



# Politecnico di Bari

Repository Istituzionale dei Prodotti della Ricerca del Politecnico di Bari

Riconfigurazione rapida in ambiente collaborativo dei processi produttivi di stampa 3D per la produzione automotive

This is a PhD Thesis

*Original Citation:*

Riconfigurazione rapida in ambiente collaborativo dei processi produttivi di stampa 3D per la produzione automotive / Scibilia, Sergio. - ELETTRONICO. - (2026).

*Availability:*

This version is available at <http://hdl.handle.net/11589/301260> since: 2026-05-18

*Published version*

DOI:

Publisher: Politecnico di Bari

*Terms of use:*

(Article begins on next page)



Politecnico  
di Bari

Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management

DRIMeG

Ph.D. Program

SSD: IIND-04/A – TECNOLOGIA E SISTEMI DI LAVORAZIONE

**Tesi**

---

Riconfigurazione rapida in ambiente collaborativo dei processi  
produttivi di stampa 3D per la produzione automotive

---

dottorando

Sergio Scibilia

Revisore 1: Prof.ssa Michela Simoncini

Revisore 2: Prof. Marius Criveanu

Supervisore:

Prof. Giuseppe Casalino

*Coordinatore del dottorato:*

Prof. Giuseppe Casalino

---

Corso n°38, 01/04/2023-31/03/2026



Politecnico  
di Bari

Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management

DRIMeG

Ph.D. Program

SSD: IIND-04/A – TECNOLOGIA E SISTEMI DI LAVORAZIONE

**Tesi**

---

Riconfigurazione rapida in ambiente collaborativo dei processi  
produttivi di stampa 3D per la produzione automotive

---

dottorando

Sergio Scibilia

Revisore 1: Prof.ssa Michela Simoncini

Revisore 2: Prof. Marius Criveanu

Supervisore:

Prof. Giuseppe Casalino

*Coordinatore del dottorato:*

Prof. Giuseppe Casalino

---

Corso n° 38, 01/04/2023-31/03/2026

***I ringraziamenti sono dovuti. I ringraziamenti sono sentiti.***

*Ringrazio chi mi ha sostenuto e guidato, ringrazio il Prof. Giuseppe Casalino.*

*Ringrazio il gruppo di lavoro, colleghi di studio e Illustri Professori che hanno accompagnato questa esperienza.*

*Ringrazio il Politecnico di Bari, per essere sempre lì, solida istituzione territoriale di riferimento.*

*Ringrazio Zia Caterina per il suo aiuto e supporto amorevole.*

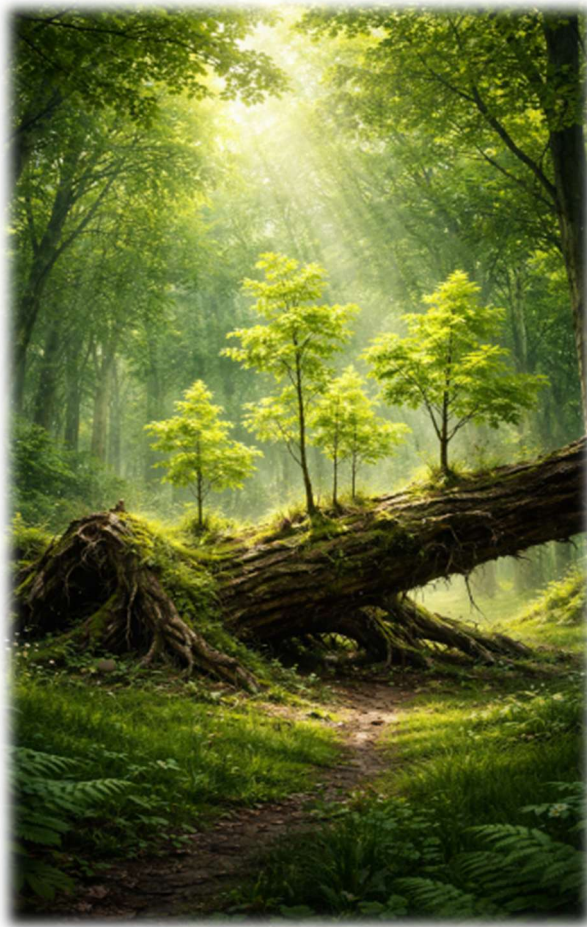
*Ringrazio la caparbietà e volontà che sempre mi accompagnano.*

*Ringrazio il sacrificio e l'accettazione al cambio che sempre mi sorprendono.*

*Ringrazio la vita e le sue intrinseche e sconosciute opportunità che cela.*

*Al tempo, e ad ogni "albero" che cade...*

*Al tempo, e ad ogni "albero" che nasce...*



***Grazie!***

# SOMMARIO

---

1	Abstract.....	5
2	Introduzione.....	6
3	Stato dell'arte.....	8
3.1	Processi produttivi di manifattura additiva in contesti HRC.....	8
3.2	L'operatore nelle celle collaborative.....	9
3.3	Sinergia tra robot collaborativi e manifattura additiva.....	10
3.4	Scenari e gradi di collaborazione operatore-cobot.....	11
3.5	Post processing in additive manufacturing e ruolo degli agenti.....	13
3.6	Sistemi produttivi flessibili e riconfigurazione rapida dei processi HRC.....	14
3.7	Modelli decisionali per l'allocazione dei compiti e score delle caratteristiche.....	16
4	Giustificazione metodologica.....	18
5	Cella di lavoro, workflow, simulazioni e i migliori scenari collaborativi osservati.....	21
5.1	Inquadramento delle scelte hardware e del layout sperimentale.....	21
5.2	Inquadramento del workflow post-processing nella cella di lavoro.....	24
5.3	Risposta della stampa 3D al settore automotive e presentazione delle simulazioni.....	27
5.4	Metodologia di svolgimento delle simulazioni.....	31
5.5	Scenari best case delle simulazioni.....	35
6	Knowledge base per il supporto decisionale per la riconfigurazione della cella di lavoro.....	40
6.1	Dal dato reale al dataset.....	40
6.2	Il fattore di forma FF e i suoi tre componenti FG, FC e FM.....	41
6.2.1	Il Fattore Geometrico FG.....	43
6.2.2	Il Fattore Compositivo FC.....	47
6.2.3	Il Fattore Manipolativo FM.....	49
6.2.3.1	Razionalizzazione metodologica volontaria delle variabili di FM.....	53
7	Sviluppo, architettura e logica operativa del sistema di supporto decisionale.....	55
7.1	Logica del modello algoritmico e strutturazione computazionale.....	55
7.2	Dalla conoscenza operativa alla costruzione di un sistema intelligente.....	56
7.3	Tecniche di Machine Learning per il supporto alla riconfigurazione nei sistemi HRC.....	59
7.3.1	Modellazione predittiva tramite regressione supervisionata per l'allocazione operativa.....	60
7.4	Logica operativa del modello quando viene inserito un nuovo pezzo.....	61
8	Validazione e approssimazione del modello.....	63
8.1	Validazione modello.....	63
8.1.1	Validazione deterministica del modello (calcolo + software).....	63
8.1.2	Valutazione della capacità predittiva del modello di Machine Learning.....	65

8.2	Base dati personalizzata.....	71
8.3	Approssimazioni del modello .....	71
9	Risultati.....	73
9.1	Risultati sul ruolo dell'operatore .....	73
9.1.1	Risultati simulazioni laboratoriali: scenari collaborativi .....	73
9.1.2	Risultati simulazioni laboratoriali: operativi .....	74
9.1.3	Variazione rispetto lo scenario "solo operatore" .....	77
9.1.4	Peso relativo delle fasi sul tempo totale del ciclo best case .....	79
9.1.5	Scomposizione delle fasi in operazioni e allocazione dei compiti .....	80
9.2	Interpretazione del multiruolo come risultato operativo della ricerca .....	82
10	Conclusioni e Sviluppi futuri.....	84
10.1	Il ruolo degli agenti .....	84
10.2	Modello e sua concettualizzazione intelligente.....	86
10.3	Standardizzazione distribuita dei dati.....	86
10.4	Estensioni del sistema.....	87
11	Appendici.....	90
11.1	Hardware, layout e scenario operativo della cella .....	90
11.2	Esperimento preliminare di calibrazione dell'accelerazione del cobot su cubo in PLA .....	97
11.3	Descrizione dei manufatti scelti per le simulazioni laboratoriali .....	102
11.4	Riassunto svolgimento delle simulazioni laboratoriali.....	107
11.5	Relazione ottimizzazione movimenti cobot: raggi raccordo, velocità e accelerazione giunti ....	120
11.6	Risultati simulazioni laboratoriali: variabile tempo.....	121
11.7	Tabelle e valori di calcolo per l'analisi degli indici FG, FC e FM.....	124
11.8	Esempio codice Python per alcuni blocchi logici più rappresentativi .....	135
11.9	Architettura grafica del software .....	139
11.10	Script alberi programma del cobot per i sei manufatti .....	146
12	Bibliografia.....	150

Il presente lavoro di ricerca nasce dall'esigenza di accompagnare la progressiva industrializzazione della stampa 3D, superandone l'impiego esclusivamente prototipale e interpretandola come tecnologia produttiva potenzialmente integrabile in contesti manifatturieri caratterizzati da elevata variabilità, personalizzazione e necessità di riconfigurazione rapida. L'interesse è rivolto in particolare alle fasi successive alla stampa, spesso meno formalizzate ma decisive per la reale utilizzabilità del manufatto: distacco dal letto di stampa, asportazione dei supporti e assemblaggio. La ricerca si colloca nella prospettiva human-centred dell'Industry 5.0 e sviluppa un framework per l'analisi e la riconfigurazione di post-processing in ambienti di collaborazione uomo-cobot con l'obiettivo di trasformare dati sperimentali reali in una knowledge base strutturata per rendere approcciabile un possibile sistema intelligente di supporto decisionale, capace di identificare lo scenario operativo più idoneo tra operatore, cobot e configurazione ibrida HRC. In questa impostazione, il machine learning non rappresenta il nucleo centrale del contributo, ma una possibile estensione successiva, resa praticabile dalla qualità informativa della base dati costruita.

La tesi si fonda su simulazioni laboratoriali condotte in una cella reale costituita da stampante 3D, cobot e banco di lavoro mantenendo fisso il layout per garantire confrontabilità sperimentale anche in condizioni operative vincolate. Il campione di studio comprende sei tipologie di manufatti provenienti dai settori automotive e trasporti, articolati in sette simulazioni complessive, selezionate in modo volutamente eterogeneo per geometria, composizione, presenza di supporti e criticità manipolative. Tali casi non assumono un valore applicativo diretto, ma una funzione accademica e sperimentale finalizzata alla costruzione di un impianto comparativo robusto. L'analisi è sviluppata attraverso la scomposizione del workflow in tre fasi operative e mediante il confronto tra scenari solo uomo, solo cobot e uomo-cobot, così da valutare non soltanto i tempi di fase e di ciclo, ma anche le condizioni che rendono realmente conveniente, o no, l'impiego del robot antropomorfo.

Un contributo metodologico centrale consiste nella definizione di una procedura che collega osservazione sperimentale, strutturazione del dato, sintesi qualitativa e implementazione software. In questa logica, i casi studio vengono descritti non solo attraverso i tempi osservati, ma anche tramite indicatori sintetici riferiti alla natura geometrica, compositiva e manipolativa del manufatto, così da superare una lettura puramente temporale del processo. Il modello sviluppato va interpretato come un ambiente tecnico capace di raccogliere, organizzare, confrontare e restituire in forma strutturata i dati di processo, producendo come output sia la descrizione del pezzo sia l'individuazione dello scenario operativo migliore. Le evidenze ottenute confermano che la collaborazione con il cobot non costituisce una soluzione universalmente vantaggiosa, ma una risorsa selettiva e mirata, efficace solo in determinate fasi e condizioni. Ne deriva una lettura nella quale l'operatore mantiene la regia operativa del sistema, mentre il cobot assume una funzione di supporto specialistico e prestazionale.

**Keywords:** 3D printing process design; Human-robot collaboration; Cell configuration; Reconfiguration of collaborative manufacturing processes; Production flexibility; Batch mix multiproduction in 3D printing; Industrialisation of 3D printing.

## 2 INTRODUZIONE

---

La progressiva diffusione della stampa 3D sta modificando il significato stesso della produzione manifatturiera, rendendo possibile una forma di democratizzazione, umanizzazione e atomizzazione dei processi produttivi. La produzione non risulta più confinata esclusivamente a grandi impianti centralizzati, ma può essere distribuita, replicata e adattata in contesti differenti, dalle aziende strutturate fino a realtà più ridotte capaci di organizzare una propria cella di produzione. In questo senso, la manifattura additiva sta vivendo un passaggio rilevante ridefinendosi da tecnologia spesso associata all'ambiente domestico, sperimentale o prototipale, verso un impiego sempre più integrato nelle aziende e nei sistemi produttivi dove assumono valore strategico flessibilità, rapidità di adattamento, gestione di lotti differenziati e capacità di risposta a richieste sempre più variabili. Tale transizione si estende in generale all'additive manufacturing (AM), includendo tecnologie di stampa come quella con deposizione di filamento (oggetto di questo studio), ma anche basate su polveri e materiali metallici. Queste applicazioni confermano che la stampa 3D può oggi essere letta non più soltanto come mezzo di fabbricazione, ma come parte di una più ampia trasformazione dell'organizzazione produttiva.

In questo contesto il settore automotive rappresenta uno degli ambiti di maggiore interesse, sia per la crescente domanda di personalizzazione del prodotto, sia per la necessità di alleggerimento dei componenti, soprattutto in relazione ai veicoli elettrici, alle produzioni differenziate e ai segmenti ad elevata customizzazione, incluse le applicazioni di lusso, veicoli d'epoca e per elementi sostitutivi in generale.

La manifattura additiva diventa qui significativa non solo per la libertà geometrica o altri vantaggi ad essa associata di carattere meramente produttivo di stampa, ma perché permette di sostenere logiche di produzione flessibile, piccoli lotti, varianti di prodotto di interesse.

L'interesse del presente progetto di studio, non è rivolto alla stampa 3D in sé, ma al comportamento del sistema produttivo nelle operazioni successive alla stampa.

La configurazione sperimentale considerata è una cella reale costituita da stampante 3D, cobot, banco di lavoro la tecnica utilizzata è FDM con utilizzo di acido lattico (PLA).

Il problema affrontato riguarda peculiarmente ciò che accade quando il pezzo cambia e, con esso, cambiano supporti, operazioni richieste, strumenti necessari, condizioni di presa, accessibilità, sequenza di manovre e ripartizione dei compiti tra operatore e cobot. Per questa ragione il post-processing immediatamente a valle della stampa viene assunto come nucleo reale dell'analisi. Il workflow viene osservato all'interno di una cella mantenuta volutamente stabile e fissa, nella quale l'operatore e il cobot possono intervenire singolarmente o collaborativamente. Tale impostazione consente di leggere il processo in condizioni operative concrete, mettendo in evidenza non solo i tempi, ma anche i vincoli fisici, meccanici, spaziali e gestionali che influenzano la manipolabilità dei pezzi e la riconfigurazione del ciclo. La scelta di non modificare il layout costituisce una precisa ipotesi metodologica, finalizzata a mantenere costanti le condizioni fisiche della cella e a rendere confrontabili le variazioni osservate tra i manufatti.

La ricerca si sviluppa così attorno alla relazione uomo-cobot in una logica human-centred, nella quale l'operatore non viene sostituito, ma resta il riferimento operativo e valutativo del sistema. L'osservazione parte intenzionalmente da una condizione priva di automatismo, cioè dalla sola esecuzione umana, perché proprio questo consente di comprendere con maggiore chiarezza ciò che accade quando la cella viene "cobotizzata", e in che modo la presenza del cobot modifichi, oppure non modifichi, il ciclo produttivo. Il processo viene quindi scomposto in fasi e sottofasi così da individuare con precisione dove si concentrino le criticità, dove emerga un effettivo vantaggio collaborativo e dove invece la centralità dell'operatore continui a rappresentare la soluzione più

robusta. Le evidenze sperimentali confermano infatti che il beneficio della collaborazione non dipende da una generica presenza del cobot, ma dalla sua capacità di incidere su passaggi realmente dominanti e funzionalmente adatti alla cooperazione.

La cella di produzione viene letta come un sistema dinamico nel quale la riconfigurazione deriva dall'alta frequenza di variazione del prodotto e dai vincoli geometrici, compositivi, operativi e di manovrabilità che ognuno di essi introduce. I manufatti selezionati per le simulazioni sono stati scelti in modo volutamente eterogeneo, proprio per aumentare la capacità di confronto tra componenti molto differenti per geometria, presenza di supporti, numero di elementi, necessità di assemblaggio, compattezza, delicatezza e accessibilità. Ciò non riduce il valore del lavoro, al contrario, consente di osservare il processo con un livello di controllo sufficiente a far emergere i criteri che governano la distribuzione delle attività tra operatore e cobot e le condizioni in cui la riconfigurazione diventa realmente significativa.

Su questo sfondo emerge una seconda linea di interesse, di carattere informativo e sistemico come quella di trasformare l'esperienza sperimentale in una base conoscitiva ordinata, riutilizzabile e progressivamente estendibile. Il sistema sviluppato in ambiente Python assume quindi il ruolo di primo supporto decisionale fondato su dati reali, orientato alla descrizione del pezzo, al confronto tra scenari operativi e alla scelta della configurazione più idonea. La prospettiva del machine learning rimane successiva e non costituisce il nucleo immediato del contributo.

Infine, la riflessione assume rilievo anche in una prospettiva di scala più ampia. Pur essendo sviluppato su una singola cella collaborativa, il lavoro si muove chiaramente entro scenari di produzione in serie di carattere industriale e può essere letto come base per configurazioni future nelle quali più celle, o più stampanti 3D implementate nello stesso ambiente produttivo, operino secondo una logica uniforme di raccolta, elaborazione e redistribuzione del dato. In tale ottica, la standardizzazione distribuita della conoscenza diventa un possibile fattore di supporto all'industrializzazione della stampa 3D perché ogni cella opera sul proprio caso produttivo, ma al tempo stesso contribuisce ad alimentare un nucleo centrale di conoscenza, che può restituire output specifici e personalizzati per esigenze differenti di riconfigurazione. La questione centrale non è quindi soltanto tecnologica, ma riguarda il modo in cui la stampa 3D può essere inserita in sistemi produttivi reali, flessibili e coordinati, mantenendo la centralità dell'operatore e rafforzando la capacità del sistema di apprendere dall'esperienza operativa.

#### 3.1 PROCESSI PRODUTTIVI DI MANIFATTURA ADDITIVA IN CONTESTI HRC

La crescente complessità dei prodotti, l'elevata variabilità geometrica e la produzione in lotti ridotti stanno trasformando radicalmente il paradigma manifatturiero. In ambienti ad alta personalizzazione, come quelli tipici della produzione additiva, la rigidità delle linee robotizzate tradizionali non è più sufficiente. In questo contesto, la Human–Robot Collaboration (HRC) emerge come configurazione produttiva capace di coniugare precisione meccanica e adattabilità umana attraverso l'impiego di linee cobotizzate. [1;2] I robot collaborativi (cobot) sono infatti progettati per operare nello stesso spazio fisico dell'operatore, senza barriere, condividendo l'area di lavoro e interagendo direttamente con l'operatore. [3;4] Tale caratteristica li rende particolarmente adatti a contesti dinamici e riconfigurabili nei quali la flessibilità del sistema rappresenta un requisito progettuale primario. [5;6] In termini funzionali, i cobot integrano precisione e ripetibilità delle macchine con il valore aggiunto dell'intervento umano, inteso come decisione, adattamento e creatività. La loro progettazione è orientata a un'interazione diretta con l'operatore secondo logiche di sicurezza integrate, con limitazioni di velocità e forza conformi alla DIN ISO/TS 15066 (2016). [7] Rispetto a robot convenzionali, si distinguono per maggiore sicurezza, programmazione più semplice e flessibilità, senza la necessità di celle isolate, elementi cruciali quando si punta a una produzione custom e ad alta variabilità, come nel settore automobilistico e dei trasporti.

La collaborazione uomo–robot si fonda su alcuni cardini come sicurezza, dinamiche di interazione in contesti cooperativi e livello di autonomia e adattabilità del cobot. Grazie a sensori intelligenti, i cobot possono operare in prossimità dell'operatore in condizioni di sicurezza, adattando il proprio comportamento tramite percezione visiva, riconoscimento delle azioni, previsione delle intenzioni e pianificazione in tempo reale. [8] L'obiettivo è bilanciare intervento umano e automazione; tuttavia, molte soluzioni restano ancora basate su logiche rigide, che limitano una collaborazione realmente naturale e richiedono politiche di controllo robuste e spesso onerose. Permangono inoltre limiti legati alla carenza di standard di interoperabilità e alla complessità delle architetture multi-sensore, che rendono ancora onerosa l'implementazione di soluzioni facilmente integrabili e riconfigurabili. In tale contesto, resta necessaria l'esperienza umana per ottimizzare in modo efficace la cella di produzione e la programmazione del sistema multi-device e multi-sensore. [9] Gli algoritmi di machine learning e le tecniche di ottimizzazione automatica emergono come strumenti capaci di generare soluzioni più dinamiche e adattive, ma l'automazione di operazioni multimodali e sequenziali presenta ancora criticità rilevanti come margini d'errore, necessità di configurazioni integrate, costi computazionali e carichi di elaborazione dati elevati. A ciò si aggiunge l'esigenza di formare gli operatori su molteplici metodi di controllo, fattore che nei sistemi produttivi dinamici può tradursi in down time prolungati durante i processi di riconfigurazione. [10]

Programmazione robot collaborativi è un compito relativamente semplice ma richiede conoscenze specifiche. Proprio per garantire flessibilità operativa, l'aspetto chiave dei cobot è la loro riprogrammazione e il loro adattamento specifico per gestire contesti dinamici e variabili, caratteristici degli ambienti produttivi ad alta riconfigurabilità. [11] Lo sviluppo e l'utilizzo di cobot riconfigurabili, capaci di rispondere a cambiamenti delle esigenze di domanda di produzione e dei vincoli del layout, è considerato un approccio adeguato, in grado di aumentare l'utilità dei cobot nei contesti di manifattura flessibile.

