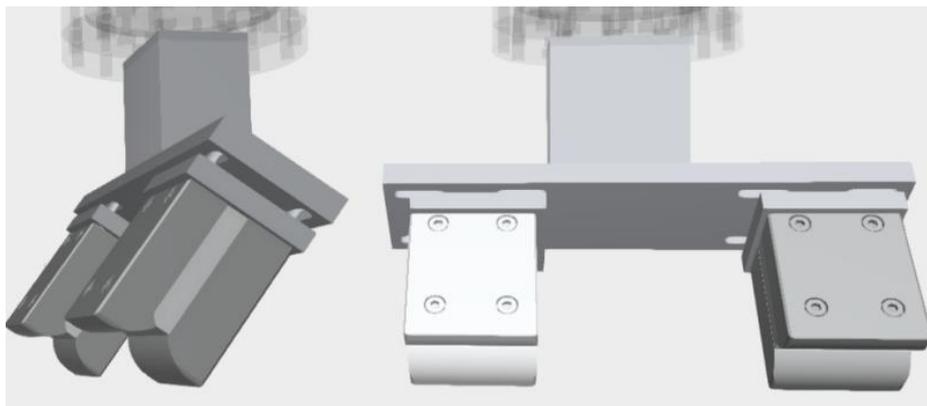


Figura 8: Sistema di presa magnetico per robot [2]

Quella installata presso l'azienda prevede, oltre ad un robot antropomorfo, un sistema di Bin-Picking indispensabile al riconoscimento dei pezzi all'interno del cassone. I pezzi grezzi, infatti, arrivano dai fornitori non ordinati su appositi vassoi ma all'interno di cassoni posizionati in modo casuale.

Affinché il robot possa svolgere il suo compito è stato necessario implementare questo sistema di scansione 3D in modo che, a prescindere dalla posizione che assumono in pezzi, il robot fosse in grado di riconoscere il grezzo e la sua posizione nello spazio e di conseguenza afferrarlo grazie ad un end- effector magnetico (Figura 8).

Isola robotica di tornitura: La seconda tipologia di isola automatizzata è, come già detto, quella adibita alla fase di tornitura e si compone di (Figura 9)

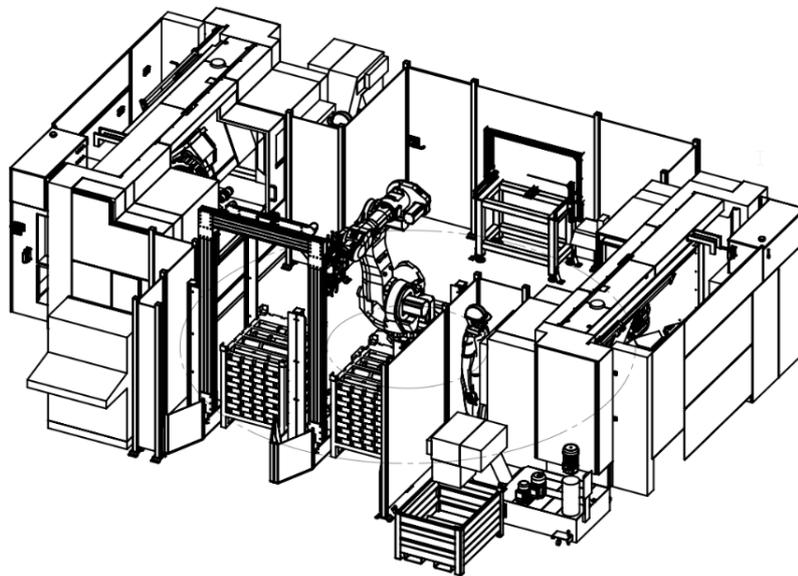


Figura 9: Rappresentazione 3D dell'isola robotica per il reparto di tornitura

- Due Torni CNC
- Macchina di misura
- Marcatrice
- Baia di carico\scarico pezzi con fotocellula di sicurezza
- Armadio elettrico con schermo di interfaccia
- Reti perimetrali di sicurezza
- Robot ABB IRB 6600

La grossa differenza rispetto alla prima isola robotica risiede nella mancanza del sistema Bin-Picking in quanto gli articoli che vengono lavorati nei torni qui presenti hanno già subito la prima fase di centro-intestatura e di conseguenza Inseriti nel ciclo di lavorazione.

Gli articoli che arrivano presso l'isola in questione si trovano infatti su vassoi termoformati in polimero disposti in modo ordinato su apposite canaline. Grazie alle posizioni che gli articoli hanno sul vassoio è più agevole per il robot afferrare e rilasciare ogni pezzo, o meglio, è più veloce programmare le istruzioni da far eseguire al braccio robotico di messa in macchina, prelievo dalla macchina e carico\scarico pezzi. Come per tutte le isole robotiche, anche questa prevede una rete di sicurezza provvista di fotocellule che, in caso di accesso all'interno del suo perimetro da parte di un operatore, attiva un segnale di pericolo rallentando di molto la velocità del braccio robotico o fermandolo del tutto. Ciò, ovviamente, per limitare il più possibile il rischio di infortuni.

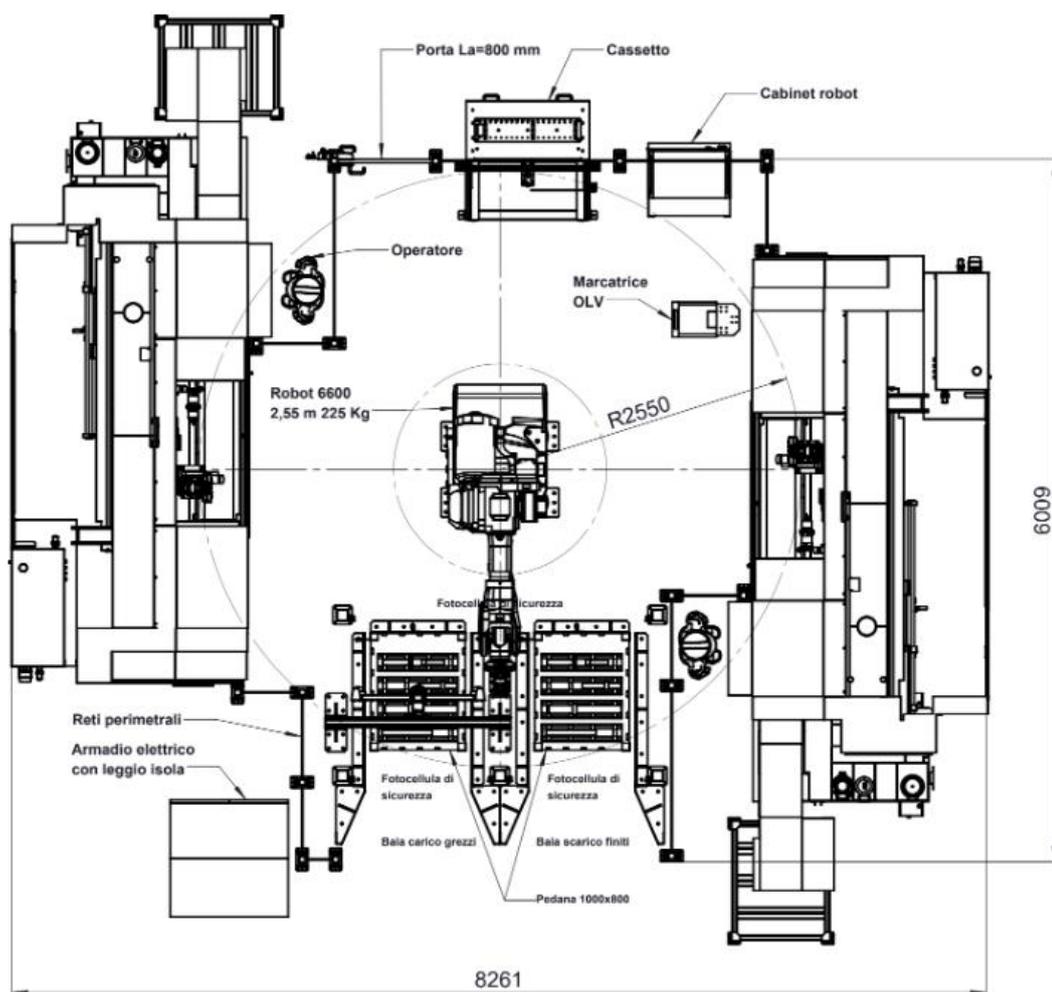


Figura 10: Layout isola robotica di tornitura (quote in mm)

Si noti come il braccio robotico sia predisposto all'asservimento di due torni CNC contemporaneamente, ciò permette non solo di ottimizzare le ore di lavoro dell'isola robotica ma anche di gestire in modo più efficiente articoli anche molto diversi tra loro in termini di tempo di lavorazione o di dimensioni.

Una buona programmazione abbinata ai tempi certi di un sistema automatizzato come quello in questione consente di raggiungere livelli di produzione molto elevati rispetto al passato (Figura 11).

	Lavorazione con operatore	Isola Robotizzata
Tempo Ciclo [hh:mm:ss]	00:07:33	00:05:27
Tempo Macchina [hh:mm:ss]	00:03:46	0:03:46
Tempo Fermo [hh:mm:ss]	00:03:47	00:01:41
% Fermi	48,04%	30,89%
Produzione oraria	7,96	11,04

Figura 11: confronto tempi tra reparto non automatizzato rispetto all'isola robotica [2]

Nella tabella raffigurata sopra (Figura 11) si evince quanto detto. Prendendo un esempio di articolo lavorato, in questo caso un albero di trasmissione, si vede bene come la differenza tra operatore ed isola robotizzata risiede quasi esclusivamente nel tempo di fermo macchina. A parità, infatti, di tempo macchina un braccio robotico consente di limitare la percentuale di attesa tra la lavorazione di un pezzo con il successivo. Tutto ciò si traduce, come già detto, in un aumento della produzione oraria.

Il robot

Per entrambe le tipologie di isole robotizzate è stato installato lo stesso modello di braccio robotico, si tratta infatti di un “IRB 6600 - 225/2.55” prodotto da “ABB “ [6].

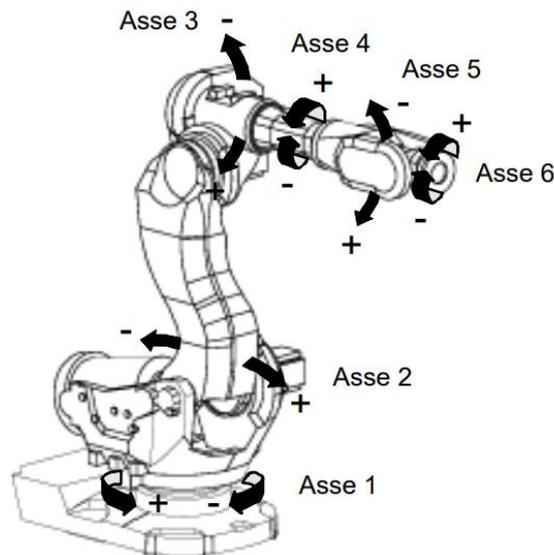


Figura 12: Braccio robotico con sei gradi di libertà IRB 6600 [6]

Il manipolatore in questione presenta i seguenti limiti operativi:

- **Carico massimo manipolabile:** 225 Kg
- **Portata (raggio massimo d’azione):** 2,55 m

Come si osserva dalla rappresentazione in Figura 12 il braccio è caratterizzato da sei gradi di libertà, ognuno di essi consente una rotazione attorno ad un asse. A questi “GDL” eventualmente si aggiungono poi quelli dei sistemi di presa che, come vedremo, possono essere di diverso genere. Ad esempio, possono anche non aggiungere nessun “gdl” come nel caso osservato in Figura 8 dove l’end-effector è costituito da una calamita e di conseguenza non ha necessità di fornire ulteriori movimenti rispetto a quelli già possibili dal manipolatore robotico.

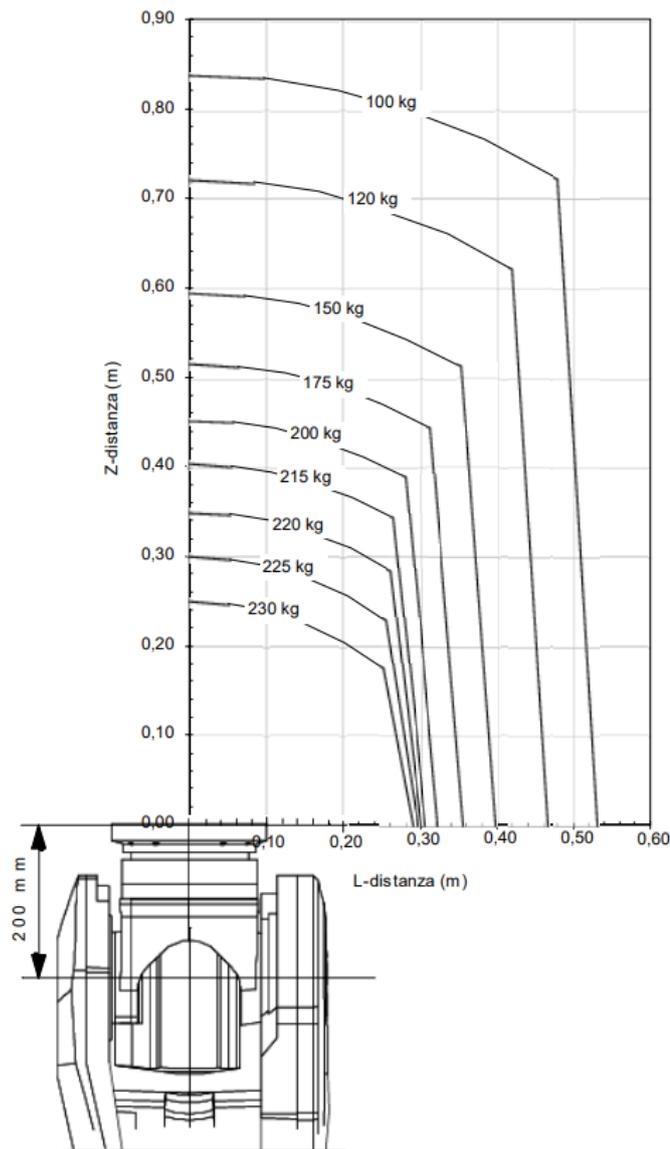


Figura 13: Diagramma di carico massimo movimentabile in funzione della distanza dall'estremità libera del braccio robotico [6]

Nel diagramma rappresentato nella Figura 13 si osserva molto chiaramente le capacità di movimentazione in termini di peso da parte del braccio, questi valori sono funzione sia del carico statico ottenuto dalla somma di sistema di presa e (come nel caso specifico) del pezzo ma anche dei carichi dinamici che si sviluppano durante il movimento. In particolare, per le forze di inerzia sviluppate bisogna ovviamente far riferimento alle accelerazioni determinate dai motori elettrici presenti. Da scheda tecnica si può accedere invece alle velocità ammissibili dalle quali quindi si determinano le accelerazioni.

IRB 6600 - 225/2.55	100°/s	90°/s	90°/s	150°/s	120°/s	190°/s
---------------------	--------	-------	-------	--------	--------	--------

Figura 14: velocità raggiungibili da ogni asse di rotazione (rispettivamente: Asse 1, 2, 3, 4, 5 e 6) [6]

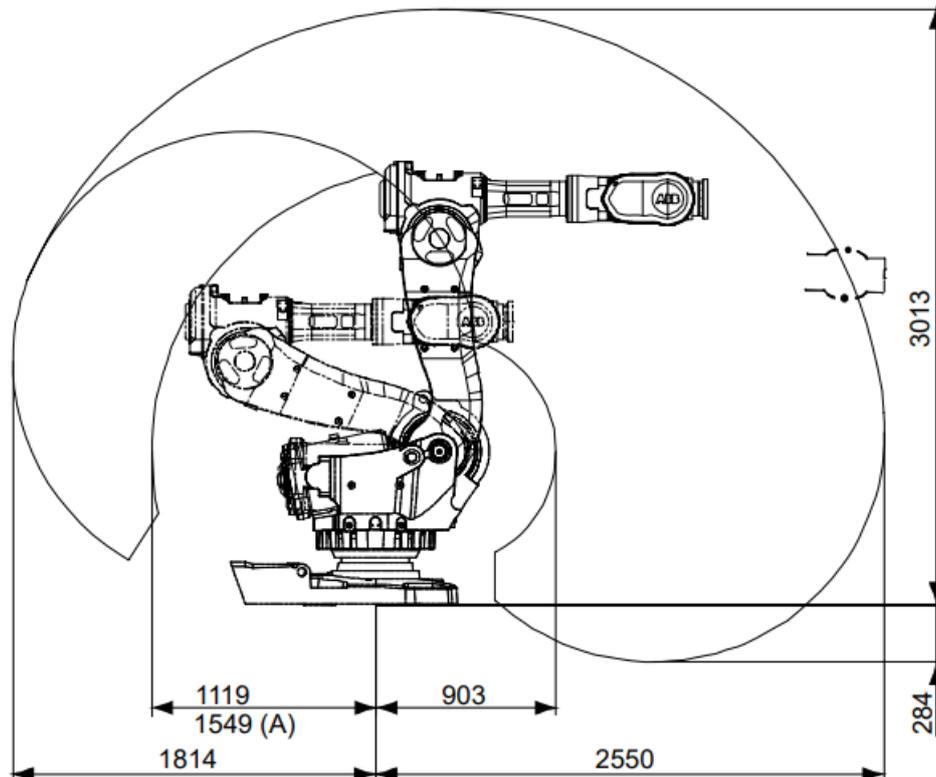


Figura 15: Raggio di lavoro del manipolatore rispetto al centro della base (distanze in mm) [6]

Questo tipo di Bracci robotici sono ad oggi uno dei più usati in ambito industriale, ciò che ne garantisce il successo è senza dubbio l'elevata precisione e ripetibilità ma soprattutto la sua flessibilità. Le applicazioni che questi manipolatori trovano maggiore successo sono infatti molteplici, vengono utilizzati ad esempio per:

- Movimentazione materiale\semilavorati
- Saldature (a punti, laser, stud)
- Verniciature
- Lavaggio
- Taglio laser
- Incollaggio
- Assemblaggio di parti
- Pallettizzazione

La cinematica che caratterizza il movimento del braccio robotico è costituita dalla combinazione delle sei rotazioni ammesse da ogni asse presente e di conseguenza la precisione dell'estremità libera è anche funzione della precisione di ogni grado di libertà ammesso. In particolare, per tutti gli attuatori, robot compresi, risultano fondamentali parametri quali Risoluzione e ripetibilità come già accennato [7].

- **Risoluzione:** viene utilizzata per definire la più piccola dimensione rilevabile dai sensori (encoder). Questo parametro determina la capacità di un robot nella precisione e nella ripetibilità. Il manipolatore utilizzato in questo caso presenta una risoluzione che va da $0,001^\circ$ a $0,005^\circ$ per asse.[6], [7]
- **Ripetibilità:** questo parametro indica la capacità del robot di ritornare nello stesso punto di partenza nello spazio a parità di movimenti effettuati. In particolare, la ripetibilità mette in evidenza la qualità del robot stesso in quanto frutto della qualità della catena cinematica e della risoluzione degli assi di rotazione (Figura 16). Il braccio robotico ABB 6600 da dati tecnici presenta una ripetibilità media di 0,14 mm.[6]
- **Precisione:** Chiamato anche accuratezza, è un parametro che descrive la capacità del robot di raggiungere un qualsiasi punto teorico all'interno del volume di lavoro ed è espresso attraverso la differenza tra punto teorico e punto reale (Figura 16). Di fatto quindi il parametro di precisione non è altro che un errore di posizione, più basso sarà più il robot risulta "accurato". L' ABB 6600 ha una precisione dichiarata di 0,12 mm. [6]

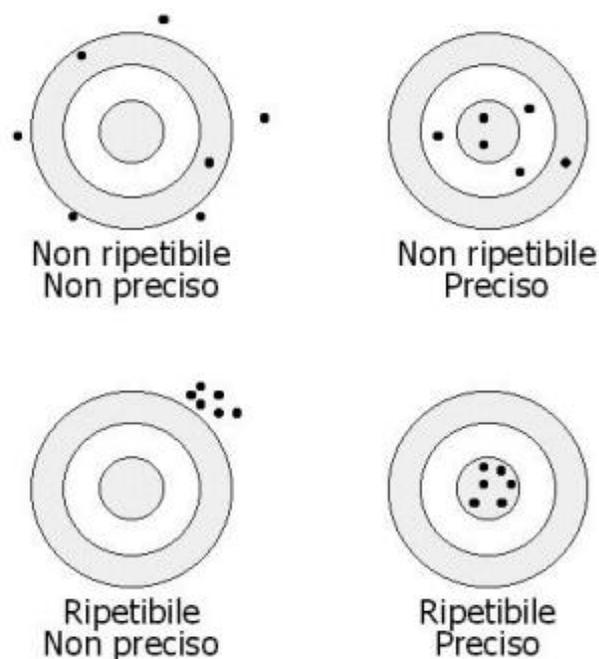


Figura 16: rappresentazione qualitativa dei parametri di ripetibilità e accuratezza [7]

Review Bibliografica: Sistemi di presa

Tipicamente le aziende produttrici di sistemi di presa differiscono da quelle che producono robot industriali e non. Ciò perché l'elevata crescita della domanda da parte del mercato per il settore dell'automazione ha portato all'aumento del numero di applicazioni. Spesso a fare la differenza tra un'applicazione e l'altra non è il manipolatore robotico che, come abbiamo visto, è estremamente flessibile ma è proprio l'end-effector. In generale, per end-effector si intende un qualsiasi dispositivo che viene applicato all'estremità libera del robot, questo ha il compito di eseguire l'operazione per cui è stato installato il robot stesso. Per tali ragioni ed altre legate ai costi di sviluppo è possibile capire come parallelamente al crescere del settore di robot industriali vi siano anche aziende specializzate allo sviluppo di svariati sistemi di presa per molteplici settori come quello metalmeccanico, automotive, alimentare, tessile e così via. Una tra le aziende leader nel settore di sistemi di presa è sicuramente la "Schunk", specializzata per sistemi meccanici e magnetici [8].



Figura 17: esempio di mano antropomorfa robotica sviluppata da "SCHUNK" [8]

È opportuno, innanzitutto, provare a fare una classificazione degli “End-effector” in base, ad esempio, al loro funzionamento o allo scopo per il quale sono progettati. Come già accennato, spesso a ricoprire il ruolo di end-effector è direttamente lo strumento utilizzato per compiere il lavoro richiesto come ad esempio saldatrice a punti o laser, pistola per verniciature, scanner laser ecc... Ma ad essere molto interessanti sono i sistemi di presa adibiti alla movimentazione e manipolazioni dei prodotti in quanto possono assumere svariate forme e funzionalità. In particolare, è possibile individuare cinque macrocategorie di classificazione che identificano le differenti tipologie di “Gripper” [9]. Possiamo quindi classificare in base a:

- Numero di dita
- Tipologia di attuatore
- Modalità di presa
- Cinematica di presa
- Principio fisico di presa

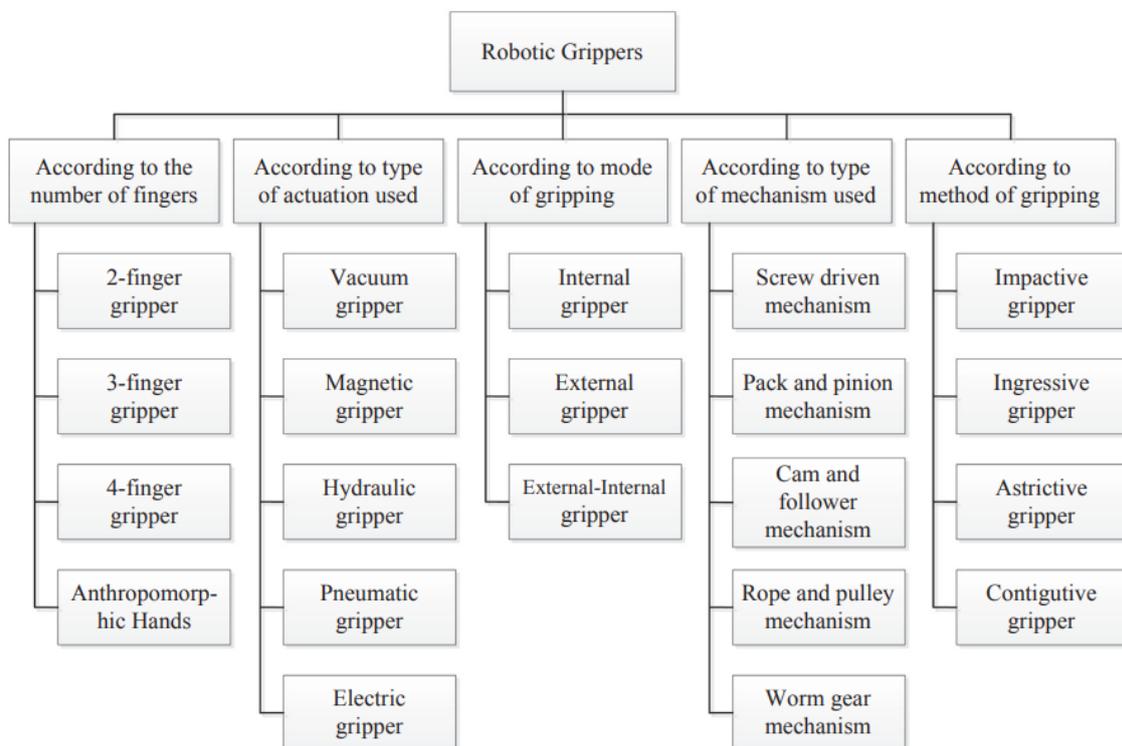


Figura 18: Classificazione dei sistemi di presa per robot [10]

Ciò non implica necessariamente che un sistema di presa appartenente ad una di queste categorie non possa essere presente anche in un'altra tra queste cinque classi. Questo vale a dire che in alcuni casi è possibile avere un sistema ibrido di presa, composto quindi dall'unione di due o più metodi di presa. Si riportano quindi alcuni esempi di meccanismi di presa:

- **Magnetici:** Sistemi utilizzati per la manipolazione di parti metalliche, tipicamente composti da un elettromagnete che sfruttando il passaggio di un'opportuna corrente elettrica genera un campo magnetico tale per cui si abbia una magnetizzazione della zona di contatto con il pezzo da afferrare e interrompendo la medesima corrente consente il rilascio. (Figura 19).



Figura 19: Esempio di sistema di presa magnetico [11]

- **A vuoto:** Sono sistemi utilizzati per il sollevamento di componenti non ferromagnetici che presentano tipicamente superfici piane in quanto sfruttano delle ventose che al contatto e adesione con la superficie, grazie ad un meccanismo di generazione di depressione, permettono una buona presa (Figura 20).



Figura 20: Esempio di sistema di presa a vuoto [11]

➤ **Meccanici (dita o griffe):** Una delle categorie più utilizzate grazie alla sua versatilità. Sono caratterizzate da due o più dita o griffe che sfruttando un azionamento di tipo pneumatico, idraulico o elettrico riescono ad afferrare il componente. Come visto (Figura 21), possono semplicemente afferrare l’oggetto avvicinando tra loro le dita per una presa esterna oppure allontanando queste per permettere una presa interna. Le applicazioni in merito sono molteplici e spesso molto differenti tra loro, i sistemi meccanici infatti si adattano bene ad oggetti che presentano anche forme particolari e con diverse dimensioni. La tecnica di presa, infatti, varia con la complessità dell’oggetto da afferrare. A tal proposito infatti ritroviamo, ad esempio, sistemi con dita rigide che scorrono linearmente (o angolarmente) per oggetti relativamente semplici da afferrare fino a sistemi con più gradi di libertà che si adattano al pezzo durante la fase di contatto [9], [10].