In questo scenario emerge con forza l'esigenza di una collaborazione efficiente e simbiotica uomo e cobot e, conseguentemente, la necessità di una riconfigurazione rapida di tale sistema. Nel progetto di studio, un aspetto critico emerso nelle simulazioni riguarda esattamente il cambio pezzo, che

rappresenta un momento in cui la riconfigurabilità del sistema viene messa concretamente alla prova. Si evidenzia infatti una variazione significativa non solo nella complessità del manufatto, ma anche nelle modalità operative necessarie per mantenere efficacia e continuità del processo produttivo. Tale variazione si manifesta nella necessità di modificare strategia di presa, sequenza operativa, allocazione dei compiti, parametri cinematici, ricorso al Freedrive e numero di riconfigurazioni richieste per il raggiungimento anche di una sola operazione. Queste evidenze denotano quanto la riconfigurabilità costituisca un fattore chiave nell'aumentare l'utilità dei cobot in ambienti flessibili.

### 3.2 L'OPERATORE NELLE CELLE COLLABORATIVE

Il funzionamento efficace delle celle collaborative dipende in modo determinante dal ruolo dell'operatore poiché i cobot bilanciano i benefici dell'automazione avanzata con una capacità di adattamento che è, in parte, guidata dalle scelte umane. In altri termini, il valore non deriva dalla semplice introduzione di un cobot, ma dalla progettazione della collaborazione e dalla corretta decisione su dove e come inserirlo nella sequenza, evitando che la presenza del cobot si traduca in overhead o rigidità operative.

La collaborazione uomo-robot (HRC) è indicata come un elemento strutturale delle fabbriche del futuro, in quanto la combinazione tra ripetibilità-precisione dei robot e adattabilità degli esseri umani può incrementare flessibilità e produttività dei processi industriali di Additive Manufacturing. La definizione di metodologie efficaci per guidare l'implementazione di tale paradigma in ambienti produttivi reali resta una sfida aperta. [12] L'organizzazione del lavoro e le soluzioni tecniche per i sistemi cyber-fisici (CPS) dovrebbero evolvere tra alternative tecno-centriche e antropo-centriche. [13]

In questa prospettiva, le strategie di progettazione, configurazione e programmazione devono includere non solo l'efficienza dell'intero sistema, ma anche la qualità dell'interfaccia uomo-macchina, così da rendere la cooperazione fluida e sicura. Tale complementarità è coerente con il paradigma Industry 5.0, in cui l'automazione non mira alla sostituzione dell'operatore, ma alla sua valorizzazione all'interno di sistemi produttivi intelligenti, resilienti e sostenibili. Tuttavia, automatizzare molti compiti industriali richiede ancora uno sforzo elevato, spesso a causa della complessità tecnica dei sistemi e della carenza di competenze disponibili. [14]

Alla luce di questi presupposti, il ruolo dell'operatore nelle celle collaborative non può essere considerato residuale nel contesto HRC. Al contrario, l'operatore svolge funzioni sistemiche:

- agente decisionale adattivo, perché alcune operazioni richiedono frequentemente una capacità di adattamento superiore rispetto a quella ottenibile tramite cobot;
- garante di continuità e robustezza operativa, per migliorare tempo e qualità finale del manufatto.

L'automazione di operazioni sequenziali può comportare complessità elevata, margini d'errore maggiori e necessità di configurazioni integrate non sempre sostenibili in ambienti reali. L'operatore tende a mantenere un vantaggio relativo soprattutto in presenza di variabilità geometrica e necessità di micro-decisioni adattive. [1]

Il contributo dell'operatore e la convenienza della collaborazione variano in funzione di parametri legati al pezzo e al set-up, come per esempio la superficie di contatto con il letto di stampa, presenza o assenza di supporti, accessibilità della zona di presa, numero di componenti sul piatto, dimensioni geometriche e forma, maneggiabilità. La collaborazione, dunque, non è neutra rispetto al pezzo, ma cambia in modo marcato al variare delle sue caratteristiche. L'operatore si posiziona come decisore nel paradigma Human-in-the-Loop, in quanto chiude il ciclo operativo, permettendo la finalizzazione dei task. La programmazione dei cobot resta dunque molto importante e richiede competenze

specifiche, soprattutto quando il sistema deve adattarsi a geometrie variabili e a condizioni operative non ideali o differenti. [15]

L'operatore risulta essere un elemento cardine della manifattura adattiva, a conferma del fatto che il sistema non è robot-driven o only-cobot, ma human-centric e cobot-enabled nel rispetto dei fattori chiave tecnologici della transizione 5.0. [16]

### **3.3 SINERGIA TRA ROBOT COLLABORATIVI E MANIFATTURA ADDITIVA**

L'integrazione tra robot collaborativi (cobot) e stampanti 3D si sta affermando come una combinazione particolarmente efficace per rispondere a esigenze di automazione avanzata che siano, al tempo stesso, sostenibili dal punto di vista tecnico ed economico.

Nel contesto della manifattura additiva, l'utilità del cobot può estendersi lungo l'intera catena del processo: dal caricamento dei materiali fino alle operazioni finali di pick and place e pallettizzazione dei pezzi finiti. [17] Tale estensione, tuttavia, richiede un'attenzione specifica alla programmazione, alla riconfigurazione e all'interoperabilità dell'ecosistema tecnologico, fattori che determinano la reale scalabilità industriale delle soluzioni collaborative uomo-cobot.

All'interno di questa logica, il cobot può assumere due ruoli principali: come elemento di produzione, arrivando in alcuni casi a sostituire la stampante 3D mediante l'integrazione di un opportuno estrusore come effetto finale; come elemento di asservimento, supportando il processo attraverso attività operative e logistiche lungo le diverse fasi.

- Utilizzo del cobot come estrusore (sostituto della stampante 3D)

La stampa 3D si basa sulla deposizione controllata e progressiva di materiale, attraverso la sovrapposizione di strati. In questo scenario, libertà di movimento, precisione e ripetibilità dei cobot risultano coerenti con le esigenze di tracciamento e deposizione di filamento richieste dalla manifattura additiva. Quando configurato come estrusore, il cobot non si limita a replicare le funzioni di una stampante 3D tradizionale, ma introduce gradi di libertà che possono abilitare geometrie, orientamenti e strategie di deposizione difficilmente ottenibili con architetture convenzionali.

- Utilizzo del cobot per asservimento

Un secondo ambito di utilizzo del cobot, di principale e unica rilevanza in questo progetto di studio, riguarda il ruolo di asservimento, inteso come l'insieme di attività di supporto operativo e logistico che affiancano il processo produttivo e ne incrementano stabilità, continuità ed efficienza. Nelle applicazioni industriali, i robot collaborativi vengono impiegati soprattutto come supporto operativo in attività ripetitive e ad alto carico fisico per l'operatore. Tra le funzioni più comuni si collocano controllo qualità, machine tending, pick and place, pallettizzazione, assemblaggio, saldatura, avvitatura, incollaggio. [15;18]

Tali attività corrispondono a quelle di post-processing nelle applicazioni di stampa 3D, per esempio con tecniche di stampa a deposizione di filamento (FDM). [19] L'introduzione del cobot in questi contesti non si limita all'automazione puntuale della singola operazione ma può produrre benefici di sistema, in termini di riduzione dei tempi, maggiore stabilità dei risultati e qualità più costante. Parallelamente, lo spostamento verso il cobot delle attività più gravose contribuisce a contenere l'esposizione dell'operatore a rischi dovuti a sovraccarichi fisici, liberazione di polveri tossiche quando si considerano tecniche di stampa SLM, temperature elevate nella cella di lavoro o contatto con il componente su cui si lavora. [20] Le possibilità applicative nella produzione additiva con linee cobotizzate risultano ampie e riconfigurabili, ma strettamente legate alla disponibilità di tool, strategie di programmazione, interoperabilità, conoscenze e formazione adeguata.

### 3.4 SCENARI E GRADI DI COLLABORAZIONE OPERATORE-COBOT

La letteratura presenta numerosi studi dedicati ai criteri di collaborazione e alla definizione degli scenari HRC in ambito industriale. [21] Tali inquadramenti risultano applicabili non solo in celle di lavoro industriali, ma anche a configurazioni su scala ridotta, come postazioni desktop che integrano cobot e stampanti 3D, poiché la natura collaborativa dipende principalmente dalle modalità di interazione e non dalla dimensione dell'impianto. [22]

Di conseguenza, l'introduzione del cobot conduce all'identificazione di scenari collaborativi differenti in funzione dei compiti da svolgere e del relativo livello di autonomia o cooperazione tra i due agenti, ossia operatore umano e cobot. [23] In questo quadro, la HRC può essere interpretata come una variabile di sistema che cambia al variare della ripartizione delle attività e delle regole di coordinamento, determinando assetti operativi più robot-centric, più human-centric o realmente condivisi. [24]

In generale, gli scenari HRC si distinguono in base a pochi elementi semplici:

- quanto spazio condividono operatore e robot
- come si coordinano nel tempo
- come sono divisi compiti e ruoli
- quanto il sistema è adattivo.

All'aumentare di prossimità e simultaneità, aumentano anche i requisiti di sicurezza e la necessità di una progettazione più accurata. [25;26]

In continuità con tali elementi, la collaborazione può essere sintetizzata in quattro scenari o gradi di collaborazione. [27;28]

- Coesistenza. Operatore e cobot operano nello stesso ambiente, ma con aree definite e senza sovrapposizioni operative, svolgendo eventualmente attività separate.
- Sincronizzazione. Operano nello stesso momento sullo stesso pezzo ma su operazioni diverse.
- Cooperazione. Lavorano sullo stesso pezzo in fasi successive, con dipendenza temporale tra una fase e l'altra.
- Collaborazione. Agiscono insieme sullo stesso obiettivo e pezzo, con dipendenza reciproca.

Questa classificazione è utile perché permette di collegare la natura della collaborazione alla struttura del compito e ai vincoli operativi del processo di post-processing in AM. [29;30;31]

Le proposte scientifiche sviluppate nel tempo per descrivere e classificare la collaborazione uomo-robot (nella Tabella 1 si riportano alcuni esempi) sono numerose e tuttavia il denominatore comune della definizione operativa degli scenari è ancorata a norme e standard che ne stabiliscono requisiti e vincoli applicativi.

	Coesistenza	Sincronizzazione	Cooperazione	Collaborazione
(Michaelis et al., 2020) [21]	No interazione. Separazione fisica uomo-robot tramite barriere; assenza di interazione.	Start /stop Interazione. Prossimità uomo-robot con robot inattivo in presenza umana; avvio/arresto gestito dall'operatore.	Nessuna Interazione. Attività sincrona; l'uomo guida o adatta i movimenti del robot.	Collaborazione. Esecuzione congiunta del compito; adattamento dinamico del robot allo stato umano e operativo.
(Aaltonen et al., 2018) [22]	Nessuna coesistenza. Celle robotiche tradizionali recintate; assenza di	Coesistenza. Spazio condiviso; attività uomo-robot non correlate.	Cooperazione. Obiettivo condiviso; interazione	Collaborazione. Lavoro contemporaneo

	condivisione operativa.		superiore alla semplice coesistenza.	uomo-robot su oggetto condiviso.
(Christiernin, 2017) [25]	No collaborazione. Spazio robotico separato e protetto; accesso umano escluso durante il funzionamento.	Robot inattivo. Stesso spazio fisico; robot inattivo quando l'uomo è presente.	Uomo come guida. Robot guidato dall'uomo; adattamento dei movimenti per sicurezza e distanza.	Collaborazione. Lavoro congiunto nello stesso spazio; robot adattivo rispetto ad attività e intenzioni umane.
(Wang et al., 2025) [26]	Tradizionale. Workspace separati con protezioni di sicurezza.	Coesistenza. Stesso workspace senza protezioni; compiti diversi.	Cooperazione. Stessa operazione e stesso workspace; esecuzione in tempi separati.	Collaborazione. Stessa operazione, stesso workspace e stesso tempo.
(Schmidbauer, 2022) [27]	Indipendenza. Uomo e cobot su pezzi separati; assenza di collaborazione.	Sincronizzazione. Stesso pezzo; attività sequenziali tra uomo e cobot.	Simultaneità. Stesso pezzo; attività simultanee ma su compiti separati.	Supporto. Stesso pezzo e stesso compito; supporto cooperativo simultaneo.
(Dzedzickis et al., 2021) [28]	Coesistenza. Celle rimosse; workspace separati.	Sincronizzazione. Workplace condiviso; assenza di simultaneità.	Cooperazione. Compito e workspace condivisi; assenza di interazione fisica.	Collaborazione. Scambio di forze tra operatore e robot.
(El Zaatari et al., 2019) [29]	Indipendenza. Compresenza senza barriere; processi indipendenti su pezzi separati.	Simultaneità. Stesso pezzo e stesso tempo; compiti separati senza dipendenza temporale.	Sequenzialità. Processi sequenziali sullo stesso pezzo; dipendenze temporali uomo-cobot.	Supporto. Obiettivo comune sullo stesso pezzo; dipendenza reciproca e assistenza fisica.
(Taesi et al., 2023) [31]	Coesistenza. Aree di lavoro definite e non sovrapposte; attività separate.	Sincronizzazione. Ambiente condiviso; compiti indipendenti.	Cooperazione. Ambiente e compito condivisi; esecuzione step-by-step.	Collaborazione. Area e compito condivisi; esecuzione concorrente uomo-robot.

Tabella 1. Classificazione degli scenari collaborativi uomo-robot secondo diverse proposte scientifiche

In questo quadro, la specifica tecnica ISO/TS 15066:2016 si colloca nel perimetro dei sistemi robotici industriali disciplinati da ISO 10218-1 e ISO 10218-2. [17] In continuità con tali standard, la ISO/TS 15066 estende l'applicazione ai contesti di robotica collaborativa perché chiarisce come interpretare e applicare i requisiti quando robot e persone operano in prossimità e possono condividere lo spazio; l'elemento distintivo di tale ISO è la trasformazione di principi generali in criteri operativi. [32] La progettazione di una cella collaborativa richiede parametri e vincoli misurabili, ad esempio legati a velocità, distanze di separazione e limiti di forza e pressione in caso di contatto, oltre alla definizione di modalità di funzionamento. [33;34]

In questo panorama regolatorio si colloca attualmente anche il Regolamento (UE) 2023/1230, con piena applicazione dal 20 gennaio 2027. L'impostazione del regolamento tende a rendere più stringente e uniforme l'interpretazione dei requisiti, soprattutto in presenza di sistemi caratterizzati da software, interconnessione, funzioni adattive e digitalizzazione. [35;36]

Dunque, per una cella dinamica HRC riconfigurabile, la sicurezza non può essere trattata come un accessorio di integrazione, ma deve essere incorporata nella logica di cella, nella definizione delle modalità operative e nella gestione del ciclo di vita, inclusi aggiornamenti e riconfigurazioni.

Nel perimetro del progetto di studio, centrato sulla collaborazione uomo-cobot e applicato a un processo additivo con forte variabilità geometrica e con attività a valle della stampa, la normativa non rappresenta un vincolo a posteriori, ma un insieme di requisiti che aiutano e orientano scelte di progetto, allocazione dei compiti e selezione dello scenario collaborativo per fase e sottofase.

### 3.5 POST PROCESSING IN ADDITIVE MANUFACTURING E RUOLO DEGLI AGENTI

I trattamenti applicati ai pezzi immediatamente dopo la fase di stampa sono essenziali per garantire la funzionalità ed estetica dei componenti stampati. Per esempio, nella stampa FDM, sebbene ampiamente utilizzata, non eccelle in precisione rispetto ad altre tecnologie additive, diventa cruciale implementare interventi correttivi per ottimizzare la qualità finale dei pezzi. Pertanto, i trattamenti post-stampa o post-processing sono ampiamente diffusi nell'ambito della AM al fine di garantire la conformità e l'affidabilità dei componenti. [37;38] È importante notare che molti pezzi stampati potrebbero non richiedere una fase di post-elaborazione e alcuni potrebbero richiedere solo la rimozione delle strutture di supporto. [39;40]

Quando la stampante ha completato il suo lavoro, è il momento di procedere con l'estrazione del pezzo. A seconda della stampante e, soprattutto, della tecnologia e dei materiali utilizzati, i processi di estrazione possono variare. Per le stampanti FDM, i pezzi di solito vengono estratti manualmente o con utensili che rendano l'operazione di distacco e presa più facile. In questo caso di studio è proprio il cobot a divenire oggetto di analisi, cercando di identificare quale scenario di collaborazione con l'operatore adottare.

A seguire risulta importante ripulire il pezzo da residui o materiale di supporto. In tale fase è importante considerare l'orientamento e posizionamento del pezzo sul letto di stampa durante il processo di deposizione del filamento. In linea generale, uno dei criteri più utilizzati per scegliere posizionamento e orientamento è quello di utilizzare meno materiale possibile, riducendo al minimo le parti a sbalzo, in modo da stampare meno strutture di supporto e finalizzare il pezzo durante il post-processing in meno tempo possibile. Solitamente i software di slicing offrono opzioni di stampa a riguardo del materiale di supporto; in questo caso di studio è duplice: "Minimizza volume di supporto" e "Minimizza il tempo di stampa". Il materiale di supporto può essere tagliato o spezzato manualmente oppure rimosso inserendo il pezzo stampato in una soluzione a base acquosa, per esempio utilizzando il filamento polimerico PVA come materiale di supporto. La rimozione dei supporti continua a rappresentare un passaggio critico rimanendo ancora oggi una attività prevalente dell'operatore. L'approccio manuale richiede tecnici qualificati, capaci di operare con utensili tradizionali e strumenti portatili, facendo leva su abilità operative, capacità di problem solving e adattamento. [41] Proprio per questa natura artigianale e flessibile, la rimozione manuale può risultare adeguata in contesti caratterizzati da elevata varietà di prodotto e bassi volumi. Tale modalità, tuttavia, presenta limiti strutturali perché è lenta, laboriosa, spesso disordinata e può generare polveri tossiche (in alcune tecniche di stampa 3D), richiedendo DPI e ambienti protetti. [42] Inoltre, con l'esecuzione manuale la scalabilità risulta limitata nel momento in cui la domanda di parti AM cresce in modo significativo.

Pur essendo la rimozione manuale ancora prevalente in molte applicazioni di AM, sono stati sviluppati approcci di automazione del post-processing. In questo quadro assumono rilievo sistemi robotici capaci di adattarsi alla variabilità. Soluzioni robotiche dedicate integrano software avanzati e moduli di intelligenza artificiale per supportare la generazione di percorsi utensile e movimenti del

robot. L'effetto complessivo è un miglioramento in velocità, precisione e ripetibilità nelle operazioni rendendo più praticabile l'inserimento di automazione adattiva nelle fasi.[43]

L'adozione di robot collaborativi nei contesti industriali si configura sempre più come una traiettoria strategica di trasformazione dei sistemi produttivi verso linee progressivamente cobotizzate, anche per mitigare criticità legate alla salute e alla sostenibilità del lavoro e per rispondere alla riduzione della disponibilità di personale qualificato.

Quando necessario, le parti stampate possono essere assemblate con altri componenti per formare un unico oggetto completo. Questo può richiedere l'uso di adesivi, colle, viti o altri metodi di fissaggio. Alcuni pezzi devono essere assemblati o uniti in quanto costituiti da più componenti. In tal caso l'unione dei componenti avviene tramite utilizzo di componenti esterni come viti e parti cave autofilettanti, con operazioni di avvitamento, utilizzo di rivetti, o con metodi ad incastro meccanico. In tutti questi processi del sistema produttivo additivo il contributo del cobot rappresenta un punto potenzialmente importante di automazione collaborativa avanzata, focus del caso di studio. [15;44] Ciononostante, nello scenario attuale industriale AM, confermando ancora la centralità dell'operatore in queste fasi, molte forme di finitura estetica o funzionale e assemblaggio vengono ancora svolte principalmente in modo manuale. [45;46;47]

### **3.6 SISTEMI PRODUTTIVI FLESSIBILI E RICONFIGURAZIONE RAPIDA DEI PROCESSI HRC**

I sistemi produttivi contemporanei operano in contesti caratterizzati da domanda volatile, cicli di vita brevi e crescente personalizzazione, condizioni che rendono progressivamente meno sostenibile il paradigma della linea rigida dedicata a un solo prodotto. [48;49] In tale scenario, la competitività non dipende soltanto dall'efficienza di picco, ma dalla capacità di adattamento a variazioni di mix, volumi e requisiti qualitativi. In risposta a questa evoluzione si sono affermate due famiglie di soluzioni complementari: i sistemi di produzione flessibili (FMS) e i sistemi riconfigurabili (RMS), spesso combinati con celle ibride uomo-robot per aumentare capacità di adattamento e produttività. Se i FMS privilegiano la flessibilità operativa su famiglie di prodotti affini, i RMS enfatizzano la riconfigurazione strutturale rapida in risposta a nuove esigenze. [50]

Nel contesto della presente ricerca, tali concetti vengono applicati a una cella di stampa 3D con post-processing in ambiente HRC, in cui la riconfigurazione riguarda l'allocazione dei compiti tra operatore e cobot. Il passaggio da un pezzo all'altro non coincide quindi con un semplice cambio di programma, ma può richiedere l'adeguamento delle strategie di stacco, dei parametri di traiettoria, degli strumenti impiegati, della configurazione di presa del cobot e, soprattutto, della distribuzione operatore, cobot e uomo-cobot lungo le fasi del workflow.

Per sistema di produzione flessibile si intende un insieme di risorse organizzate in modo da poter produrre più varianti di prodotto senza modifiche strutturali profonde, grazie a capacità di riconfigurazione leggera e a layout non vincolati a un singolo modello. [51] Rispetto ai sistemi dedicati, i FMS accettano una parziale riduzione dell'efficienza di picco per ottenere capacità di adattamento a mix di prodotto variabili e volumi medi o bassi, condizione tipica della personalizzazione di massa. [29;52]

In questa prospettiva, la flessibilità non coincide con la sola riprogrammazione del cobot, ma con la possibilità di riconfigurare in modo leggero le modalità di esecuzione delle stesse fasi in funzione delle caratteristiche del pezzo.

La flessibilità statica non è sufficiente quando il contesto produttivo è altamente dinamico (con variazioni improvvise di mix, disturbi come vibrazioni inaspettati, guasti e interferenze umane o del sistema) e si richiedono flussi di lavoro che possano essere ripianificati, possibilmente anche online. [53;54] In un ambiente cyber-fisico di tipo Industry 5.0, il flusso di lavoro non è più un'unica

sequenza deterministica, ma un insieme di piani alternativi selezionati o ricalcolati sulla base dello stato in tempo reale di risorse e processo. [55;56;57] Nel contesto HRC, questi flussi diventano ulteriormente variabili perché includono decisioni condivise tra umano e robot e devono tenere conto del non determinismo del comportamento umano e della necessità di mantenere il team di lavoro fluente e sicuro. [58;59]

Nel progetto considerato, il workflow post-stampa è stato scomposto in tre fasi (Distacco / Estrazione, Pulizia / Rimozione supporti, Assemblaggio) per confrontare in modo sistematico, per ciascun pezzo, l'andamento del processo nei tre scenari (operatore, cobot, HRC). [60] Tale impostazione evidenzia che il workflow non può essere trattato come sequenza invariabile. La sua forma e i suoi colli di bottiglia dipendono da molteplici elementi osservabili come: accessibilità geometrica, presenza di supporti, numero di componenti, rischio di deformazione, ecc. Ciò significa che una stessa fase, per esempio, può mantenere un carattere prevalentemente uomo in alcuni pezzi e assumere un profilo più cooperativo in altri.