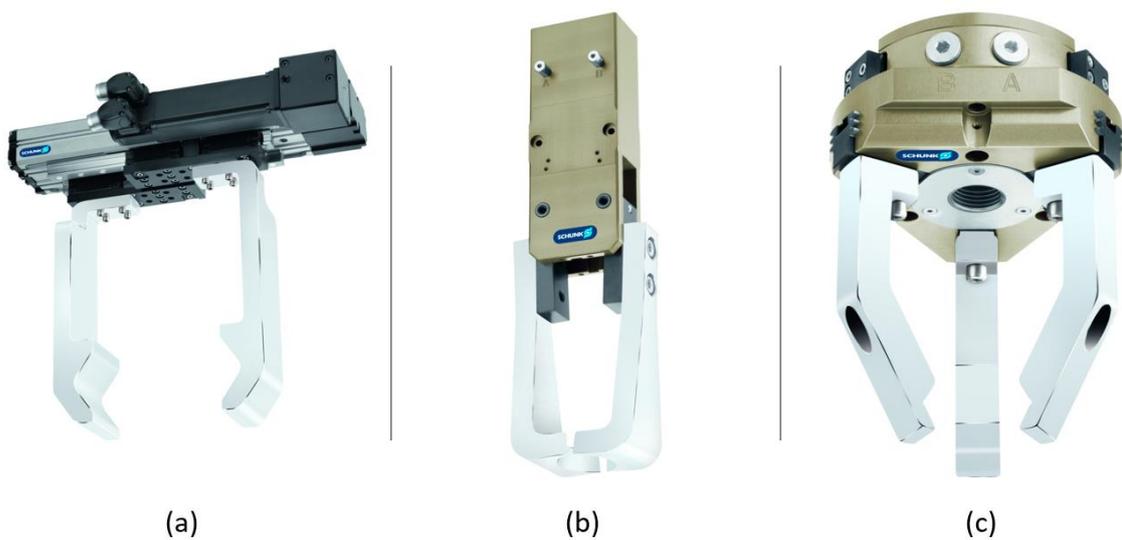


Figura 21: Esempi di sistemi presa meccanica [8]:

a) Pinza elettrica con due griffe e guide lineari;

b) Pinza radiale a 180° con cinematica a leva;

c) Pinza elettrica autocentrante con tre griffe e guide lineari

Nel caso di griffe “rigide” ovvero caratterizzate da un solo grado di libertà, come quelle raffigurate sopra (Figura 21), la zona di contatto con il pezzo da afferrare presenta una geometria tale per cui vi sia un auto-centramento durante la fase di presa, in questo modo si garantisce un corretto posizionamento e di conseguenza una maggiore sicurezza e affidabilità del sistema.

Un'altra categoria sopra citata di gruppo di presa meccanico è quella di tipo adattativo. Sono sistemi che grazie ad un numero maggiore di gradi di libertà consentono di adattarsi all'oggetto da afferrare quando, ad esempio, è presente una certa complessità geometrica oppure è richiesta una maggiore delicatezza. Affinché si possa garantire una migliore adesione, come abbiamo detto, è opportuno aumentare i gradi di libertà della pinza e ciò si ottiene aumentando ad esempio gli assi di rotazione o di traslazione come si vede in Figura 22 dove si sfruttano tre dita con due assi di rotazione per ognuno di essi.



Figura 22: Pinza angolare con tre griffe con un esempio di presa adattativa [12]

Per ottenere una presa ancor più adattativa vi sono molte tipologie di pinze che, ad esempio, sfruttano le proprietà meccaniche dei materiali come l'elasticità o deformabilità. In merito a questa particolare tipologia si riporta in Figura 23 l'uso di un materiale termoplastico per la realizzazione delle griffe che sotto un'opportuna forza sfruttano la deformazione propria del polimero per aderire al meglio durante la presa [13] [14]. Queste griffe fanno parte di una tipologia comunemente denominata "Soft Grippers", ovvero sistemi di presa che sfruttano materiali non rigidi che al contatto consentono una presa più delicata e spesso più avvolgente sul pezzo.

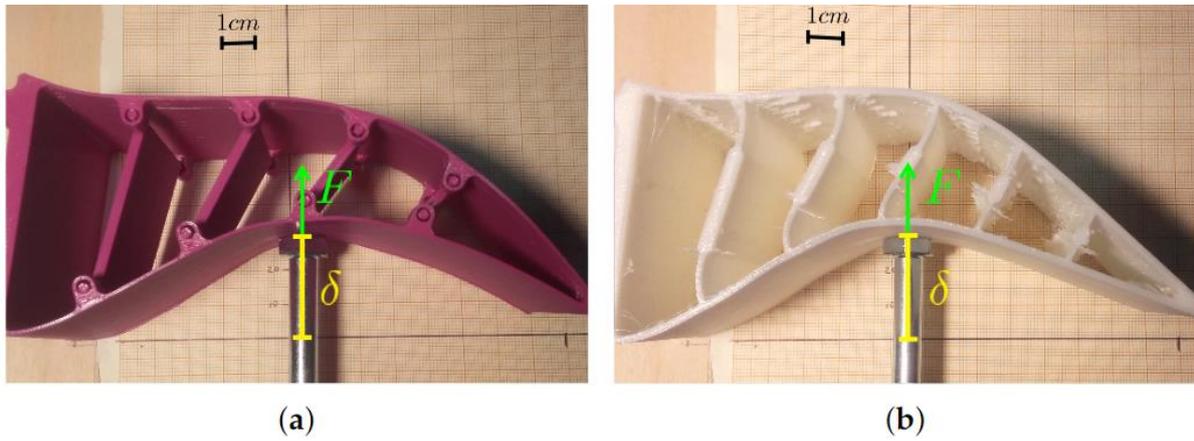


Figura 23: Esempio di presa adattativa con griffe in polimero sottoposto ad una forza ed uno spostamento misurabile, sono riportate due configurazioni: a) struttura semi rigida; b) struttura flessibile [14]

Per quanto riguarda la ricerca e sviluppo nel settore dei sistemi di presa, già da diversi anni, sta vedendo sempre più una crescita in termini di investimenti verso nuovi, più precisi e flessibili end-effector. In particolare, si sta prestando molta attenzione nello studio delle dita di presa o “finger design”. Questo settore, infatti, propone nuove soluzioni attraverso tecnologie e prodotti già presenti con il fine di adattarli verso nuove applicazioni oppure opta direttamente ad un design totalmente “custom” ovvero studiato su misura per il compito affidato. Lo sviluppo di un nuovo design per le dita di presa parte da un modello 3D che, attraverso uno studio sulle superfici dell’oggetto da afferrare, se ne ricava una forma ottimale (Figura 24). Il risultato ottenuto dovrà poi passare alla scelta di uno o più gradi di libertà affinché la forma ottenuta in fase di CAD possa aderire al meglio al pezzo [15].

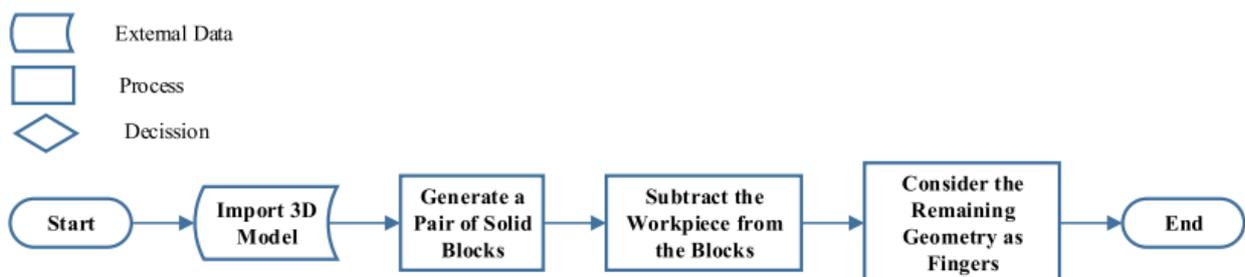


Figura 24: Flowchart di un generico "customized design" per dita di presa [15]

Questo sistema, inoltre, si presta molto all'uso della prototipazione rapida o Additive manufacturing in quanto per prodotti particolarmente "customizzati" e per piccoli lotti si ottiene un notevole risparmio in termini di tempi e costi al fronte di pochissimi limiti geometrici.

Parlando più in generale, invece, è interessante accennare come viene effettuata la scelta di una tipologia di presa rispetto ad un'altra. A tal proposito la letteratura propone diverse metodologie basate sull'analisi di appositi parametri di progetto e, grazie ad algoritmi, se ne estraggono i risultati permettendo di affinare la ricerca del sistema di presa ottimale all'interno di un catalogo [10], [15].

Il metodo in questione si basa fundamentalmente su una serie di principi di esclusione che consentono di scremare dall'iniziale data-base di griffe la maggior parte di quelle che non rispettano le condizioni richieste dal problema. Questo metodo, come già accennato, assegna:

- **Parametri:** descrivono il caso studio analizzando due macrocategorie:
 - **Caratteristiche dell'oggetto da afferrare.** Ovvero proprietà fisiche e geometriche
 - **Operazione da eseguire.** Come ad esempio il piazzamento, allineamento e movimentazione del pezzo

Si veda nella tabella rappresentata in Figura 25 come questi parametri vengono classificati in base alle due macrocategorie appena descritte e si noti, inoltre, che per alcuni di essi la classificazione comprende più categorie contemporaneamente.

- **Regole:** Sono fundamentalmente principi che si basano sull'esclusione di tutte le griffe che non rispondono alle richieste geometriche, fisiche o di movimentazione necessarie alla soluzione del problema.

	Object		Operation		
	Physical	Geometric	Feeding	Handling	Placing
<i>Weight</i>	✓				
<i>Size</i>	✓				
<i>Density</i>	✓				
<i>Porosity</i>	✓				
<i>Slippery</i>	✓				
<i>Stickiness</i>	✓				
<i>Hydrophobic</i>	✓				
<i>Hygienic req.</i>	✓				
<i>Sensitivity</i>	✓				
<i>Conductivity</i>	✓				
<i>Ferromagnetic</i>	✓				
<i>Wet</i>	✓				
<i>Stiffness</i>	✓	✓			
<i>Shape can change</i>	✓	✓			
<i>Roughness</i>	✓	✓			
<i>Toughness</i>	✓	✓			
<i>Shape</i>		✓			
<i>Symmetry</i>		✓			
<i>Presence of holes</i>		✓			
<i>Hole for grasping</i>		✓			
<i>Planar surface</i>		✓			
<i>Regular curved s.</i>		✓			
<i>Stacked</i>			✓		
<i>Tangled</i>			✓		
<i>Oriented state</i>			✓		
<i>Known position</i>			✓		
<i>Orienting</i>				✓	
<i>Acceleration</i>				✓	
<i>Aligning</i>					✓
<i>Inserting</i>					✓

Figura 25: parametri descrittivi di un generico caso studio per sistema di presa attraverso valutazioni fisiche, geometriche e applicative.[10]

In Figura 26 si veda per completezza uno schema rappresentativo del processo selettivo di una tipologia di presa. In particolare, si noti anche i “grasping principles” ovvero un’ulteriore selezione basata ad esempio:

- sulla soluzione più semplice
- sulla soluzione in funzione dell’ambiente circostante
- sulla soluzione consigliata
- sulle criticità rilevate.

Un altro punto fondamentale è costituito come già detto dalla banca dati ed in particolare, questa, viene suddivisa anche in base alle modalità di presa e di rilascio (si veda in Figura 26 la voce “Releasing strategies” e Grasping principles”). In fine ciò che si ottiene è una o più scelte ottimali per il problema proposto.

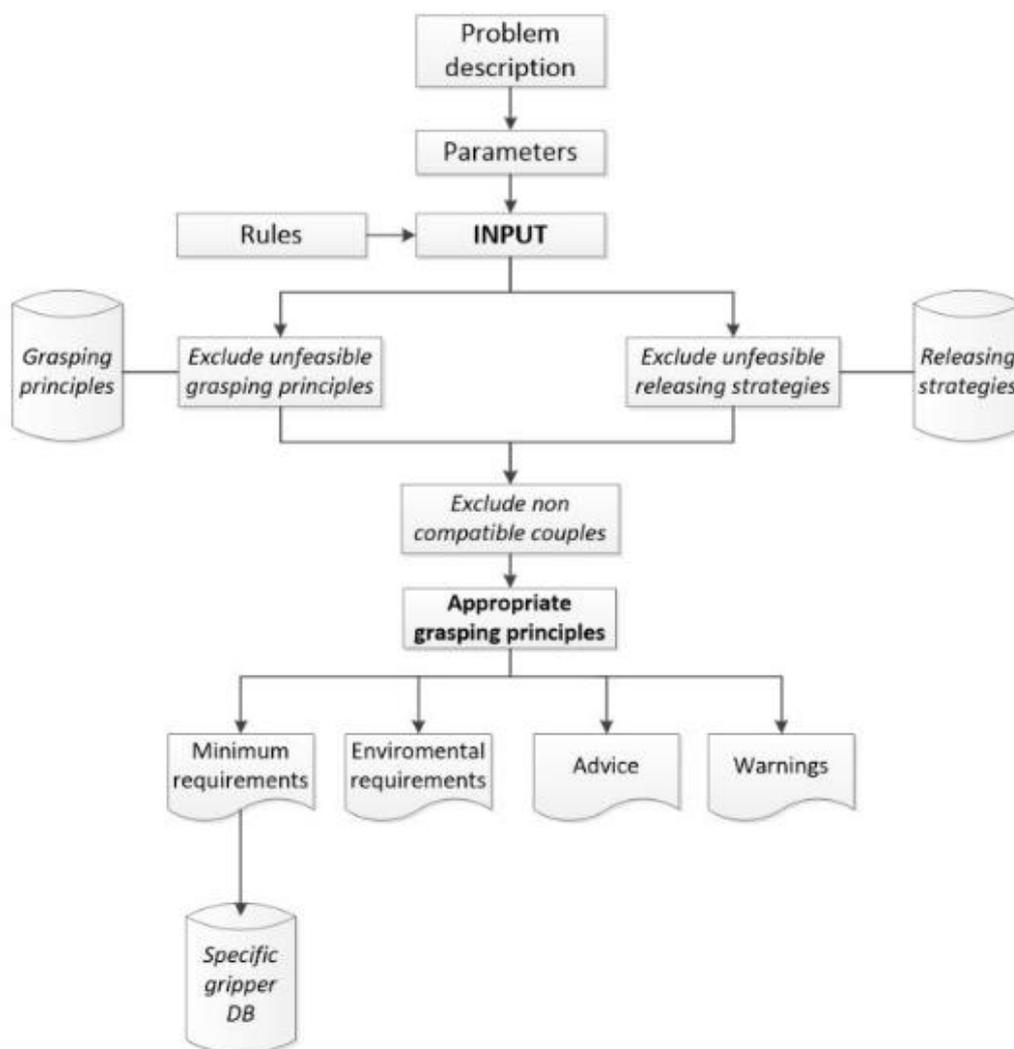


Figura 26: esempio di metodo selettivo di un sistema di presa [10]

Ad oggi, la richiesta di sistemi di presa sempre più personalizzati porta ad avere una domanda molto alta per svilupparne di nuovi. In particolare, per far fronte a queste necessità si sta vedendo una forte espansione dell'Additive Manufacturing (AM) all'interno del settore in questione. Ciò è dovuto alla possibilità di elevate personalizzazioni dei sistemi di presa pur mantenendo anche un lead time basso. Si riportano quindi alcuni esempi di sistemi di presa o "gripper" per robot realizzati mediante processo di Fabbricazione additive. Volendo fare una classificazione di questa categoria di prodotti è possibile distinguere i componenti realizzati in materiale polimerico e/o composito rispetto a componenti realizzati in leghe metalliche:

➤ **Polimeri e compositi:**

- Un primo esempio è rappresentato da due sistemi di pinze per robot realizzati mediante processo CFR (comunemente detto FDM) brevettato da Markforged [16], [17]. In particolare, in questo caso vi sono due applicazioni reali di gripper, a sinistra (a) un sistema di presa e rilascio con azionamento pneumatico composto da guide lineari per l'apertura e chiusura delle griffe e da una guida lineare a pistone per spingere lungo la verticale l'oggetto voluto. In questo caso, anche il supporto superiore è realizzato mediante additive. Il materiale con il quale sono state realizzate le griffe è un composito, ovvero una matrice di polimero denominato "Onyx" composto da Nylon-6 caricato con fibra corta di carbonio con in più un rinforzo in fibra continua di carbonio che ne aumenta di molto le proprietà meccaniche. La seconda tipologia (b) rappresenta anch'esso un'applicazione reale di gripper per rubinetteria, anche in questo caso vi è la stessa matrice polimerica di "Onyx" ma il rinforzo in fibra continua è realizzato in kevlar che ne migliora le proprietà meccaniche soprattutto in ambito di resistenza alle deformazioni cicliche.



Figura 27: Applicazioni di griffe per robot realizzate mediante processo CFR con la tecnologia Markforged [16] [17]

- Un altro esempio di materiale polimerico usato per la realizzazione di griffe robotiche è rappresentato da queste due applicazioni (Figura 28). Nella figura a sinistra (c) si riporta uno studio fatto sui materiali plastici deformabili per la tecnologia di stampa 3D FDM. in particolare, il risultato voluto è un sistema di presa definito “soft gripper”, già accennato nel capitolo precedente. Tale modalità di presa consente di adattarsi all’oggetto da afferrare sfruttando quindi le proprietà del materiale del quale sono composte le griffe stesse. Sulla destra vi è un’altra applicazione simile, ovvero un sistema di presa meccanico realizzato mediante tecnica FDM che sfrutta le proprietà meccaniche di due materiali. Le parti che necessitano di maggiore resistenza agli urti sono realizzate con un polimero più elastico denominato TPU mentre per il resto è stato utilizzato un ABS.

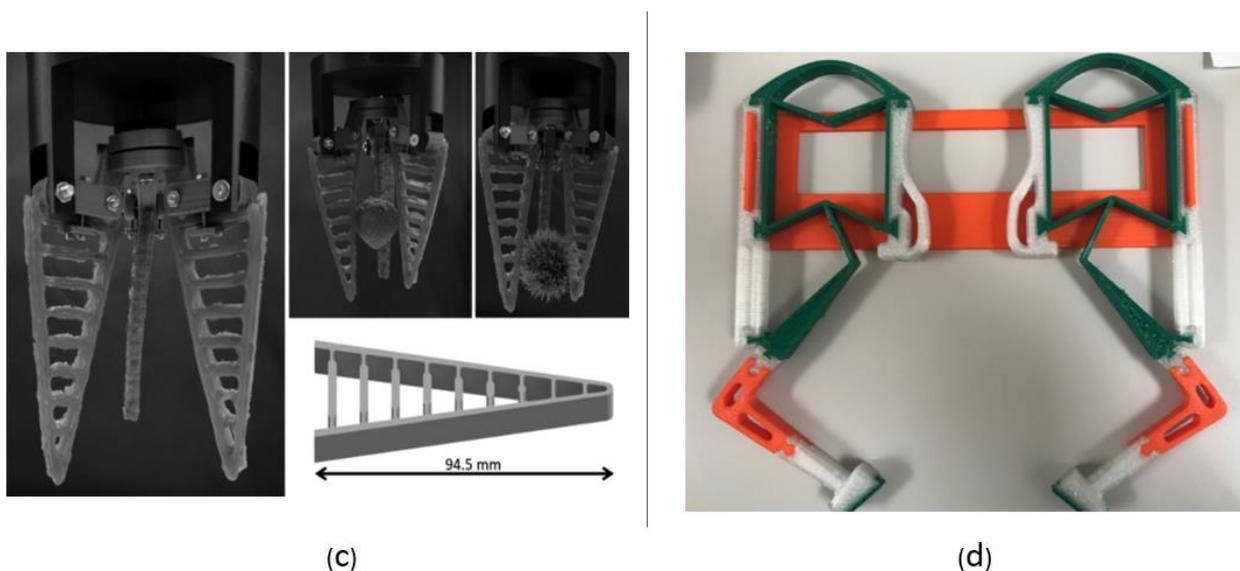


Figura 28: Applicazioni di gripper realizzati con tecnica FDM con polimeri elastici [18], [19]

➤ **Leghe metalliche:** Vista l'applicazione in questione, ovvero gripper per pinze robotiche, è possibile comunque estendere la ricerca di lavori simili verso dei sistemi di sostegno o "bracket" che fondamentalmente sono caratterizzati dalla stessa funzione meccanica, cioè delle travi vincolate alla base con un carico puntuale o distribuito sull'estremità. Fatta questa premessa si riportano alcuni esempi di bracket realizzati mediante fabbricazione additiva in metallo.

- il primo esempio riguarda uno studio effettuato su di un bracket per il settore dell'aerospazio per l'analisi delle tensioni, confrontando i risultati teorici con quelli fisici. Il modello in questione è stato realizzato mediante la fusione selettiva di polveri metalliche attraverso un fascio di elettroni che strato dopo strato va a comporre il pezzo, Questo processo prende il nome di EBM (Electron Beam Melting). Prima di arrivare alla fase di messa in macchina, in questo caso, è stata effettuata anche un'ottimizzazione topologia attraverso la quale è stato possibile ottenere una riduzione della massa del componente originale, aspetto fondamentale nel settore aerospaziale. Il materiale utilizzato è una lega di Titanio, altamente diffusa per il settore per le sue proprietà idonee per le condizioni in gioco. Nella Figura 29 si può vedere a sinistra la rappresentazione CAD del modello e a destra il modello montato su di una macchina di testing con al suo fianco una camera termica per l'analisi degli sforzi derivati dal test di carico.

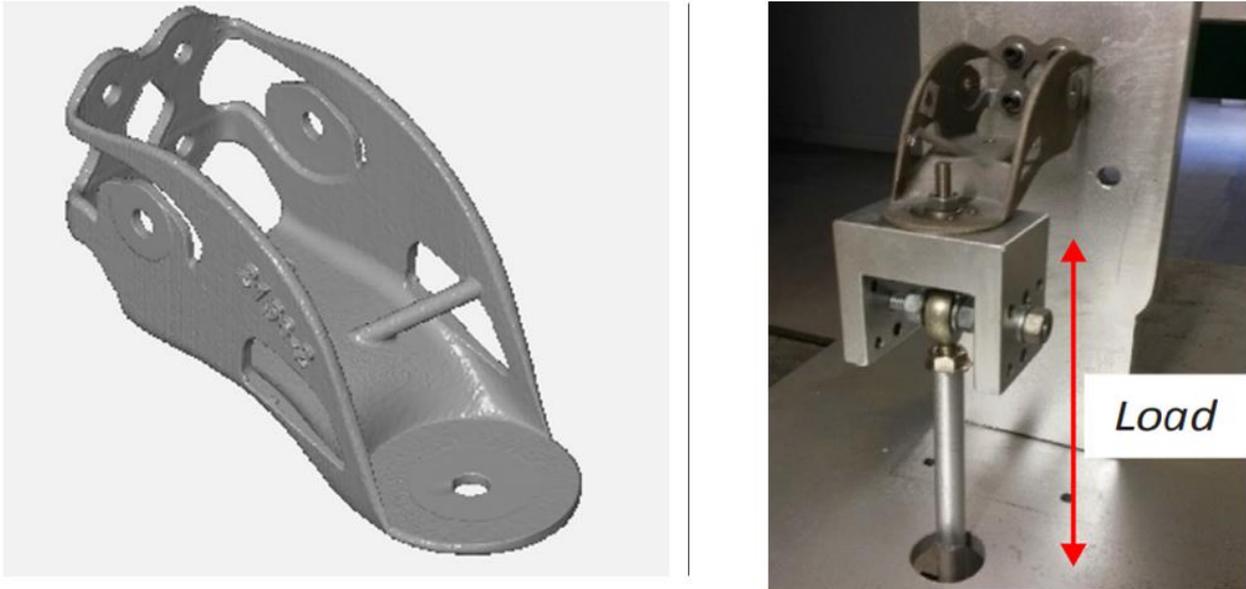


Figura 29: Test di carico di un Bracket per il settore aerospace realizzato mediante Additive Manufacturing con processo EBM [20]

- Si riporta infine un ultimo esempio di Fabbricazione additiva per la realizzazione di gripper. Il modello in questione è una pinza montata su di un manipolatore per una cella robotica adibita alla piegatura (Figura 30). Si tratta di un caso simile a quello in “O.L.V srl” con la differenza che in questa applicazione è stata realizzata per asservire non un tornio ma una pressa industriale. Anche in questo caso come nell’esempio precedente è stata effettuata un’ottimizzazione topologica ma a differenza della tecnica di stampa vista prima qui si è utilizzato un processo composto da più fasi:
 - Deposizione materiale mediante estrusione (FDM)
 - Debinding (rimozione parte polimerica con funzione di legante)
 - Sinterizzazione della parte



Figura 30: Pinza per robot realizzata in additive con processo FDM e sinterizzazione per l'asservimento di una pressa industriale [21]

Avendo fatto una breve introduzione sui sistemi di presa, è importante descrivere il sistema scelto nel caso portato in campo da “O.L.V. Officina meccanica s.r.l.”. Come già detto, l’isola robotizzata presa in esame ha la funzione di asservire due Torni CNC (uno di fronte l’altro) che lavorano per commesse, in questo caso, composte esclusivamente da articoli di tipo assial-simmetrico come alberi di trasmissione o pignoni. Di conseguenza il sistema di presa ha come compito quello di afferrare:

- pezzi grezzi o lavorati assial-simmetrici
- vassoio termoformato in polimero adibito a contenere i pezzi grezzi e lavorati

La necessità di questo caso consiste quindi nell'abbinare due tipologie differenti di presa, il primo sarà effettuato da un sistema meccanico di griffe a scorrimento lineare mentre il secondo, trattandosi di una superficie piana, verrà effettuato da un sistema di presa a vuoto (Figura 31) avente delle ventose in corrispondenza dei punti di aggancio del vassoio stesso. Il risultato ottenuto è quindi un sistema di presa ibrido dove grazie ad un supporto metallico centrale sono state fissate due pinze meccaniche rispettivamente su due lati opposti del blocco centrale ed un sistema di presa a vuoto composto da sei ventose di posizione regolabile posizionato sulla parte inferiore del blocco (Figura 31).

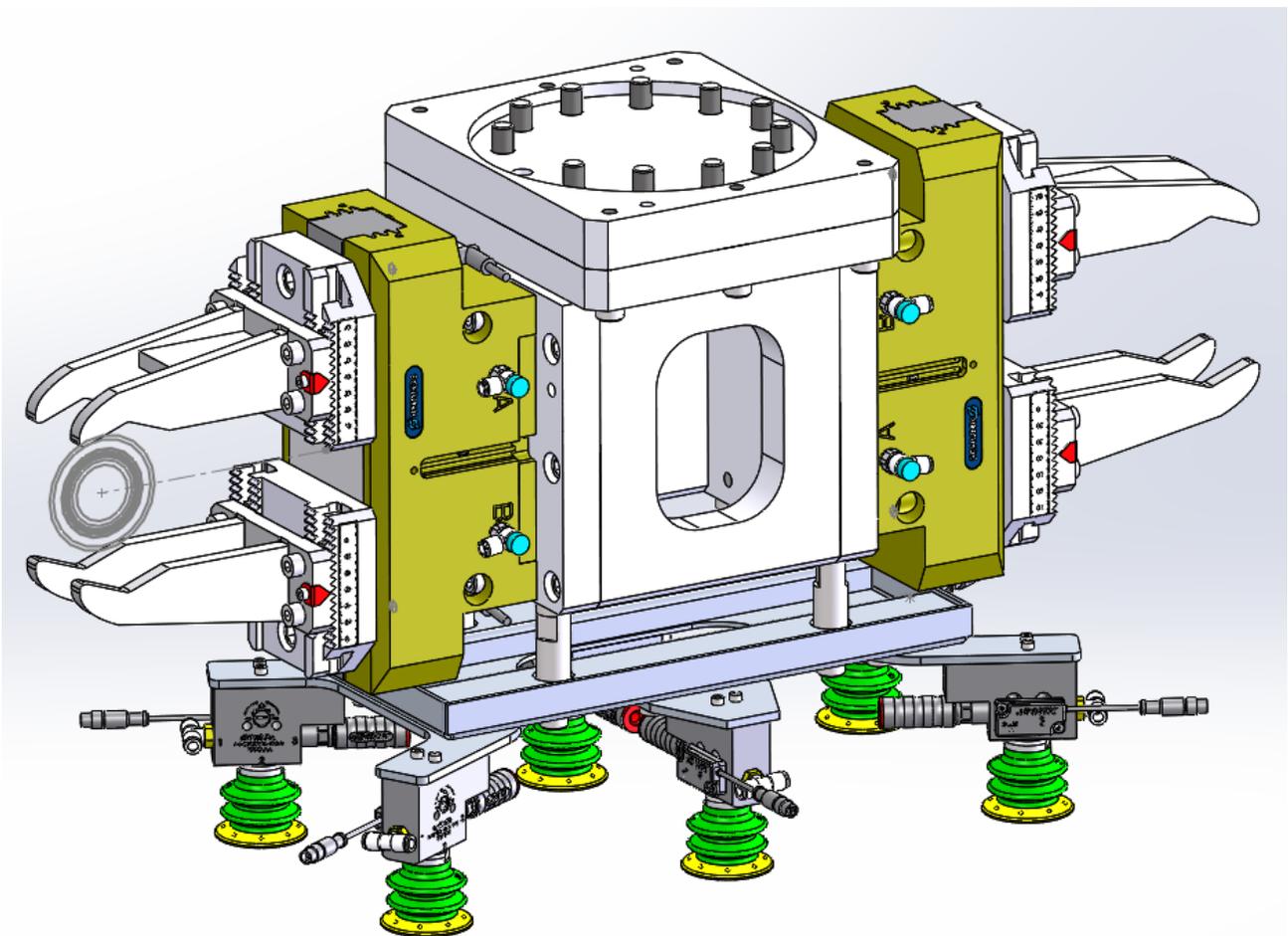


Figura 31: Sistema di presa ibrido utilizzato in "O.L.V. Officina meccanica s.r.l." per l'isola di tornitura robotizzata

Caso Studio in Azienda

Durante un tirocinio curriculare da me svolto da settembre 2021 fino a novembre dello stesso anno ho potuto vedere direttamente le fasi preliminari dell'installazione delle isole robotizzate descritte nel capitolo precedente. Il Responsabile dell'azienda, nonché mio tutor aziendale, mi ha dato la possibilità di visionare l'intero progetto e le sue fasi. In particolare, la mia curiosità si è soffermata sulla sopracitata isola di tornitura che, vista la mole di lavoro a cui erano sottoposte le macchine CNC con operatore, avrebbe fornito all'azienda un grande passo in avanti in termini di produzione e di efficienza.

Come già accennato nel capitolo precedente, l'isola di tornitura ha come scopo quello di effettuare lavorazioni per asportazione di truciolo grazie a due torni CNC asserviti da un braccio robotico con 6 gradi di libertà (Figura 12). Facendo nuovamente riferimento al layout visibile in

Figura 10 si descrive brevemente il compito per quale il braccio robotico è stato programmato.

Fondamentalmente il braccio robotico esegue una movimentazione classificabile nella famiglia del "Pick and Place" ovvero prendere e piazzare. I punti che dovrà raggiungere o dai quali dovrà prelevare sono 6, ovvero:

- Vassoio prodotti grezzi
- Tornio CNC 1
- Tornio CNC 2
- Vassoio prodotti lavorati
- Macchina di misura
- Buffer vassoi vuoti

Il ciclo inizia sempre dal vassoio dei prodotti grezzi, dove il braccio robotico preleva un articolo afferrandolo grazie ad una delle due griffe in metallo ad azionamento pneumatico (Figura 31). Una volta arrivato presso lo sportello principale del tornio CNC, effettuando una rotazione dell'intero sistema di presa rispetto all'asse uscente dal braccio stesso, sfrutta la seconda pinza meccanica per prelevare il componente (qualora ci sia) appena lavorato dal tornio.

Eseguito il prelievo, il braccio, effettua la rotazione appena citata e procede quindi al posizionamento del grezzo all'interno del tornio per la nuova lavorazione. Arrivato a questo punto, il robot si ritrova con una delle due pinze vuota e l'altra impiegata per il pezzo lavorato. Il manipolatore, quindi, potrà piazzare il componente in presa all'interno del vassoio dei prodotti lavorati oppure, in base ad un intervallo di pezzi prestabilito, presso la macchina di misura per effettuare una prima ispezione dimensionale a campione degli articoli in lavorazione (Figura 32).

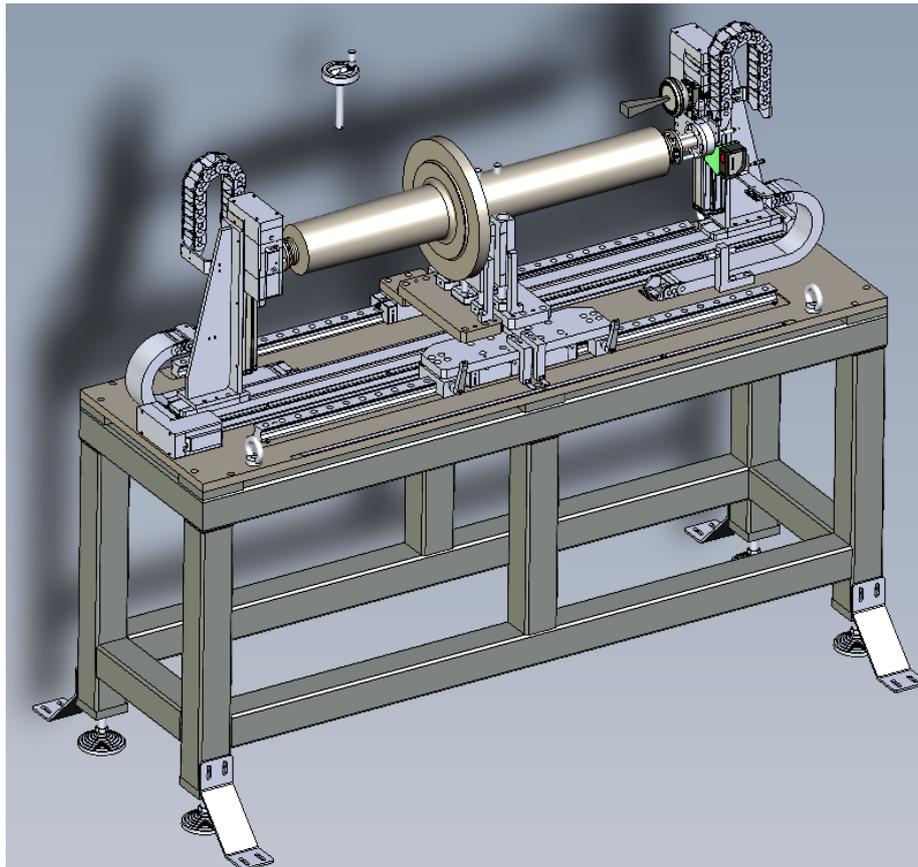


Figura 32: Macchina di misura

Il Ciclo appena descritto è il medesimo per l'asservimento del secondo tornio CNC. Il vantaggio di una buona programmazione fa sì che, nei limiti del possibile, si rifornisca un tornio durante la lavorazione in corso del secondo e viceversa in modo che si limitino al meglio i tempi morti. Oltre al ciclo di "pick and place" dei semilavorati si affianca un'altra movimentazione eseguita dal manipolatore, ovvero il prelievo dal buffer dei vassoi vuoti e l'impilaggio di questi presso la baia di scarico\carico materiale.

I vassoi, infatti, conterranno sia i pezzi grezzi che i lavorati. Quelli in questione in particolare sono stati realizzati dall'azienda "Jollyplast s.r.l." [22] che utilizzando la tecnica della termoformatura plastica si arriva ad ottenere un profilo personalizzato per gli articoli lavorati nell'isola robotizzata di tornitura.

La termoformatura è un processo tipico per lo stampaggio di materiali polimerici che attraverso una forza o un sottovuoto premette al film o lastra plastica di aderire allo stampo, per garantire però che il materiale sia sufficiente deformabile è necessario preriscaldarlo per poi riportarlo alla temperatura ambiente per fissare la forma desiderata [23]. (Figura 33)

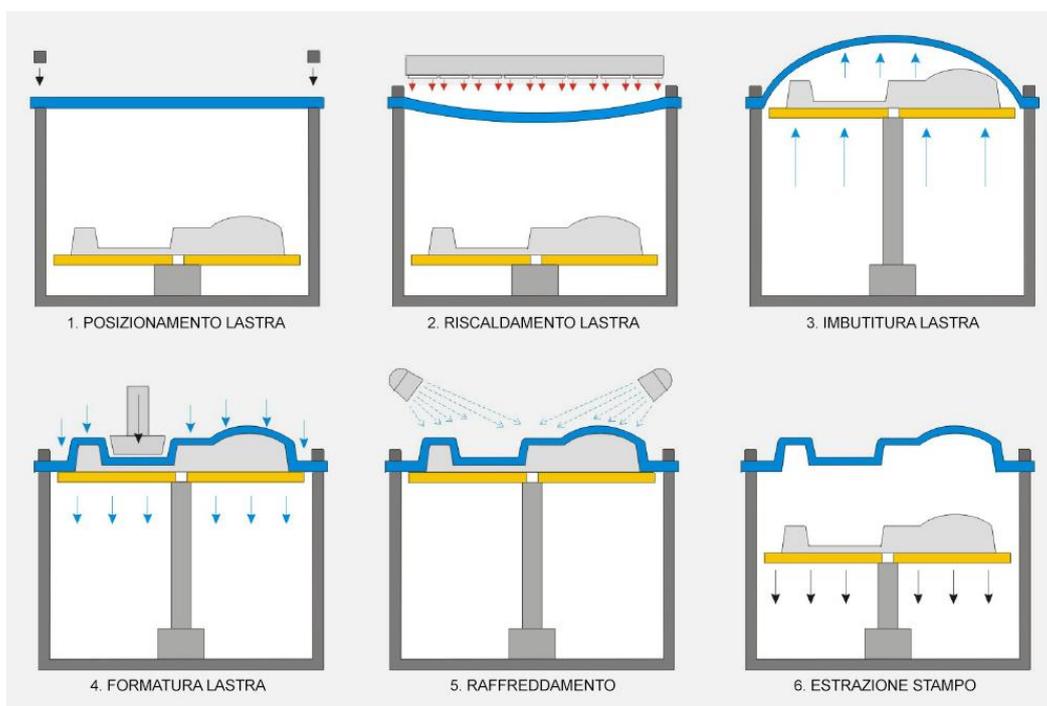


Figura 33: Rappresentazione del processo di termoformatura [24]

Nel caso specifico i vassoi termoformati per la O.L.V. srl sono realizzati in HDPE (polietilene ad alta densità) con dimensioni pari a 1200mm x 800 mm per renderli pallettizzabili secondo gli standard europei ed inoltre risultano autoportanti, Ciò li rende ideali per proteggere, stoccare e movimentare i pezzi prodotti che necessitano quindi di un idoneo supporto visto il peso non indifferente. La loro geometria consente di posizionare quattro pezzi o più nel caso di articoli più piccoli (Figura 34).

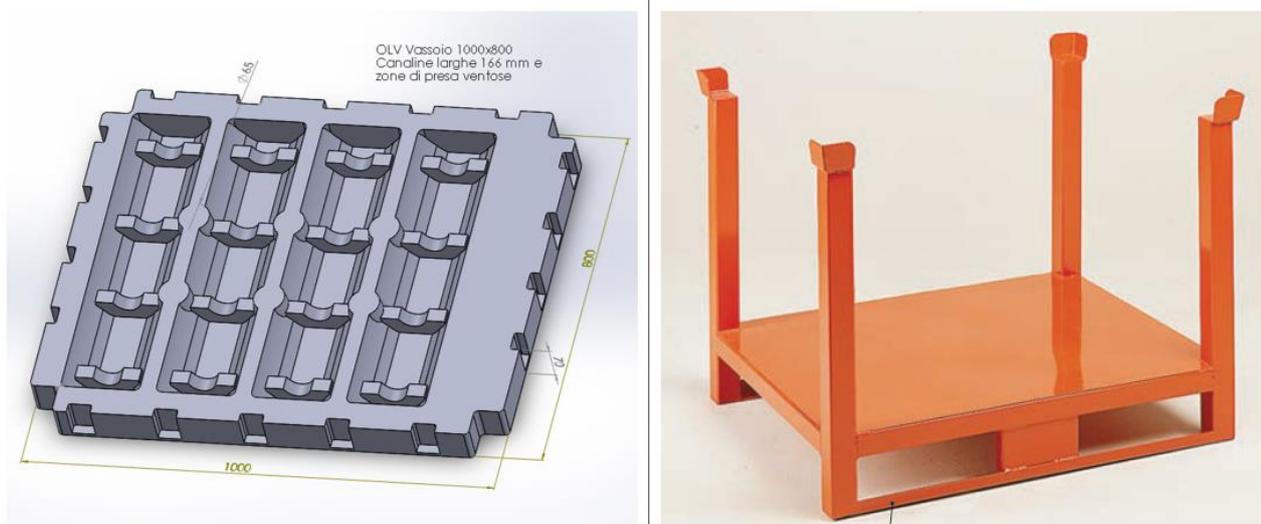


Figura 34: Vassoio termoformato per O.L.V srl (sinistra) e pallet per il loro impilaggio (destra)

Come si osserva in Figura 34 al centro del vassoio in corrispondenza dei bordi tra una canalina e l'altra vi sono sei aree circolari, queste sono particolarmente importanti perché fanno sì che il sistema di presa a vuoto facente parte dell'end-effector possa aderire localmente proprio in corrispondenza di queste superfici permettendo quindi di sollevare l'intero vassoio.

Infine, è opportuno sottolineare che il calcolo dello spessore di ogni vassoio è calcolato, in fase di progettazione da parte dell'azienda produttrice, in modo che si tenga in considerazione il peso al quale verrà sottoposto affinché venga garantita l'impilamento autoportante. Lo spessore, tuttavia, non può risultare eccessivamente spesso in quanto renderebbe complicato il processo di termoformatura e potrebbe ridurre il volume libero tra la superficie superiore e quella inferiore del vassoio stesso andando quindi a limitare le dimensioni dei pezzi impilabili senza avere interferenze (si veda una sezione in Figura 35).

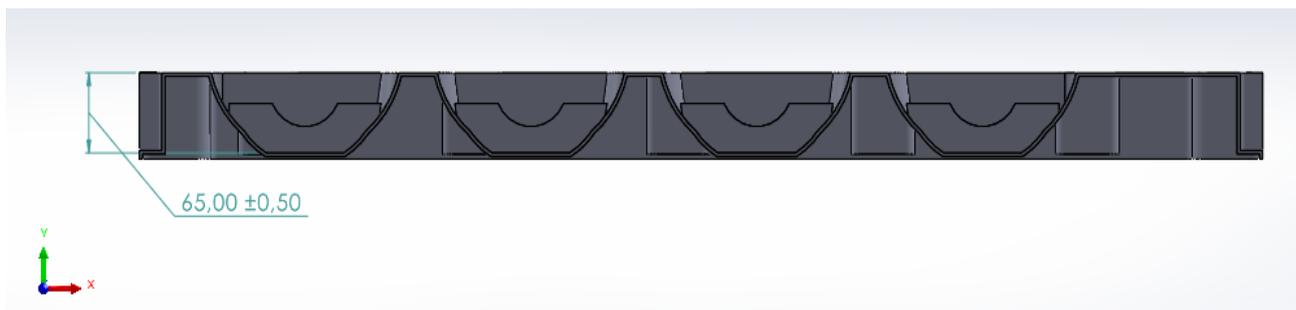


Figura 35: Sezione di un vassoio termoformato con 4 canaline

Per quanto concerne gli articoli lavorati, come si è detto, sono esclusivamente solidi assial-simmetrici quali pignoni ed alberi di trasmissione. Ciò avviene per ovvie ragioni in quanto il tornio CNC è adibito alla lavorazione di questi componenti con l'asportazione di truciolo attraverso processi di sgrossatura e di finitura. In Figura 37 si prende come esempio un pezzo prima e dopo la lavorazione di tornitura, in particolare, nel caso specifico si tratta di un albero di trasmissione realizzato in acciaio a medio tenore di carbonio. In Figura 36, invece, si può vedere un esempio di pignone.

La motivazione per il quale, all'interno dell'azienda, si è deciso di utilizzare (almeno per il momento) l'isola robotizzata solo per articoli medio- piccoli risiede nella necessità di ottimizzare la produzione laddove si generano maggiori colli di bottiglia. In base all'esperienza maturata negli anni e spinta dall'introduzione di sistemi software ed hardware per l'industria 4.0 la "O.L.V. srl" ha riscontrato che il grosso dei ritardi in termini di lead time si concentra per l'appunto per i lotti composti da grandi numeri di pezzi ma di piccole-medie dimensioni. Le motivazioni risiedono anche nella sovrapposizione di fermi macchina che accumulandosi generano notevoli rallentamenti.



Figura 37: albero di trasmissione prima e dopo la lavorazione di tornitura

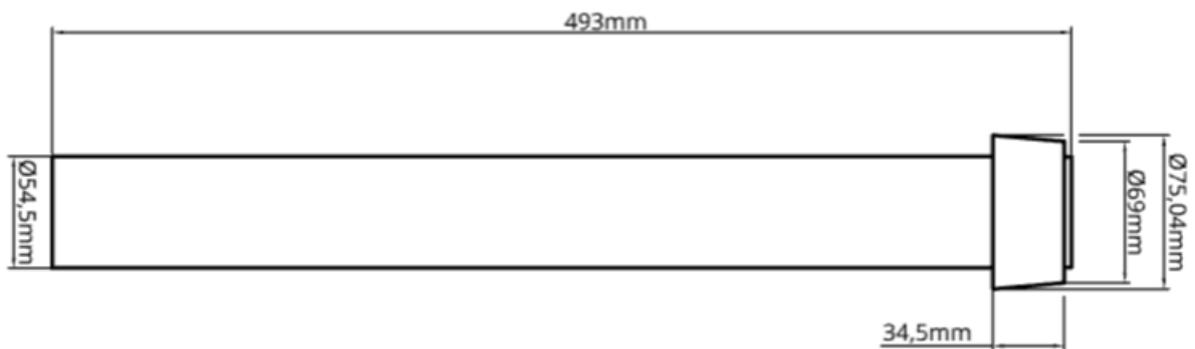


Figura 36: Pignone lavorato nell'isola robotizzata di tornitura

Descrizione problema

Durante la descrizione del nuovo sistema automatizzato di tornitura appena descritto, il titolare dell'azienda, mi ha sottoposto un limite progettuale legato al vassoio con il quale ci si è imbattuti.

Considerando l'obiettivo principale di tutto l'investimento per l'automatizzazione dei reparti sopracitati, ovvero massimizzare la produzione attraverso l'ottimizzazione dei tempi, risulta di primaria importanza anche il concetto di ottimizzazione dello stoccaggio. A tal proposito, ritornando al limite progettuale, durante la personalizzazione da parte della "Jollyplast s.r.l." per il vassoio da realizzare si è aggiunto un vincolo da considerare per il design finale in aggiunta a quelli già considerati dall'azienda produttrice di termoformati, ovvero:

- Spessore minimo per garantire la pallettizzazione
- Altezza minima per evitare il contatto dei pezzi impilati con il vassoio superiore

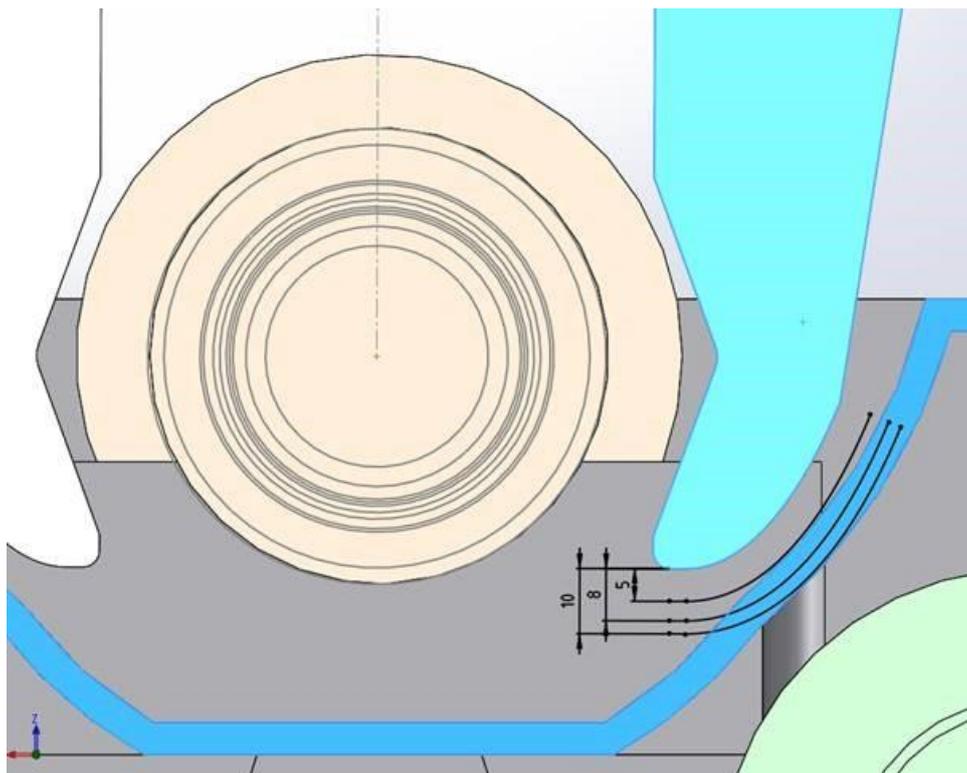


Figura 38: Ingombro della griffa all'interno della canalina durante la fase di presa o rilascio del semilavorato (quote in mm)

Come si vede nelle immagini raffiguranti il vassoio autoportante (Figura 34 e Figura 35), le canaline adibite ad ospitare i semilavorati sono quattro e presentano una larghezza costante per tutte. Tale larghezza è determinata sia dalla dimensione dei componenti da depositare, ovvero il diametro più grande, ma anche e soprattutto dall'ingombro dato dal sistema di presa meccanico del manipolatore robotico. In particolare, ciò che ha vincolato la dimensione delle suddette canaline è lo spessore delle griffe montate sulle guide lineari della pinza. Il motivo di tale scelta è giustificato dalla necessità che il sistema di presa ha per garantire una corretta posizione durante la fase di prelievo e deposito del semilavorato all'interno del vassoio.

Nella Figura 38 si evidenzia meglio quanto appena detto, in particolare, si nota come oltre allo spessore delle griffe sia altrettanto importante considerare un certo gioco tra la superficie del vassoio e le griffe stesse. Ciò è dovuto fondamentalmente per due ragioni:

- Il vassoio accoglie diverse tipologie di articoli
- Il sistema di presa necessita di un certo livello di tolleranza

Preso atto quindi di questo limite progettuale e non potendo modificare gli altri citati il titolare di "O.L.V srl" ha dovuto accettare come migliore soluzione ottenibile un vassoio con massimo quattro canaline disponibili.

Un ulteriore limite che si aggiunge a quanto detto è il problema degli ordini già effettuati. Precisamente, durante il periodo in cui effettuando il mio tirocinio formativo ho potuto visionare il progetto, le tempistiche relative alle consegne e alle installazioni si trovavano già in una fase sufficientemente avanzata da non permettere una sostanziale modifica alla tipologia di sistema di presa senza incappare in ulteriori rallentamenti dei lavori. Quando mi è stato presentato il problema in questione, infatti, l'intera isola robotizzata con il relativo robot e sistema di presa erano già stati progettati ad hoc ed ordinati. Un'eventuale modifica o cancellazione avrebbe portato oltre a notevoli ritardi anche un significativo aumento dei costi.

L'unico spazio di manovra concesso in quel lasso di tempo risiedeva nella modifica dei vassoi termoformati ma che comunque era limitato all'incirca ad una o massimo due settimane, lasso di tempo che corrispondeva infatti al lead time necessario all'azienda produttrice di vassoi per mettere sulla linea di produzione l'ordine per "O.L.V srl". Anche in questo caso, una modifica al progetto fatta oltre il periodo di tempo indicato avrebbe portato un aumento di costi e ritardi.

Delineati quindi i vincoli da rispettare per trovare un'ipotetica soluzione per migliorare il caso in esame è possibile dichiarare gli obbiettivo principale del lavoro di tesi:

- ❖ **Diminuire la larghezza di ogni canalina dell'attuale vassoio per permettere l'aggiunta di una quinta aumentando così il numero di pezzi totali stoccabili per unità di pallet.**

Per raggiungere tale obbiettivo è necessario rispettare i seguenti vincoli:

- **Ridurre al minimo lo spessore della griffa attuale**
- **Mantenere le stesse funzionalità del sistema di presa senza compromettere la resistenza**
- **Trovare un'alternativa alle attuali griffe in un lasso di tempo limitato**

Definizione Dati di progetto

Calcolo dimensioni obiettivo

Avendo definito l'obiettivo principale, ovvero ridurre la larghezza delle canaline, ho potuto iniziare la fase progettuale vera e propria per una nuova geometria per le griffe metalliche del sistema di presa. Prima di tutto è stato necessario analizzare le caratteristiche geometriche e fisiche del componente originale e da lì procedere quindi alle modifiche necessarie per il raggiungimento di un risultato ottimale.