In termini generali, se la flessibilità consente di gestire variazioni di mix senza interventi profondi sull'impianto, la riconfigurazione implica un adattamento più incisivo della configurazione del sistema, con effetti diretti sulle modalità operative e sulle regole decisionali che governano l'esecuzione. [61;62]

A differenza della sola automazione, dove la riconfigurazione può essere pianificata off-line e applicata in fasi di fermo impianto, nei sistemi HRC si apre la possibilità di riconfigurazioni rapide e locali. Tali riconfigurazioni possono assumere forme diverse come variazione del grado di automazione di un sotto-processo, re-assegnazione dinamica di compiti fra operatori e cobot in risposta a variazioni di carico, guasti o preferenze degli operatori. [27;63]

Nel caso studio, la riconfigurazione si manifesta nel passaggio tra i sei casi applicativi. Non si tratta di semplici variazioni di programma, ma di modifiche delle logiche operative lungo le fasi del post-processing. Questi esiti indicano che, in una cella collaborativa di post-processing additivo, la riconfigurazione non è soltanto meccanica, ma anche decisionale, perché riguarda la scelta dello scenario operativo più coerente per fase e sottofase.

Nel caso in esame, la simulazione dei tempi ha svolto una funzione decisionale consentendo di confrontare scenari alternativi e di esplicitare, per ciascun pezzo, dove la riconfigurazione si concentra e quali vincoli la guidano.

L'introduzione o la modifica di varianti di prodotto incide sulle geometrie, sulle tolleranze, sui materiali e sui requisiti di processo e rappresenta uno dei principali driver di riconfigurazione. [64]

Nelle simulazioni oggetto di studio, le variazioni tra i pezzi hanno mostrato che non è sufficiente descrivere la variabilità come più o meno complessità, perché gli effetti operativi dipendono dal tipo di vincolo dominante. [65] Queste variabili hanno avuto ricadute dirette su accessibilità e presa per il cobot, rischio di flessione o rottura, necessità di intervento manuale, strategie di traiettoria e tempi ciclo, confermando che la riconfigurazione deve considerare feature geometriche e produttive come input primari. [66]

Quando cambiano le caratteristiche del pezzo, la decomposizione del processo fasi, sottofasi, operazioni e istruzioni deve essere rivista. In ambito HRC, i task di alto livello possono rimanere invariati, mentre le attività elementari cambiano in numero, sequenza o modalità di esecuzione. Anche le operazioni a livello di traiettoria richiedono l'aggiornamento di punti, traiettorie e parametri di velocità e forza per accomodare nuove geometrie. Anche le istruzioni operative per l'operatore devono essere rigenerate per guidare correttamente l'esecuzione, evitando errori dovuti a discrepanze tra rappresentazione e realtà. La riconfigurazione non coincide con un cambio fisico della cella, ma con un aggiornamento della scomposizione operativa e delle istruzioni necessarie a garantire esecuzione corretta e sicura.

La riconfigurazione in un sistema HRC non è mai gratuita in quanto ogni modifica alla configurazione, sia essa geometrica, operativa o di allocazione, comporta tempi, costi, limita transitoriamente la disponibilità di risorse e deve rispettare vincoli di sicurezza, qualità, produttività ed ergonomia. [67] Ne consegue che la riconfigurazione va trattata come un problema decisionale multi-obiettivo, in cui si confrontano alternative alla luce di indicatori chiave di prestazione e di restrizioni tecnologiche e organizzative. [68]

La riconfigurazione del caso studio non è stata assunta come ipotesi di progetto, ma osservata nel passaggio tra le differenti e le evidenze riscontrate consentono di discutere fattori e vincoli su basi operative misurabili e valutabili per quanto concerne lo scenario HRC nella prospettiva geometria, compositiva e di manovrabilità.

### 3.7 MODELLI DECISIONALI PER L'ALLOCAZIONE DEI COMPITI E SCORE DELLE CARATTERISTICHE

L'allocazione dei compiti costituisce il ponte tra flessibilità e riconfigurazione del sistema e performance operative in quanto per ciascun compito elementare occorre stabilire se l'esecuzione debba essere assegnata all'operatore, cobot o a una modalità ibrida. Nei sistemi HRC la decisione non si riduce a chi fa cosa, ma richiede un modello in grado di adattarsi alla variabilità del pezzo, del layout e delle condizioni operative, integrando capacità, tempi, rischi, preferenze e obiettivi.

Le simulazioni analizzate mostrano in modo empirico che l'allocazione non può essere assunta come statica. Tale variabilità suggerisce che l'allocazione debba essere guidata da criteri espliciti e verificabili, evitando scelte tecnologiche aprioristiche. [69]

In letteratura si riscontrano diverse classi di modelli decisionali per l'allocazione: metodi rule-based e matrici di assegnazione, metodi di ottimizzazione e approcci capability-based che mappano requisiti dei compiti e capacità di umano e robot, introducendo indici di congruenza a supporto dell'assegnazione. [70;71]

Per supportare decisioni di allocazione scalabili è utile introdurre uno score delle caratteristiche di prodotto e processo, formalizzate in variabili (Tabella 2), che sintetizzi la compatibilità con operatore e/o cobot. Tali score sono tipicamente calcolati a partire da feature geometriche e produttive. [72;73;74;75;76]

Classe di variabili	Esempi	Impatto sull'allocazione HRC
Geometriche	Dimensioni, forma, accessibilità, cavità	Condizionano presa, traiettoria e raggiungibilità del cobot
Compositive	Numero componenti, assemblaggio, giunzioni	Aumentano coordinamento, sequenza operativa e complessità del task
Manipolative	Supporti, residui, rigidità, danneggiabilità, tool	Determinano la praticabilità reale dell'intervento umano, robotico o HRC
Temporal	Tempo fase, sottofase, ciclo	Permettono il confronto tra scenari alternativi
Ergonomico-sicurezza	Stabilità pezzo, rischio operatore, uso utensili	Possono rendere vantaggioso il supporto del cobot anche con risparmi temporali limitati

Tabella 2. Variabili rilevanti per l'allocazione dei compiti in sistemi HRC in questo progetto di studio.

Le feature geometriche (dimensioni, forma, posizione, orientamento, accessibilità, esigenza di tolleranze strette) influenzano difficoltà di presa e posizionamento per il cobot e carico fisico per l'umano. Le feature produttive (tempo standard di esecuzione, frequenza di ripetizione, criticità di qualità, rischi ergonomici, necessità di feedback sensoriale come forza, tatto e vista) contribuiscono a definire l'opzione allocativa più coerente.

Esempi in letteratura includono indici di riconfigurabilità a livello di macchina, capability indicator per l'allocazione variabile e score per la formazione di famiglie di pezzi e per la selezione di configurazioni RMS. Più recentemente, approcci basati su AI generativa propongono l'estrazione automatica di descrizioni di task, comportamenti, feature e vincoli, con generazione di piani e allocazioni iniziali da rifinire mediante ottimizzazione o revisione esperta. [77] In questa prospettiva, gli score di feature geometriche e produttive costituiscono un linguaggio intermedio tra rappresentazione del prodotto/processo e modelli decisionali, facilitando progettazione iniziale e riconfigurazione rapida dei sistemi HRC al variare delle varianti di prodotto e del contesto operativo.

## 4 GIUSTIFICAZIONE METODOLOGICA

---

La presente tesi si configura come uno studio empirico-sperimentale controllato, a carattere comparativo e multi-caso, con componenti quasi-sperimentali dovute alla natura reale del contesto osservato e ai vincoli operativi che ne limitano la piena manipolabilità.

Il metodo adottato combina un significativo grado di controllo sperimentale, la confrontabilità tra scenari e la successiva formalizzazione del dato, trasformando l'evidenza osservata in una struttura valutativa e computabile a supporto della riconfigurazione rapida del processo. Tale impostazione nasce dall'esigenza di studiare la riconfigurazione rapida dei processi di post-processing nella stampa 3D in ambienti HRC non come problema puramente teorico o simulativo, ma come fenomeno tecnico osservabile in una cella collaborativa uomo-cobot, nel quale le variazioni del manufatto modificano tempi, operazioni, strumenti, criticità di manipolazione e allocazione dei compiti. In questa prospettiva, il lavoro si colloca in una logica dove l'obiettivo non è dimostrare la sostituzione dell'operatore, ma chiarire in quali condizioni la presenza del cobot produca un vantaggio reale e in quali, invece, sia l'operatore che continui a rappresentare l'agente più efficace e adattivo. Il valore del metodo non risiede soltanto nella campagna di test e simulazioni, ma nella capacità di ricondurre i risultati a una struttura coerente, robusta e trasferibile in ambiente software.

La tesi si fonda così su una doppia esigenza:

- comprendere il comportamento del sistema produttivo al variare del pezzo
- trasformare la conoscenza operativa in una forma leggibile, confrontabile e progressivamente computabile.

La ricerca combina quattro caratteri principali

- Natura empirica. I dati derivano da osservazioni dirette, prove laboratoriali e misurazioni ottenute in una cella reale.
- Dimensione sperimentale controllata. Le simulazioni sono state pianificate preventivamente e svolte mantenendo costanti le condizioni principali della cella, così da rendere confrontabili i casi osservati.
- Impostazione multi-caso e comparativa. Il campione comprende sei manufatti selezionati per rappresentare condizioni geometriche, compositive e operative differenti. Ciascuna simulazione è stata inoltre studiata attraverso tre scenari, solo uomo, solo cobot e configurazione ibrida HRC, riferiti alle tre fasi del workflow e, dove previsto, anche alle varianti con e senza supporto; ne deriva, ai fini dell'acquisizione dei tempi, un insieme di 21 studi effettivi utile a valutare configurazioni operative, distribuzione delle attività e convenienza dei diversi scenari.
- Orientamento metodologico-informatico. Il dato acquisito non resta nella forma grezza dell'osservazione, ma viene ordinato, sintetizzato e implementato in un ambiente software destinato alla conservazione e al riutilizzo della conoscenza prodotta.

Considerando una cella di lavoro AM, nei processi di post-processing un criterio di riconfigurazione non può essere dedotto esclusivamente da una teoria generale poiché dipende da fattori che emergono nel "contatto reale" con il processo e la sua operatività: difficoltà di presa, accessibilità del cobot, presenza del supporto, sequenza di distacco, necessità di assemblaggio, vincoli del layout, differenze di tempo e distribuzione del lavoro. Per questa ragione la ricerca non parte da un modello astratto ma dalla cella e dalla produzione dei manufatti, assumendo il dato reale come base primaria dell'analisi verificato realmente nelle osservazioni laboratoriali

L'impianto metodologico della tesi è stato costruito attorno ad alcune domande di interesse:

- Che cosa accade quando avviene il cambio pezzo?
- Qual è il ruolo dell'operatore nel post-processing collaborativo?

- Quando e come il cobot produce un vantaggio reale nel ciclo?
- Come vengono allocate le attività tra uomo, cobot e configurazione ibrida?
- A quale livello del processo si identifica la convenienza operativa, nella fase o sottofase?

Queste domande ispirano il disegno della ricerca e ne organizzano l'intero percorso concettuale in quanto guidano la scomposizione del workflow, orientano la raccolta dei tempi, sostengono il confronto tra scenari e rendono possibile la successiva formalizzazione del dato. Il metodo collega così variazione del pezzo, distribuzione delle attività, risultati sperimentali e criteri di supporto decisionale.

Per rispondere alle domande di ricerca, il workflow è stato scomposto in tre fasi: distacco o estrazione dal letto di stampa, pulizia preliminare e asportazione del supporto, assemblaggio quando presente. Tale scomposizione consente di isolare le variabili critiche del processo e di osservare, per ciascuna fase, differenti configurazioni di intervento umano, robotico o ibrido.

L'analisi non si arresta tuttavia al solo livello di fase. Quando necessario, essa scende al livello di sottofase, poiché è proprio qui che la collaborazione reale tra operatore e cobot diventa più leggibile. Una stessa fase può infatti contenere sottofasi che richiedono regole di collaborazione differenti; di conseguenza, l'attribuzione dello scenario viene condotta al livello di sottofase, dove la ripartizione dei compiti e la dinamica collaborativa risultano osservabili con maggiore precisione. L'allocazione dei compiti rappresenta quindi una variabile metodologica centrale e non un esito secondario dell'analisi.

Le variabili osservate sono riconducibili a:

- i tempi di fase, sottofase e ciclo
- caratteristiche geometriche e compositive del manufatto
- condizioni operative e manipolative
- scenario di esecuzione.

Questa matrice consente di leggere ogni risultato non solo in termini di durata, ma anche in termini di distribuzione delle attività e di convenienza operativa.

Il dato osservato viene selezionato, ordinato e sintetizzato per definire un criterio di valutazione del processo capace di rendere confrontabili i casi studio. Tale criterio viene poi trasferito nel modello algoritmico, dove assume una funzione descrittiva, comparativa e decisionale. Il sistema organizza i parametri del pezzo, integra tempi e fattori sintetici, archivia i casi e restituisce lo scenario operativo più opportuno tra quelli praticabili. Il fattore di forma, articolato nelle componenti geometrica, compositiva e manipolativa, svolge in questo passaggio un ruolo centrale; esso non sostituisce i tempi sperimentali, ma li integra, permettendo di descrivere il pezzo in forma sintetica e di collocarlo in una struttura computabile coerente con il processo reale.

In sintesi, la ricerca procede per trasformazione progressiva del dato (Tabella 3) che parte dalla necessità di riconfigurazione del sistema al suo sostegno finale per un supporto decisionale futuro riconfigurativo.





*Tabella 3. Evoluzione della ricerca secondo trasformazione progressiva del dato*

La Tabella 3 sintetizza il percorso logico della ricerca, evidenziando il passaggio dall’osservazione sperimentale alla formalizzazione del dato in ambiente software. Il nucleo scientifico della tesi risiede nella costruzione del criterio di valutazione, nella solidità del dato e nella coerenza tra laboratorio, formalizzazione e output del software.

Il capitolo successivo è dedicato alla descrizione del contesto fisico e hardware entro cui si sviluppano le simulazioni e per mostrare come il workflow di post-processing, assunto qui come oggetto metodologico della ricerca, venga successivamente analizzato nella sua concreta configurazione sperimentale.

## 5 CELLA DI LAVORO, WORKFLOW, SIMULAZIONI E I MIGLIORI SCENARI COLLABORATIVI OSSERVATI

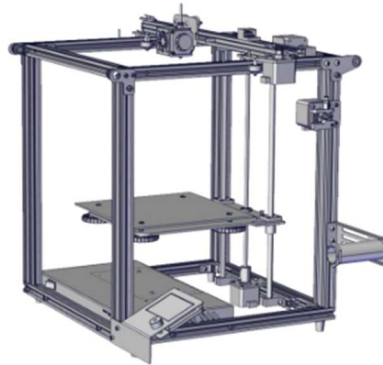
---

### 5.1 INQUADRAMENTO DELLE SCELTE HARDWARE E DEL LAYOUT SPERIMENTALE

Le scelte relative all'hardware, al layout e alle condizioni operative sono state orientate alla massimizzazione della performance e alla costruzione di un ambiente controllato in grado di garantire confrontabilità tra scenari differenti. Nell'Appendice 11.1 è possibile verificare ogni valore dimensionale e il criterio logico di ogni scelta riguardante il layout e i componenti funzionali presenti.

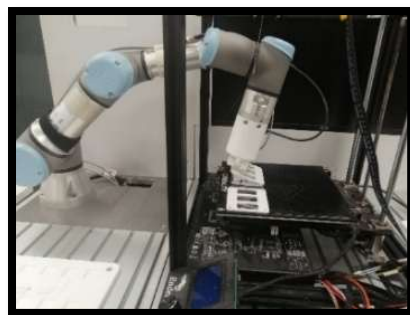
La cella è costituita da tre macro-componenti funzionali [78;79]:

- un sistema di produzione additiva basato su stampante 3D con tecnologia FDM e materiale PLA (Figura 1)



*Figura 1. Modello stampante 3D laboratorio*

- un manipolatore antropomorfo collaborativo disposto sulla sinistra della stampante 3D (Figura 2)



*Figura 2. Modello Cobot UR3-e durante una operazione di presa*

- una postazione operatore banco di lavoro e due postazioni operative

Tale configurazione del layout riflette una struttura HRC a bassa automazione, in cui il processo è distribuito tra operazioni automatizzate e interventi manuali riguardanti il post-processing.

Il posizionamento della stampante 3D, cobot e banco di lavoro non viene mai modificato in funzione della singola simulazione e l'ordine produttivo risulta essere in senso antiorario come illustrato in Figura 3 e 4.

Durante le simulazioni non vengono mai effettuati spostamenti finalizzati a facilitare la manovrabilità o l'esecuzione di specifiche fasi operative, osservando una configurazione della cella di lavoro sempre fissa. Per questo motivo e averne sempre tracciabilità qualora avvenisse uno spostamento dovuto ad un urto sono stati calcolati a priori:

- dimensioni del banco e spazio di lavoro
- utensili, tool e strumenti di lavoro
- distanze fra cobot, stampante e pannello di delimitazione
- dimensioni esterne e interne della stampante

In questa maniera aumenta il grado di difficoltà del processo di riconfigurazione per ogni nuova simulazione perché questa configurazione introduce limitazioni cinematiche che influenzano direttamente la pianificazione (o meglio programmazione) dei movimenti e l'accessibilità alle aree operative nel volume di stampa.

Operativamente parlando, in alcuni casi, una diversa disposizione degli elementi della cella avrebbe senza dubbio agevolato delle singole operazioni o specifiche fasi del processo.

La scelta di mantenere invariato il layout per ipotesi consente tuttavia di garantire uniformità sperimentale e confrontabilità tra le simulazioni e anche perché questa scelta risponde a una logica di realismo applicativo perché nei contesti industriali reali solitamente l'introduzione di nuovi processi operativi avvengono su sistemi già esistenti.

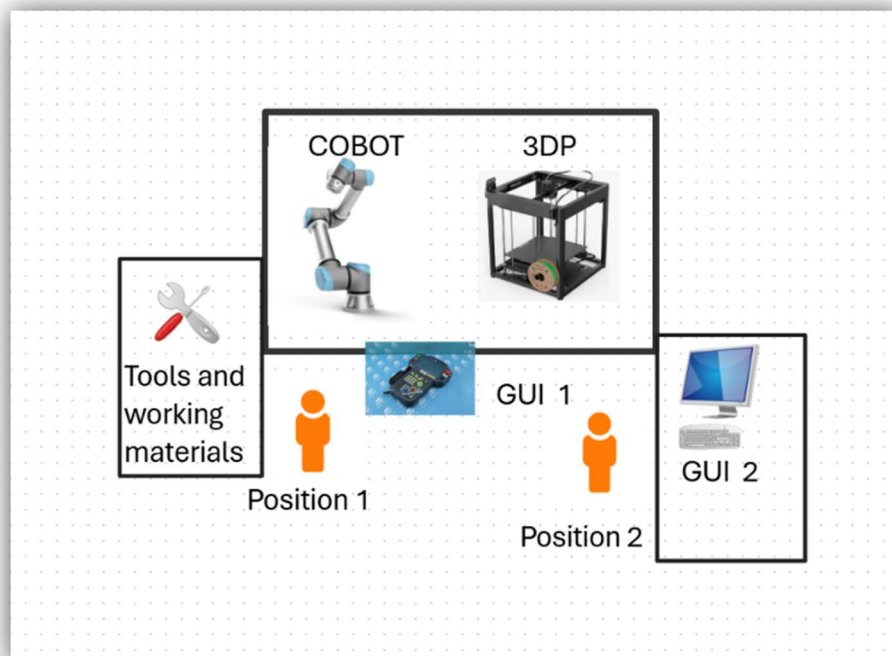
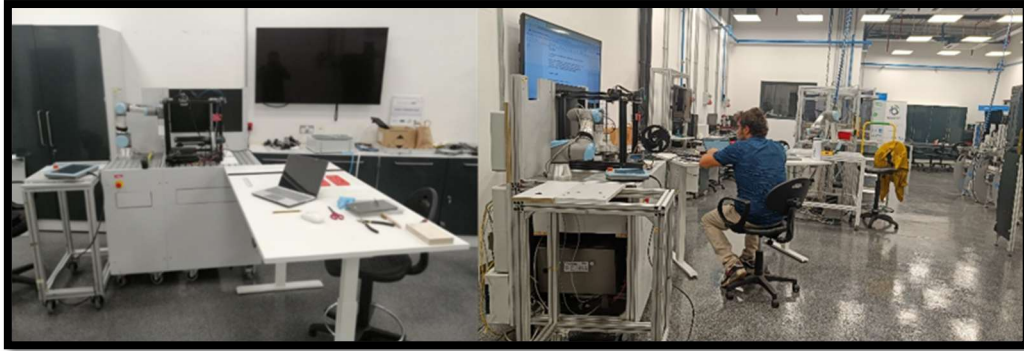


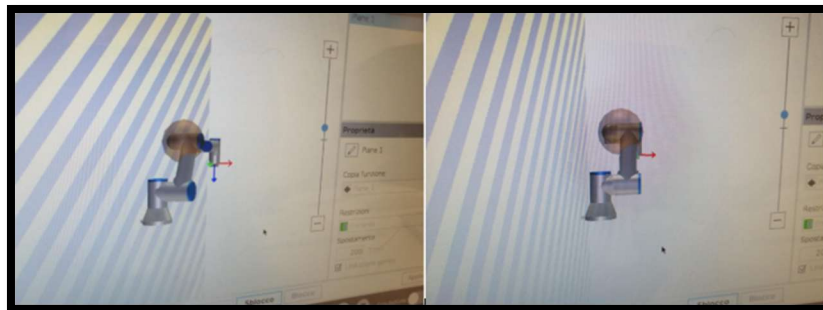
Figura 3. Layout grafico cella di produzione



*Figura 4. Layout reale cella di produzione*

Il manipolatore collaborativo è stato integrato nella cella con un ruolo di supporto alle operazioni di movimentazione e interazione con l'area di stampa e per quanto concerne la sua impostazione dei parametri principali, quali carico utile e riferimento del centro di gravità del TCP, è stata effettuata coerentemente con le caratteristiche del materiale trattato (leggero in quanto PLA) e del set-up del TCP configurato precedentemente

Per quanto concerne la sicurezza operativa è stato definito un piano di sicurezza (safety plan) basato su vincoli spaziali, derivati dalla posizione limite del manipolatore rispetto agli elementi strutturali della cella come il pannello verticale di delimitazione retrostante del banco di lavoro. L'adozione di superfici di sicurezza e la protezione estesa non solo sul TCP dell'end-effector ma anche ai segmenti del braccio robotico (gomito del cobot) rispondono alla necessità di prevenire collisioni in uno spazio operativo ristretto. (Figura 5)



*Figura 5. Setup corpo robot per safety plan*

Un ulteriore elemento progettuale riguarda la modifica del piano di stampa, realizzata attraverso un adattamento dell'altezza del letto rispetto al banco di lavoro fissa (Figura 6). Questa scelta è motivata da una duplice esigenza:

- aumentare lo spazio utile per le manovre del manipolatore, riducendo il rischio di collisioni con la struttura della stampante
- introdurre una misura preventiva volta a limitare sollecitazioni meccaniche potenzialmente critiche per l'integrità del sistema del piatto di stampa soprattutto per sollecitazioni verticali



Figura 6. Supporto protezione deformazione montante piatto di stampa

Nel complesso, l'insieme delle scelte descritte configura un ambiente sperimentale controllato, caratterizzato da vincoli strutturali espliciti e da un livello di complessità sufficiente a rappresentare condizioni operative realistiche. Tale impostazione costituisce la base per l'analisi del workflow operativo.