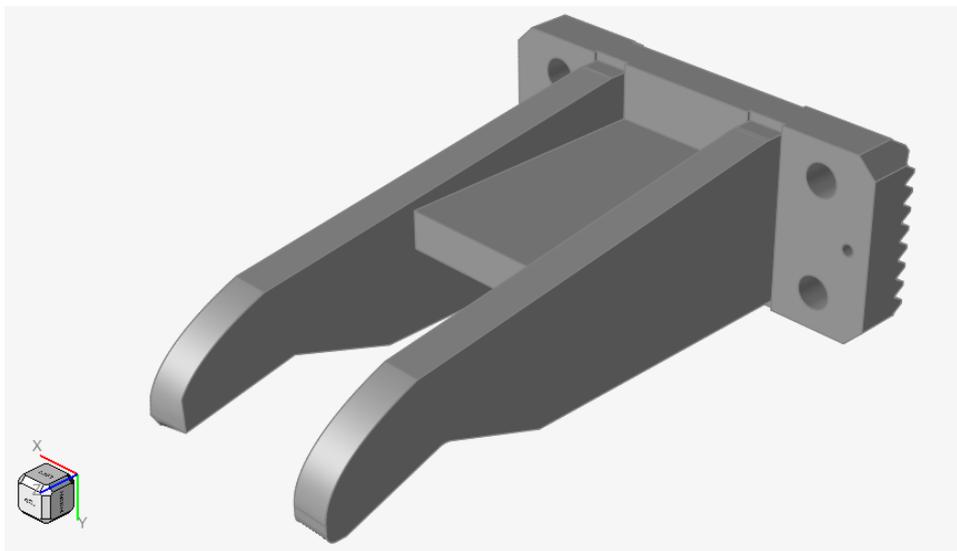


Figura 39: Griffe originali

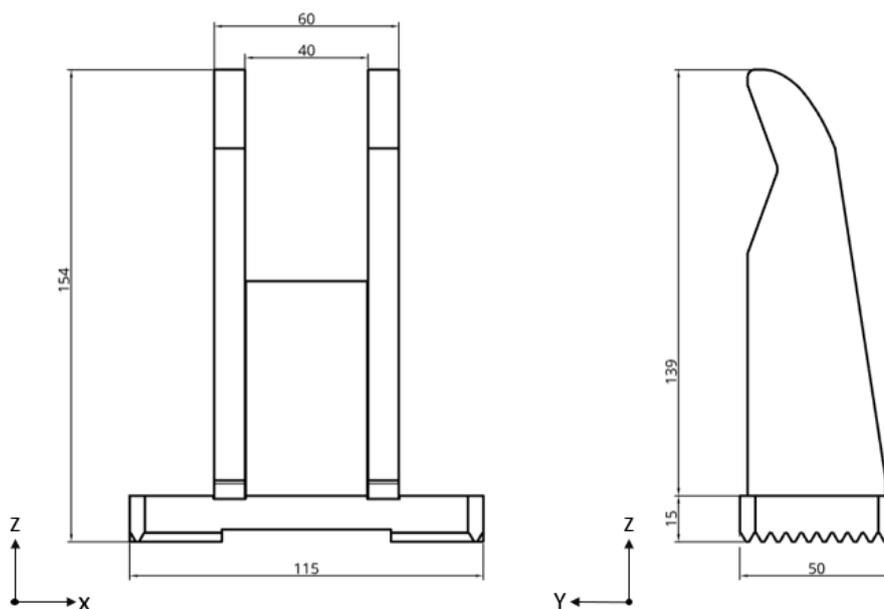


Figura 40: Viste e dimensioni delle griffe originali (quote in mm)

La fase di progetto ha avuto inizio con un confronto con la “Jollyplast s.r.l.” in quanto per poter avere un obiettivo in termini di riduzione degli ingombri era necessario capire con che dimensioni finali delle griffe sarebbe stato possibile ottenere sufficiente spazio sul vassoio per l’inserimento di una quinta canalina.

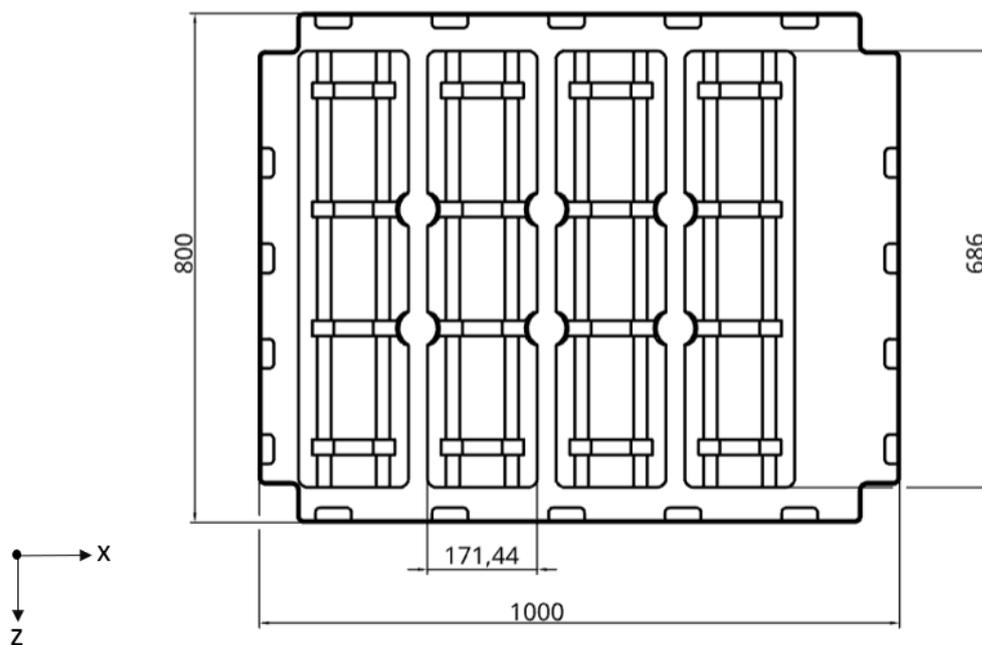


Figura 41: larghezza originale delle canaline del vassoio termoformato (quote in mm)

Attraverso considerazioni interne all’azienda dei termoformati e tenendo sempre in considerazione i vincoli progettuali già citati sui vassoi, il referente del reparto tecnico mi ha comunicato che ottenendo una canalina con larghezza (misurata sulla superficie del vassoio) inferiore a 145 mm sarebbe fattibile l’aggiunta della quinta canalina. Ottenuto questo dato fondamentale mi è stato possibile iniziare a delineare le dimensioni obiettivo da riportare sulle griffe originali (Figura 41).

In particolare, analizzando le dimensioni del vassoio originale e attraverso un semplice calcolo si ritrova lo spessore da raggiungere sulle griffe (Equazione 1).

$$RIDUZIONE\ SULLA\ SINGOLA\ GRIFFA = \frac{Larghezza\ originale - Larghezza\ Obiettivo}{2}$$

Equazione 1: calcolo riduzione degli ingombri

Si ottiene così un valore di riduzione dello spessore pari o maggiore a 13,4 mm sulla singola griffa. Questa grandezza va quindi riportata sulla griffa, in particolare, verrà applicata in corrispondenza del punto di giunzione tra il raccordo sull'estremità della pinza e il corpo principale (Figura 42).

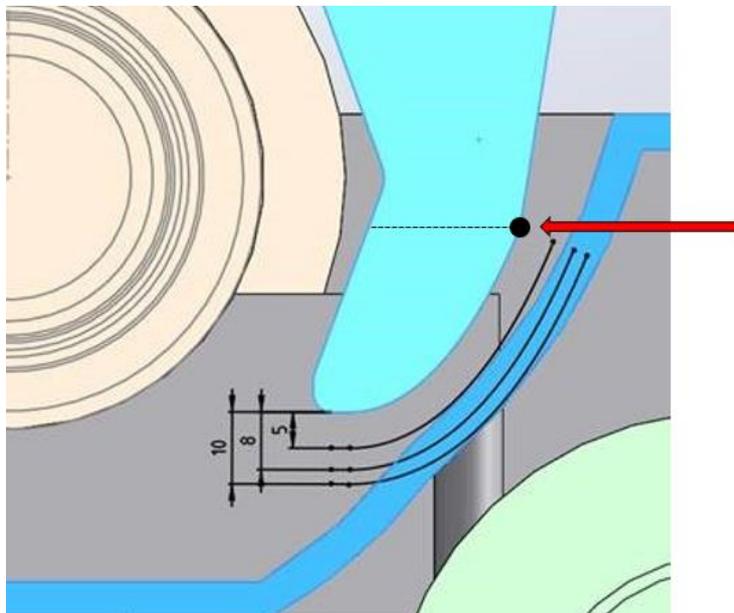


Figura 42: punto di applicazione della riduzione di spessore (quote in mm)

La scelta di questo punto è dovuta ad un rapido calcolo riguardante la massima profondità di immersione richiesta dagli articoli attualmente considerati per questa isola robotizzata. Partendo, infatti, dal semilavorato più piccolo in termini di diametro si va ad individuare il punto sopraccitato sulla griffa in quanto punto più vicino alla superficie della canalina e di conseguenza il punto dal quale bisogna applicare la riduzione di spessore calcolata nella Equazione 1: calcolo riduzione degli ingombri.

Ovviamente, considerare solamente lo spessore delle griffe non è sufficiente in quanto bisogna anche tener conto della profondità di “immersione” all’interno della canalina ovvero di quanto la griffa deve scendere verticalmente per poter afferrare il semilavorato appoggiato. Per trovare questo valore ho utilizzato la distanza del vassoio originale che c’è tra la superficie superiore e la superficie sul fondo della canalina (Figura 35). Partendo da quella grandezza, considerando anche un gioco tra le due superfici, ho considerato una profondità di immersione e quindi la lunghezza sulle griffe dove applicare la riduzione di larghezza pari a circa 60 mm a partire dall’estremità della griffa.

$$PROFONDITA'DI IMMERSIONE GRIFFA = \text{profondità canalina} - \text{gioco} \approx 60 \text{ mm}$$

Equazione 2: calcolo lunghezza di riduzione di spessore nella griffa

Trovati i primi due Obiettivi geometrici si riporta quindi la porzione di griffa da rimuovere per il raggiungimento dello spessore richiesto e della profondità necessaria (Figura 43).

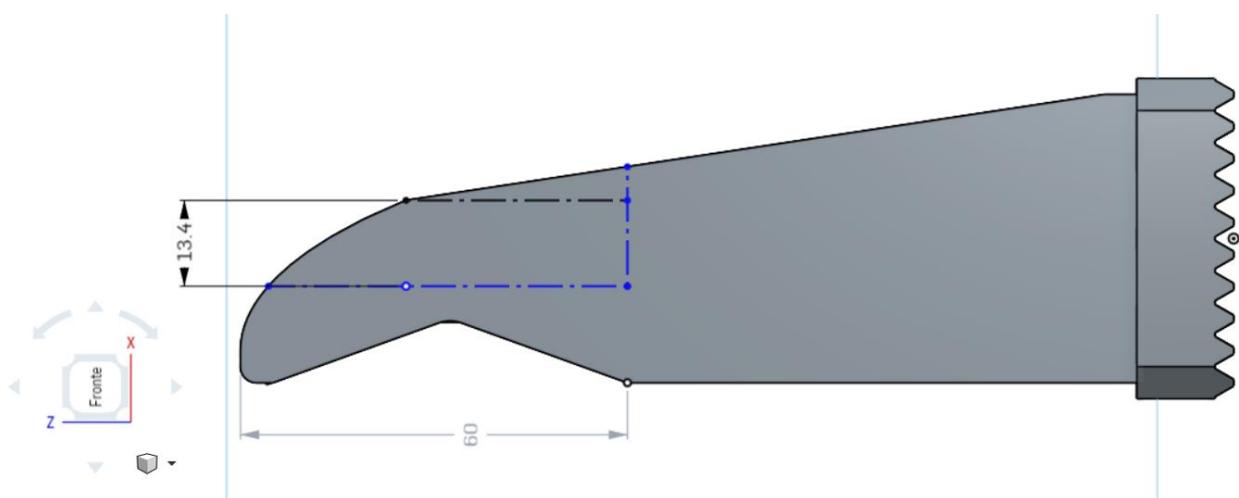


Figura 43: rappresentazione degli obiettivi geometrici sulla griffa (quote in mm)

Chiaramente le modifiche appena viste verificano anche uno dei vincoli progettuali sopra citati riguardante il mantenimento delle funzioni di presa del sistema.

La parte di griffa da rimuovere infatti non intacca il loro funzionamento ed in particolare, le dimensioni caratteristiche come la lunghezza totale della griffa e la superficie di contatto con i semilavorati rimangono le medesime della griffa originale. Resta invariato anche la base della griffa, adibita all'accoppiamento con le guide lineari della pinza grazie alla dentatura ed i fori passanti per il fissaggio.

Calcolo dei carichi

Come per quasi tutti i sistemi di presa simili a quello in analisi, è prevista una forza di serraggio o di trattenimento che consiste in una compressione della pinza sul pezzo da afferrare. Le motivazioni di tale carico sono fondamentalmente due:

- Mantenimento della posizione durante la manipolazione
- Sicurezza di presa anche sotto accelerazioni variabili e/o impulsive

Nel capitolo precedente riguardante i sistemi di presa si era detto che questi sistemi sono azionati mediante attuatori appartenenti a tre macrocategorie:

- Attuatori elettrici
- Attuatori pneumatici
- Attuatori idraulici

Ciò che differisce tra i tre sistemi è fondamentalmente solo il principio fisico che genera la forza o pressione necessaria all'apertura e alla chiusura delle pinze. Il sistema utilizzato in questo caso specifico è azionato mediante un circuito pneumatico con pressione pari a 6 bar che mette quindi in movimento le guide lineari.

La scelta della pinza per il manipolatore è stata fatta, insieme all'intero il progetto di automatizzazione dell'isola robotica, dall'azienda "Automation technology srl"[25]. Risulta interessante, di conseguenza, visionare come tale scelta è stata effettuata. Il primo passo consiste nel calcolo delle forze di inerzia in gioco applicando nel calcolo il caso più critico, ovvero viene considerata la massa dell'articolo da manipolare più pesante tra quelli presenti. Fatta questa premessa vengono considerati altri fattori che determinano in fine la forza di serraggio idonea ad una movimentazione sicura.

Il calcolo è effettuato tramite questa equazione:

$$F = \frac{M \cdot (g + a_R) \cdot CS}{f}$$

Equazione 3 : Calcolo forza di serraggio

Con rispettivamente:

- $M = 17 \text{ Kg}$ (massa del pezzo più pesante da movimentare)
- $g =$ accelerazione di gravità $\approx 10 \frac{m}{s^2}$
- $a_R =$ accelerazione robot $\approx 3 \frac{m}{s^2}$
- $f =$ coefficiente d'attrito $\approx 0,1$
- $CS =$ coefficiente di sicurezza $= 2$

Si ottiene così una forza di serraggio necessaria pari o superiore a:

$$F = 4420 \text{ N}$$

Ottenuto questo dato si passa alla scelta attraverso il catalogo della “Schunk spa” azienda dalla quale è stato acquistato il sistema di presa. Considerato il range di forza necessaria è stato selezionato il seguente prodotto “PGN-plus 240” (Figura 44).



Figura 44: sistema di presa “PGN-plus 240” scelto da catalogo [8]

Questo sistema consente di avere un range di forza caratterizzato da:

- Forza di chiusura ≤ 6500 N
- Forza di apertura ≤ 6870 N

La scelta fatta quindi è idonea al tipo di carico calcolato precedentemente. Questa pinza inoltre presenta due versioni, una con un'apertura fino a 30 mm ed una fino a 17 mm. La seconda versione, denominata “**PGN-plus 240 – 2**”, è sufficiente a soddisfare le esigenze di presa e di conseguenza completa la scelta da catalogo.

Quanto dichiarato, però, si riferisce alla forza che si ha in corrispondenza della base della pinza, ovvero sulla superficie esterna delle guide lineari. Per poter ricavare il valore effettivo della forza applicata sulle griffe bisogna far riferimento al diagramma estratto dalla scheda tecnica del sistema di presa (Figura 47).

Gripping force

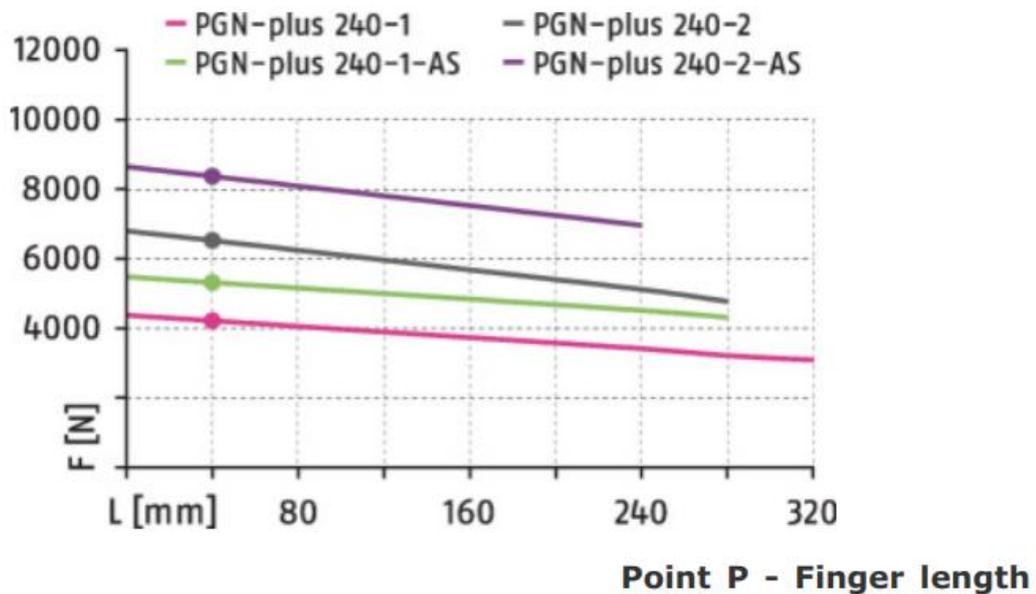


Figura 45: Diagramma forza applicata in funzione della lunghezza della griffa [26]

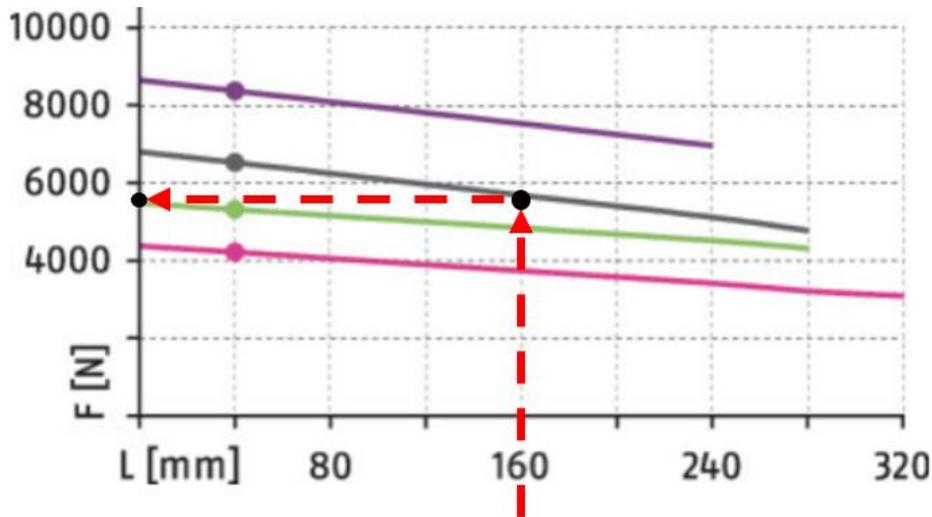


Figura 46: Individuazione della forza applicata sulla griffa in esame [26]

Come si può notare dal diagramma, la forza di chiusura diminuisce all'aumentare della lunghezza della griffa. Ciò è dato dal fatto che il sistema è in grado di supportare griffe di diverso tipo e lunghezza. Nel caso in esame con una lunghezza di griffa circa pari a 160 mm si ricava la forza di serraggio utile. Si ottiene in questo modo una **forza di chiusura di circa 5500 N** (Figura 46).

Per quanto concerne altri parametri caratteristici della pinza visibili nella tabella sottostante, sono tutti rispettati dalle condizioni di operatività presenti nel progetto in questione come ad esempio temperatura ambientale, peso massimo movimentabile o lunghezza massima della griffa. Con quest'ultimo dato relativo alla forza di chiusura e con gli altri calcolati in merito alla geometria voluta si è ora in condizioni di poter ipotizzare le opportune modifiche sul nuovo design delle griffe.

Technical data

Description		PGN-plus 240-1	PGN-plus 240-2
ID		0371108	0371158
Stroke per jaw	[mm]	30	17
Closing/opening force	[N]	4200/4440	6500/6870
Min. spring force	[N]		
Weight	[kg]	8.5	8.5
Recommended workpiece weight	[kg]	21.5	33
Fluid consumption double stroke	[cm ³]	650	650
Min./nom./max. operating pressure	[bar]	2.5/6/8	2.5/6/8
Min./max. air purge pressure	[bar]	0.5/1	0.5/1
Closing/opening time	[s]	0.45/0.45	0.45/0.45
Closing/opening time with spring	[s]		
Max. permissible finger length	[mm]	320	280
Max. permissible mass per finger	[kg]	8.5	8.5
IP protection class		40	40
Min./max. ambient temperature	[°C]	5/90	5/90
Repeat accuracy	[mm]	0.04	0.04
Dimensions X x Y x Z	[mm]	270 x 115 x 107	270 x 115 x 107

Figura 47: Scheda tecnica di "PGN-plus 240-2"[26]

Materiali e Metodi

Partendo dai dati ricavati nel capitolo precedente si passa quindi ad ipotizzare una soluzione in termini di geometria per le nuove griffe di presa. Come primo step è opportuno ipotizzare la soluzione relativamente più semplice e veloce ovvero modificare direttamente le griffe originali mediante una lavorazione per asportazione di truciolo tramite fresa CNC, macchinario già presente in “O.L.V. srl” e che quindi comporterebbe un basso costo ed in tempi rapidi.

Per far ciò bisogna, innanzitutto, definire il materiale del quale le griffe sono composte e da quell'informazione verificare che le modifiche non compromettano la resistenza. Nel caso specifico, le griffe sono realizzate ad hoc da un'azienda fornitrice di “Automation Technology srl” e sono assemblate mediante saldatura di placche derivate dal taglio di una lastra di comune acciaio C40 (Si riporta in Figura 48 la scheda tecnica).

C40 Normativa di riferimento UNI 7845 Reference Standard UNI 7845		 IMS S.p.A. acciai speciali					
Corrispondenze <i>Comparable standards</i>	SIAU	DIN	W.N.	AFNOR	BS	AISI/SAE	
	C4	CK40	1.1186	XC42	(060A42)	(1042)	
Composizione <i>Chemical analysis</i>	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Altri
	.37÷.44	.50÷.80	.15÷.40	-	-	-	P e S ≤ .035
Temperature per la lavorazione a caldo ed il trattamento termico <i>Hot work and heat treatment temperatures</i>	Punti critici <i>Critical points</i>	Fucinatura <i>Forging</i>	Normalizzazione <i>Normalization</i>	Ricottura subcritica <i>Subcritical annealing</i>	Ricottura isotermica <i>Isothermal annealing</i>	Tempra <i>Hardening</i>	Rinvenimento <i>Tempering</i>
	Ac1 730 Ac3 780 Ms 360	1100÷850	840÷880	650÷700	840÷880 ↓ 660x1h	830÷850 acqua/water	550÷650
Caratteristiche meccaniche / Mechanical properties							
Stato <i>Condition</i>	Saggio Ø mm. <i>Specimen Ø mm.</i>	Re min. <i>N/mm2</i>	Rm <i>N/mm2</i>	A min. <i>%</i>	KCU min. <i>J</i>	Durezze HB allo stato <i>HB hardness in the following conditions</i>	
Bonificato <i>Hardened and tempered</i>	16 16÷40 40÷100	490 420 370	700÷840 640÷780 590÷740	15 17 18	25 25 20	Ricotto lavorabile / <i>Soft-annealed</i> ≤ 220 Ricotto isoteramico / <i>Isothermal annealed</i> 155÷210 Ricotto sferoidale / <i>Spheroidal annealed</i> ≤ 179	
Normalizzata / <i>Normalized</i>	16÷100	325	570÷720	18			
Temprabilità <i>Hardenability</i>	HRC / % Martensite		Diametro temprabile mm. / Hardenable diameter mm.				
	90%	50%	olio / <i>oil</i>		acqua / <i>water</i>		
	53	42	-		25		

Figura 48: Scheda tecnica acciaio C40 [27]

La lega metallica “C40” rappresenta uno tra i più utilizzati acciai a medio tenore di carbonio tipicamente impiegato nel settore delle costruzioni e della meccanica per il basso costo e le numerose applicazioni. È denominato spesso acciaio da bonifica in quanto è tipico il trattamento di bonifica per migliorare le prestazioni meccaniche. Si notano infatti sulla scheda tecnica (Figura 48) quelle che sono le temperature caratteristiche per eseguire questo trattamento termico che risulta essere composto da:

- Austenitizzazione: riscaldamento fino ad ottenere sola Austenite con $T > 780 \text{ °C}$ (Ac_3)
- Tempra: rapido raffreddamento fino a temperatura ambiente per ottenere martensite
- Rinvenimento: ulteriore riscaldamento ad una $T < Ac_1$ per ottenere martensite rinvenuta

Si passa quindi alla definizione del nuovo design, facendo però riferimento ai vincoli citati precedentemente e visibili nella Figura 43. Seguendo quindi il profilo suggerito dagli obiettivi ed evitando angoli troppo netti (causa di fattori di intaglio) si arriva ad un’ipotesi di design visibile nella (Figura 49).

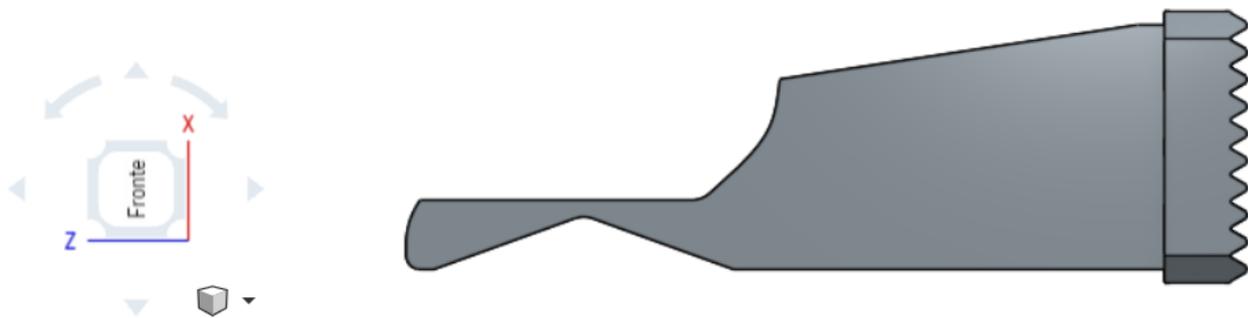


Figura 49: prima ipotesi di design per le nuove griffe

Il profilo così ottenuto rispetta gli obiettivi di progetto, tuttavia è necessario verificare che tale riduzione di spessore non incida sulla resistenza meccanica e sullo spostamento. Il modello originale, infatti a parità di condizioni di carico presenta un Coefficiente di sicurezza circa pari a 3. È quindi opportuno che tale valore venga al più eguagliato o migliorato.

Per la verifica si sfrutta un'analisi agli elementi finiti (FEM), tale analisi è stata effettuata mediante il software "Altair Inspire". I parametri utilizzati per svolgere questa verifica sono:

- Tipologia elemento della mesh: trial
- Dimensione elemento: 2 mm
- Dettaglio analisi: più accurato

Per quanto riguarda l'applicazione dei carichi e vincoli si fa riferimento al carico determinato nel capitolo precedente (Figura 46). La sua applicazione è stata fissata nella mezzeria del profilo a "V" adibito al contatto con i cilindri da afferrare. Trattandosi di sue superfici di contatto rappresentate dalle due dita che compongono la griffa, il carico di 5500 N è stato suddiviso equamente tra le due superfici. Infine, affinché la simulazione sia più vicina possibile alla realtà, si è fatto uso del vincolo di accoppiamento mediante vite mordente (funzione prevista dal software "Altair Inspire") in corrispondenza dei fori presenti alla base della griffa (Figura 50).