## 5.2 INQUADRAMENTO DEL WORKFLOW POST-PROCESSING NELLA CELLA DI LAVORO

Nel contesto di lavoro oggetto di studio, l'interesse è rivolto non alla stampa 3D come attività produttiva e dunque di stampa, ma all'insieme di operazioni che avvengono successivamente la stampa, a valle della stampa, e che risultano essere necessarie per rendere il pezzo e i suoi componenti pronti alle attività di rifinitura estetica o funzionale del pezzo.

L'analisi parte con l'impianto pilota configurato come cella di lavoro stabile e fissa, nel quale operatore e cobot possono intervenire, singolarmente o collaborativamente. Questa impostazione consente di osservare il processo in condizioni operative concrete, mettendo in evidenza non solo i tempi, variabile di riferimento di questo studio, ma anche i vincoli fisici e meccanici, spaziali e gestionali che caratterizzano il maneggiamento dei pezzi e l'esecuzione delle diverse fasi con la adeguata capacità manipolativa e operativa necessaria.

Considerando questa struttura operativa, come punto di partenza, si considera il sistema privo di automatismo, questo per rispettare una logica tramite la quale si osserva il flusso operativo in una esecuzione essenziale solo operatore e, a seguire, comprendere ciò che avviene quando cobotizziamo la cella e quelli che sono gli impatti nel ciclo produttivo.

Gli aspetti centrali dell'analisi si fondono su più punti cardini:

- osservazione del workflow [80]
- identificazione di tutte le fasi sottofasi/operazioni che compongono il ciclo
- identificazione e considerazioni sui vincoli operativi e manipolabilità [81]
- analisi del ruolo degli agenti uomo o cobot in forma singola o simbiotica
- costruzione di una base di informazioni ordinata utile alla successiva lettura del processo in chiave di riconfigurazione

Il workflow post-processing è stato scomposto in tre macro Fasi:

- Distacco / Estrazione dal letto di stampa (Fase 1)
- Pulizia preliminare e asportazione del materiale di supporto (Fase 2)
- Assemblaggio quando presente (Fase 3)

Con questa scomposizione è stato possibile isolare le variabili operative critiche e di confrontare, per ciascuna fase, tre scenari collaborativi:

- Solo uomo
- Solo cobot

- Configurazione ibrida HRC

Si ottiene una matrice fasi/scenari come riportato in Figura 7.

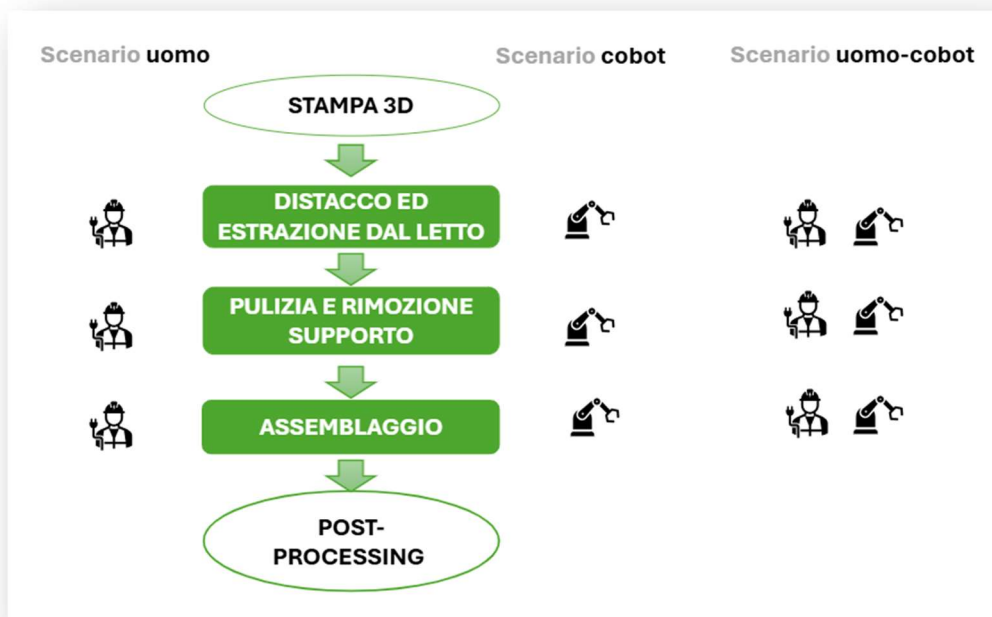


Figura 7. Matrice fasi /scenari possibili

Il workflow non risulta neutro rispetto alla configurazione adottata in quanto il comportamento del sistema varia sempre in funzione di diversi fattori che possono essere raggruppati in tre categorie per riscontro reale operativo mentre venivano eseguite le attività laboratoriali [82]:

- geometria del pezzo
- composizione del pezzo e attività di assemblaggio eventuale
- comportamenti inerenti all'operatività e manipolabilità del pezzo che impatta nel comportamento collaborativo tra operatore e cobot

### Fase 1: Distacco/ Estrazione dal letto di stampa

La Fase 1 è necessaria per separare il pezzo o suoi componenti dal letto di stampa renderli successivamente afferrabile e mobili per l'estrazione dal volume di stampa della stampante. È risultata una fase molto delicata perché coinvolge diversi aspetti:

- meccanica dei movimenti
- programmazione del cobot
- studio degli spazi di manovra
- identificazione di prassi per la sicurezza operativa sia della persona che dell'impianto

La fase 1 è costituita da due sottofasi:

- Distacco (Sottofase 1 A)
- Presa ed Estrazione dal volume di stampa (Sottofase 1 B)

Il distacco rappresenta il primo momento critico della Fase 1 e, dell'intero ciclo. L'efficacia di questa operazione dipende da svariati fattori come:

- forza e accelerazione da applicare
- spazio di manovra

- necessita di tool specifici
- presenza di supporto
- quantità di materiale (manufatto e supporto) aderente al piatto di stampa
- posizionamento del pezzo sul letto di stampa
- orientamento del pezzo sul letto di stampa

La sottofase 1A si è dimostrata un importante vincolo operativo che ha caratterizzato tutte le simulazioni. A livello logico e come punto di studio di questa sottofase, l'obiettivo era riuscire ad ottenere, o analizzare, l'"effetto click", identificando questo come l'insieme delle operazioni di:

- distacco
- presa e scardinamento dai punti radice del supporto dal letto
- movimentazione ed estrazione dal volume di stampa

La finalità è provare ad ottenere la realizzazione dell'intera fase in una unica azione senza rilascio del pezzo.

Prima di iniziare fisicamente le simulazioni in laboratorio, si è ritenuto opportuno sperimentare quella che è la forza e accelerazione del braccio antropomorfo necessaria per poter identificare i parametri minimi e massimi necessari a procurare un distacco efficace senza compromettere o deformare il pezzo, mantenendo in sicurezza anche l'impianto e il letto di stampa. Per questa ragione sono state condotte preliminarmente diversi esperimenti preliminari di calibrazione dell'accelerazione del cobot consultabili nell'Appendice 11.2, aventi come scenario di studio le seguenti condizioni:

- accelerazione lineare parallela letto di stampa
  - o con pinza inclinata
  - o con pinza perpendicolare al piatto
- accelerazione rotazionale
- parallela letto di stampa

Nella sottofase 1B, "Presa ed Estrazione dal volume di stampa" risulta importante identificare il punto più opportuno di contatto per evitare rotture o deformazioni. Tendenzialmente per l'operatore risulta importante identificare la posizione di presa più adatta e il livello di forza opportuno; contrariamente quando viene considerato il cobot il processo richiede un maggiore livello di controllo e programmazione preventiva. [83]: Con il cobot bisogna considerare:

- la definizione di traiettorie e waypoints
- assicurare delle distanze opportune fra il TCP del cobot dal pezzo altamente e montanti della stampante
- identificare forza di presa e velocità di movimentazione senza rischio di perdita del pezzo.

È un'operazione onerosa per via soprattutto nel tempo di programmazione, rischio deformazione e rischio urti.

## **Fase 2: Pulizia preliminare e asportazione del materiale di supporto**

La fase 2 è costituita da due sottofasi:

- Pulizia preliminare e asportazione del materiale di supporto (Sottofase 2 A)
- Movimentazione dal punto di fermo del pezzo alla posizione di partenza per la Fase 3 o deposito del pezzo quando la Fase 3 non è attiva (Sottofase 2 B)

La Sottofase 2A risulta essere una fase dominante strettamente correlata alle capacità e maestria dell'operatore nel pulire o asportare il materiale di supporto. Quando il materiale di supporto non è considerato, l'operazione consiste nella eliminazione di filamenti residui visibili.

In tale Sottofase l'utilizzo del cobot è di stabilizzatore, come una morsa stabile, permettendo l'utilizzo di entrambe le mani libere e migliorando in qualità e sicurezza.

La Sottofase 2 B si identifica solo in questa operazione altrimenti questa sottofase quando è associata all'operatore non esiste.

Nello scenario solo cobot, la Fase 2 non è mai risultata finalizzabile. Tale limite dipende dall'assenza di dime o sistemi di fissaggio dedicati, dalla mancanza di un secondo agente cobot e dalla non adozione di una procedura di rimozione dei supporti in soluzione acquosa, che avrebbe richiesto l'impiego di un materiale solubile specifico, quale ad esempio l'alcol polivinilico (PVA).

### Fase 3: Assemblaggio (quando presente)

La Fase 3, come le precedenti, è anch'essa costituita da due sottofasi ma, in tale circostanza, la sottofase di movimentazione dal punto di fermo al punto di deposito non è stata considerata in quanto, in una fase di assemblaggio, l'operatore verifica manualmente l'efficacia ottenuta dall'operazione prelevando il pezzo dalle pinze del cobot; per questo motivo l'assemblaggio avrà sempre un tempo univoco che include le due sottofasi nonostante gli scenari possano essere differenti. Come la Fase 2, anche la 3, non si finalizza mai nello scenario solo cobot. La fase 3 non è sempre attiva in tutti i manufatti studiati, solo in due simulazioni.

Avendo scomposto ulteriormente le fasi, in sottofasi aumentano le combinazioni possibili come riportato nella Figura 8.





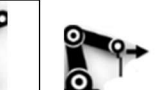
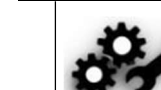



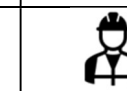
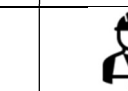
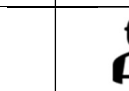



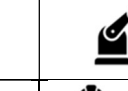
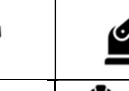
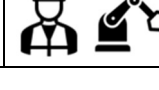



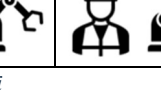
Stampa	Sottofase1A	Sottofase1B	Sottofase2A	Sottofase2B	FASE 3	Post
 Stampa	 Distacco	 Estrazione	 Pulizia	 Movimentazione	 Assemblaggio	 Post-Processing
Scenari possibili						...post processing altro
						
						

Figura 8. Matrice sottofasi /scenari possibili

### 5.3 RISPOSTA DELLA STAMPA 3D AL SETTORE AUTOMOTIVE E PRESENTAZIONE DELLE SIMULAZIONI

L'industrializzazione della stampa 3D va oggi letta come un processo di progressiva integrazione della manifattura additiva entro sistemi produttivi reali e, in tale prospettiva, la 3DP non coincide più con una tecnologia relegata alla sola prototipazione, ma tende a collocarsi come leva produttiva utile nei contesti caratterizzati da elevata variabilità, richiesta di personalizzazione e necessità di riconfigurazione rapida.

Questa trasformazione risulta particolarmente evidente nel settore automotive e trasporti. In tali ambiti, la produzione non può più essere interpretata unicamente secondo la logica della grande serie standardizzata. La crescente differenziazione dei modelli, la richiesta di componenti specifici per

mercati differenti, la pressione verso l'alleggerimento e la crescente attenzione alla sostenibilità stanno progressivamente spostando l'interesse verso soluzioni produttive più adattive.

Uno degli aspetti più rilevanti di questa trasformazione riguarda la personalizzazione. Nel settore automotive, i segmenti premium e luxury, ma progressivamente anche in fasce di mercato più ampie, l'automobile tende a essere interpretata come prodotto configurabile, nel quale abitacolo, accessori, finiture e alcuni elementi funzionali vengono adattati a esigenze specifiche.

In tali contesti la produzione standardizzata perde parte della propria centralità, mentre aumenta il valore della iper-personalizzazione, della tiratura ridotta e della possibilità di realizzare componenti ad alto contenuto simbolico o funzionale. La stampa 3D si mostra particolarmente adatta a questi scenari perché permette di produrre parti unitarie, micro-lotti e componenti altamente personalizzati in modo economicamente più sostenibile rispetto ai processi convenzionali. Ciò vale sia per elementi di abitacolo e dettagli interni, sia per ricambi, cover, inserti, console, supporti e particolari che devono adattarsi a configurazioni poco standardizzate. Nei veicoli di alta gamma e nei modelli a bassa tiratura, la manifattura additiva consente dunque di conciliare libertà progettuale, riduzione dei tempi di sviluppo e differenziazione del prodotto.

A questa dimensione si affianca quella dei ricambi e delle sostituzioni, particolarmente rilevante sia nell'automotive sia nel più ampio settore dei trasporti. La manifattura additiva offre qui un vantaggio specifico ossia la possibilità di produrre on-demand componenti non più facilmente reperibili, limitando la dipendenza dalle scorte fisiche e riducendo i costi associati a lotti minimi non economicamente sostenibili. Tale logica risulta importante per i veicoli storici, per le auto d'epoca, per i mezzi da collezione e per tutte quelle configurazioni nelle quali il valore del singolo pezzo è elevato, pur in presenza di volumi molto bassi. In questo senso, la stampa 3D si lega direttamente ai temi della manutenzione evoluta e del reverse engineering.

Anche nel settore dei trasporti come nei sistemi ferroviari, nei bus, nei veicoli speciali e in altri mezzi di mobilità il vantaggio non è solo produttivo, ma organizzativo perché la parte può essere realizzata quando serve. Tale condizione risulta particolarmente rilevante per mezzi che hanno una lunga vita operativa o che richiedono continui adattamenti manutentivi.

Accanto a personalizzazione e ricambi, un altro asse fondamentale come risposta al settore automotive della stampa 3D, riguarda l'alleggerimento dei componenti. La riduzione della massa del veicolo è infatti una leva strategica sia in termini prestazionali sia in termini ambientali, perché incide su consumi, autonomia, emissioni e uso più efficiente delle risorse. La manifattura additiva risulta interessante in questo senso poiché consente di ottimizzare la distribuzione del materiale, integrare più funzioni nello stesso componente e ridurre, in alcuni casi, la necessità di assemblaggi complessi. In tale contesto assume interesse anche il crescente impiego di materiali specifici e compatibili per il loro utilizzo come quello per componenti interni, pannellature, rivestimenti, elementi di finitura, tappetini, coperture e moduli secondari del veicolo. Il loro sviluppo segnala che la trasformazione industriale non riguarda soltanto il modo di produrre, ma anche il modo di selezionare i materiali in funzione di sostenibilità, peso, riciclabilità e integrazione con i processi. [84]

Per il presente lavoro, il materiale di studio risulta il PLA, poiché esso rappresenta uno dei polimeri più diffusi e uno dei materiali più immediatamente associabili alle logiche di stampa 3D considerate nel settore automotive il PLA non può essere letto come materiale universalmente valido per l'intero settore automotive perché presenta limiti noti in termini di stabilità termica, resistenza all'urto, plasticità sotto carico e durabilità in condizioni severe. [85] Per questa ragione la sua applicazione industriale appare maggiormente coerente con componenti non strutturali, elementi interni, accessori, parti di finitura, prototipi funzionali e componenti sottoposti a sollecitazioni moderate.

Alcuni casi reali mostrano che il PLA ha già trovato applicazione in componenti concreti dell'automobile, soprattutto in combinazione con altre matrici e fibre naturali. In questa direzione si

collocano, ad esempio, la copertura della ruota di scorta della Toyota Raum, realizzata con PLA e fibre di kenaf, nonché alcune applicazioni su modelli Toyota e Lexus nelle quali formulazioni PP/PLA bio-based sono state utilizzate per finiture laterali, elementi di protezione, pannelli del pavimento, aree di contenimento, ecc. In altri casi il PLA compare in pannellature, sedute, tappetini, console interne e materiali di rivestimento, come mostrano alcune applicazioni associate a Mazda e Mitsubishi, dove l'interesse è stato rivolto soprattutto a componenti interni, leggeri e a maggiore compatibilità con esigenze di sostenibilità. [86] In altre parole, l'utilizzo del PLA emerge come materiale fortemente utilizzato nel settore.

Nel presente progetto di tesi si vuol evidenziare che esiste già una fascia concreta di applicazioni nella quale la produzione additiva a filamento risulta tecnicamente e industrialmente coerente. Quanto più la stampa 3D si diffonde come tecnologia produttiva in automotive e trasporti, tanto più emerge anche la sua efficacia industriale la quale, non dipende esclusivamente dalla stampa del componente ma da tutto ciò che accade dopo. [87] Quando il pezzo cambia, cambiano tutte le variabili geometriche, compositive e di manovrabilità. Nei contesti caratterizzati da piccoli lotti, personalizzazione, ricambi e rapida variazione del manufatto, si richiedono capacità di produzione e capacità di riconfigurazione del workflow in funzione del pezzo e delle sue criticità operative.

Con questo scenario industriale attuale del settore automotive, si vuol giustificare l'interesse verso un'analisi del post-processing che non sia soltanto descrittiva, ma orientata a comprendere in quali condizioni il sistema produttivo possa riconfigurarsi rapidamente e con quale distribuzione dei compiti tra operatore e cobot.

Alla base di queste considerazioni la scelta dei manufatti da riprodurre in forma simulata a livello laboratoriale è rappresentata da elementi molto eterogenei e differenti fra loro così da migliorare i criteri di confronto e di studio. Nell'appendice 11.3 è possibile verificare tutti gli aspetti descritti e i fattori decisionali che hanno spinto al perché esatto della scelta di ciascun pezzo.

Le simulazioni in laboratorio si basano pertanto su sei pezzi del settore automotive volutamente differenti fra loro (Figura 9):

1. Mascherina copertura tasti moto
2. Rivetti di giunzione
3. Manopola cambio marcia
4. Snorkel di aspirazione aria
5. Porta consolle
6. Piastra di copertura arco ruota

La logica alla base di questa scelta si fonda su tre livelli principali di valutazione:

- geometrico
- compositivo
- operativo e di manovrabilità

Queste tre dimensioni costituiscono le linee guida per l'analisi del campione selezionato e permettono di valutare un insieme articolato di caratteristiche, quali ad esempio: la presenza o meno della fase di assemblaggio, la dimensione del componente, il numero di elementi costitutivi, il grado di ingombro all'interno del volume di stampa, la compattezza, la solidità e l'eventuale delicatezza del manufatto. Un ulteriore elemento di differenziazione è rappresentato dalla presenza o assenza del materiale di supporto, fattore che incide direttamente sull'intera operatività del ciclo produttivo. Proprio per questo motivo, e al fine di approfondire in modo parallelo l'analisi sul medesimo componente, il caso della Mascherina è stato considerato in due varianti distinte: senza materiale di supporto e con materiale di supporto.

A partire da questo punto, i casi simulati vengono denominati come segue:

- Mascherina senza supporto (S1)
- Mascherina con supporto (S2)
- Rivetti (S3)
- Manopola (S4)
- Snorkel (S5)
- Porta consolle (S6)
- Piastra (S7)

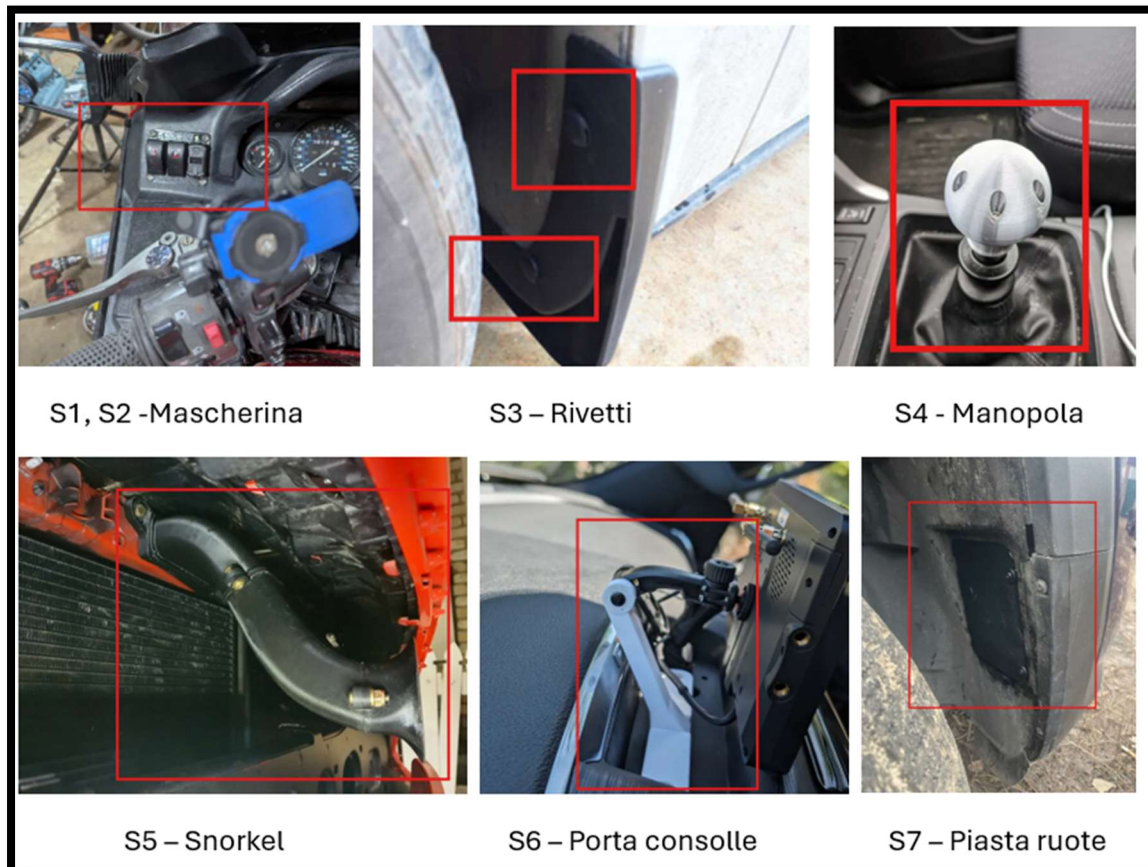


Figura 9. Campione dei manufatti scelti per le simulazioni operative laboratoriali

La selezione dei casi studio è stata dunque costruita per rappresentare una forte diversificazione geometrica, dimensionale e compositiva dei manufatti come rappresentato nella Tabella 4 così da osservare il comportamento nel post-processing su condizioni operative anch'esse differenti.

Il set sperimentale non è stato costruito per ripetere lo stesso tipo di caso, ma per includere manufatti sottili, piccoli, volumetrici, multicomponente, assemblabili, cavi, longilinei o con ampia superficie di contatto, così da coprire una casistica varia e tecnicamente significativa. È proprio questa eterogeneità a dare valore comparativo alle simulazioni, permettendo di osservare come cambino criticità, vincoli e opportunità operative al variare della natura del pezzo

Componente	X_mm	Y_mm	Z_mm	Volume_mm3
<b>Mascherina (unico)</b>	85,71	73,03	3,71	11796,00

<b>Gambo short</b>	20,16	20,16	10,40	796,98
<b>Testa short</b>	8,00	8,00	14,40	161,96
<b>Gambo long</b>	20,15	20,15	17,66	1050,19
<b>Testa long</b>	8,00	8,00	19,40	209,55
<b>Componente superiore</b>	50,80	50,80	33,26	44769,60
<b>Componente inferiore</b>	48,08	48,08	29,07	15238,80
<b>Componente 1</b>	29,46	83,90	12,22	3074,91
<b>Componente 2</b>	53,87	82,27	54,60	7408,94
<b>Componente 3</b>	43,68	77,61	54,60	7047,36
<b>Braccio (comp.1)</b>	22,95	104,58	19,80	21713,50
<b>Base (comp.2)</b>	105,05	27,78	26,03	35246,80
<b>Piastra (unico)</b>	144,00	187,00	19,00	62654,60

Tabella 4. Dimensioni e volumi dei manufatti e componenti

Si evidenzia che la produzione dei pezzi scelti non assume un valore applicativo reale ma esclusivamente accademico e simulativo in quanto è finalizzata solo a consentire l'analisi dei casi studio.

#### 5.4 METODOLOGIA DI SVOLGIMENTO DELLE SIMULAZIONI

Al momento iniziale, ogni simulazione è stata pianificata in modo preventivo, con l'obiettivo di abilitare il processo produttivo senza incorrere in problematiche in itinere come osservabile nell'Appendice 11.4. In altri termini, si è cercato di anticipare tutte le possibili criticità di carattere tecnico, così da consentire lo svolgimento delle fasi e delle sottofasi in condizioni prive di interferenze esogene al processo e poter acquisire la variabile Tempo per ogni sottofase, fase e ciclo. Per ipotesi fondamentale, la variabile di riferimento di studio scelta è il Tempo.

##### Pianificazione preventiva delle operazioni

Tale impostazione ha comportato, ad esempio:

- l'identificazione preventiva di tutti i tool e degli strumenti di lavoro necessari, soprattutto per la Fase 2 e la Fase 3
- la preparazione preliminare delle condizioni operative richieste per l'impiego del cobot
- la considerazione del tempo investito nella programmazione del cobot inteso come tempo necessario alla costruzione dell'albero dei programmi e delle relative istruzioni operative.

Per l'utilizzo del cobot, l'opzione Freedrive (Figura 10) ha assunto un ruolo centrale, poiché ha consentito di identificare con precisione i punti di contatto necessari per le diverse operazioni, dal distacco alla presa, dalla movimentazione alla deposizione del pezzo.



Figura 10. Freedrive impostato, utilizzo manuale del braccio antropomorfo

## Criteria adottati per il processo di stampa

Per quanto riguarda il processo di stampa e la scelta di utilizzare o meno il supporto, si precisa che, per ragioni semplificative e in coerenza con il focus dello studio, rivolto alle fasi a valle della stampa, sono state considerate principalmente le opzioni proposte dal software di slicing (Figura 11):

- minimizza volume di supporto
- minimizza il tempo di stampa



Figura 11. Opzioni di riferimento proposta dal software slicer di stampa per disegno supporto

Solo in alcune circostanze è stata considerata anche una progettazione più specifica del materiale di supporto, soprattutto per approfondire le dinamiche delle fasi di distacco e presa, particolarmente critiche nei casi di automatizzazione.

## Modalità di acquisizione dei tempi

Per quanto concerne il calcolo dei tempi, la rilevazione è avvenuta secondo due modalità (Figura 12):

- manuale, mediante cronometro, per tutte le fasi e sottofasi svolte manualmente;
- automatica, attraverso i dati restituiti dal file di programma e visualizzati sullo schermo del teach pendant, nei casi in cui il sistema operasse in modalità automatizzata.

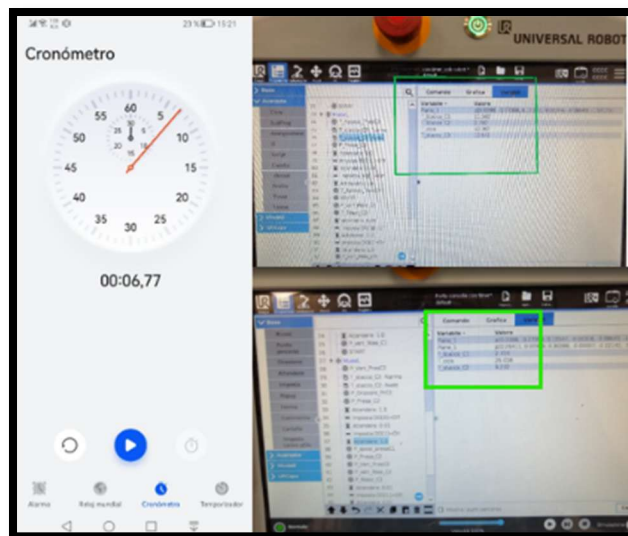


Figura 12. Acquisizione tempi manuali o automatici per operazioni, sottofasi, fasi e cicli

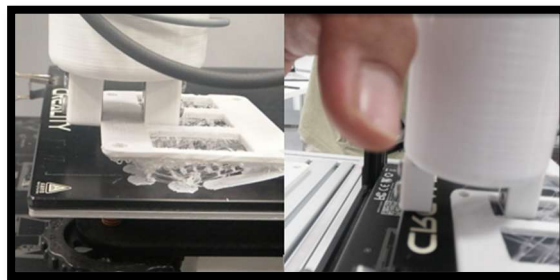
Il tempo costituisce la variabile obiettivo dell'intero studio. Coerentemente con tale impostazione, il ciclo viene analizzato e confrontato secondo una logica di minimizzazione della variabile tempo.

### **Condizioni fisse della cella di lavoro**

La simulazione del processo produttivo è stata sviluppata assumendo una cella di lavoro fissa, caratterizzata dalle seguenti condizioni:

- il layout non cambia mai
- i parametri produttivi restano invariati
- non cambia mai l'end-effector del robot antropomorfo (Figura 13)

In altre parole, la pinza del cobot rimane la stessa per qualsiasi tipologia di manufatto in ingresso nella cella. Da un punto di vista produttivo reale, tale scelta rappresenterebbe una limitazione significativa; nel presente progetto di studio, invece, essa assume valore metodologico, poiché consente di evidenziare con maggiore chiarezza criticità e possibili miglioramenti.



*Figura 13. End effector per le simulazioni con pinza e denti disponibile*

### **Sicurezza ed ergonomia**

Tutte le simulazioni sono state valutate anche secondo criteri legati alla sicurezza e all'ergonomia del processo. Un movimento errato, sia durante operazioni manuali sia durante fasi come presa o assemblaggio, può compromettere gravemente sia la qualità del pezzo sia la sicurezza del lavoratore. Tale necessità è stata effettivamente riscontrata nel corso dello studio ed è stata affrontata progressivamente anche attraverso l'esperienza maturata in itinere durante le prove.

Allo stesso modo, la programmazione del cobot ha richiesto un elevato livello di precisione, poiché il rischio di urti indesiderati, oppure di inversioni di traiettoria rispetto alla direzione prevista tra due waypoint successivi, avrebbe potuto causare collisioni con la stampante o trascinalamenti della stessa, considerando che il cobot operava all'interno del volume di stampa.

Per quanto riguarda l'ergonomia, questo fattore è stato considerato in misura prevalente nella Fase 2 e in misura meno rilevante nella Fase 3. I tempi elevati e la necessità di maestria tecnica richiedevano infatti condizioni di lavoro confortevoli e un basso livello di affaticamento. Per tale motivo, la postazione è stata dotata di (Figura 14):

- sgabello di media altezza;
- sedia comoda, per le lavorazioni manuali più specifiche e minuziose.



Figura 14. Posizioni più diffuse durante le fasi e operazioni produttive

### Impostazione della programmazione del cobot

Per la programmazione del cobot, in tutte le simulazioni, sono state adottate specifiche istruzioni, comandi e logiche finalizzate. Inoltre, sono state considerate delle specifiche condizioni di lavoro per quanto concerne criteri di ottimizzazione per i raggi di raccordo, velocità e accelerazione dei giunti come consultabile nell'Appendice 11.5.

- MoveL: movimento lineare del TCP per traiettorie controllate e maggiore sicurezza operativa soprattutto per i movimenti all'interno del volume di stampa
- MoveJ: movimento in spazio giunti quando l'imprevedibilità del movimento non risultava essere un rischio dovuto a piccoli cambi di direzione per l'ottimizzazione del percorso con aumento della velocità e quindi riduzione del tempo. Utilizzato a partire dalla Sottofase 2B
- Waypoint: definizione dei punti di passaggio della traiettoria acquisiti o con pendant o con freedrive in forma manuale (centralità dell'operatore), opzione funzionale di estrema importanza per l'identificazione di punti critici (Figura 15).

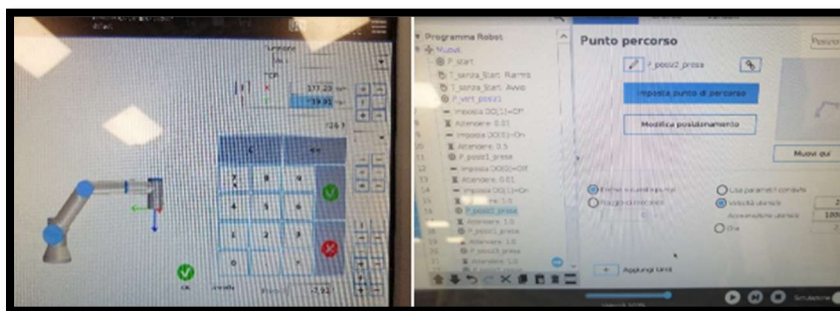


Figura 15. Schermata acquisizione punti della traiettoria da pendant

- Identificazione dei punti di raccordo per garantire continuità del moto in particolare a posteriori dell'operazione di presa riducendo il rischio di movimenti con cambi direzione repentini
- Comandi START e STOP necessari per l'identificazione delle fasi e cicli
- Comando di FERMO (Figura 16): mantenimento stabile del manipolatore in posizione specifica. Questo comando riflette molto l'asservimento del cobot in una cella produttiva e molte simulazioni acquisiscono scenario HRC proprio per questo comando.

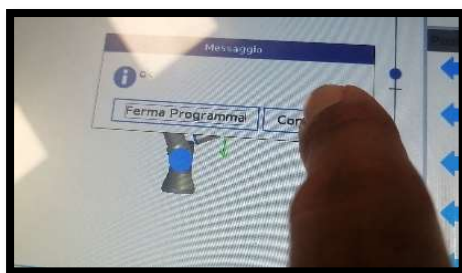


Figura 16. Schermata funzione Fermo

- Pop-up “OK”: consenso alla ripresa del ciclo dopo intervento manuale della Fase 2 o per deposito componenti
- Timer: acquisizione dei tempi di esecuzione delle fasi e cicli
- Settaggi cinematici e ottimizzazione del moto: definizione di velocità e accelerazione controllata sia dei giunti del cobot che del TCP, molto rilevante nelle operazioni di distacco dal letto e movimentazione

## 5.5 SCENARI BEST CASE DELLE SIMULAZIONI

Per ciascuna simulazione sono stati identificati e calcolati i tempi di tutti gli scenari possibili fino alla selezione del miglior scenario osservato, espresso come combinazione più conveniente delle fasi operative attive in termini temporali. Appendice 11.6.








Qualsiasi scenario che includa una fase o sottofase (operazione) svolta con scenario cobot oppure uomo-cobot acquisisce la qualifica di scenario HRC.

A seguire un quadro generale figurativo di tutte le simulazioni e i migliori best case associati a ciascuna simulazione.










### Mascherina copertura tasti manubrio moto



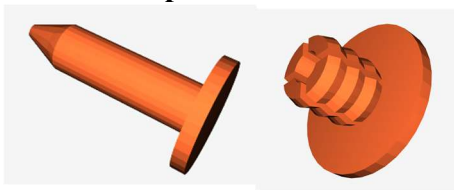
#### S1 - SENZA supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
 Stampa	 Distacco Estrazione	 Pulizia Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario				UOMO
Minuti	00:07,23	01:41,22	Non prevista	01:48,5
Secondi	7,23	101,22	Non prevista	108,45










### S2 - CON supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
 Stampa	  Distacco Estrazione	  Pulizia Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario		 + 	Non prevista	HRC
Minuti	00:11,23 - Uomo	04:05,09 - HRC	Non prevista	04:16,32
Secondi	11,23	245,09	Non prevista	256,32

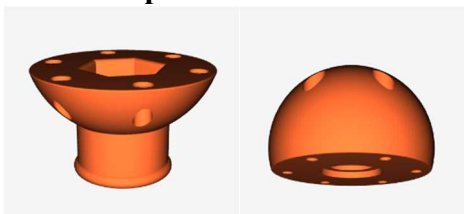
### S3 - Rivetti plastica carrozzeria auto









#### SENZA supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
 Stampa	  Distacco Estrazione	  Pulizia Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario				UOMO
Minuti	00:16,39	05:56,03	Non prevista	06:12,42
Secondi	16,39	356,03	Non prevista	372,42

### S4 - Manopola cambio marcia auto

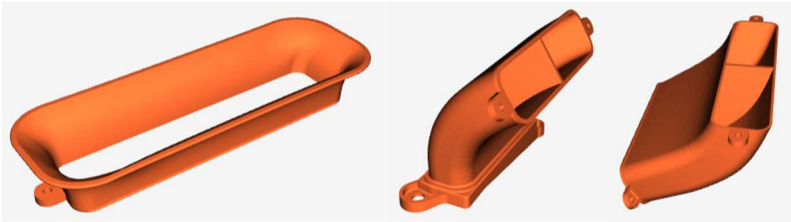


#### SENZA supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
 Stampa	  Distacco Estrazione	  Pulizia Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro

Scenario				UOMO
Minuti	00:17,11	03:06,73	Non prevista	03:23,84
Secondi	17,11	186,73	Non prevista	203,84

### S5 - Snorkel aspirazione aria



#### CON supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
	 Stampa  Distacco  Estrazione	 Pulizia  Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario		+	Non prevista	HRC
Minuti	00:18,7 Uomo	11:05,66 HRC	05:24,19	16:48,55
Secondi	18,70	665,66	324,19	1008,55

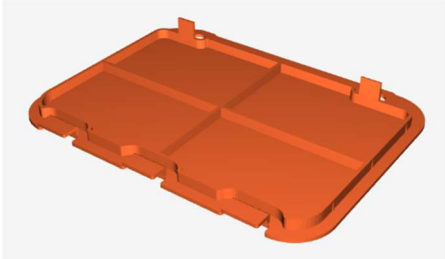
### S6 - Porta consolle












#### SENZA supporto

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	Best scenario
	 Stampa  Distacco  Estrazione	 Pulizia  Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario		+		HRC
Minuti	00:06,77	03:02,43 HRC	00:39,10	03:48,0
Secondi	6,77	182,43	39,10	228,3

## S7 - Piastra copertura interna arco passaruota



CON supporto

	FASE 1A	FASE 1B	FASE 2	FASE 3	Tempo ciclo totale	
 Stampa	 Distacco	 Estrazione	 Pulizia	 Movimentazione	 Assemblaggio	...post processing altro
Scenario				Non prevista	HRC	
Minuti	00:05,71	00:03,66	07:08,71	Non prevista	07:18,08	
Secondi	5,71	3,66	428,71	Non prevista	438,08	
Minuti	00:09,37					
Secondi	9,37					

Nella Tabella 5 si evidenziano i best case; in verde chiaro il tempo fase e verde scuro il tempo ciclo.

Pezzo simulato	Supporto	Scenario	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo (sec)
Mascherina	Senza supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:07,2	7,23
			Pulizia / Asportazione supporto		01:41,2	101,22
			Assemblaggio		Non prevista	
		<b>Tempo totale CICLO</b>		01:48,5	<b>108,45</b>	
		Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		Non possibile	
			Pulizia / Asportazione supporto		Non possibile	
	Assemblaggio			Non prevista		
	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile			
	HRC	Stacco / Estrazione dal piatto		00:07,23 - Uomo		7,23
		Pulizia / Asportazione supporto		01:41,22 - Uomo		101,22
		Assemblaggio		Non prevista		
	<b>Tempo totale CICLO</b>		01:48,5	108,45		
Con supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:11,2	11,23	
		Pulizia / Asportazione supporto		04:27,1	267,1	
		Assemblaggio		Non prevista		
	<b>Tempo totale CICLO</b>		04:38,3	278,33		
	Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		00:16,8	16,75	
		Pulizia / Asportazione supporto	Stacco Presa e posizionamento	00:02,8 00:13,9	2,82 13,93	
Assemblaggio			Non possibile			
<b>Tempo totale CICLO</b>		00:04,6	4,55			
HRC	Stacco / Estrazione dal piatto		00:11,23 - Uomo		11,23	
	Pulizia / Asportazione supporto		04:05,09 - HRC		245,09	
	Assemblaggio		Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		04:16,3	<b>256,32</b>			
Rivetti	Senza supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:16,4	16,39
			Pulizia / Asportazione supporto		05:56,0	356,03
			Assemblaggio		Non prevista	
	<b>Tempo totale CICLO</b>		06:12,4	<b>372,42</b>		
	Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		00:52,6 (2gambi e 2 teste)	52,6	
		Pulizia / Asportazione supporto		Non possibile		
Assemblaggio			Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile				
HRC	Stacco / Estrazione dal piatto		00:16,39 - Uomo	16,39		
	Pulizia / Asportazione supporto		05:56,03 - Uomo	356,03		
	Assemblaggio		Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		06:12,4	372,42			
Manopola	Senza supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:17,1	17,11
			Pulizia / Asportazione supporto		03:06,7	186,73
			Assemblaggio		Non prevista	
	<b>Tempo totale CICLO</b>		03:23,8	<b>203,84</b>		
	Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		00:34,972	34,97	
		Pulizia / Asportazione supporto		Non possibile		
Assemblaggio			Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile				
HRC	Stacco / Estrazione dal piatto		00:17,11 - Uomo	17,11		
	Pulizia / Asportazione supporto		03:52,55 - HRC	232,55		
	Assemblaggio		Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		04:09,7	249,66			
Snorkel	Con supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:18,7	18,7
			Pulizia / Asportazione supporto		11:34,6	694,65
			Assemblaggio		05:46,1	346,09
	<b>Tempo totale CICLO</b>		17:39,4	1059,44		
	Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		50:362	3036	
		Pulizia / Asportazione supporto		Non possibile		
Assemblaggio			Non possibile			
<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile				
HRC	Stacco / Estrazione		00:18,7 Uomo	18,7		
	Pulizia / Asportazione supporto		11:05,66 HRC	665,66		
	Assemblaggio		05:24,19 HRC	324,19		
<b>Tempo totale CICLO</b>		16:48,6	<b>1008,55</b>			
Porta consolle	Senza supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:06,8	6,77
			Pulizia / Asportazione supporto		03:08,5	188,5
			Assemblaggio		00:39,1	39,1
	<b>Tempo totale CICLO</b>		03:54,4	234,37		
	Cobot	Stacco / Estrazione		00:26,1	26,05	
		Pulizia / Asportazione supporto		Non possibile		
Assemblaggio			Non possibile			
<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile				
HRC	Stacco / Estrazione		00:06,77 Uomo	6,77		
	Pulizia / Asportazione supporto		03:02,43 HRC	182,43		
	Assemblaggio		01:09,38 HRC	69,38		
<b>Tempo totale CICLO</b>		03:48,0	<b>228,3</b>			
Piastra copertura	Con supporto	Uomo	Stacco / Estrazione dal piatto		00:14,9	14,93
			Pulizia / Asportazione supporto		07:08,7	428,71
			Assemblaggio		Non prevista	
	<b>Tempo totale CICLO</b>		07:23,6	443,64		
	Cobot	Stacco / Estrazione dal piatto		00:05,7	5,71	
		Pulizia / Asportazione supporto	Stacco Presa e posizionamento	Non possibile Non possibile		
Assemblaggio			Non prevista			
<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile				
HRC	Stacco / Estrazione dal piatto		00:09,4	9,37		
	Pulizia / Asportazione supporto	Stacco Presa e posizionamento	00:05,71 Cobot 00:03,66 Uomo	5,71 3,66		
	Assemblaggio		07:08,71 Uomo	428,71		
<b>Tempo totale CICLO</b>		07:18,1	<b>438,08</b>			

Tabella 5. Resoconto tempi simulazioni e best case

## 6 KNOWLEDGE BASE PER IL SUPPORTO DECISIONALE PER LA RICONFIGURAZIONE DELLA CELLA DI LAVORO

---

### 6.1 DAL DATO REALE AL DATASET

Adesso il focus è sul passaggio che va dalla fase di osservazione ottenuta dai casi sperimentali a quella di creazione di una struttura analitica dai risultati ottenuti.