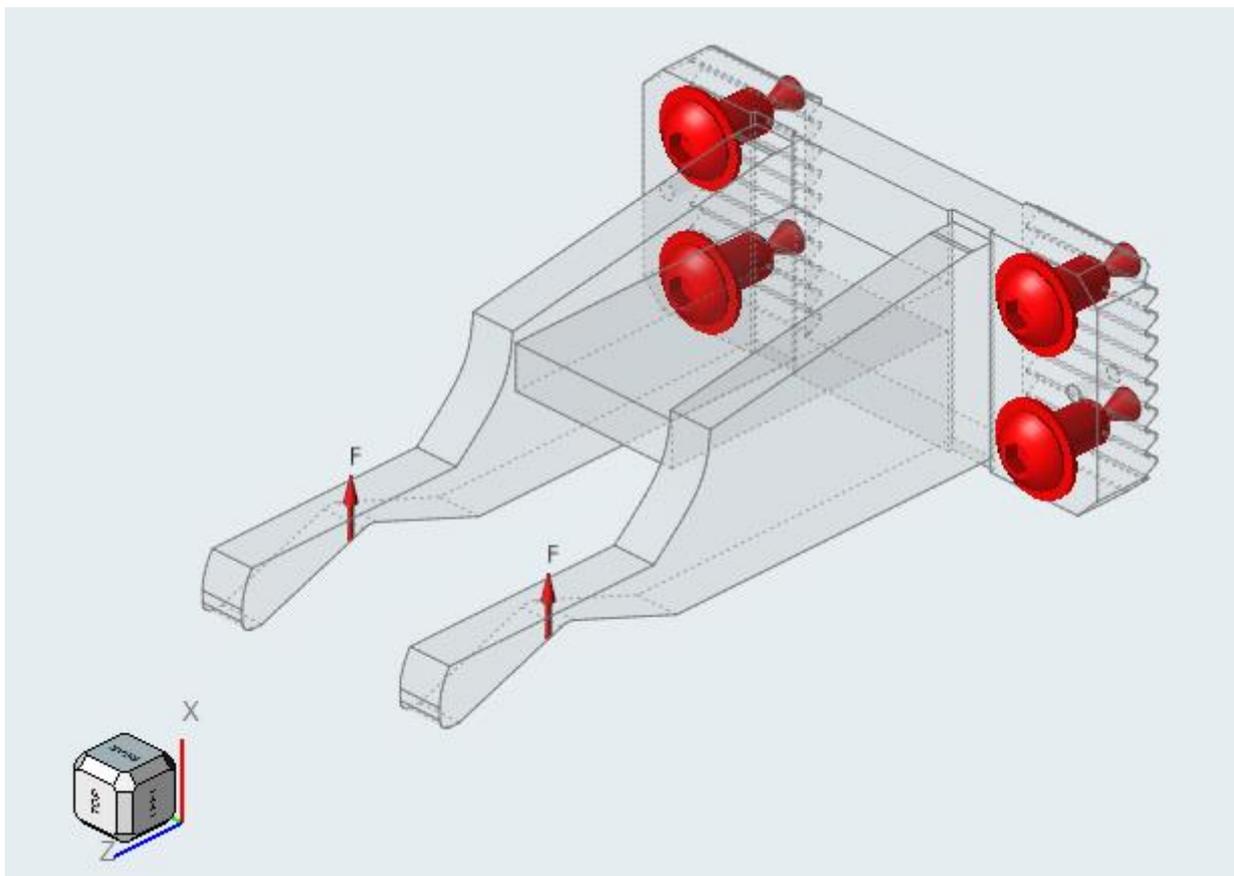


Figura 50: definizione dei carichi e vincoli per analisi FEM

Lanciata a questo punto l'analisi, si ottengono come risultati da confrontare col modello originale due parametri significativi:

- rappresentazione dei coefficienti di sicurezza (Figura 51)
- rappresentazione degli spostamenti (Figura 52)

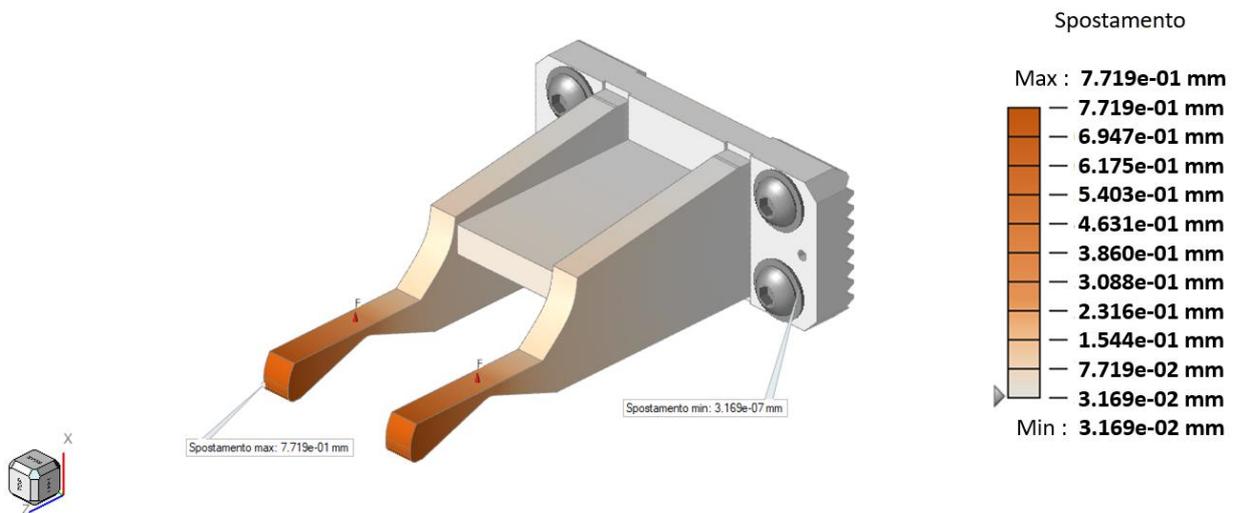


Figura 52: Risultato analisi FEM sullo spostamento

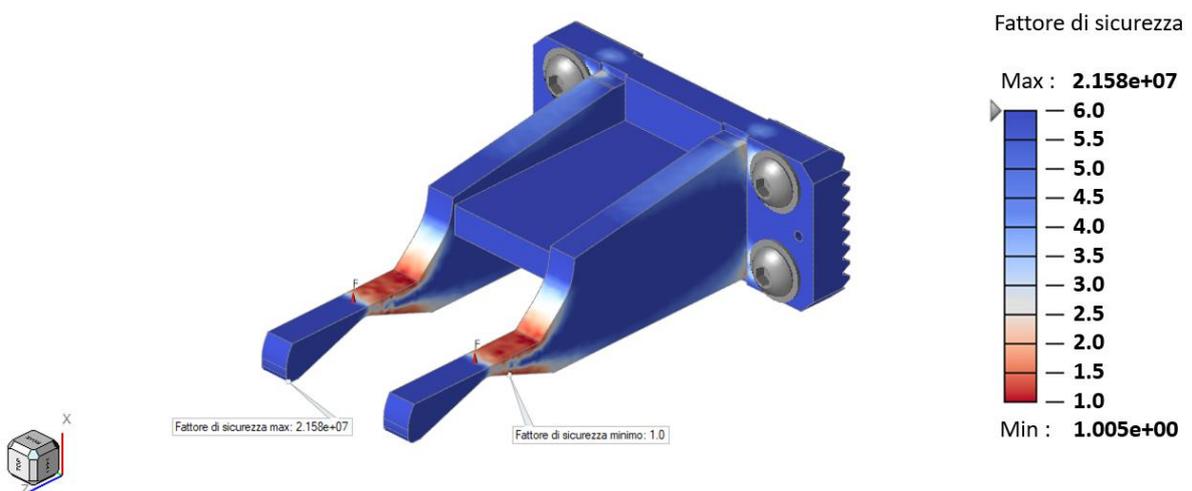


Figura 51: Risultato analisi FEM sul Coefficiente di sicurezza

Come si evince dai risultati ottenuti dall'analisi FEM si riscontrano delle criticità sia per lo spostamento che risulta essere quasi pari ad 1 mm ma soprattutto per il coefficiente di sicurezza. Questo, essendo poco al di sopra dell'unità ovvero pari a 1,005, descrive una resistenza statica al carico non sufficientemente alta da garantire un buon livello di affidabilità. Bisogna, di conseguenza, trovare un'alternativa al seguente design per il raggiungimento degli obiettivi preposti.

Attraverso una veloce stima della resistenza meccanica necessaria a sopperire la riduzione di spessore, in base ai primi risultati ottenuti col primo modello appena analizzato, si può dedurre che è opportuno modificare oltre che il design anche e soprattutto il materiale utilizzato.

Affinché si possa ottenere una resistenza pari o superiore rispetto a quella del modello di partenza si ipotizza l'utilizzo di un metallo che presenti almeno tre volte la resistenza a trazione per C40 visto in precedenza. Chiaramente questa non rappresenta una metodologia empirica ma serve giusto ad avere un ordine di grandezza tale per cui si possa già scartare una serie di leghe metalliche non all'altezza del caso studio in esame.

Dovendo quindi necessariamente cambiare il materiale e tenendo sempre in considerazione uno dei tre vincoli progettuali, ovvero un lead time ridotto, ho proposto al titolare dell'azienda di valutare l'opzione di realizzare la nuova griffa mediante Additive Manufacturing. Visto che questa branca della manifattura coincide anche con il percorso di studi di magistrale in ingegneria meccanica conoscevo già le basi e le diverse tecnologie attualmente in uso e consapevole dell'idoneità del caso studio con tale disciplina ho quindi intrapreso lo studio del nuovo design delle griffe.

L' Additive Manufacturing (AM) è, ad oggi, una delle tipologie di manifattura di oggetti più innovativa. Mediante l'AM è possibile realizzare prototipi e/o parti finali senza l'utilizzo di particolari utensili e in un tempo ridotto a prescindere dalla complessità geometrica richiesta dal componente.

Partendo da un semplice file CAD 3D del componente desiderato, la tecnologia di Fabbricazione additiva sfrutterà il modello matematico ottenuto attraverso un formato idoneo per passare direttamente alla fase realizzativa.

Un prerequisito, infatti, per adottare l'AM è certamente quello legato alla presenza di un modello matematico tridimensionale del componente da realizzare. Come lo stesso nome suggerisce, la Fabbricazione Additiva o Additive Manufacturing inverte la logica di realizzazione di un oggetto rispetto ai metodi "tradizionali". I metodi comuni, infatti prevedono tutti (o quasi) il raggiungimento della geometria desiderata mediante il processo di asportazione di truciolo. Utilizzando quindi strumenti quali: Torni, Frese, Trapani. Al contrario l'AM si basa sull'apporto di materiale e non sulla rimozione di questo [28]. Ciò che contraddistingue la tecnologia in questione è quindi l'uso di materiale solo laddove è necessario, ottimizzando e minimizzando quindi anche gli sprechi e gli scarti tipici delle lavorazioni convenzionali.

A tal proposito, inoltre, vi sono già numerose applicazioni simili al caso studio in esame. L'Additive, infatti, sta assumendo sempre più un ruolo principale quando si tratta ad esempio di personalizzazioni di componenti estetiche e funzionali con un lead time ridotto. La letteratura propone diversi casi studio simili che, di conseguenza, ne avvalorano l'uso in settori come l'automazione, l'automotive, l'aerospace, il biomedicale ed in generale l'industria metalmeccanica.

Progettazione prototipo mediante Additive Manufacturing

Per la realizzazione del nuovo design è stato utilizzato il software "Altair Inspire", con il quale è stato possibile sia realizzare il modello CAD 3D che le successive analisi FEM e ottimizzazione topologica. L'uso dell'ottimizzazione topologica è stato preso in considerazione sin dall'inizio per due ragioni importanti:

- Risparmio di materiale e quindi di peso
- Risparmio di tempo per la realizzazione del componente

A queste, come vedremo a valle della scelta del materiale, si aggiungerà anche una ragione legata alla maggiore facilità di costruzione mediante la fusione di polveri rispetto all'asportazione di truciolo dovuta alla durezza del metallo stesso.

Ottimizzazione Topologica

“Altair Inspire” Utilizza come algoritmo per elaborare l’ottimizzazione topologica il metodo denominato “SIMP” ovvero “Solid Isotropic Microstructure with Penalization”. Questo è uno dei metodi più utilizzati insieme ad esempio al metodo degli “asintoti mobili”. Per quanto riguarda il SIMP è uno strumento che sfrutta gli elementi finiti costituenti un solido per andare a stabilire, in funzione di carichi e vincoli opportunamente applicati, quali tra gli elementini elementari è soggetto a sforzi e quali invece no. Da, quindi un’indicazione della distribuzione migliore della massa all’interno di un volume finito.

Ogni elemento o cella è caratterizzato da un determinata densità e rigidezza, in particolare ad ogni elemento viene attribuito un valore di ρ (Figura 53):

- $\rho_e = 1$ elemento con massa necessaria (colore nero)
- $\rho_e = 0$ elemento con massa non necessaria (colore bianco)

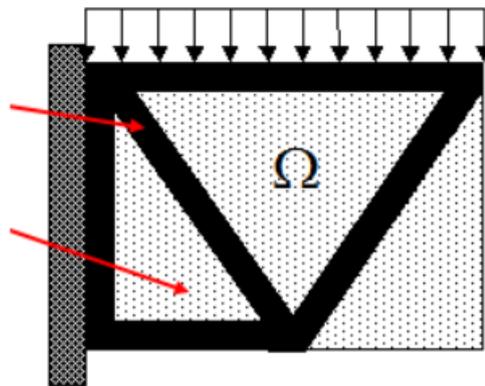


Figura 53: Esempio di ottimizzazione topologica mediante metodo “SIMP” [29]

Affinché l’algoritmo attribuisca un valore di densità (ρ) ad ogni cella, che è quindi compreso tra 0 ed 1, si deve imporre una funzione obiettivo, nel caso più frequente si ha che:

$$\rho_e = s_e^{1/p} \quad \text{con } (p > 1)$$

Questa rappresenta la funzione obiettivo tra la densità e la rigidezza di ogni singolo elemento (e) mentre p rappresenta il fattore di penalizzazione ed è tipicamente pari a 3.

Lo scopo di questo fattore è quello diminuire la quantità di elementi che presentano una densità intermedia, ovvero con $0 < \rho_e < 1$ detti anche elementi “grigi”, per indirizzare invece verso gli elementi che sono più necessari (neri) o viceversa verso elementi non necessari (bianchi).

Per quanto riguarda le funzioni obiettivo, quelle permesse dal software sono fondamentalmente due:

- Massimizzazione della rigidezza con imposizione di riduzione della massa
- Minimizzazione della massa con imposizione di un livello di rigidezza

L'intero ciclo di progettazione di un componente mediante l'uso anche dell'ottimizzazione topologica prevede diverse fasi:

1. Definizione design di partenza e di progettazione
2. Definizione carichi e vincoli
3. Definizione funzione obiettivo
4. Ottimizzazione topologica
5. Ricostruzione della geometria
6. Analisi FEM

Tutta via spesso è necessario effettuare più cicli di ottimizzazione (Figura 54), ciò per due ragioni principali:

- Raggiungere il risultato migliore possibile
- Sopperire ad una verifica negativa dell'analisi FEM

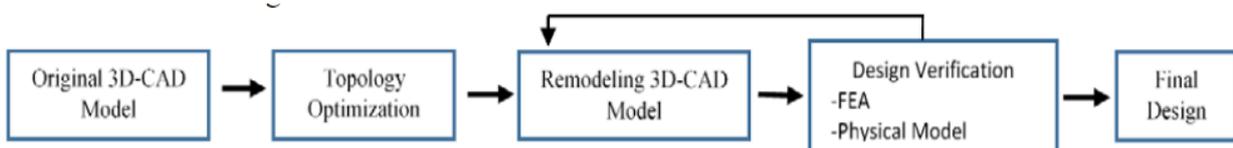


Figura 54: Ciclo di progettazione mediante ottimizzazione topologica [30]

Seguendo i vari step (Figura 55) si ottiene così il miglior risultato possibile frutto del compromesso tra risultato teorico dato dall'algoritmo di ottimizzazione topologica e quello fisico ottenuto mediante la ricostruzione della geometria con successiva verifica attraverso l'analisi FEM.

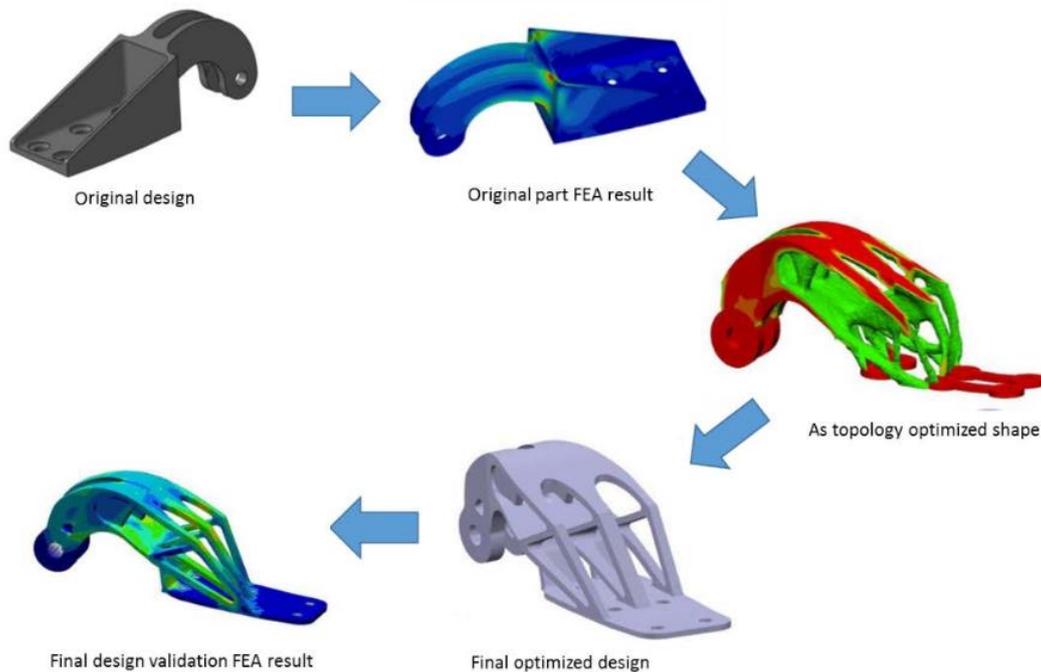


Figura 55: Ciclo dell'ottimizzazione topologica [30]

Riferendosi ai vantaggi ottenuti grazie all'uso di questo strumento per la realizzazione di parti funzionali possiamo certamente ricordare:

- Riduzione del lead time
- Riduzione del peso
- Parti definitive
- Riduzione di materiale di scarto
- Risparmio energetico per la realizzazione del componente

Definizione Design space

- Per “Design space” si fa riferimento alla porzione di volume colorata in marrone (Figura 56) sul quale si vuole che l’ottimizzatore faccia il calcolo. A tal proposito è consigliabile fare delle modifiche al design di partenza, rendendolo più “semplice” e soprattutto fornendo al software un dominio più grande possibile sul quale agire. La semplificazione consiste nella rimozione di particolari geometrici superflui ai fini dello scopo per il quale il prototipo è stato pensato, si rimuovono ad esempio i raccordi, gli smussi, le cave, ecc...

La funzione di quanto appena detto è quella di partire da una situazione con pochi vincoli geometrici, in questo modo si dà la possibilità all’ottimizzatore di avere maggiore libertà nell’elaborare una soluzione. Attraverso molteplici cicli di ottimizzazione si va poi, se necessario, ad affinare sempre più la soluzione ottenuta.

- Con “Non design space”, invece, si vanno ad identificare le porzioni di volume (colore grigio) che non devono essere modificate in quanto funzionali allo scopo dell’oggetto da realizzare. In questa categoria appartengono ovviamente le parti di accoppiamento meccanico, parti estetiche o di contatto con altri oggetti come ad esempio attrezzeria. Bisogna anche tener conto dell’eventuale montaggio del prototipo, infatti qualora si prevedano ad esempio dei fori per il fissaggio tramite viti o bulloni, è necessario preservare uno spazio idoneo per consentire l’inserimento degli utensili (cacciavite o avvitatore).

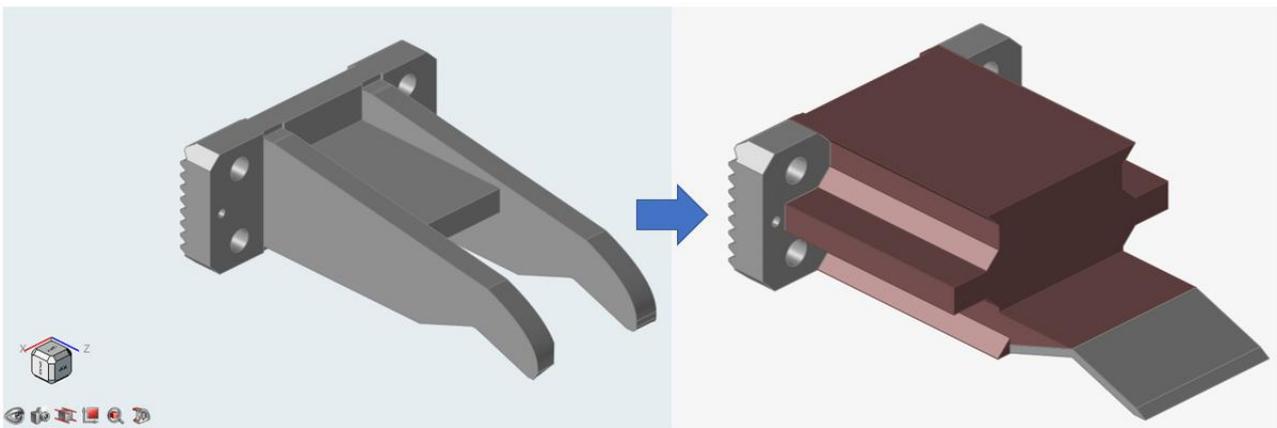


Figura 56: Modifica del design di partenza con definizione di design space

Si veda nel dettaglio la scelta della zona di progettazione (Figura 57). In particolare, la scelta di estendere la superficie di contatto tra griffa e pezzo da due estensioni ad una più larga è frutto di migliorare la distribuzione dei carichi attraverso l'uso di una superficie maggiore, che a parità di pressione di chiusura subirà una forza puntuale minore rispetto al design originale. Questa modifica, tuttavia, non va a compromettere la funzionalità della griffa in fare di presa.

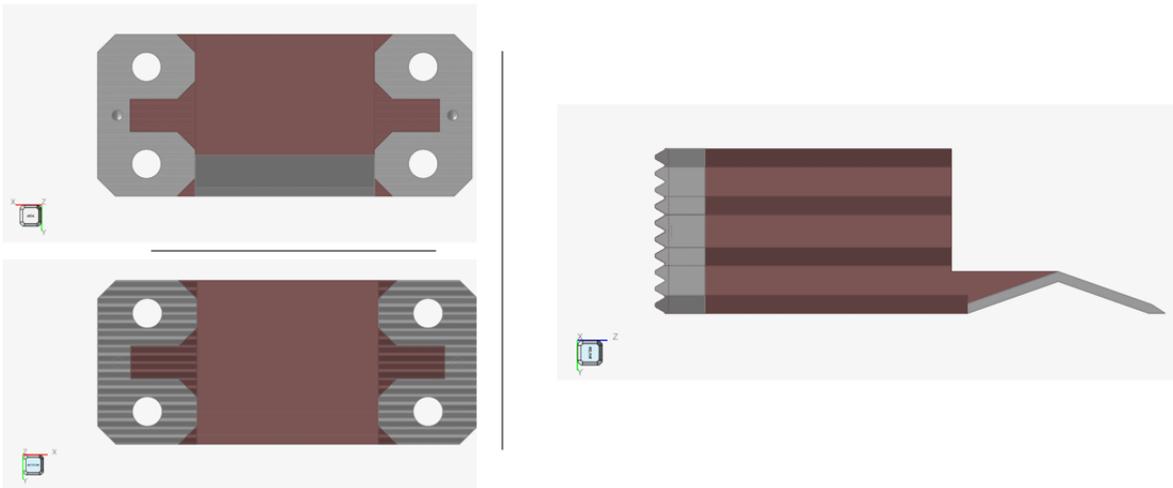


Figura 57: Viste del modello con designazione della zona di progettazione (marrone)

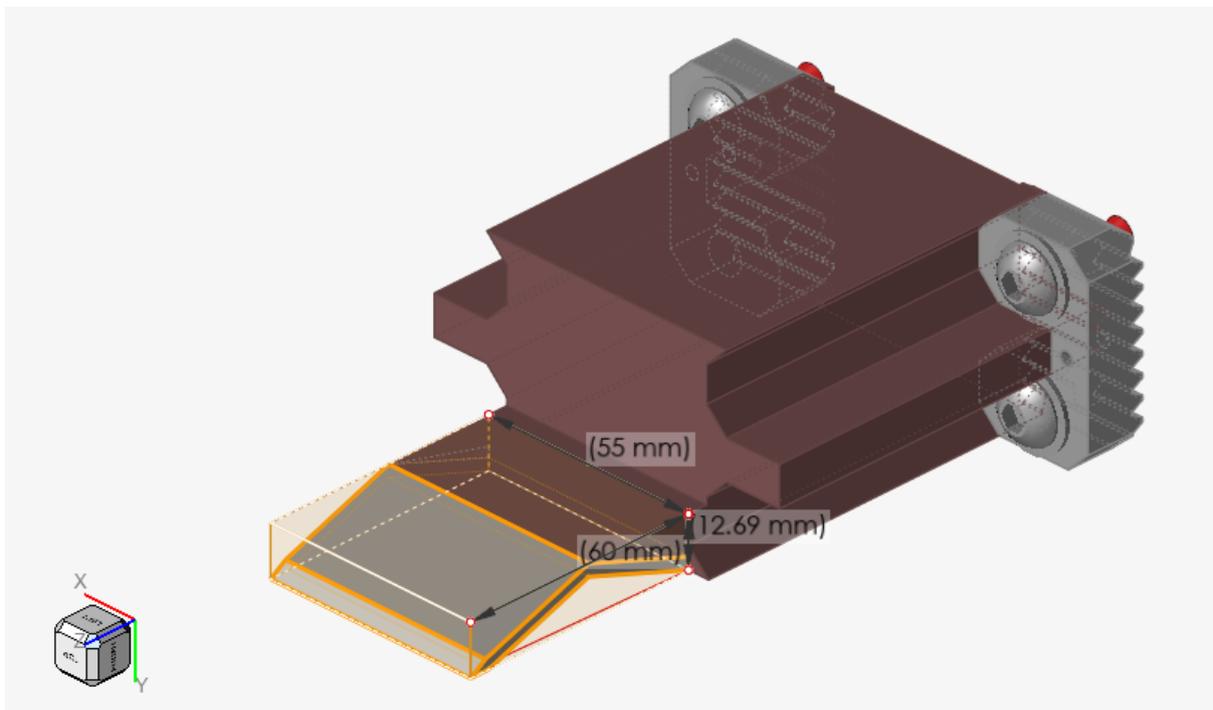


Figura 58: Design space con dimensioni obiettivo

Come si può notare nella (Figura 58) sono stati rispettati gli obiettivi iniziali legati alla geometria, imponendo quindi anche in questo caso una profondità di immersione soggetta alla riduzione di spessore pari a 60 mm e la riduzione di spessore pari a 13,4 mm calcolata dal punto visto in precedenza. Infine, per quanto riguarda la base adibita al montaggio della griffa sul corpo della pinza, è stato sufficiente generare una forma di offset attorno ai fori passanti presenti dal modello di partenza. In questo modo si riesce a garantire sia il montaggio che la stabilità della griffa mantenendo anche in questo caso la funzionalità originale.

Carichi e Vincoli

- **Vincoli:** come nel caso precedente (Figura 50), anche qui si fa uso del vincolo proposto dal software di “vite mordente”.
- **Carichi:** Rispetto al caso precedente, come già accennato, avendo modificato la superficie

di applicazione della forza si ha una variazione sul valore della forza stessa. Infatti, nel caso attuale, non è più necessario dividere la forza di serraggio calcolata nel capitolo precedente. (Figura 59)

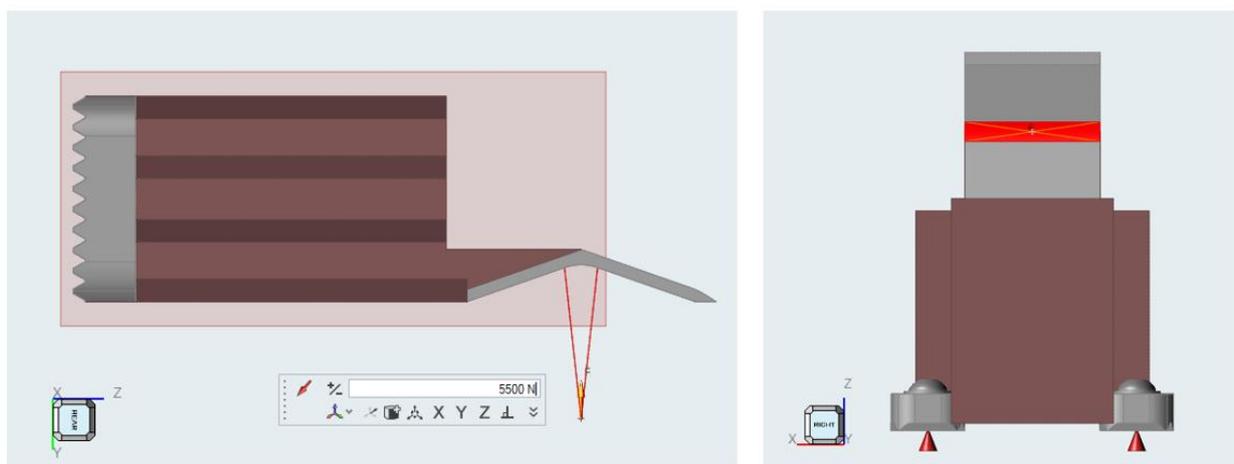


Figura 59: Applicazione dei carichi con vista laterale e inferiore

Materiale

Dovendo eseguire un'ottimizzazione topologica, il software, necessita l'attribuzione di un materiale per poter stabilire in funzione del carico applicato e dei vincoli quali elementi del volume di progettazione debbano essere mantenuti e quali invece no (Metodo SIMP). Basandosi sul primo tentativo fatto precedentemente utilizzando lo stesso materiale delle griffe originali, si va quindi ad ipotizzare uno dei materiali in polvere presenti in commercio. In particolare, si è fatto riferimento al catalogo dell'azienda "EOS". La "EOS" è una tra le realtà ad oggi leader nel settore della produzione di stampanti 3D che sfruttano la fusione selettiva mediante laser e di materiali per le suddette macchine ovvero polveri di diversa natura (Polimeri, Compositi e metalli).

Il procedimento eseguito prevede quindi l'attribuzione di uno di questi materiali presenti in catalogo e ottenuto alla fine il modello, attraverso un'analisi statica degli sforzi, si verifica l'idoneità o meno del materiale stesso per il caso specifico.

La scelta di primo tentativo è ricaduta su di un acciaio per utensili denominato dall'azienda "MS1" o secondo normativa ISO "18Ni300". È un acciaio caratterizzato da un'elevata resistenza a trazione e un basso allungamento a rottura, Inoltre, la sua durezza consente una bassa usura, aspetto utile per il caso studio in questione.

Si riporta la scheda tecnica con le caratteristiche meccaniche principali (Figura 60):

Material data sheet

Tensile properties at room temperature [9, 10, 11]

	Heat treated [7]	
	Horizontal	Vertical
Ultimate tensile strength, Rm	2080 MPa	2080 MPa
Yield strength, Rp0.2	2010 MPa	2000 MPa
Elongation at break, A	4 %	4 %

[9] Tensile testing according to. ISO 6892-1 B10, proportional test pieces, diameter of the neck area 5 mm (0.2 inch) , original gauge length 25 mm (1 inch). Results are derived from the validation data made with EOS M290 system and two powder LOTs.

[10] Solution and ageing treatments are needed in order to achieve corresponding mechanical properties. The numbers are average values determined from samples with horizontal and vertical orientation respectively.

[11] Mechanical properties depend on the thermal load of particular job layout as well as the positioning on the platform.

Figura 60: Scheda tecnica del materiale scelto per il nuovo design [31]

Come si può notare dalla scheda tecnica (Figura 60), vi è una differenziazione in funzione della direzione del carico. Trattandosi di polveri che verranno poi fuse strato per strato, non è garantita la isotropia interna. Ciò vale soprattutto tra un piano di sinterizzazione all'altro. Lungo z, infatti, è più facile avere il fenomeno di “delaminazione” dei piani, motivo per cui si vede un valore di $R_{p0.2}$ leggermente inferiore rispetto al corrispettivo in direzione orizzontale.

L'altra caratteristica da tenere presente che i dati riportati fanno riferimento alla condizione ottenuta a valle di un trattamento termico fatto per migliorare ulteriormente le proprietà meccaniche (Figura 61). Tale trattamento termico consiste in:

- Normalizzazione: Riscaldamento fino a 940°C per due ore con raffreddamento in aria
- Invecchiamento: ulteriore riscaldamento a 490°C per sei ore con raffreddamento in aria

Hardness in heat treated status [7]

Hardness Rockwell C [8]	50-57 HRC
[7] Heat treatment procedure: solution treatment at 940 °C (1724 °F) for 2 hours, air cooling + ageing at 490 °C for 6 hours, air cooling.	
[8] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface.	

Figura 61: Trattamento termico consigliato dall'azienda produttrice "EOS" [31]

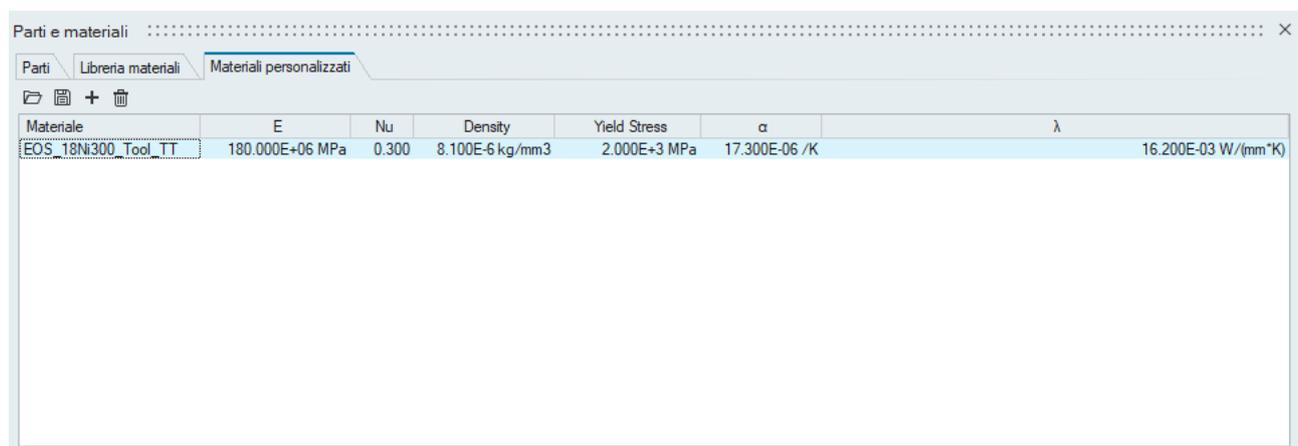


Figura 62: Inserimento Dati del materiale nella libreria del software Inspire

Deciso quindi il materiale di primo tentativo, si passa ad inserire i dati estrapolati dalla scheda tecnica completa all'interno del software “Inspire” per poter effettuare l’ottimizzazione (Figura 62).

Ottimizzazione

Determinati tutte le caratteristiche fisiche necessarie al processo di ottimizzazione topologica si passa quindi alla definizione dei parametri di calcolo (Figura 63). In particolare, si definisce:

- **Controllo di forma:** simmetria rispetto al piano longitudinale (Figura 64)
- **Coefficiente di sicurezza** minimo pari a 2
- **Funzione Obiettivo:** Minimizzazione della massa

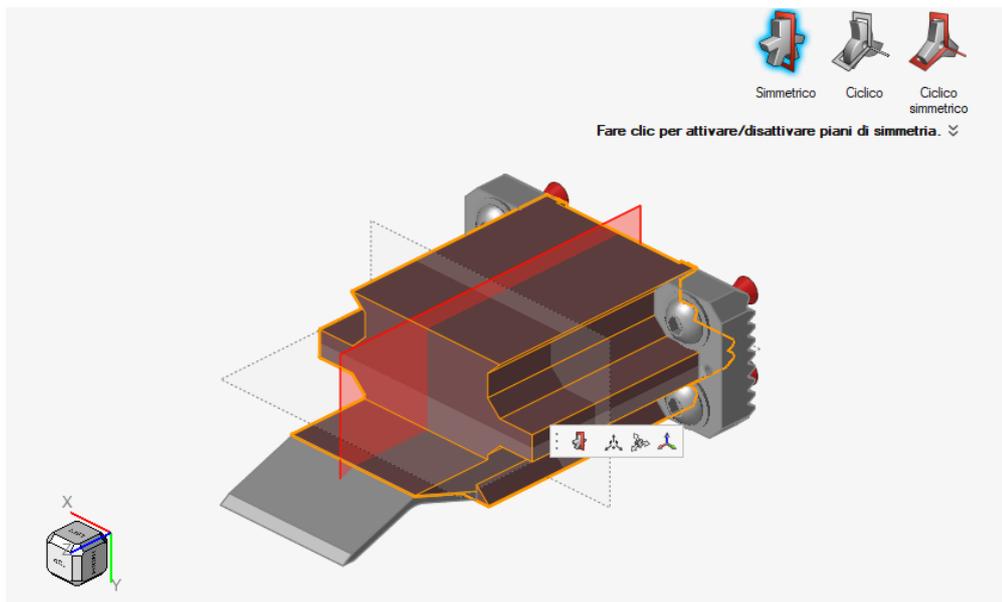


Figura 64: definizione del controllo di forma di tipo simmetrico

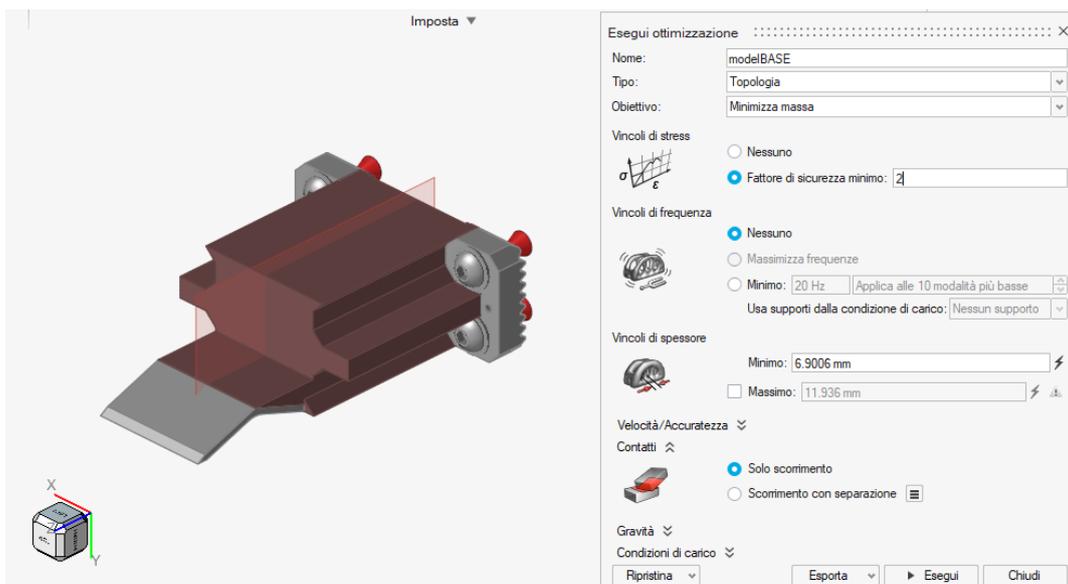


Figura 63: definizione parametri per il calcolo dell'ottimizzazione topologica

Si ottiene infine un primo risultato idoneo alla successiva ricostruzione (Figura 66).

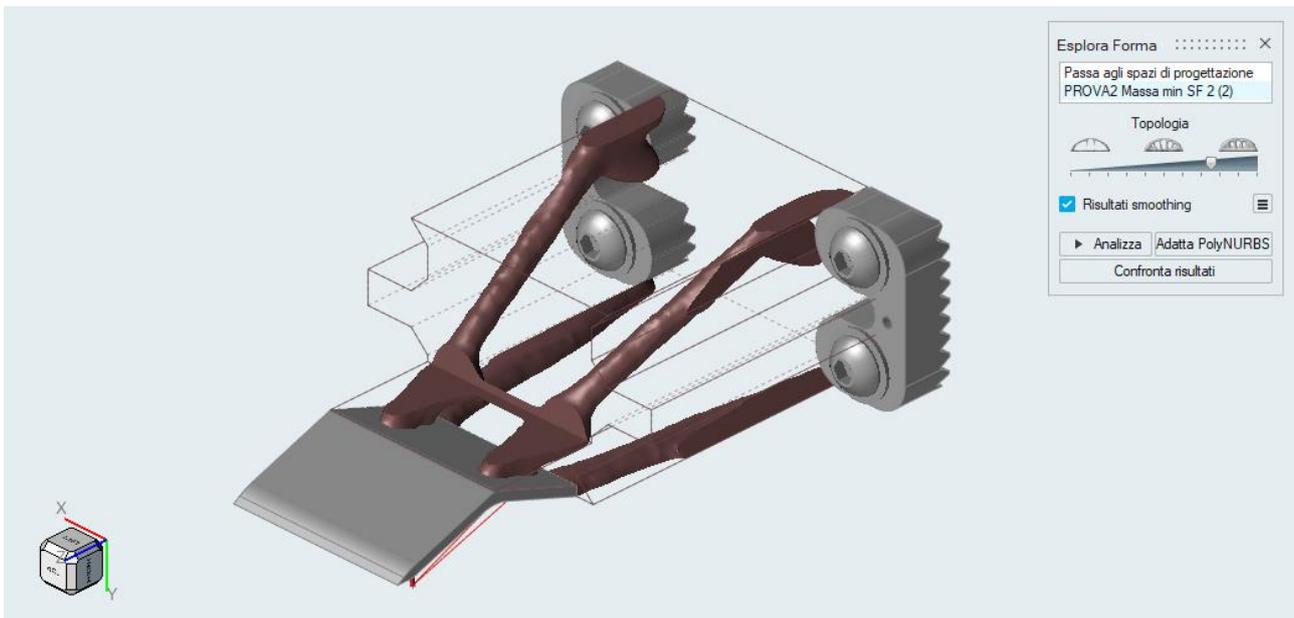


Figura 66: Risultato dell'ottimizzazione topologica

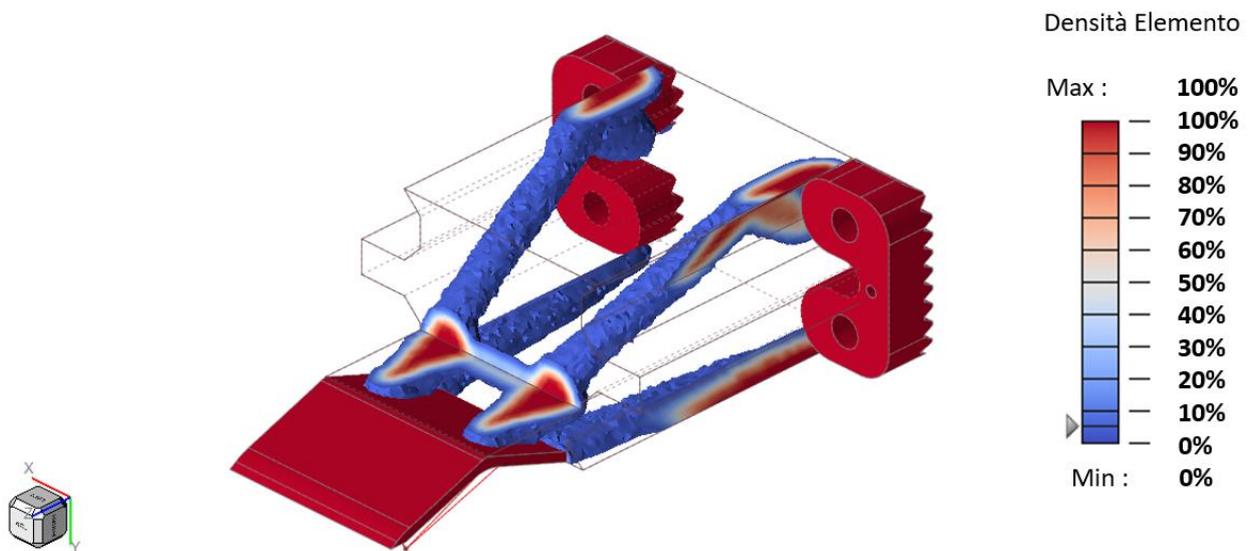


Figura 65: Densità degli elementi costituenti del modello a valle del processo di ottimizzazione topologica

Si può subito notare una notevole riduzione del volume e di conseguenza della massa appartenente al design space. Attraverso una visione dettagliata in funzione della densità è interessante notare in che porzioni del volume si concentrano gli elementi pieni rispetto al resto, ovvero il risultato dell'ottimizzazione mediante il metodo SIMP (Figura 65).

Definizione Design prototipo

Il prossimo step consiste nel ricostruire una geometria di prova attraverso la funzione “PolyNURBS” (Figura 67), questa funzione di Inspire consente di ricavare una geometria più omogenea prendendo come riferimento il risultato ottenuto mediante l’ottimizzazione topologica.

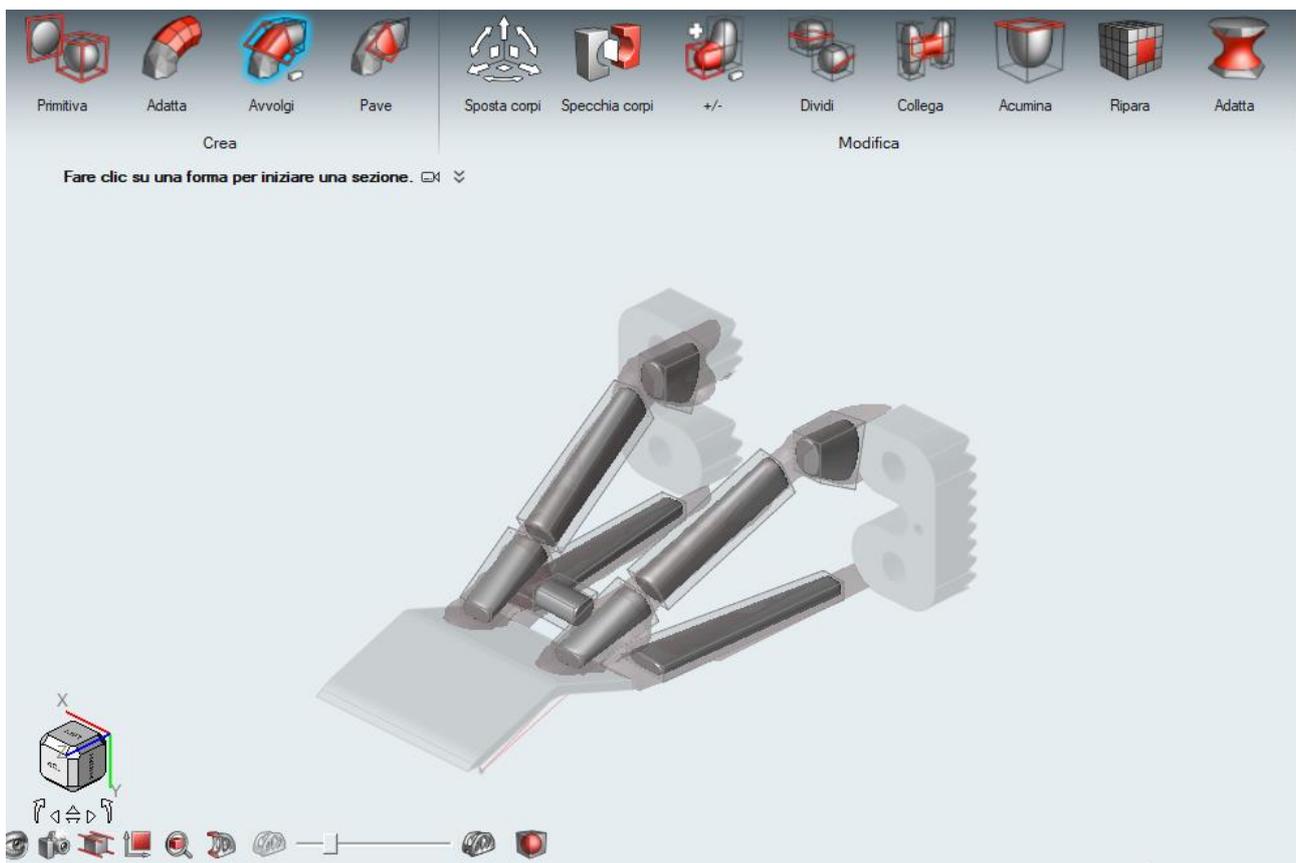


Figura 67: Ricostruzione attraverso polyNURBS

Dopo una serie di passaggi necessari per adattare al meglio le giunzioni tra le zone di design space e quelle di non design space si ottiene finalmente un modello idoneo ad essere testato (Figura 68). L’attenzione è stata focalizzata sull’evitare angoli di connessione troppo spigolosi ma piuttosto cercare di rendere il design più “smooth” possibile in modo che si escludano sin da subito eventuali punti di intaglio, critici per la resistenza del componente stesso. Un’altra modifica fatta durante la fase di ricostruzione rispetto al design suggerito dall’ottimizzazione è stata l’inserimento di collegamenti tra le sezioni più lunghe simmetriche tra loro. Questo accorgimento è stato necessario per limitare lo spostamento risultante dall’applicazione del carico. In questo modo, infatti, si riesce ad ottenere una struttura più resistente.

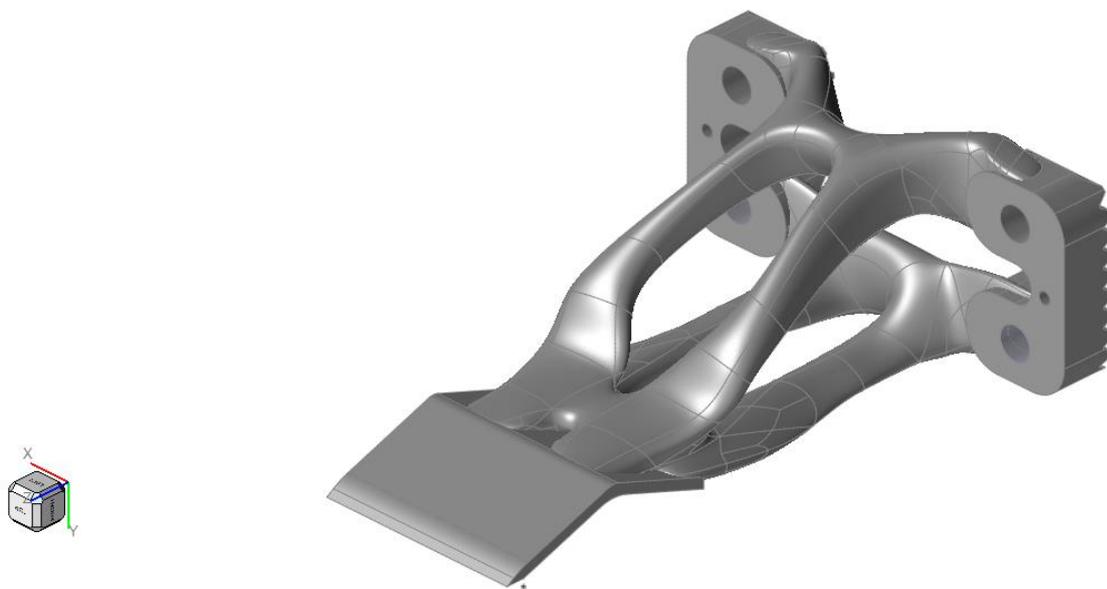


Figura 68: Risultato finale della ricostruzione con "polyNURBS"

Si vedano anche altre viste del prototipo ottenuto:

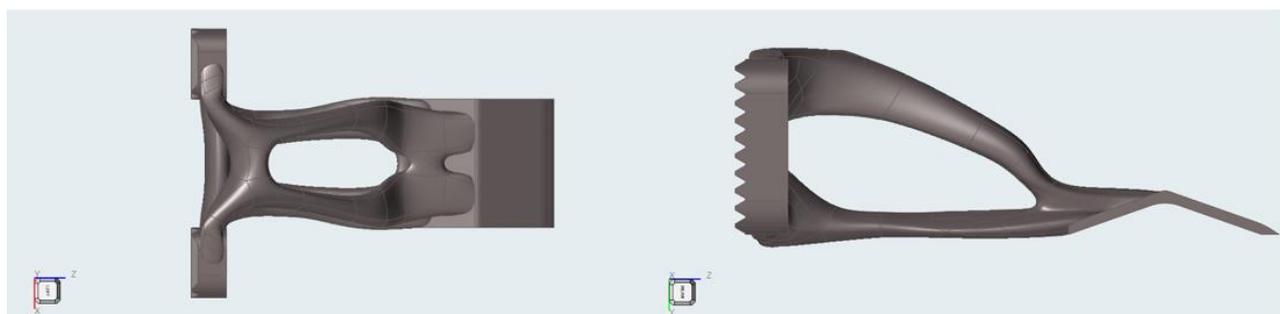


Figura 69: vista superiore (sinistra); vista laterale (destra)

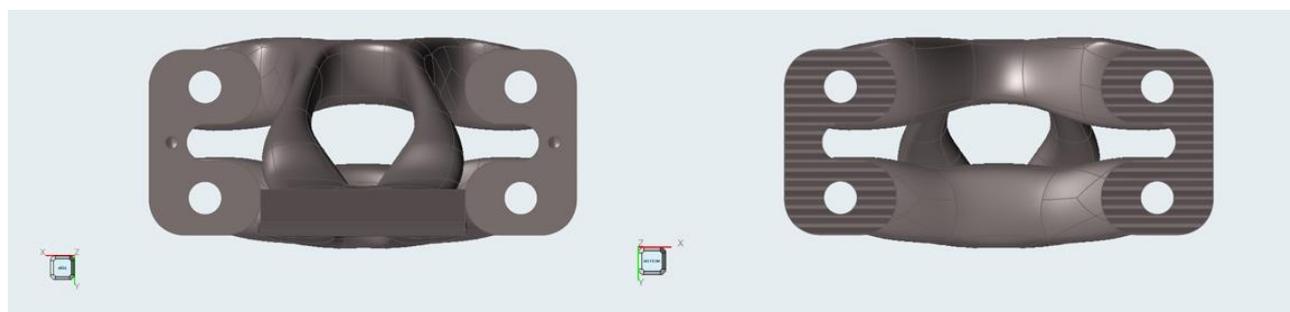


Figura 70: vista frontale (sinistra); vista posteriore (destra)

Verifica statica del Prototipo

Ottenuto quindi il primo prototipo si passa a testarne la resistenza statica agli sforzi mostrando rispettivamente i risultati in termini di:

- Spostamento (Figura 71)
- Tensione e compressione (Figura 72)
- Tensione di Von Mises (Figura 73)
- Coefficiente di sicurezza (Figura 74)

Il raggiungimento di un risultato attendibile per mezzo dell'analisi FEM è anche dovuto ad una correzione mediante convergenza sulla mesh utilizzata.