Il valore delle simulazioni non risiede solo nell'aver identificato tempi, sequenze e best cases, ma anche nell'aver reso osservabili delle criticità che hanno avuto impatto diretto sull'identificazione del miglior scenario tra operatore e cobot.

In altre parole, il dato reale rappresenta il fondamento dell'intero sistema metodologico utilizzato quindi, dai dati sperimentali, emergono le condizioni concrete per poter valutare qualitativamente elementi di studio come l'accessibilità, la presa, la danneggiabilità, gestione dei supporti, l'articolazione del pezzo ecc.

I dati ottenuti, il loro studio e la loro valutazione hanno dunque una funzione che va oltre la mera registrazione dei tempi. La loro analisi ha permesso di leggere il comportamento dell'intero processo nelle tre fasi operative potendo identificare in quali situazioni prevale il contributo dell'operatore, del cobot o uomo-cobot

È stato quindi possibile non solo identificare il miglior scenario, ma anche comprendere le ragioni operative che ne giustificano la scelta.

Per quanto le simulazioni siano un numero limitato, si può considerare tale campione una base empirica qualitativamente solida in quanto la scelta è stata impostata su casi eterogenei con differenze importanti di carattere geometrico, strutturali-compositive e manipolative.

Il dato reale ottenuto viene assunto dunque come una matrice di ripartenza per un sistema formalizzato controllato che non va a sostituire l'esperienza sperimentale ma al contrario la organizza in una base di conoscenza.

Si considera dunque il salto da un sistema metodologico con una dimensione descrittiva ad una più leggibile, confrontabile e riutilizzabile all'interno di un sistema algoritmico capace di supportare anche simulazioni predittive (Tabella 6).

Aspetto metodologico	Giustificazione
<b>Coerenza con i dati</b>	Input del dataset derivano dalle simulazioni reali. Variabili reali.
<b>Semplicità del modello</b>	Il sistema resta replicabile, controllabile e leggibile
<b>Capacità descrittive</b>	La conoscenza operativa spiega il pezzo e i tempi spiegano il processo
<b>Utilità simulativa</b>	Può confrontare le simulazioni, generare scenari e supportare le decisioni future
<b>Apertura futura sistemi intelligenti</b>	Dataset, seppure limitato quantitativamente, resta compatto e adatto per belle applicazioni predittive

*Tabella 6. Set minimo di variabile e accettazione metodo*

Partendo dunque dalla base sperimentale dei dati reali si è considerata la costruzione di un dataset essenziale e coerente che potesse conservare il contenuto informativo di tutti i casi analizzati senza appesantire il modello con un numero eccessivo di variabili soprattutto all'inizio.

All'interno di questa architettura, si rende necessario introdurre una variabile sintetica in grado di tradurre la complessità osservata sperimentalmente in un parametro leggibile e utilizzabile dal sistema e, il Fattore di Forma (FF), assume il ruolo di parametro sintetico principale nella descrizione del pezzo. Esso non è inteso come una semplice misura dimensionale né come un'etichetta morfologica, ma come una variabile strutturata capace di esprimere in quale misura un pezzo, o un suo singolo

componente, ingombri, condizioni o renda più complesso il lavoro operativo rispetto al sistema reale di post-processing nell'ambiente HRC considerato. [88;89;90]

## 6.2 IL FATTORE DI FORMA FF E I SUOI TRE COMPONENTI FG, FC E FM

Il Fattore di Forma Finale è un indice cui valore è compreso tra 0 e 1, è riutilizzabile, interpretabile e coerente con il processo reale. [91;92]

- Riutilizzabile. Una volta identificato il metodo di calcolo questo indice potrà essere applicato a differenti casi di studio. In tale maniera la ricerca non resta confinata ma può acquisire una struttura che può essere raffinata qualitativamente ed estesa quantitativamente
- Interpretabile. FF consente spiegare perché un certo pezzo risulti più o meno adatto ad una tipologia di scenario operativo.
- Coerente nei dati e processo reale. FF è costituito da tre sottocomponenti a loro volta introdotti non per motivi teorici generici ma sulla base di importanti evidenze pratiche emerse dalle simulazioni e quindi da alcune difficoltà che ne derivavano (Tabella 7):
  - dalla geometria del pezzo (FG)
  - dal numero di componenti o presenza di giunzioni (FC)
  - dall'accessibilità di manovra e comportamenti operativi (FM)

Con l'integrazione di questi contributi ne deriva una scomposizione del fattore di forma che, piuttosto che ridurre il pezzo ad una sola proprietà per esempio geometrica, si declina secondo tre prospettive complementari quali la configurazione fisica, l'articolazione strutturale e anche il comportamento operativo. [93;94;95]

Come il Fattore di Forma, anche FG, FC e FM sono normalizzati nell'intervallo [0,1] per garantire uniformità di lettura e confrontabilità tra variabili eterogenee. Pur condividendo la stessa scala, essi si distinguono per il contenuto informativo. Un pezzo o componente può risultare geometricamente semplice ma critico manipolativamente oppure un pezzo potrebbe risultare essere semplice da prendere ma complicato da un punto di vista compositivo perché costituito da più componenti.

- Il fattore geometrico FG valuta le proprietà morfologiche e dimensionali del pezzo.
- Il fattore compositivo FC descrive il grado della articolazione strutturale del pezzo che potrebbe essere costituito da più componenti, avere una fase di assemblaggio (F3) e richiedere giunzioni.
- Il fattore compositivo FM è quello che più si avvicina alla pratica sperimentale ed ha più rilevanza. In questo progetto di studio assume una valutazione importante perché rappresenta un punto di contatto fra l'azione dell'operatore e/o del cobot e il componente stesso. Questo indice FM differisce dagli altri due perché non è vincolato direttamente ad aspetti geometrici e dimensionali, ma a valutazioni quali-quantitative identificate durante le osservazioni laboratoriali, nelle quali la componente umana assume rilevanza fondamentale.

	<b>Cosa descrive</b>	<b>Importanza</b>
<b>F Geometrico</b>	Proporzioni, ingombro, rapporto tra lati, dimensioni, distribuzione volumetrica	Il profilo dimensionale e geometrico di un pezzo impatta nella presa, accesso nel volume di stampa, modalità operative
<b>F Compositivo</b>	Presenza di assemblaggi giunzioni, numero di componenti.	Quando un pezzo è composto da più componenti richiede una gestione operativa differente rispetto a un pezzo monolitico
<b>F Manovrabilità</b>	Supporti, difficoltà di presa, rigidità e flessibilità, tool specifici, manovra, accessibilità	Fattori che rappresentano le difficoltà reali operative di collaborazione fra operatore, cobot e pezzo di lavoro stesso

Tabella 7. I tre contributi del fattore di forma finale FFF

Il fattore finale FF è espresso dalla media aritmetica semplice dei tre contributi:

$$FF = \frac{FG + FC + FM}{3}$$

La scelta di una media aritmetica semplice e non di una media pesata non risponde ad una equivalenza teorica assoluta tra le tre dimensioni ma ad un criterio metodologico e di controllo del modello che sia chiaro e trasparente, soprattutto in questa fase iniziale di creazione del modello algoritmico.

A questo punto del progetto di tesi non si è voluto identificare un ranking di importanza tra geometria, composizione e manovrabilità poiché una pesatura differente avrebbe poi richiesto ulteriori necessità di ipotesi, eventuali validazioni e altre scelte interpretative.

Il sistema è articolato su due distinti livelli ma allo stesso tempo integrati, da un lato vi è una componente descrittiva che consente la rappresentazione del pezzo in una forma strutturata e sintetica con l'indice FF e dall'altra vi è una componente di carattere decisionale che utilizza i dati temporali reali. [96;97]

Consapevolmente al fatto che i dati disponibili non siano abbastanza numerosi, ma bensì articolati, si ritiene metodologicamente più idoneo mantenere l'essenzialità e robustezza della struttura andando ad evitare una sovra estensione dell'analisi in forma prematura. Proprio in questo volontario equilibrio risiede uno dei principali cardini di solidità del fattore di forma in quanto esso non pretende esaurire ogni possibile variabile dei problemi che si riscontrano, ma andare a selezionare quelle variabili che realmente risultano necessarie per la descrizione del pezzo in forma coerente e allineata con l'obiettivo della ricerca di questo progetto di tesi.

Il punto di forza di FF risiede nella logica che lo sostiene come:

- ancoraggio di parametri assoluti macchina-processo
- integrazione equilibrata di tre contributi fondamentali
- separazione funzionale tra descrizione del pezzo e valutazioni temporali delle fasi di processo
- possibilità di utilizzo di tale indice su ogni tipologia di forma o componente

Si può concludere che l'indice fattore di forma finale rappresenta una variabile stabile e coerente con i dati reali, è leggibile, utilizzabile e collega il pezzo al contesto reale di produzione e quindi alla scelta operativa migliore tra i tre scenari uomo, cobot e uomo-cobot.

Nella Tabella 8 si riportano i valori osservati e calcolati degli indici FF, FG, FC e FM associati ai best case di ogni pezzo e nella Tabella 9 una spiegazione teorica generale dell'indice FF per ogni pezzo. Nell' Appendice 11.7 sono visibili tutte operazioni di calcolo dei sei pezzi.

Simulazione	FG	FC	FM	FF
Mascherina tasti moto	0.387124	0.000000	0.227273	0.204799
Rivetti	0.297756	0.381665	0.545455	0.408292
Manopola cambio	0.261240	0.146819	0.227273	0.211777
Snorkel	0.375191	0.811013	0.828125	0.671443
Porta consolle	0.360056	0.678634	0.453125	0.497272
Piastra passaruota	0.485205	0.000000	0.454545	0.313250

Tabella 8. Assegnazione indice valori finale per indici FF, FG, FC e FM a ciascun pezzo simulato

Simulazione	Valore FF	Spiegazione teorica
Mascherina tasti moto	0,204799	Valore basso in quanto dominato da una singola parte senza contributi di carattere compositivo o assemblaggio. Bassa complessità integrata con

		manca di interazioni fra i componenti o criticità morfologiche. Piccola complicazione nella fase di pulizia.
<b>Rivetti</b>	0,408292	Valore intermedio basso con più componenti di geometria piccola che induce ad un'identificazione della sequenza di presa ben controllata. Specifiche relative ai tools di utilizzo per la pulizia.
<b>Manopola cambio</b>	0,211777	Valore basso con geometria moderata e manovrabilità semplice. Pezzo composito senza necessità di giunzioni. Privo di criticità nel processo produttivo.
<b>Snorkel</b>	0,671443	Indice con il valore più alto dimostrando una elevata complessità. Struttura multicomponente con assemblaggio e giunzioni. Manovrabilità molto gravosa in tutte le fasi. Si rilevano criticità geometriche compositive e operative. Alta difficoltà realizzativa e di gestione.
<b>Porta consolle</b>	0,497272	Valore medio alto con un bilanciamento tra una geometria non banale e assemblaggio congiunzioni. Richiede un impegno significativo ma non estremo. Complessiva complessità finale tipica di un multicomponente ma priva di criticità non controllabili.
<b>Piastra passaruota</b>	0,313250	Valore intermedio basso. Pezzo monolitico grande e sottile che impatta nella manovrabilità e dal materiale di supporto implementato.

Tabella 9. Spiegazione indice FF per ciascun pezzo simulato

### 6.2.1 Il Fattore Geometrico FG

Il fattore geometrico viene introdotto per la rappresentazione della configurazione fisica del pezzo chiarendo se e in quale misura la forma del pezzo studiato può rendere complicata un'operazione. Non si limita nel descrivere solo la forma ma va a rappresentare in modo realistico il profilo geometrico di tutto il pezzo insieme ai suoi componenti (eventuali) cercando di riflettere proprio come esso si presenta nel contesto sperimentale considerato. Nella Tabella 10 si riporta una spiegazione interpretativa del FG. La geometria non è trattata come una caratteristica descrittiva neutra ma come una condizione che possa impattare direttamente sulla convenienza relativa dello scenario uomo, cobot o uomo-cobot. [98]

Simulazione	FG	Spiegazione teorica
<b>Mascherina tasti moto</b>	0,387124	Forma moderata con volume non troppo esteso ma con configurazione superficiale che aumenta la sensibilità
<b>Rivetti</b>	0,297756	Complessità geometrica distribuita ma non severa. La criticità è la grandezza e delicatezza locale derivata da piccole forme complesse
<b>Manopola cambio</b>	0,261240	Geometria ordinata nei due componenti. Complessità forma considerevole vista la sfericità ma regolare e simmetrico
<b>Snorkel</b>	0,375191	Geometria penalizzata multicomponente con cavità, sviluppo spaziale irregolare e aumento del volume di ingombro. Contributo importante per la poca compattezza e snellezza. Natura condottiforme penalizzante
<b>Porta consolle</b>	0,360056	Complessità di forma non estrema e moderata che richiede comunque attenzione vista la morfologia funzionale di un bicomponente con superfici estese
<b>Piastra passaruota</b>	0,485205	Forma lamellare semplice sul piano topologico ma penalizzante su quello morfologico.

Tabella 10. Spiegazione indice FG per ciascun pezzo simulato

Nel nostro modello questi elementi sono ricondotti ad una sorta di sintesi più controllata e fondata su quattro dimensioni geometriche centrali:

- Scala. (KS)

- Anisotropia (KA)
- Sottigliezza (KT)
- Non compattezza (KQ)

Trasformando i numeri in logica quando abbiamo un FG elevato abbiamo un caso geometricamente più critico proprio per effetto di una maggiore scala, proporzioni più estreme, maggiore sottigliezza oppure minore compattezza. [99]

Da un punto di vista analitico il calcolo del fattore FG viene costruito partendo da un riferimento assoluto che è direttamente collegato al sistema fisico di produzione, ossia ai parametri di stampa. Tali parametri servono per costruire gli intervalli di normalizzazione delle grandezze geometriche.

In questo studio, per un contesto produttivo di stampa 3D FDM, si assumono i seguenti vincoli/parametri:

- Lato equivalente. Trasforma il volume in una misura di carattere lineare equivalente per poter confrontare i pezzi aventi un volume differente sulla stessa scala dimensionale

$$LEQ = \sqrt[3]{V_{min}}$$

$$LEQ_{min} = (d_{min,x}d_{min,y}d_{min,z})^{1/3}$$

$$LEQ_{max} = (X_{max}Y_{max}Z_{max})^{1/3}$$

Dove:

$$X_{max}, Y_{max}, Z_{max}$$

sono le dimensioni massime stampabili lungo i 3 assi di riferimento X, Y e Z (risoluzione massima di stampa)

e

$$d_{min,x}, d_{min,y}, d_{min,z}$$

sono le dimensioni minime stampabili lungo i 3 assi di riferimento X, Y e Z (risoluzione minima di stampa), con:

- $d_{min,z}$   
altezza minima (consigliata) del layer
- $d_{min,x} = d_{min,y}$   
spostamento minimo per stampa orizzontale lungo x e y

- Aspect ratio. Misura quanto sia allungato un pezzo. Quando risulta perfettamente equilibrato il valore di questo indice è 1, e lo si definisce isotropo.

$$AR = \frac{\max(X, Y, Z)}{\min(X, Y, Z)}$$

$AR_{min} = 1$  . Il pezzo ha le dimensioni minime uguali.

$$AR_{max} = \frac{\max(X_{max}Y_{max}Z_{max})}{\min(d_{min,x}d_{min,y}d_{min,z})}$$

In Tabella 11 si riportano i valori reali di riferimento.

Parametro	Valore reale
<b>Xmax</b>	220.000000
<b>Ymax</b>	220.000000
<b>Zmax</b>	300.000000
<b>dmin_x</b>	0.400000
<b>dmin_y</b>	0.400000
<b>dmin_z</b>	0.100000
<b>NC_Max</b>	4.000000
<b>LEQ_MAX</b>	243.962011
<b>LEQ_MIN</b>	0.251984
<b>AR_MIN</b>	1.000000
<b>AR_MAX</b>	3000.000000

Tabella 11. Parametri e vincoli del contesto produttivo, reali

Noti, dunque, questi valori si può procedere con il calcolo dei quattro coefficienti utili alla formulazione di FG.

-  $K_S$  Coefficiente dimensionale.

Rappresenta la scala del pezzo tramite la normalizzazione di  $Leq$ . Con un valore alto di questo coefficiente si segnala che il componente cresce di scala rispetto ai limiti di processo e questo può implicare una gestione più laboriosa e impegnativa.

$$K_{S,i} = \frac{Leq_{i} - LEQ_{\min}}{LEQ_{\max} - LEQ_{\min}}$$

-  $K_A$  Coefficiente di anisotropia.

Rappresenta l'anisotropia tramite la normalizzazione di AR. Valore alto indica delle proporzioni più estreme derivanti da forme più allungate e sbilanciate.

$$K_{A,i} = \frac{AR_i - AR_{\min}}{AR_{\max} - AR_{\min}}$$

-  $K_T$  Coefficiente di snellezza relativa.

Rappresenta la sottigliezza del pezzo. Valore alto di questo coefficiente indica pezzi di maggiore sottigliezza impattando dunque sulla fragilità del pezzo o per esempio stabilità di presa.

$$K_{T,i} = 1 - TR_i$$

Sia:

Thickness Ratio. Complementare a AR. Valore basso di questo indice indica allungamento o sbilanciamento lungo una direzione principale x,y o z.

$$TR_i = \frac{1}{AR_i}$$

oppure

$$TR_i = \frac{\min(x_i, y_i, z_i)}{\max(x_i, y_i, z_i)}$$

-  $K_Q$  Coefficiente di non compattezza.

Un valore alto identifica una forma meno compatta dove il valore reale occupa solo una porzione del box d'ingombro suggerendo così maggiori complessità morfologiche e una minore pienezza della geometria del pezzo.

Sia:

$$V_{box,i} = X_i Y_i Z_i$$

$$\phi_i = V_i / V_{box,i}$$

$$0 \leq \phi_i \leq 1$$

$$\phi_i = 1$$

Volume del box d'ingombro del pezzo

Fattore di riempimento del box

compreso tra 0 e 1

Quando il componente riempie in forma perfetta il volume del box ingombro del pezzo, al contrario se il componente è molto irregolare o poco compatto tende a 0

$$K_{Q,i} = 1 - \phi_i$$

Così come il fattore di forma e i suoi componenti anche i coefficienti  $K_S$ ,  $K_A$ ,  $K_T$  e  $K_Q$  vengono ricondotti all'intervallo normalizzato  $[0,1]$  assegnando valore 0 ai casi inferiori al limite minimo e valore 1 ai casi superiori al limite massimo.

Considerando un pezzo costituito da più componenti allora vale la regola:

$$FG_i = \frac{K_{S,i} + K_{A,i} + K_{T,i} + K_{Q,i}}{4}$$

In questo caso il calcolo viene eseguito in due passaggi, prima con il calcolo del peso volumetrico di ciascun componente e poi con la media pesata sul volume totale del pezzo.

Sia:

$v_i$ : volume del singolo componente

$V_{tot} = \sum_i V_i$  Volume totale del pezzo (somma dei volumi dei componenti)

Il Peso volumetrico del singolo componente:

$$w_i = \frac{v_i}{V_{tot}}$$

Con

$$\sum_{i=1}^{N_c} w_i = 1$$

Dunque, il contributo complessivo risulta essere la somma pesata dei singoli FG:

$$FG = \sum_{i=1}^{N_c} w_i FG_i$$

$$FG = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{v_i}{V_{tot}} \cdot \frac{K_{S,i} + K_{A,i} + K_{T,i} + K_{Q,i}}{4}$$

La formula definitiva di FG risulta:

$$FG = \frac{K_S + K_A + K_T + K_Q}{4}$$

### 6.2.2 Il Fattore Compositivo FC

Il fattore compositivo FC è contemplato per rappresentare circostanze in cui i pezzi sono multicomponente. La sua importanza deriva dal fatto che la difficoltà di una operazione dipende anche dal numero di parti coinvolte e dalla conseguente necessità di assemblaggio, presenza di giunzioni e distribuzione dei volumi all'interno del volume di stampa. Basti pensare che due componenti potrebbero avere le stesse dimensioni ma al contempo generale profonde differenze di caratteri operativo. FC legge la complessità del prodotto e del compito che non sarebbe adeguatamente rappresentato se solo ancorassimo le nostre valutazioni descrittive alle singole dimensioni geometriche del pezzo e/o dei suoi componenti. [100;101;102]

Quando il valore dell'indice FC è elevato indica un caso più articolato da un punto di vista compositivo operativo.

Come nel fattore geometrico anche nel fattore compositivo FC ci si avvale di quattro coefficienti principali:

- $K_N$  Numero normalizzato di componenti.

Quando questo indice è alto significa dire che il volume è più distribuito tra i componenti

$$K_N = \frac{N_c - 1}{NC_{\max} - 1}$$

Sia:

$N_c$  N° componenti che costituiscono il pezzo stampato

$NC_{\max}$  N° componenti massimo utilizzato per la normalizzazione.

Le soluzioni finali sono:

$$K_N = 0 \text{ quando } N_c = 1$$

$$K_N = 1 \text{ quando } N_c = NC_{\max}$$

- $K_D$  Dispersione volumetrica.

Questo è il coefficiente di riferimento per lo studio e analisi di FC. Quando questo indice è alto allora il volume è più distribuito fra i componenti e aumenta il contributo compositivo, al contrario di  $K_{\text{dom}}$ .

$$K_D = 1 - K_{\text{dom}}$$

Sia:

$K_{\text{dom}}$  Dominanza volumetrica. Questo indice rappresenta se un singolo componente domina il volume totale denotando così uno sbilanciamento.

$$K_{\text{dom}} = \frac{v_{\text{max}}}{V_{\text{tot}}}$$

sia:

$$v_{\text{max}} = \max_{i=1, \dots, N_c} v_i \quad \text{Il volume del componente più grande}$$

- A Assemblaggio

A = 0 Non è prevista la fase di assemblaggio

A = 1 È prevista la fase di assemblaggio

- G Giunzioni

G = 0 Non sono previste giunzioni e l'assemblaggio avviene tramite gioco meccanico

G = 1 Sono previste giunzioni o sistemi appositi come rivetti, clipper, viti o incollaggio

Ne deriva:

$$FC = \frac{K_N + A + G + K_D}{4}$$

FC consente di mantenere il modello valutativo del software aderente al caso reale evitando scollamenti tra la descrizione del processo e la descrizione del prodotto. Tale indice diventa anch'esso una misura sintetica di tutta la complessità strutturale del manufatto, informazione utile soprattutto quando durante il post processing e durante il processo di allocazione dei compiti ci si rende conto che queste attività dipendono proprio dalla presenza di più parti che devono essere coordinate e relazionate reciprocamente. Con FC arricchiamo il fattore di forma finale con una informazione più fine a riguardo della distribuzione strutturale del pezzo in esame. Non si misura soltanto quanti componenti sono presenti ma anche come gli stessi partecipano nella costruzione definitiva del manufatto. Nella Tabella 12 si riportano i numeri reali osservati e calcolati e nella Tabella 13 si riporta una spiegazione interpretativa dei valori attribuiti agli indici FC di ogni pezzo.

Caso simulazione	Nc	Ass	Giun ti	Vtot	Vmax	KN	K dom	KD	FC
<b>Mascherina tasti moto</b>	1	0	0	11796.00	11796.00	0.00	1.00	0.00	0.00
<b>Rivetti</b>	4	0	0	2218.67	1050.19	1.00	0.47	0.52	0.38
<b>Manopola cambio</b>	2	0	0	60008.40	44769.60	0.33	0.74	0.25	0.14
<b>Snorkel</b>	3	1	1	17531.21	7408.94	0.66	0.42	0.57	0.81
<b>Porta consolle</b>	2	1	1	56960.30	35246.80	0.33	0.61	0.38	0.67
<b>Piastra passaruota</b>	1	0	0	62654.60	62654.60	0.00	1.00	0.00	0.00

Tabella 12. Valore numerico per ogni coefficiente di FC di ciascun pezzo simulato

Simulazione	FC	Spiegazione teorica
<b>Mascherina tasti moto</b>	0,000000	Monolitico senza criticità che siano associabili alla scomposizione in più componenti e loro coordinamento.
<b>Rivetti</b>	0,381665	La complessità deriva da una struttura multicomponente e non da operazioni di connessione e montaggio
<b>Manopola cambio</b>	0,146819	Bicomponente con moderato impatto strutturale
<b>Snorkel</b>	0,811013	Complessità formale e architettonica in quanto il sistema di montaggio richiede organizzazione e coordinamento tra le parti
<b>Porta consolle</b>	0,678634	Struttura concreta, funzionale ed estetica con necessità di unione corretta fra i componenti.

<b>Piastra passaruota</b>	0,000000	Monolitico
-------------------------------	----------	------------

Tabella 13. Spiegazione indice FC per ciascun pezzo simulato

### 6.2.3 Il Fattore Manipolativo FM

Il fattore manipolativo FM rappresenta il punto in cui il fattore finale cessa di essere una mera descrizione derivante da elementi di carattere geometrico e si trasforma nella rappresentazione della prestazione operativa e, la sua valutazione, risulta essere strettamente connessa all'osservatore. L'indice FM rappresenta variabili quali la rigidità o flessibilità, bisogno di tool specifici, sistemi di fissaggio, manovrabilità, accessibilità del cobot nel volume di stampa, presenza di supporti o residui post stampa. Osservandoli nel loro insieme tali elementi permettono la valutazione della manovrabilità effettiva del pezzo e soprattutto la compatibilità con l'intervento dell'operatore umano, robotico o collaborativo, obiettivo fortemente orientato a questi studi. [103]

Metodologicamente FM è stato costruito e implementato per l'ottenimento, in primo luogo, di un indice medio di criticità che si riferisca all'insieme di tutti gli aspetti considerati e, in secondo luogo, come indicatore sintetico capace di restituire l'osservazione della presenza di tali criticità distribuite su più fasi o sottofasi operative. Per questa ragione FM risulta, tra i tre fattori che contribuiscono al fattore di forma finale, quello più vicino al reale comportamento emerso nelle simulazioni laboratoriali in quanto traduce in chiave operativa la criticità che incide sulla qualità dell'interazione tra l'operatore, il cobot, il pezzo e sulla concreta eseguibilità delle operazioni.

Per la costruzione dell'indice FF è necessaria preliminarmente la normalizzazione delle variabili su un intervallo comune che va da 0 a 1. In tale modo si possono rendere aggregabili misure originariamente espresse su scale differenti. In questo studio sono state considerate scale binarie (0;1) e scale ordinali (1;2;3;4;5).

Tipi di variabile in relazione alla scala [104]:

- Binarie, con dominio:  $s_j \in \{0,1\}$
- Quantitative ordinarie, con dominio:  $s_j \in \{1,2,3,4,5\}$

La normalizzazione non modifica la natura del dato in quanto tale valore ne consente il confronto. Le variabili che adottano una scala binaria 0 o 1 mantengono comunque il loro carattere dicotomico secondo cui con il valore 0 vi è assenza di criticità e con valore 1 invece presenza di criticità. Per esempio, la variabile presenza di materiale di supporto, ha valore 0 quando il supporto è assente e valore 1 quando il supporto è presente; quindi, la fase è più critica nel processo manipolativo. Per quanto riguarda una variabile in una scala da 1 a 5 essa esprime livelli intermedi di criticità consentendo di rappresentare gradazioni di valutazioni più fini, in questa maniera un punteggio intermedio che va da 1 a 5 viene riportato in forma coerente sulla scala normalizzata rendendo così confrontabili variabili che altrimenti resterebbero diverse nella loro natura, potendo adesso invece essere aggregate nello stesso indice.

La normalizzazione ha reso comparabili due scale differenti non cambiando la natura dei dati.

In definitiva per ciascuna variabile  $j$  si introduce uno score grezzo (raw)  $s_j$

Normalizzazione per una variabile binaria:

$$n_j = \frac{s_j - 0}{1 - 0} = s_j$$

Normalizzazione per una variabile qualitativa/ordinale:

$$n_j = \frac{s_j - 1}{5 - 1} = \frac{s_j - 1}{4}$$

Metodologicamente e operativamente ogni fase del processo è associata a un insieme di variabili dotate di un conteggio numerico (score), proveniente da osservazioni qualitative elaborate in laboratorio.

- Fase 1: 6 variabili
- Fase 2: 5 variabili
- Fase 3: 5 variabili

Ottenuti i valori normalizzati sono stati costituiti tre indici di fase come media dei punteggi normalizzati delle variabili associate a ciascuna fase

- M1 media dei punteggi normalizzati per la Fase 1
- M2 media dei punteggi normalizzati per la Fase 2
- M3 media dei punteggi normalizzati per la Fase 3 (quando esiste)

Non tutte le simulazioni hanno considerato la Fase 3 di assemblaggio e, in questo caso, le variabili associate a M3 non vengono considerate. Tale metodo non rappresenta una semplificazione arbitraria ma una scelta di coerenza di carattere logico perché non è metodologicamente corretto contabilizzare criticità di assemblaggio quando invece questa fase non esiste, per questo motivo, il calcolo viene condotto su 11 variabili piuttosto che 16. Nella Tabella 14 si riportano il numero e tipologia di variabili associate a ciascuna Fase operativa osservata.

	Variabili da compilare	Formula di fase	N° variabili	Output atteso
<b>Fase 1</b>	Supporto, quantità supporto, residui, presa, accessibilità, sequenza	M1 = media dei punteggi normalizzati Fase 1	6	Valore in [0,1]
<b>Fase 2</b>	Rigidità/flessibilità, danneggiabilità, tool, fissaggio, maneggiabilità	M2 = media dei punteggi normalizzati Fase 2	5	Valore in [0,1]
<b>Fase 3</b>	Giunzioni, danneggiabilità, tool, fissaggio, maneggiabilità	M3 = media dei punteggi normalizzati Fase 3	5	Valore in [0,1]
<b>FM</b>	M1, M2, M3	FM = (M1 + M2 + M3) / 3	- 16 con F3 - 11 con F3 assente	Valore in [0,1]

Tabella 14. Resoconto numero variabili FM per ogni fase

In definitiva il valore di FM risulta:

$$FM = \frac{1}{16} \sum_{j=1}^{11} n_j$$

$$FM = \frac{M_1 + M_2 + M_3}{3}$$

Quando F3 assente:

$$FM = \frac{1}{11} \sum_{j=1}^{11} n_j$$

$$FM = \frac{M_1 + M_2}{2}$$

Fase	Variabile	Valore raw	Score numerico
Fase 1	Supporto presente	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 1	Quantità supporto	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 1	Rischio residui	No/si	sj ∈ {0,1}
Fase 1	Difficoltà di presa	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 1	Accessibilità cobot	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 2	Rigidità/flessibilità	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 2	Danneggiabilità	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 2	Tool specifici	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 2	Necessità di fissaggio	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 3	Necessità giunzioni	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 3	Danneggiabilità	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 3	Tool assemblaggio	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	No/Si	sj ∈ {0,1}
Fase 3	Maneggiabilità	molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso	sj ∈ {1,2,3,4,5}
Fase 3	Supporto presente	No/Si	sj ∈ {0,1}

Tabella 15. Interpretazione scala valutativa delle variabili FM

Nella valutazione di ogni simulazione delle variabili dell'indice FM, non è stato considerato il peso, poiché i componenti realizzati in PLA presentano masse contenute e comunque non tali da avvicinarsi al carico limite utile del cobot (3 kg), conseguentemente tale parametro non assume carattere discriminante ai fini della valutazione.

Nella Tabella 15 si riportano le 16 variabili osservate e distribuite per ciascuna fase del ciclo, mentre nella Tabella 16 si riporta l'esempio pratico per la simulazione Snorkel e l'intero processo valutativo del campione simulato è consultabile nell'Appendice 11.7. Nella Tabella 17 la spiegazione interpretativa associata a ciascun pezzo simulato dell'indice FM.

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
Snorkel	F1	Supporto presente	Sì	Il supporto è parte integrante del caso e condiziona sia le strategie di stacco sia il carico operativo della pulizia.
		Quantità supporto	Scarso	La quantità di supporto non è trascurabile, ma non raggiunge un livello tale da bloccare integralmente lo stacco; resta comunque penalizzante nella pulizia, soprattutto interna.
		Rischio residui	Sì	Le geometrie cave e le zone interne favoriscono la permanenza di residui dopo la rimozione primaria del supporto.
		Difficoltà di presa	Molto scarso	La presa è fortemente penalizzata da multicomponente, superfici irregolari, cavità, supporti e necessità di orientamenti specifici.
		Accessibilità cobot	Molto scarso	L'accessibilità robotica è limitata dalla struttura della stampante, dal volume di

				manovra, dallo sbraccio utile e dai vincoli di safety.
		Sequenza di stacco e manovra	Molto scarso	La sequenza non è lineare né uniforme sui tre componenti; richiede strategie differenziate di stacco, taglio preliminare di filamenti e gestione accurata dell'ordine di prelievo.
	<b>F2</b>	Rigidità/flessibilità	Medio	I componenti non sono estremamente flessibili e la presenza di superfici non prismatiche e zone cave riduce la robustezza uniforme dei tre componenti
		Danneggiabilità	Medio	Il rischio di danno esiste nelle zone cave, nei bordi e durante pulizia/assemblaggio, ma il pezzo mantiene una robustezza sufficiente a un trattamento operativo con adeguata cautela.
		Tool specifici	Sì	La geometria interna e la pulizia dei supporti richiedono utensili specifici di precisione, non una sola manipolazione generica.
		Necessità di fissaggio	Sì	Il pezzo beneficia dal mantenimento stabile per permettere accesso alle zone cave con due mani e poter ripulire le alette per viti sporgenti
		Maneggiabilità/pulizia	Scarso	La pulizia è operativamente onerosa a causa di cavità, accessi ridotti, residui interni e necessità di rifiniture controllate.
	<b>F3</b>	Necessità giunzioni	Sì	Il caso richiede montaggio di tre componenti e quindi presenza reale di giunzioni.
		Danneggiabilità in assemblaggio	Medio	Durante il montaggio esiste rischio medio di danneggiamento per cattivo allineamento nei fori, carichi localizzati o inserimenti non corretti. Alette sporgenti a rischio.
		Tool assemblaggio	Sì	L'assemblaggio richiede supporti operativi, strumenti o accorgimenti dedicati per mantenere e orientare correttamente i componenti.
		Necessità di fissaggio/assembli o	Sì	Il fissaggio o mantenimento durante l'assemblaggio è utile per garantire posizione, orientamento e accoppiamento ripetibile. Ripetibile la necessità di cambio posizione del componente con sblocco presa cobot con utilizzo teach pendant.
		Maneggiabilità in assemblaggio	Buono	Pur essendo presente una fase di montaggio reale, la manipolazione finale dei componenti assemblativi risulta complessivamente gestibile quando il pezzo è stabilizzato e correttamente orientato.

Tabella 16. Interpretazione logico-numerica delle variabili di FM per pezzo Snorkel

Simulazione	FM	Spiegazione teorica
Mascherina tasti moto	0,227273	Richiesta attenzione operativa senza allarmismi per reali criticità di manipolazione e di processo
Rivetti	0,545455	Il coefficiente dimostra una criticità prevalentemente di carattere operativa non tanto per la procedura di lavoro quanto per le scale ridotte dei componenti e la ripetitività nella gestione manuale

<b>Manopola cambio</b>	0,227273	Manovrabilità ordinaria dimostrando compatibilità con una sequenza di gestione stabile e poco critica
<b>Snorkel</b>	0,828125	Criticità operative complesse dove la gestione manuale e l'assemblaggio risultano dominanti nel comportamento globale
<b>Porta consolle</b>	0,453125	Complessità operativa osservabile e controllabile con un processo articolato ma non critico
<b>Piastra passaruota</b>	0,454545	La criticità consta nelle operazioni di maneggiabilità e pulizia asportazione dei materiali di supporto

Tabella 17. Assegnazione indice FM a ciascun pezzo simulato

### 6.2.3.1 Razionalizzazione metodologica volontaria delle variabili di FM

Per quanto riguarda le valutazioni di carattere qualitativo delle variabili delle tre fasi del processo concernenti il fattore FM si è scelto volontariamente di limitarle al numero massimo di 16 al fine di evitare una condizione di paralisi da analisi. Si è consapevoli del fatto che altre variabili avrebbero potuto influenzare il fenomeno studiato e fra queste si vuole menzionare quelle che hanno spiccato l'attenzione durante le attività laboratoriali:

- tipologia di pinza dell'effettore finale del robot antropomorfo
- tempo necessario alla programmazione del cobot
- tempo richiesto per la stampa del pezzo (se si analizzasse l'analisi a monte della stampa).

Questi elementi sono emersi durante la fase laboratoriale. L'introduzione di altri elementi in questo stadio dello studio avrebbe sicuramente arricchito il sistema ma nello stesso tempo avrebbe comportato il rischio di appesantire il modello eccessivamente, andando così a disperdere l'attenzione su un numero troppo elevato di parametri.

Inoltre, nel presente studio, si è scelto di operare su specifiche condizioni assunte come costanti quali ad esempio l'utilizzo del medesimo effettore finale e pinze, la stessa posizione relativa alla stampante e cobot (layout costante) e l'adozione di un piano di sicurezza che ha impedito alcuni movimenti specifici del robot antropomorfo e, su queste ipotesi, si sono identificate e valutate le variabili di FM. Nella fase iniziale di costruzione del sistema non è opportuno dover ampliare eccessivamente il numero di variabili in quanto un'elevata quantità di dati descrittivi associata ad un numero ancora limitato di simulazioni avrebbe potuto compromettere la capacità interpretativa del modello stesso. Nello studio di FM l'identificazione del dato non è fortuita ma è stata costruita con una logica comparativa che prende avvio già dalla scelta del manufatto finale a monte dello studio. La differenziazione tra forma e caratteristiche operative tra le diverse simulazioni non è stata dunque casuale ma invece definita intenzionalmente per consentire un confronto significativo tra casi non omogenei.

L'approccio allo studio qualitativo è stato sviluppato proprio con l'obiettivo di pervenire a un criterio numerico capace di attribuire valore strutturato a quella che è l'interpretazione dell'osservatore. Il dato qualitativo che è stato espresso in una scala lineare da 1 a 5, dunque una codifica numerica univoca nella quale un valore più alto corrisponde a una maggiore difficoltà e complessità durante il processo. La scala qualitativa utilizzata che va da *molto buono* a *molto scarso* indica se la variabile osservata va a favorire oppure ostacolare l'esecuzione e finalizzazione della fase. Un valore positivo come buono indica che la variabile sta supportando la corretta realizzazione mentre il valore scarso segnala la presenza di complicazioni o criticità che vanno ad impattare negativamente sulla sua finalizzazione. Contrariamente a FG e FC, l'indice FM presenta una natura diversa e strettamente legata a quella che è l'osservazione sperimentale, ossia di chi valuta. FM, per quanto possa essere stato formalizzato numericamente, dipende in forma rilevante dalla capacità valutativa appunto di chi ha osservato i casi

di studio, ha interpretato le criticità operative e ha attribuito i punteggi alle variabili qualitative e binarie che descrivono le varie operazioni durante il processo.

Si può dunque sostenere che il modello non è autosufficiente ma necessita la centralità dell'operatore come soggetto esperto capace di leggere correttamente il fenomeno reale, alimentare il sistema con dati coerenti e costruire appunto la base conoscitiva su cui il modello stesso viene addestrato.

### 7.1 LOGICA DEL MODELLO ALGORITMICO E STRUTTURAZIONE COMPUTAZIONALE

Le modalità con cui sono state selezionate le variabili, in particolare per il fattore FM, evidenziano come il dato utilizzato non sia il risultato di una raccolta massiva ma di una costruzione controllata e coerente con il contesto sperimentale della cella di lavoro laboratoriale. La formalizzazione numerica delle variabili qualitative consente di trasformare l'osservazione in una base informativa strutturata, mantenendo centrale il contributo dell'operatore nella sua interpretazione e validazione. Il dato così definito diventa utilizzabile all'interno di una struttura computazionale capace di organizzare, confrontare e supportare il processo decisionale, ponendo le condizioni per una successiva evoluzione verso logiche di tipo predittivo.

Funzionalmente il modello del sistema segue un framework algoritmico i cui input, oltre ai tempi osservati, sono i parametri/vincoli di processo, le variabili e i coefficienti che generano i tre indici dell'FF. L'algoritmo calcola questi input per risalire ai contributi del fattore di forma (FG, FC, FM) ottenendo il fattore di forma finale FF per ogni simulazione. A livello operativo si include anche la gestione di casi o fasi non eseguibili e controindicati con NA o con campo vuoto.

Dopo l'archiviazione di ogni FF il sistema incrocia i dati Tempo ed elabora lo scenario migliore fra operatore, cobot o HRC in ciascuna fase e ciclo. La memorizzazione di questo scenario best case contribuisce alla strutturazione progressiva della base dati.

La logica del sistema parte dalla strutturazione del dato sperimentale, dal suo riordino e calcolo e, a seguire, in un livello successivo superiore, elabora una stima predittiva finale in forma intelligente (Figura 17).



Figura 17. Logica di funzionamento del sistema

Il modello segue una doppia funzione decisionale:

- la prima è locale in quanto confronta i tempi delle tre fasi in ciascuno dei tre scenari e individua quella che è la soluzione più conveniente,
- la seconda è invece più globale perché considera l'intero processo permettendo l'identificazione della combinazione più vantaggiosa.

Quando la Fase di assemblaggio F3 non è attiva il sistema limita l'analisi solo alle fasi realmente esistenti. Si rispetta così la scelta matematica di utilizzo della media pesata (discussa nel Capitolo precedente del fattore di forma) per la rappresentazione degli indici del fattore di forma, in quanto il

sistema limita l'elaborazione dell'output alle sole fasi effettivamente esistenti riducendo il peso delle fasi non attive, come quella di assemblaggio non sempre presente.

In tale maniera si conferma che il modello non rispecchia un semplice calcolatore di coefficienti e indici ma rappresenta una catena di elaborazione di dati e decisioni nella quale la raccolta dei tempi, la descrizione del pezzo e la selezione degli scenari operano in forma totalmente integrata.

La funzione di tale struttura non è dunque quella di sostituire l'osservazione sperimentale, ma di trasferire e rendere utilizzabili tutti i risultati ottenuti.

Il modello rappresenta un prototipo il cui contributo è quello di:

- organizzare i casi sperimentali
- calcolare i fattori descrittivi del componente o pezzo stampato
- garantire un'archiviazione coerente delle simulazioni
- supportare la scelta del best case

Il valore intrinseco del modello non dipende dal numero elevato di dati in entrata ma dalla qualità e pertinenza delle variabili selezionate, che derivano direttamente da un reale riscontro durante le simulazioni laboratoriali.

In questa maniera la struttura computazionale svolge una doppia funzione:

- opera come strumento utile ad archiviare e ordinare la conoscenza emersa dagli esperimenti reali,
- costituisce un primo supporto computabile alla decisione, rendendo possibile l'utilizzo dei dati raccolti per confronti con nuove simulazioni di pezzi da stampare.

Inoltre, con questa impostazione, si evita che i risultati sperimentali ottenuti in questa tesi si disperdano in una serie di osservazioni non formalizzate e si impedisce la costruzione di un modello astratto scollegato da valori reali.

## **7.2 DALLA CONOSCENZA OPERATIVA ALLA COSTRUZIONE DI UN SISTEMA INTELLIGENTE**

In questo stadio, il modello algoritmico non deve essere interpretato come un sistema di machine learning, ma come una struttura dati orientata all'analisi descrittiva dei manufatti, alla riorganizzazione delle informazioni sperimentali e al supporto decisionale tramite regole definite. La componente descrittiva deriva dagli indici sintetici FG, FC e FM, mentre la componente decisionale deriva dal confronto tra i tempi osservati nelle diverse fasi operative e dalla selezione dello scenario più opportuno tra le configurazioni disponibili.