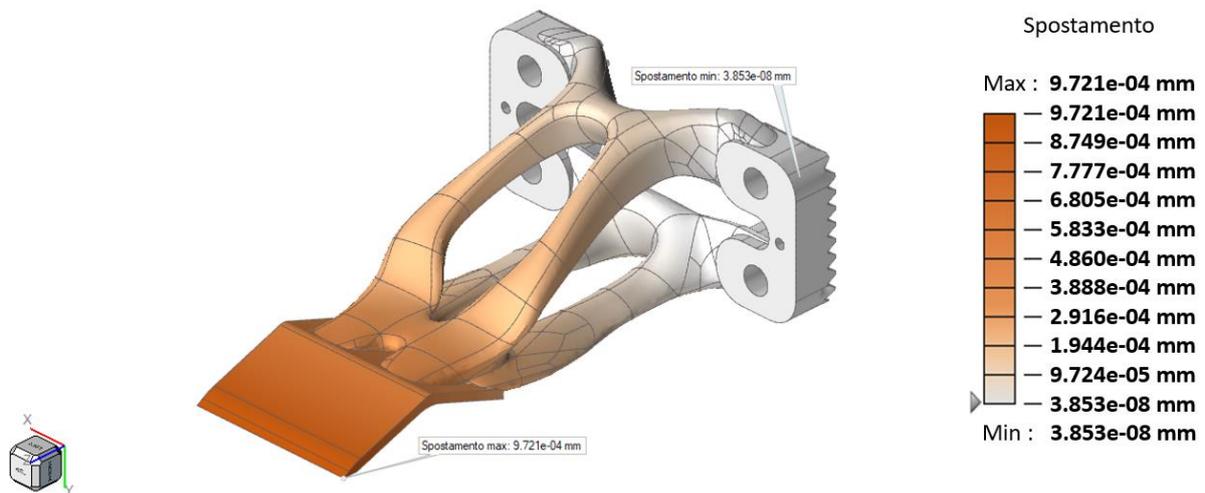


Figura 71: Risultato analisi FEM dello spostamento

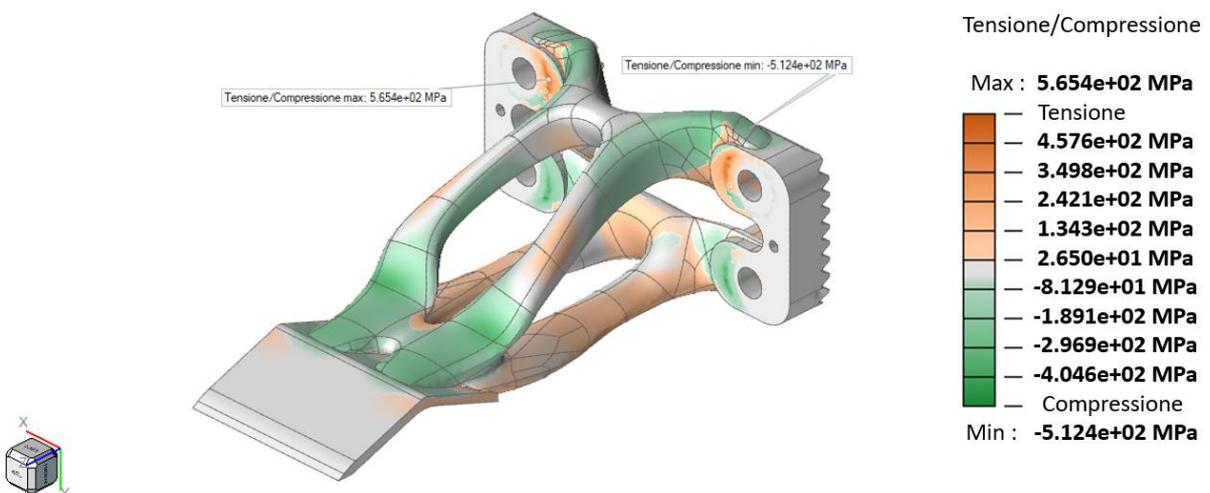


Figura 72: Risultato analisi FEM di tensione/compressione

In particolare, sono stati fatti diversi test variando di volta in volta la dimensione dell'elemento base che compone la mesh stessa fino ad ottenere un risultato abbastanza costante con una certa dimensione di cella. Nel caso specifico l'analisi è stata effettuata con un elemento di tipo "trial" con dimensioni pari a 2 mm.

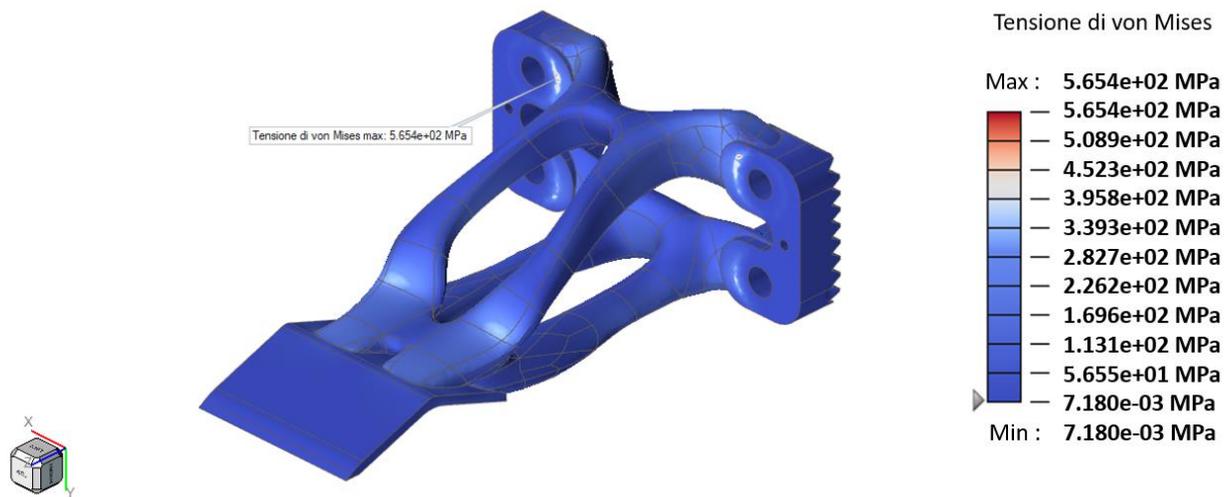


Figura 73: Risultato analisi FEM della Tensione di Von Mises

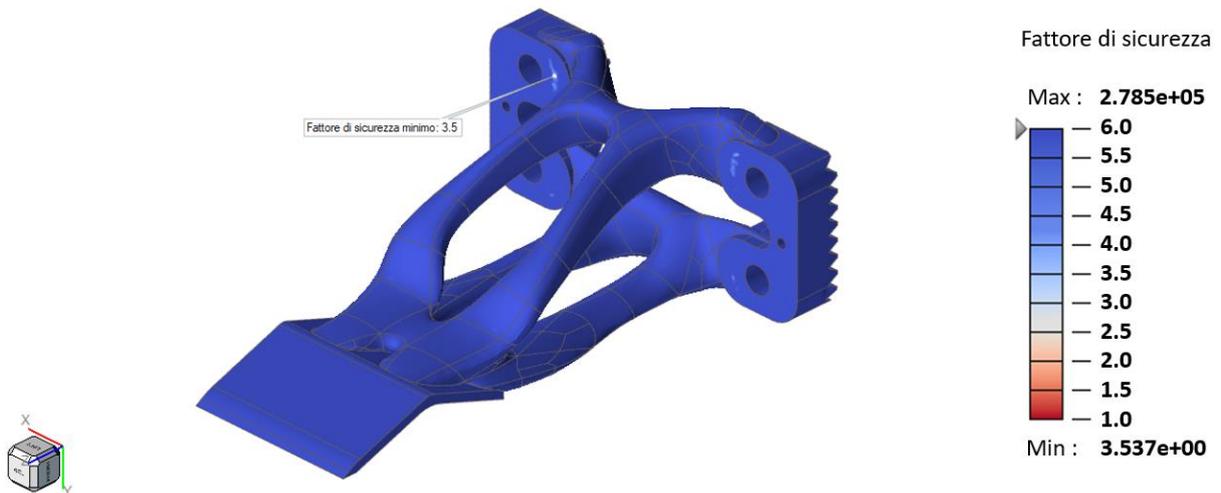


Figura 74: Risultato analisi FEM del Coefficiente di sicurezza

Risultati analisi FEM

Da ciò che si evince dall'analisi FEM, il prototipo supera la verifica statica ottenendo un Coefficiente di sicurezza leggermente maggiore di quello del componente originale.

$$CS = 3,5$$

In più. Lo spostamento massimo risulta essere sufficientemente trascurabile ai fini della funzionalità della pinza.

$$\text{Spostamento massimo} \cong 9,72 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

Il prototipo, quindi, è idoneo alla realizzazione e all'uso per il caso studio in "O.L.V. srl".

Simulazione assemblaggio

L'ultima fase progettuale per questo caso studio consiste nella realizzazione di un prototipo fisico da poter testare direttamente in macchina. Ma prima di procedere in questa direzione è opportuno verificare attraverso un software CAD 3D che il montaggio virtuale sia corretto e che non ci siano errori di accoppiamento come, ad esempio, interferenze o giochi non previsti. Di conseguenza il modello CAD ottenuto con "Inspire" è stato esportato attraverso una conversione in formato di tipo step ed aggiunto all'assieme dell'intero sistema di presa del robot utilizzando il software "Solidworks". In questo modo è stato possibile effettuare una prima verifica virtuale sull'idoneità del prototipo.

Ciò che si evince dall'accoppiamento fatto all'interno dell'assieme è l'assenza di particolari problematiche come per l'appunto interferenze o giochi non previsti dalle griffe originali (Figura 76) (Figura 75). Fatta questa verifica si può adesso procedere con la realizzazione del prototipo fisico.

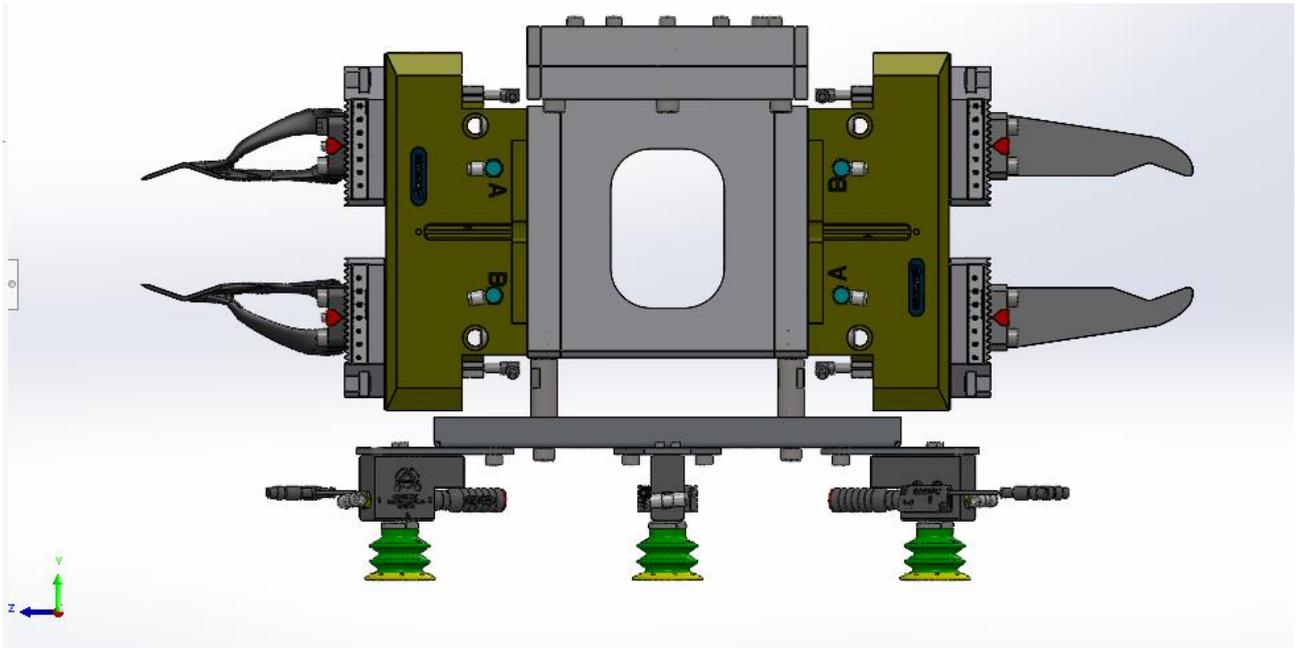


Figura 76: Testi di assemblaggio virtuale (vista laterale)

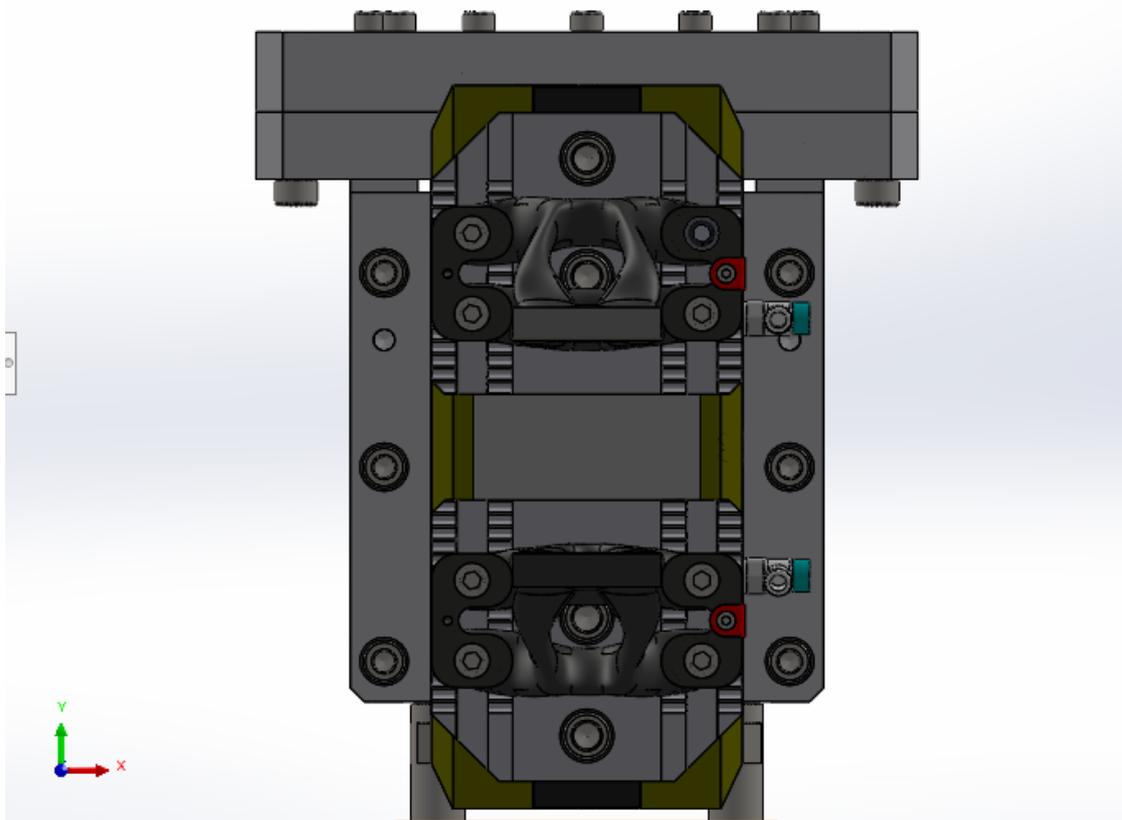


Figura 75: Testi di assemblaggio virtuale (vista frontale)

Realizzazione del prototipo

Avendo a disposizione il file CAD 3D del prototipo è possibile entrare all'interno di ciò che viene definito "ciclo della fabbricazione additiva" ovvero tutti quei passaggi che accomunano la maggior parte delle tecniche di stampa 3D ad oggi presenti sul mercato. Anche per la realizzazione del prototipo in questione sono stati seguiti tali passaggi e di conseguenza è opportuno elencare ciò che è stato fatto:

1. Conversione del formato CAD 3D del modello in STL.
2. Messa in macchina attraverso apposito software di slicing
3. Realizzazione del componente mediante tecnica SLS
4. estrazione dal volume di lavoro della stampante
5. Post-processing di pulitura e sabbiatura
6. Ispezione visiva per eventuali difetti
7. Test di assemblaggio

Tecnica SLS

Avendo descritto quali sono i tipici step per la realizzazione di un componente in Additive Manufacturing si passa alla vera e propria messa in macchina del prototipo. Il file CAD 3D è stato prima di tutto convertito in formato STL con le opportune tolleranze di conversione viste nel paragrafo precedente e di conseguenza attraverso il software di slicing è stato fatto il sezionamento del modello layer in modo che la macchina, durante la lavorazione, possa costruire il prototipo strato dopo strato. Per il caso specifico è stata utilizzata la tecnica di Fabbricazione additiva nota come "Selective Laser Sintering" o comunemente detta "SLS". Come si vede nello schema sottostante (Figura 77) il processo SLS prevede la sinterizzazione attraverso un laser di polveri polimeriche, le quali, sono disposte su di un piano livellato mediante una racla. Ad ogni passaggio, il fascio laser sinterizza un layer facendolo aderire a quello precedente seguendo il profilo indicato dal software di slicing, al termine del quale, si avrà un abbassamento del piano di sinterizzazione di una lunghezza pari all'altezza del layer stesso. A questo punto la racla distribuirà un nuovo strato di polveri ed in questo modo si ripete il ciclo fino al completamento del componente.

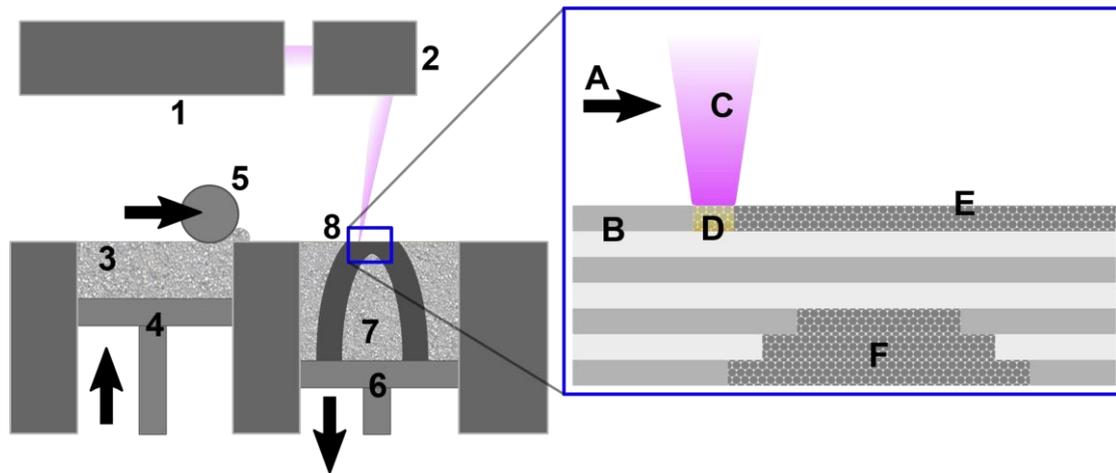


Figura 77.:schema del processo SLS [32]:

1) Laser; 2) sistema di scansione; 3) sistema deposizione delle polveri; 4) pistone sollevamento polveri; 5) racla; 6) pistone abbassamento piano di sinterizzazione; 7) polvere non sinterizzata; 8) componente sinterizzato; A) Direzione di scansione del laser; B) particelle di polvere sinterizzate; C) fascio laser; D) zona di sinterizzazione; E) strato di polvere da sinterizzare; F) polveri rimaste non sinterizzate

Una particolarità di questa tecnica è l'assenza di supporti a sostegno di eventuali parti sporgenti del componente. Essendo il materiale sufficientemente leggero e di conseguenza anche il componente realizzato con questa tecnica, a fare da sostegno sarà direttamente la polvere non processata che contenuta all'interno del volume di lavoro insieme al componente fornirà abbastanza sostegno durante la costruzione.

EOS FORMIGA P 110

La macchina utilizzata per la realizzazione del prototipo è prodotta dall'azienda tedesca "EOS" e sfrutta il principio descritto nel paragrafo precedente. L'intero processo viene effettuato a "camera calda" ovvero l'ambiente di lavoro viene portato ad una temperatura prossima a quella di fusione del polimero, In questo modo si previene il problema legato al ritiro del materiale durante la solidificazione. Inoltre, ciò consente di avere un laser di potenza ridotta, in questo caso infatti si sfrutta una sorgente di CO₂ con una potenza di 30W. (si veda la scheda tecnica in Figura 79).



Figura 78: Stampante SLS "EOS Formiga P110" [33]

Technical Data FORMIGA P 110 Velocis

Building volume	200 x 250 x 330 mm (7.9 x 9.8 x 13 in)
Laser type	CO ₂ ; 30 W
Building rate	up to 1.2 l/h
Layer thickness (depending on material)	0.06 - 0.10 - 0.12 mm (0.0024 - 0.0039 - 0.0047 in)
Precision optics	F-theta lens, high-speed scanner
Scan speed during build process	up to 5 m/s (16.4 ft/s)
Power supply	16 A
Power consumption	typical 3 kW, maximum 5 kW

Figura 79: Scheda tecnica Formiga P110 [33]

Materiale

Il materiale utilizzato per la realizzazione di questo prototipo è una polvere polimerica di Poliammide 12 comunemente chiamato “Nylon 12”. Nel caso specifico viene identificato con il nome commerciale “PA2200”. Risulta essere un buon materiale in termini di equilibrio tra proprietà meccaniche e chimiche. E infatti caratterizzato da una buona resistenza chimica, da biocompatibilità ed una buona resistenza meccanica ($Rm = 48\text{MPa}$).

Typical mechanical properties		Thermal properties		Physical properties	
Tensile modulus	1650 MPa	Melting temperature (20°C/min)	176°C	Density	930 kg/m ³
Tensile strength	48 MPa	Heat deflection temperature (1.80 MPa)	70°C		
Elongation at break	18%	Heat deflection temperature (0.65 MPa)	154°C		

Figura 80: Scheda tecnica del PA2200 utilizzato per la realizzazione del prototipo [34]

Stampa e post processing

Al termine della costruzione del prototipo la macchina deve riportare la temperatura della camera alla temperatura ambiente, questo è un procedimento molto lungo e può durare fino a 12 ore. Al termine del raffreddamento è possibile prelevare il volume di lavoro contenente i pezzi costruiti e la polvere non sinterizzata. Per tale ragione prima di poter apprezzare la qualità di ogni componente realizzato è necessario effettuare delle fasi di pulizia. Nel caso specifico sono state eseguite:

- **Rimozione polvere in eccesso** mediante aria compressa
- **Sabbiatura** per la rimozione di polvere semi sinterizzata o rimasta attaccata al pezzo

Terminata la fase di pulizia si può quindi valutare il risultato finale:



Figura 81: Prototipo realizzato in PA12 con tecnica SLS

Analisi di montaggio

Il prototipo, essendo stato realizzato con un materiale che non è quello definitivo del pezzo funzionale, ha consentito di effettuare una verifica di corretto montaggio ma non di carico in quanto non avrebbe resistito alla pressione esercitata dalla pinza pneumatica. Rimane tutta via molto utile ed interessante verificare che i componenti si montino correttamente al pari delle griffe originali. Grazie ad un permesso fornitomi sia dal Politecnico di Torino che da tutor aziendale Federico Valle è stato possibile sfruttare un fermo macchina del braccio robotico per poter sostituire le griffe originali (già consegnate durante il lasso di tempo intercorso tra inizio caso studio e test di montaggio) e montare il prototipo. Come si può notare dalle fotografie (Figura 82),

il risultato è molto buono in quanto non vi sono state criticità né durante l'accoppiamento né durante il fissaggio.

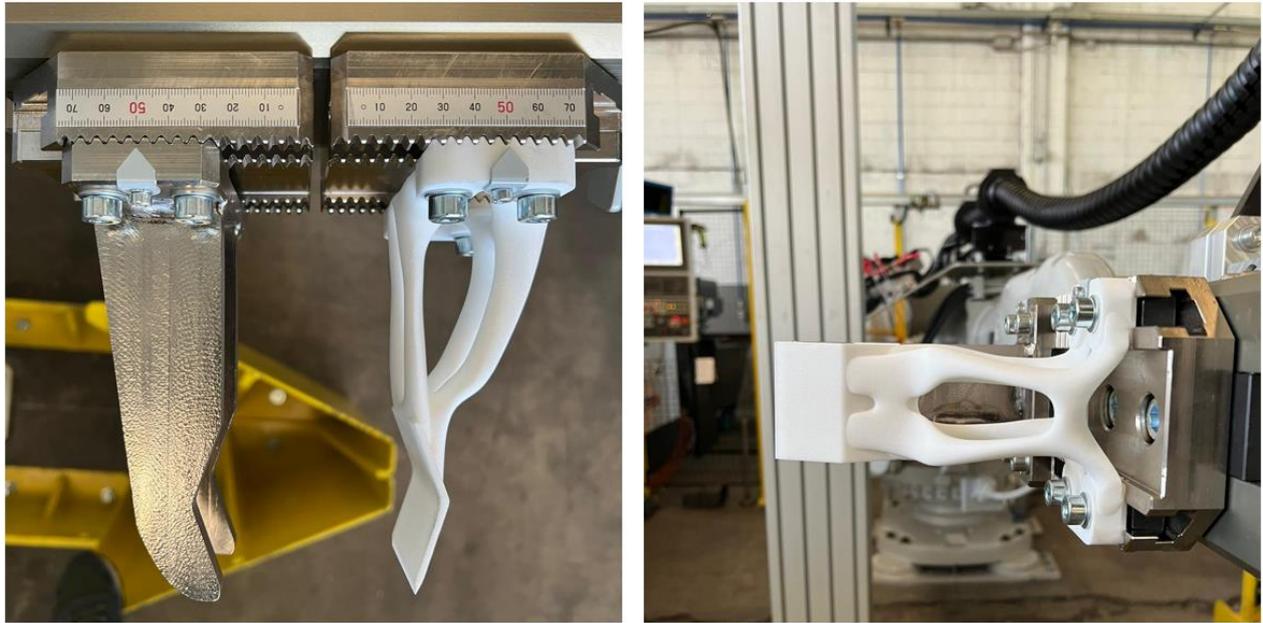


Figura 82: Verifica di montaggio in "O.L.V. srl" e confronto griffa originale con prototipo in additive

Risultati

Si analizzano infine i risultati ottenuti con il nuovo modello di griffa mettendolo al confronto con l'originale. È necessario, infatti, verificare che le dimensioni "target" siano rispettate e che la massa finale del nuovo componente non risulti critica.

➤ **Analisi degli ingombri:**

Dalla Figura 83 si apprezza il risultato dell'ottimizzazione geometrica eseguita sulla griffa originale mettendo al confronto le due versioni. Si può notare che l'altezza del nuovo modello risulta essere leggermente maggiore rispetto all'originale. Ciò è dovuto alla modellazione eseguita mediante la funzione "polyNURBS", che per generare giunzioni più regolari e morbide con la zona di non design ha prodotto un leggero raccordo. Questa differenza però non incide né sul montaggio né sulla funzionalità del sistema di presa. La verifica è stata fatta attraverso l'assieme CAD 3D e attraverso il test di assemblaggio sul braccio robotico.

Il secondo aspetto da attenzionare è anche il più importante. La riduzione di spessore ottenuta a valle di tutto il processo di ottimizzazione.

Come si vede chiaramente in Figura 83 la larghezza obiettivo è passata da 28,46 mm a 13,16 mm con un guadagno pari a 15,30 mm. Con un semplice calcolo si ricava il risparmio di ingombro totale su ogni canalina:

$$\text{Larghezza nuova canalina} = \text{larghezza originale} - (\text{riduzione ingombro griffa} \cdot 2)$$

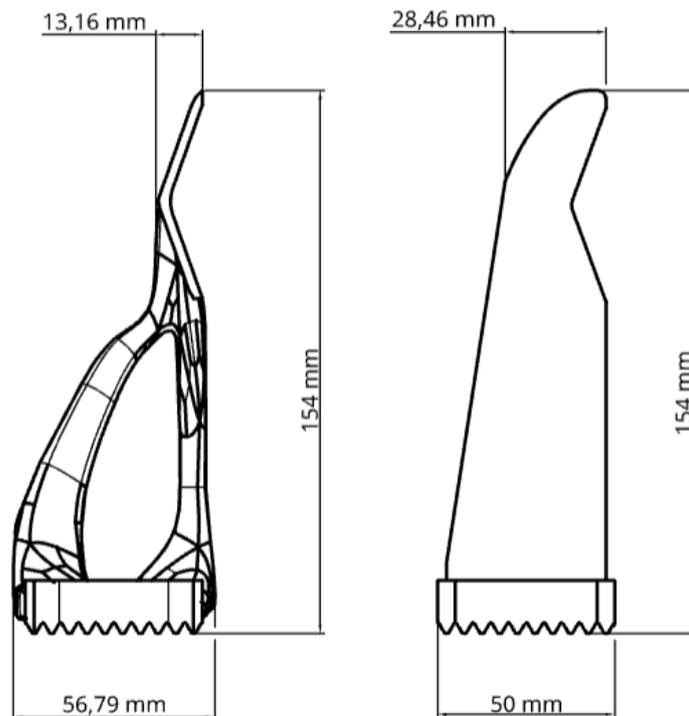


Figura 83: Confronto dimensionale tra il nuovo modello e l'originale

Si ricava in questo modo un valore pari a 140,84 mm. Essendo questa dimensione minore a quella designata come obiettivo dall'azienda fornitrice dei vassoi (145 mm), si può affermare che la richiesta principale di questo studio è soddisfatta.

➤ **Analisi delle masse:**

Calcolando la massa dei due modelli si evince una riduzione di peso nonostante il passaggio da un acciaio con densità di $\rho_{C40} = 7,85 \text{ kg/dm}^3$ ad uno con $\rho_{MS1} = 8,10 \text{ kg/dm}^3$. Questo risultato è dovuto all'uso dell'ottimizzazione topologica.

- **Peso griffa originale: 1,44 Kg**
- **Peso nuova griffa: 0,84 Kg**

Si ottiene quindi una diminuzione di massa del **41,30%** pari circa a **0,60 Kg**. Tale abbassamento del peso, oltre al risparmio di materiale utilizzato, migliora anche e soprattutto le condizioni dinamica dovute alle forze di inerzia. In particolare, facendo riferimento alle accelerazioni definite per il robot in questione (51) A parità di condizioni rispetto al modello originale vi sarà dunque una riduzione di forza dovuta all'inerzia circa pari a 1,8 N. complessivamente quindi, si ottiene anche un leggero incremento del fattore di sicurezza riferito alle griffe.

Conclusioni

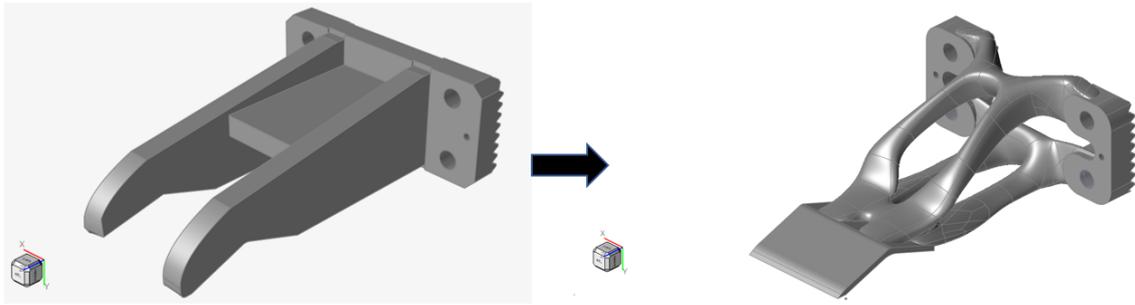
In questo lavoro di tesi si è descritto uno studio di fattibilità effettuato presso l'azienda O.L.V. Officina meccanica s.r.l.". L'analisi si è focalizzata sull'ottimizzazione degli ingombri relativi al sistema di presa su di un robot industriale, ciò viene rivisto in funzione dei vassoi contenitori dei pezzi da lavorare o lavorati. I vassoi originali presi in esame presentavano all'interno di un perimetro, vincolato da dimensioni standardizzate (1000mm x 800mm), quattro canaline adibite ad accogliere gli articoli.

L'ottimizzazione geometrica fatta ha avuto come obiettivo primario una riduzione dello spessore delle griffe del robot. Ridurre tale dimensione avrebbe consentito di risparmiare sufficiente spazio per l'inserimento di una quinta canalina. A determinare la larghezza di ogni canalina, infatti, sono sia dimensioni degli articoli ma anche le dimensioni dalle griffe che, immergendosi all'interno per la presa o il rilascio del pezzo, accrescono l'ingombro totale.

La fase preliminare dello studio ha avuto come scopo una ricerca bibliografica sullo stato dell'arte dei sistemi di presa meccanici, con maggiore attenzione verso pinze caratterizzate da attuatori su guide lineari. Analizzando la personalizzazione delle griffe è stato di particolare interesse approfondire l'uso dell'AM in questo settore. Nello specifico, infatti, si è preso spunto da alcune applicazioni simili al caso studio in questione ma realizzate mediante Additive Manufacturing.

La fase successiva è stata quella progettuale dove si sono analizzati dapprima i vincoli geometrici e dinamici da rispettare per garantire funzionalità ed una resistenza strutturale adeguata. Calcolata la forza alla quale le griffe sono sottoposte (circa **5500 N**) e la riduzione di spessore da raggiungere (**13,40 mm**) sono state ipotizzate **due soluzioni** per ottenere la nuova geometria:

1. **Attraverso una Lavorazione per asportazione di truciolo sulle griffe originali:** Il materiale originale era un acciaio a medio carbonio "C40" che attraverso un'analisi FEM sulla nuova geometria restituisce un coefficiente di sicurezza appena superiore all'unità. Di conseguenza, questa soluzione, benché veloce ed economica non avrebbe garantito una resistenza statica al carico adeguata.



2. **mediante Ottimizzazione Topologia:** Questa seconda soluzione è stata presa in considerazione vista la necessità di sostituire il metallo originale con uno caratterizzato da resistenza meccanica superiore. Nello specifico è stata scelta come primo tentativo una **lega ISO “18Ni300”**. Per garantire la funzionalità del nuovo design sono state mantenute le geometrie originali inerenti al montaggio con la pinza ed al contatto tra griffa e pezzo.

La seconda soluzione, sottoposta anch’essa ad un’analisi FEM, ha restituito risultati positivi sia in termini di spostamento ammissibile che di fattore di sicurezza. In particolare, si è ottenuto:

- ***Coefficiente di Sicurezza = 3,5;***
- ***Spostamento massimo $\cong 9,72 \cdot 10^{-4}$ mm.***

Grazie all’ottimizzazione topologica, inoltre, è stata raggiunta una **riduzione di massa pari al 41,30 %** rispetto al modello di partenza.

- ❖ In merito alla riduzione degli ingombri, obiettivo dello studio di fattibilità, è stato possibile ottenere una **riduzione di spessore sulle griffe pari a 15,30 mm**. Questo risultato consente dunque di avere una larghezza di canalina pari a 140,84 mm. La nuova larghezza si pone quindi al di sotto del valore soglia delineato dall’azienda produttrice dei vassoi (145 mm). In definitiva è possibile affermare che: ***grazie alla riduzione di spessore ottenuta, L’esito dello studio di fattibilità risulta positivo, permettendo quindi l’aggiunta della quinta canalina all’interno del vassoio.***

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va alla professoressa Manuela Galati che mi ha guidato durante lo sviluppo di questa tesi fornendomi anche nuovi ed interessanti approcci risolutivi. Ringrazio in egual misura anche il Professor Luca Iuliano che grazie alle sue lezioni ha fatto sì che mi appassionassi ancor di più al mondo della Fabbricazione Additiva. Un particolare Ringraziamento va a Federico Valle che in qualità di tutor aziendale, durante il mio tirocinio formativo, mi ha permesso di imparare molto sul mondo del lavoro dandomi, inoltre, moltissimi strumenti ed informazioni indispensabili per l'ideazione e sviluppo della tesi.

Il grazie più grande e più sentito è rivolto alla mia famiglia, la base di tutto ciò che realmente conta per me e la mia fonte di forza più importante. Allontanarsi dalla propria terra, per me come per tanti altri studenti che nascono al sud, sembra quasi un passaggio consolidato ed accettato. La realtà dei fatti è che la mancanza della propria casa, dei propri cari e delle proprie tradizioni pesa molto e si trasforma molto spesso in malinconia e sconforto. Ma se sono qui oggi a scrivere (finalmente) questi ringraziamenti, è solo perché ho avuto voi Mamma, Papà e Fede, che mi avete alleggerito il peso di andar via dalla mia Sicilia spronandomi verso nuove sfide e nuovi traguardi.

Grazie a te Mamma che, nonostante il tuo desiderio che io abbia ancora 6 anni, mi hai permesso di crescere nel migliore dei modi dandomi tutto il supporto e l'affetto possibile. Di questo e di altre infinite cose ti sono grato.

Grazie a papà, il mio punto di riferimento più solido e rassicurante. Grazie a te ho saputo approntare al meglio le avversità di questo percorso universitario e non solo. Grazie per aver valorizzato come nessun altro i miei risultati, anche i miei modesti 18 agli esami, con l'immane frase "Bonu è, pigghia e poitta 'ncasa".

Grazie a Federica, per i mille e più consigli che mi sono stati in molte occasioni indispensabili e non mi riferisco solo all'aiuto nel distinguere i colori delle magliette. Ti ringrazio per ogni singola volta che hai sopportato le mie lamentele o per tutte le volte che mi hai aiutato a superare i momenti difficili.

Un grande ringraziamento va ai miei amici, i vecchi ed i nuovi. Grazie al gruppo storico marsalese, coloro con il quale ho condiviso tutti i momenti più belli della mia adolescenza. Nonostante negli anni gli eventi mutano poco o tanto i rapporti, i ricordi vissuti insieme sono e saranno per me un bagaglio prezioso che mi porterò sempre dietro. Ringrazio quindi a Paolo, un fratello acquisito, Isabella, Stefania, Federico (polpo), Clara, Valerio, Claudia, e Nino.

Un grazie quindi anche alle Nuove amicizie, che in questo percorso universitario da fuorisede mi sono state preziose e di grande supporto nel farmi sentire Torino anche un po' casa mia. Ringrazio in modo particolare Giacomo, Federico, Riccardo, Michelangelo e Giulia.

Un sentito ringraziamento lo rivolgo anche a Paolo M., coinquilino storico, che ha condiviso con me per la maggior parte di questi anni di studi. Insieme abbiamo superato i momenti di sconforto e di delusione facendoci forza l'un l'altro per poi festeggiare per ogni piccolo traguardo.

Infine, vorrei ringraziare le mie nonne: nonna Concetta che, a distanza di ormai tanti anni dalla sua assenza, riesci ancora a farmi sentire il tuo profondo affetto. Un ricordo così prezioso che porterò per sempre con me e che non svanirà mai.

Ed un grazie alla nonna Peppa. Avrei voluto festeggiare con te anche questo mio ultimo risultato, ringraziandoti anche per il tuo indelebile consiglio di non affaticarmi troppo nello studio. Sappi nonna, che questo l'ho sicuramente preso alla lettera. Ma avrei preferito vedere almeno un'ultima volta il tuo sorriso, perché ricordo bene quanto la felicità dei tuoi nipoti ti riempiva di gioia. Mi auguro che in qualche modo, nonostante ci abbia messo un po' più del previsto, con questo mio momento di realizzazione sono riuscito anch'io a regalarti un piccolo sorriso come tu hai fatto e che continuerai farai con me grazie ai bei ricordi.

Ci sarebbero tante altre persone da aggiungere in questa lista di ringraziamenti ma, come mia sorella ha sottolineato con un eufemismo, "non sono uno bravo scrittore" e di conseguenza non sono in grado di esprimere con le parole l'immensa gratitudine che provo verso chi tiene a me e verso chi mi ha sostenuto durante questo percorso e non solo. Quindi mi auguro che queste ultime poche righe possano arrivare a tutti coloro che hanno creduto in me, rivolgendo loro nuovamente un immenso grazie!

Indice delle figure

Figura 1: centratrice-intestatrice [1]	7
Figura 2:Layout azienda "O.L.V. srl" [2].....	8
Figura 3: Schermata del software "OverOne" della sezione "produzione"[2].....	9
Figura 4: Esempio di una schermata raffigurante una programmazione della produzione all'interno del software "Workplant"[5]	11
Figura 5: Pianta reparti automatizzati. In alto a sinistra le due isole per la centro-intestatura e in basso per la tornitura	12
Figura 6: esempio di cartellino utilizzato in "O.L.V. Officina meccanica s.r.l."[5].....	13
Figura 7: Stima di efficienza relativa alla produzione di ogni reparto calcolata con dati raccolti in quattro mesi di produzione [5].....	13
Figura 8: Sistema di presa magnetico per robot [2].....	14
Figura 9: Rappresentazione 3D dell'isola robotica per il reparto di tornitura.....	15
Figura 10: Layout isola robotica di tornitura (quote in mm)	16
Figura 11: confronto tempi tra reparto non automatizzato rispetto all'isola robotica [2]	17
Figura 12: Braccio robotico con sei gradi di libertà IRB 6600 [6].....	18
Figura 13:Diagramma di carico massimo movimentabile in funzione della distanza dall'estremità libera del braccio robotico[6]	19
Figura 14:velocità raggiungibili da ogni asse di rotazione (rispettivamente: Asse 1 ,2,3,4,5 e 6) [6].....	19
Figura 15:Raggio di lavoro del manipolatore rispetto al centro della base (distanze in mm) [6].....	20
Figura 16: rappresentazione qualitativa dei parametri di ripetibilità e accuratezza [7].....	21
Figura 17: esempio di mano antropomorfa robotica sviluppata da "SCHUNK" [8]	22
Figura 18: Classificazione dei sistemi di presa per robot [10]	23
Figura 19:Esempio di sistema di presa magnetico [11].....	24
Figura 20: Esempio di sistema di presa a vuoto [11].....	24
Figura 21: Esempi di sistemi presa meccanica [8]:	25
Figura 22: Pinza angolare con tre griffe con un esempio di presa adattativa [12].....	26
Figura 23: Esempio di presa adattativa con griffe in polimero sottoposto ad una forza ed uno spostamento misurabile, sono riportate due configurazioni: a) struttura semi rigida; b) struttura flessibile [14]	27
Figura 24: Flowchart di un generico "customized design" per dita di presa [15].....	27
Figura 25: parametri descrittivi di un generico caso studio per sistema di presa attraverso valutazioni fisiche, geometriche e applicative.[10]	29
Figura 26: esempio di metodo selettivo di un sistema di presa[10]	30
Figura 27: Applicazioni di griffe per robot realizzate mediante processo CFR con la tecnologia Markforged [16] [17].....	32
Figura 28: Applicazioni di gripper realizzati con tecnica FDM con polimeri elastici [18], [19]	33
Figura 29:Test di carico di un Bracket per il settore aerospace realizzato mediante Additive Manufacturing con processo EBM [20]	34
Figura 30:Pinza per robot realizzata in additive con processo FDM e sinterizzazione per l'asservimento di una pressa industriale [21].....	35
Figura 31:Sistema di presa ibrido utilizzato in "O.L.V. Officina meccanica s.r.l." per l'isola di tornitura robotizzata	36
Figura 32: Macchina di misura.....	38
Figura 33: Rappresentazione del processo di termoformatura [24].....	39
Figura 34: Vassoio termoformato per O.L.V srl (sinistra) e pallet per il loro impilaggio (destra).....	40
Figura 35: Sezione di un vassoio termoformato con 4 canaline.....	41
Figura 36: Pignone lavorato nell'isola robotizzata di tornitura.....	42
Figura 37: albero di trasmissione prima e dopo la lavorazione di tornitura	42
Figura 38: Ingombro della griffa all'interno della canalina durante la fase di presa o rilascio del semilavorato (quote in mm)	43

Figura 39: Griffe originali	46
Figura 40: Viste e dimensioni delle griffe originali (quote in mm).....	46
Figura 41: larghezza originale delle canaline del vassoio termoformato (quote in mm).....	47
Figura 42: punto di applicazione della riduzione di spessore (quote in mm)	48
Figura 43: rappresentazione degli obiettivi geometrici sulla griffa (quote in mm)	49
Figura 44:sistema di presa "PGN-plus 240" scelto da catalogo [8]	51
Figura 45: Diagramma forza applicata in funzione della lunghezza della griffa [26].....	52
Figura 46: Individuazione della forza applicata sulla griffa in esame [26]	53
Figura 47: Scheda tecnica di "PGN-plus 240-2"[26].....	54
Figura 48: Scheda tecnica acciaio C40 [27]	55
Figura 49: prima ipotesi di design per le nuove griffe.....	56
Figura 50: definizione dei carichi e vincoli per analisi FEM	57
Figura 51: Risultato analisi FEM sul Coefficiente di sicurezza	58
Figura 52: Risultato analisi FEM sullo spostamento.....	58
Figura 53:Esempio di ottimizzazione topologica mediante metodo "SIMP" [29]	61
Figura 54: Ciclo di progettazione mediante ottimizzazione topologica [30].....	62
Figura 55: Ciclo dell'ottimizzazione topologica [30]	63
Figura 56: Modifica del design di partenza con definizione di design space	64
Figura 57: Viste del modello con designazione della zona di progettazione (marrone).....	65
Figura 58: Design space con dimensioni obiettivo.....	65
Figura 59: Applicazione dei carichi con vista laterale e inferiore	66
Figura 60: Scheda tecnica del materiale scelto per il nuovo design [31]	67
Figura 61: Trattamento termico consigliato dall'azienda produttrice "EOS" [31].....	68
Figura 62: Inserimento Dati del materiale nella libreria del software Inspire	68
Figura 64: definizione parametri per il calcolo dell'ottimizzazione topologica.....	69
Figura 63: definizione del controllo di forma di tipo simmetrico.....	69
Figura 65: Densità degli elementi costituenti del modello a valle del processo di ottimizzazione topologica	70
Figura 66: Risultato dell'ottimizzazione topologica	70
Figura 67:Ricostruzione attraverso polyNURBS	71
Figura 69: Risultato finale della ricostruzione con "polyNURBS".....	72
Figura 68: vista superiore (sinistra); vista laterale (destra)	72
Figura 70: vista frontale (sinistra); vista posteriore (destra).....	72
Figura 71: Risultato analisi FEM dello spostamento.....	73
Figura 72: Risultato analisi FEM di tensione\compressione	73
Figura 73: Risultato analisi FEM della Tensione di Von Mises.....	74
Figura 74: Risultato analisi FEM del Coefficiente di sicurezza	74
Figura 75: Test di assemblaggio virtuale (vista frontale)	76
Figura 76: Testi di assemblaggio virtuale (vista laterale).....	76
Figura 77::schema del processo SLS [32]:	78
Figura 78: Stampante SLS "EOS Formiga P110" [33].....	79
Figura 79: Scheda tecnica Formiga P110 [33]	79
Figura 80: Scheda tecnica del PA2200 utilizzato per la realizzazione del prototipo [34].....	80
Figura 81: Prototipo realizzato in PA12 con tecnica SLS	81
Figura 82: Verifica di montaggio in "O.L.V. srl" e confronto griffa originale con prototipo in additive	82
Figura 83: Confronto dimensionale tra il nuovo modello e l'originale.....	83

Bibliografia

- [1] [“http://www.olvsrl.com/.”](http://www.olvsrl.com/)
- [2] Mario Arcidiacono, “AUTOMATIZZAZIONE DEL PROCESSO DI CENTROINTESTATURA TRAMITE ROBOT ANTROPOMORFO E SISTEMA DI BIN-PICKING = AUTOMATION OF THE HEADING PROCESS VIA ANTHROPOMORPHIC ROBOT AND BIN-PICKING SYSTEM.”
- [3] [“https://www.osl.it/il-nostro-software/.”](https://www.osl.it/il-nostro-software/)
- [4] [“https://veroproject.it/erp.html.”](https://veroproject.it/erp.html/)
- [5] Matteo Leotta, “Analisi sistema industria 4.0 in officina meccanica specializzata,” 2021.
- [6] [“https://library.e.abb.com/public/2a8686ada7d3cba7c125766d003e9a51/3HAC023933-007_revH_it_library.pdf.”](https://library.e.abb.com/public/2a8686ada7d3cba7c125766d003e9a51/3HAC023933-007_revH_it_library.pdf)
- [7] [“http://www.ladispe.polito.it/robotica/Download/Precisione%20Robot.pdf.”](http://www.ladispe.polito.it/robotica/Download/Precisione%20Robot.pdf)
- [8] [“https://schunk.com/it_it/sistemi-di-presa/.”](https://schunk.com/it_it/sistemi-di-presa/)
- [9] B. Zhang, Y. Xie, J. Zhou, K. Wang, and Z. Zhang, “State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 177, p. 105694, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.COMPAG.2020.105694.
- [10] G. Fantoni, S. Capiferri, and J. Tilli, “Method for Supporting the Selection of Robot Grippers,” *Procedia CIRP*, vol. 21, pp. 330–335, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.PROCIR.2014.03.152.
- [11] [“https://onrobot.com/it/prodotti/mg10.”](https://onrobot.com/it/prodotti/mg10/)
- [12] S. J. Monteiro, “Adaptive Gripping Technology: Development of a gripper interface for SCHUNK Dextrous Hand,” 2010.
- [13] J. Jalani, L. Gerez, C.-M. Chang, N. Elangovan, A. Zisimatos, and M. Liarokapis, “On Alternative Uses of Structural Compliance for the Development of Adaptive Robot Grippers and Hands,” 2019, doi: 10.3389/fnbot.2019.00091.
- [14] J. Gandarias, J. Gómez-de-Gabriel, and A. García-Cerezo, “Enhancing Perception with Tactile Object Recognition in Adaptive Grippers for Human–Robot Interaction,” *Sensors*, vol. 18, no. 3, p. 692, Feb. 2018, doi: 10.3390/s18030692.
- [15] M. Honarpardaz, M. Tarkian, J. Ölvander, and X. Feng, “Finger design automation for industrial robot grippers: A review,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 87, pp. 104–119, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.ROBOT.2016.10.003.
- [16] [“https://www.3dcompany.it/applicazione/sistema-di-presa-per-robot/.”](https://www.3dcompany.it/applicazione/sistema-di-presa-per-robot/)
- [17] [“https://www.3dcompany.it/applicazione/caso-studio-pinze-per-robot/.”](https://www.3dcompany.it/applicazione/caso-studio-pinze-per-robot/)
- [18] [“https://webthesis.biblio.polito.it/7114/1/tesi.pdf.”](https://webthesis.biblio.polito.it/7114/1/tesi.pdf)
- [19] E. Roels, S. Terryn, J. Brancart, R. Verhelle, G. van Assche, and B. Vanderborcht, “Additive Manufacturing for Self-Healing Soft Robots”, doi: 10.1089/soro.2019.0081.
- [20] G. Allevi, M. Cibeca, R. Fioretti, R. Marsili, R. Montanini, and G. Rossi, “Qualification of additively manufactured aerospace brackets: A comparison between thermoelastic stress

- analysis and theoretical results,” *Measurement*, vol. 126, pp. 252–258, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.05.068.
- [21] “<https://www.solidmanufacturing3d.it/azienda/referenze/pinze-robot-industriali-agili-con-ottimizzazione-della-topologia-e-stampa-3d-in-metallo>.”
- [22] “http://www.jollyplastsrl.com/vassoi_movimentazione_robotizzata.html.”
- [23] “<https://it.wikipedia.org/wiki/Termoformatura#:~:text=La%20termoformatura%20%C3%A8%20una%20tecnica,sotto%20pressione%20o%20sotto%20vuoto>.”
- [24] “<https://www.civiesse.com/termoformatura/>.”
- [25] “<https://www.atec.srl/>.”
- [26] “https://schunk.com/it_it/sistemi-di-presa/series/svh/.”
- [27] “<https://www.ims.it/files/C40.pdf>.”
- [28] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 23, no. 6. 2014. doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [29] “https://help.solidworks.com/2019/italian/SolidWorks/cworks/c_simp_method_topology.htm#:~:text=Il%20metodo%20SIMP%20prevede%20una,produzione%20e%20requisiti%20di%20prestazione.”
- [30] T. Y. Lin, S. E. Baker, E. B. Duoss, A. W. Gebisa, and H. G. Lemu, “A case study on topology optimized design for additive manufacturing You may also like Topology Optimization of 3D Flow Fields for Flow Batteries A case study on topology optimized design for additive manufacturing”, doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012026.
- [31] “<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/dmls-metal-materials/tool-steel>.”
- [32] “https://it.wikipedia.org/wiki/Selective_Laser_Sintering.”
- [33] “<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/eos-polymer-systems/formiga-p-110-velocis>.”
- [34] “<https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-plastic/sls-polymer-materials/polyamide-pa-12-alumide>.”