Su questa base può essere ipotizzata una successiva estensione predittiva, finalizzata alla stima dell'allocazione operativa per nuovi pezzi con caratteristiche differenti. Tale passaggio non rappresenta una rottura rispetto al modello attuale, ma una sua evoluzione coerente, resa possibile dalla strutturazione dei dati reali. Tuttavia, questa prospettiva deve essere considerata indicativa, poiché il numero limitato di simulazioni non consente di attribuire al modello una capacità di generalizzazione pienamente consolidata.

Il valore principale di questo studio non è l'automazione della previsione e comportamenti predittivi ma la costruzione di un sistema informativo robusto, leggibile, interpretabile e predisposto al suo miglioramento per quanto riguarda sia il piano del popolamento del dataset (qualitativo e quantitativo) e sia l'evoluzione nell'architettura del sistema.

Le simulazioni hanno mostrato chiaramente che il cambio del manufatto in entrata nella cella di produzione, rappresenta una nuova sfida per la riconfigurazione del sistema, analizzando e identificando quali le variazioni riguardanti gli aspetti logici e quali quelli hardware.

Ogni qualvolta si doveva ripartire con l'esaminazione di un nuovo pezzo/simulazione, doveva essere ridefinito in diversa misura tutta la sequenza operativa e l'assegnazione tra uomo, cobot o uomo-cobot considerando anche variabili nuove di cui non si aveva storicità ed esperienza previa.

È osservabile che relativamente alla frequenza di cambio pezzo e alla modalità di riconfigurazione associata ad un nuovo manufatto, si richiede una gestione affidata esclusivamente all'intervento umano estemporaneo e regole statiche definite ma, questo modus operandi, tende a perdere robustezza, ripetibilità e scalabilità.

In questo quadro acquisiscono valore strumenti intelligenti che non vanno a sostituire un ragionamento tecnico ma a formalizzare la conoscenza accumulata, riducendo l'impegno richiesto in termini di tempo, competenze tecniche specifiche, capacità di pianificazione e risorse in genere, cercando sempre di mantenere il sistema coerente con quelli che sono stati i vincoli di progetto hardware.

In questa architettura la knowledge base radica nella conoscenza dell'esperto ed è resa operativa tramite delle regole per la supporto della pianificazione, analisi e decisioni del processo.

Nelle prove laboratoriali una parte della logica è già stata trattata in questa maniera in quanto l'assegnazione HRC è stata considerata quando per esempio:

- la presenza dei supporti rende utile un sostegno collaborativo
- l'assemblaggio viene mantenuto con la presenza dell'operatore quando il tempo di esecuzione della fase risulta essere breve o l'implementazione del cobot risulta essere penalizzante,
- l'opzione cobot invece viene esclusa quando la compatibilità geometrica tra pinza, pezzo e posizionamento sul letto di stampa non risultano essere sufficienti o idonei.

Questi sono pattern di comportamento.

Le regole e i pattern sono efficaci quando identificano un numero limitato di comportamenti ma, evidentemente, questo è un limite quando le variabili aumentano e quando la riconfigurazione deve essere frequente e ripetibile come richiesto in un sistema di produzione dinamico. L'intelligenza operativa, dunque, non è concentrata solo in un elemento valutativo, ma deve emergere dall'interazione tra cobot e operatore, dati di processo per un supporto decisionale e da logiche di simulazione con pattern comportamentali osservati (Figura 18).

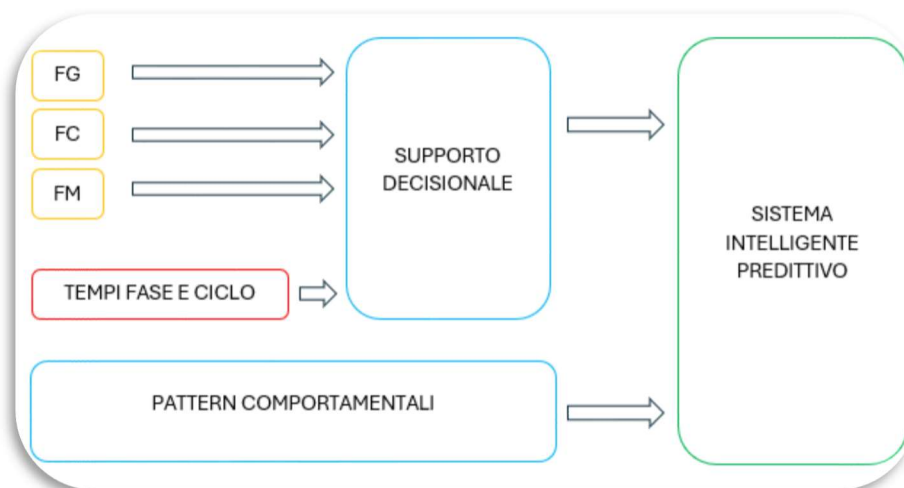


Figura 18. Intelligenza operativa per un sistema predittivo

Partendo da questa considerazione dell'intelligenza operativa, il passaggio ad una struttura computazionale non nasce dunque da una esigenza teorica astratta ma direttamente da quelli che sono i pattern emersi per l'appunto nei casi sperimentali.

I risultati laboratoriali hanno mostrato infatti che le differenze tra scenari non sono di carattere episodico ma seguono degli andamenti ricorrenti e dunque formalizzabili. Ad esempio, nel caso dello Snorkel, lo stacco eseguito dal cobot risulta essere molto più lento rispetto allo stacco eseguito dall'operatore con un ordine di grandezza superiore a 100, nella Mascherina con supporto si osserva un miglioramento in una configurazione HRC, nella Piastra passaruota emergere la necessità di distinguere la fase in due sottofasi una di distacco ed una di estrazione successiva, nel Porta consolle l'impiego di un cobot non è risultato utile in quanto considerava una penalizzazione del tempo. In altre parole, queste informazioni che poi saranno trasformate in dati sintetici non hanno un solo valore descrittivo puntuale ma costituiscono una prima forma di conoscenza formalizzata e riutilizzabile. In termini computazionali, questo significa che l'allocazione dei compiti, non può essere affidata unicamente a delle regole statiche ma risiede in una base di dati con conoscenza che sia capace di collegare le reali caratteristiche del caso alle prestazioni osservate nei loro comportamenti puntuali e globali per essere successivamente memorizzate.

Gli input di un sistema intelligente per la riconfigurazione dei sistemi devono prevedere variabili strutturate di prodotto, di processo, le risorse a disposizione e in ultima istanza, non per importanza, dei dati dinamici di esecuzione/comportamento.

L'immagazzinamento di queste informazioni identifica la storicizzazione sia dei dati sperimentali sia delle regole operative e comportamentali che hanno contraddistinto le singole simulazioni. Questo panorama di conoscenza è il nucleo tecnico che consente di trasformare i casi reali di studio in una knowledge base interrogabile capace di sostenere un continuo aggiornamento progressivo del modello e di rendere le configurazioni sempre supportate da evidenze formalizzate.

In tale sistema come input conosciamo i fattori di forma, tempi di fase e sottofase, scenari e best case, eventi operativi specifici e vincoli emersi dalle prove in laboratorio; come output corrispondono invece raccomandazioni di allocazione dei compiti fra uomo, cobot e uomo-cobot, stime di convenienza operativa e configurazioni predittive.

### 7.3 TECNICHE DI MACHINE LEARNING PER IL SUPPORTO ALLA RICONFIGURAZIONE NEI SISTEMI HRC

I primi sistemi “intelligenti” in ambito manifatturiero si sono concretizzati in sistemi esperti e sistemi basati sulla conoscenza (knowledge-based systems), nei quali la conoscenza dell’esperto veniva formalizzata in regole IF-THEN per supportare pianificazione, diagnosi e scelte di processo. [105] Le recenti evoluzioni dei sistemi produttivi riconfigurabili hanno progressivamente ampliato il ruolo delle tecniche di Machine Learning come strumento di supporto alla decisione in contesti caratterizzati da elevata variabilità del prodotto e delle configurazioni operative. In tali sistemi, la complessità non deriva soltanto dalla molteplicità delle possibili soluzioni, ma soprattutto dalla necessità di correlare in modo coerente variabili geometriche, operative e prestazionali all’interno di scenari dinamici e non deterministici.

Nel dominio dei sistemi HRC per post-processing additivo, la riconfigurazione non può essere interpretata esclusivamente come una scelta statica tra alternative predefinite, ma come un problema di inferenza basato su dati osservati e su relazioni apprese tra caratteristiche del pezzo e comportamento del sistema. In questo contesto, il Machine Learning si colloca come naturale estensione delle architetture Digital Twin e delle basi di conoscenza, con l’obiettivo di trasformare l’esperienza sperimentale in capacità predittiva, diagnostica, descrittiva e prescrittiva. [106].

Le evidenze ottenute dalle simulazioni sperimentali mostrano infatti che la relazione tra geometria del pezzo, presenza di supporti e convenienza delle configurazioni operative (operatore, cobot, ibrida) non è lineare né costante, ma dipende da combinazioni specifiche di variabili. Questo comportamento rende inefficace un approccio puramente rule-based, soprattutto in presenza di varianti frequenti e riconfigurazioni ripetute.

Per tale motivo, l’approccio adottato si colloca nell’ambito del supervised learning, in cui l’obiettivo non è l’identificazione di strutture latenti nei dati né l’apprendimento tramite interazione con l’ambiente, ma la stima di grandezze numeriche a partire da dati etichettati derivanti da simulazioni e osservazioni sperimentali. [107]

Nel caso in esame, le variabili in ingresso sono costituite da descrittori del pezzo e del processo, mentre le variabili di output sono rappresentate da indicatori prestazionali quali tempi di esecuzione per fase e ciclo complessivo, oltre alla configurazione operativa più conveniente tra gli scenari disponibili. [108] La natura supervisionata del problema deriva direttamente dalla struttura del dataset, costruito a partire da casi sperimentali nei quali i fattori descrittivi del pezzo sono stati associati a risultati osservati e valutati. Ne consegue che l’efficacia del modello dipende in modo diretto dalla qualità e dalla coerenza del processo di etichettatura delle variabili.

All’interno di questo contesto di studio attuale, l’obiettivo del Machine Learning non è sostituire la valutazione esperta, ma fornire una prima approssimazione predittiva coerente con i dati disponibili, utile soprattutto in condizioni di variabilità elevata o incompletezza informativa. In particolare, l’interesse non risiede nella ricerca del modello “ottimale” in senso assoluto, ma nella verifica della compatibilità tra struttura dei dati sperimentali e capacità di generalizzazione iniziale.

La scelta di modelli di regressione supervisionata risulta quindi coerente con la dimensione del dataset e con la natura del problema. In questo quadro, modelli lineari regolarizzati e modelli probabilistici non parametrici rappresentano due approcci complementari: il primo privilegia stabilità e interpretabilità, il secondo introduce una stima associata dell’incertezza, particolarmente rilevante in contesti con limitata disponibilità di dati.

L'elemento centrale di questa impostazione risiede nella trasformazione progressiva della base sperimentale in una struttura informativa utilizzabile per la predizione. Tale passaggio non implica una sostituzione del modello fisico o esperienziale, ma una sua estensione in termini di capacità descrittiva e anticipatoria, mantenendo sempre la coerenza con il dominio applicativo e con i vincoli sperimentali.

### **7.3.1 Modellazione predittiva tramite regressione supervisionata per l'allocazione operativa**

In coerenza con l'impostazione metodologica descritta, l'analisi del problema viene ricondotta all'utilizzo di modelli appartenenti alla famiglia del supervised learning e, nello specifico i due approcci complementari implementati nel modello sono i due algoritmi di ML Ridge Regression e Gaussian Process Regression. Appartengono entrambi alla famiglia del supervisor learning e nello specifico sottocategoria dei modelli di regressione supervisionata. [109;110] L'obiettivo non è quello di individuare strutture latenti o gruppi nascosti nei dati come, per esempio, nell'unsupervised learning, oppure neanche apprendere una politica di azioni tramite ricompense e penalità (reinforcement learning) e nella stessa maniera non deve combinare dei dati già etichettati o non etichettati come nei semi supervised learning. Il deep learning non viene neanche contemplato visto il numero molto limitato di dati. In questo sistema l'obiettivo è stimare degli output numerici come il tempo previsto per fase e ciclo e individuare la corrispondenza con gli scenari migliori fra operatore, cobot, uomo-cobot, partendo però da dati etichettati perché costruiti su casi sperimentali mediante fattori descrittivi del pezzo e informazioni degli scenari, provenienti dalla valutazione umana.

Con i modelli intelligenti e predittivi, può succedere che, inseriti i valori base, come anche quelli di riferimento dei migliori scenari, il sistema può elaborare e restituire nuovi dati e nuove configurazioni e, la soluzione suggerita, potrebbe non coincidere perfettamente con il best case precedentemente osservato. Tale possibilità però non deve essere interpretata come un errore automatico del modello bensì come conseguenza naturale del fatto che il sistema non replica meccanicamente tutti i risultati passati ma gli organizza in una struttura più ampia e orientata a descrivere eventuali casi futuri coerentemente con il dominio tecnico che è stato considerato. Tale prospettiva non risiede in una semplice aderenza storica ai casi già noti ma nella capacità di offrire una stabile descrizione del pezzo e che possa permanere valida anche quando il sistema venga esteso a nuovi casi di studio e simulazioni.

Conoscendo dunque i valori di entrata e i valori di uscita (per esempio i tempi previsti) gli algoritmi di supervised learning risultano essere i più conformi a questo caso di studio. Su questo principio si fonda l'essenza dello studio sperimentale ossia quanto è importante etichettare congruamente e qualitativamente le variabili di manovrabilità e operabilità per ottenere una nuova base dati robusta per lanciare i modelli di ML più opportuni.

La scelta dei due algoritmi è stata dunque mantenuta volontariamente in forma concettuale e prudente vista l'importante limitazione quantitativa dei dati acquisiti sperimentali. In questo progetto non si vuole identificare il migliore algoritmo ma verificare se questa struttura dati così costruita possa risultare compatibile con una prima estensione preliminare di carattere predittivo.

La Ridge Regression è adottata come baseline lineare regolarizzata e consente di modellare le relazioni tra input e output mantenendo una lettura semplice, stabile e controllabile del comportamento del modello. [111;112] Tale modello cerca di ridurre l'instabilità dei coefficienti e di

limitare fenomeni di sovra adattamento che sono aspetti rilevanti nei dataset piccoli e con caratteristiche (feature) correlate fra loro come FG, FC e FM.

L'altra alternativa è la Gaussian Process Regression (GPR) che è l'alternativa non parametrica, non lineare e probabilistica. Tale modello fornisce una previsione puntuale del tempo delle fasi ma anche associa a tale previsione una misura di incertezza. [113;114;115] Contestualizzato al caso di studio questo modello è rilevante perché con un numero ridotto di dati non è sufficiente conoscere il valore predetto e si rende necessario dunque valutare anche il grado di affidabilità della stima ottenuta. Il modello GPR permette esplorare relazioni meno rigide fra i fattori descrittivi del pezzo FF e i tempi previsti degli scenari mantenendo al contempo una lettura prudente del risultato e coerente con la natura ancora molto indicativa ed embrionale.

Entrambi gli algoritmi scelti tendono a verificare la possibilità di trasformare la base di dati in una prima struttura di ancoraggio per due differenti modelli predittivi coerenti con i dati reali. Il modello è stato dunque formalizzato in una struttura compatibile ad una estensione predittiva, identificando la knowledge base come utilizzabile in termini di apprendimento supervisionato.

#### **7.4 LOGICA OPERATIVA DEL MODELLO QUANDO VIENE INSERITO UN NUOVO PEZZO**

Quando nella cella di produzione arriva un nuovo pezzo, il modello legge i suoi valori e avvia una catena di passaggi che collega la descrizione sintetica dello stesso alla previsione più conveniente dello scenario operativo. In tale circostanza il punto di ingresso necessario per una previsione è costituito da FG e FC in quanto codesti rappresentano il pezzo in forma immediata nella loro struttura geometrica e compositiva invece, FM, è un indice di natura operativa e di manovrabilità cui conoscenza delle sue variabili avviene proprio durante le attività di post processing motivo per cui non può essere considerato un contributo all'input iniziale. Dunque, con FM non disponibile (nelle sue 16 variabili quando la Fase 3 è attiva o 11 quando è disattiva) il sistema procede con una stima preliminare.

In mancanza di FM (non inserito manualmente) il modello algoritmico si comporta come elencato a seguire e riportato nella Figura 19:

- Seleziona i casi storici compatibili dal database e legge tutti i relativi valori FG, FC e FM
- Costruisce una stima sui casi più vicini nello spazio FG-FC consultati nel passo precedente
- Per ogni simulazione memorizzata crea un calcolo della distanza standardizzata ossia cerca gli scostamenti tra il nuovo pezzo e la simulazione già nota
- Dei valori storici FG e FC si calcola la deviazione standard e seleziona i tre con meno scostamento
- Effettua una stima preliminare di FM
- Assegna un peso ai casi storici delle simulazioni, i più vicini con peso maggiore chiaramente
- Limita il risultato ottenuto un intervallo 0 - 1 in coerenza con il sistema adottato riguardante la normalizzazione di tutti i fattori analizzati nel modello finora.

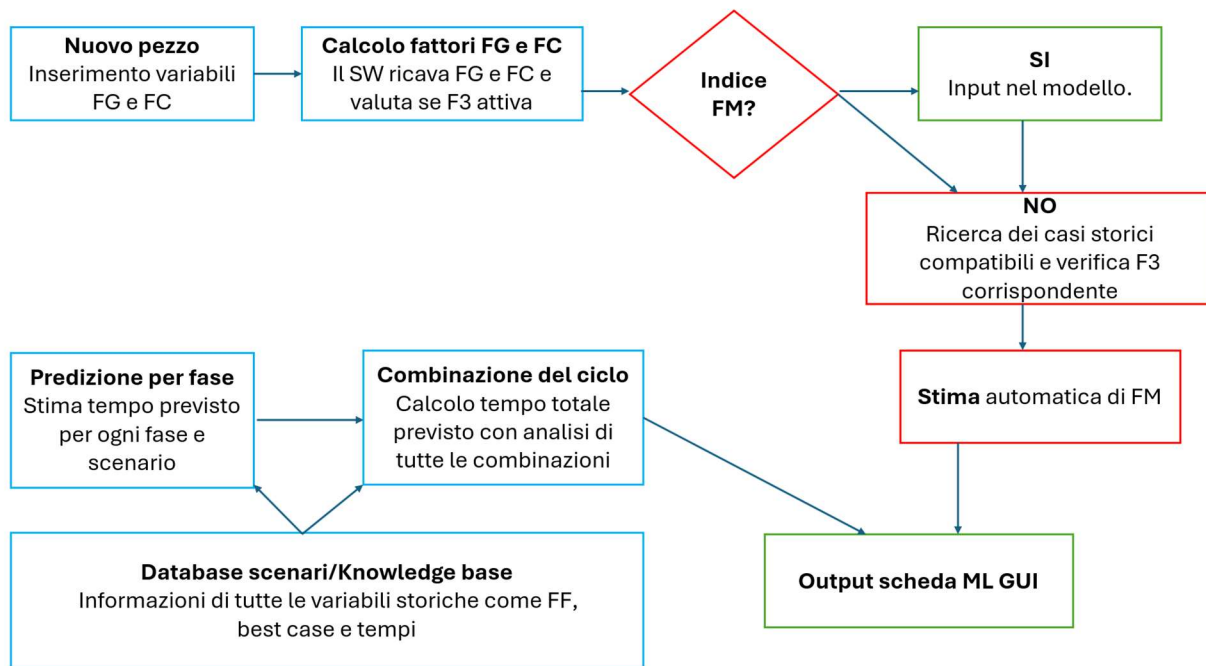


Figura 19. Flusso logico della previsione del nuovo pezzo nella scheda ML

La stima preliminare di FM non va a sostituire la valutazione esperta riguardante l'operabilità della simulazione però consente al modello di conservare la capacità di proporre una previsione dello scenario già in ingresso mantenendo una coerenza sempre con le basi sperimentali disponibili. La mancanza di FM non può essere assegnata ad un valore nullo ma stimata dai casi storici più vicini nell'intervallo FG-FC.

In un futuro, un modello efficacemente addestrato potrebbe elaborare come output, non solo le previsioni di miglior scenario e assegnazione dei compiti, ma arrivare a stimare anche delle variabili comportamentali e operative rappresentate da FM come, per esempio, se considerare o meno il supporto, quali tool utilizzare, livello di maneggiabilità del pezzo, ecc.

Procedendo in questa maniera si assume un valore metodologico che permette di usare il modulo predittivo anche quando un pezzo chiaramente non è stato già descritto operativamente rendendo il modello algoritmico più coerente proprio con una logica di supporto ad una riconfigurazione rapida. In definitiva il modello ML rappresenta un primo ambiente di sperimentazione guidata, ancora concettuale, ma coerente con future estensioni del data set e con possibili affinamenti dei moduli di supporto decisionale futuri.

### 8.1 VALIDAZIONE MODELLO

#### 8.1.1 Validazione deterministica del modello (calcolo + software)

La validazione ha riguardato l'allineamento tra i dati sperimentali delle simulazioni, la loro formalizzazione teorica e la successiva implementazione nel software. Questo iter ha seguito un percorso completo che va dall'acquisizione dei dati reali di laboratorio fino ad arrivare alla reinterpretazione in ambiente Python con restituzione finale nella GUI in Visual Studio Code. I valori sperimentali prima sono stati organizzati in tabelle di calcolo e dopo ricondotti a fattori sintetici del modello come FG, FC e FM. La verifica ha mostrato corrispondenza tra:

- valori sperimentali iniziali
- risultati ottenuti nelle tabelle teoriche di calcolo
- coefficienti e sotto coefficienti calcolati nel modello teorico
- valori restituiti con esattezza e corrispondenza dal software

L' allineamento non riguarda soltanto il valore finale del fattore di forma ma tutta la struttura di calcolo. La coerenza è stata verificata tra formule matematiche, tabelle teoriche, codice Python e output visualizzati dimostrando che il software rappresenta correttamente il modello elaborato nella ricerca. In Appendice 11.9 si riportano alcuni blocchi logici più rappresentativi del codice. Il controllo di consistenza è stato condotto su quattro livelli: dato inserito, dato calcolato, dato visualizzato e dato interpretabile operativamente.

La validazione è stata anche di carattere funzionale. I risultati restituiti dal software (Appendice 11.10) sono corretti sul piano numerico e coerenti con il comportamento osservato nei casi reali. L'estrazione complessiva delle assegnazioni dei compiti all' operatore, cobot o uomo-cobot consente di quantificare in forma oggettiva il risultato sperimentale già emerso nell'analisi sperimentale.

Il fattore FF include i fattori FG, FC e FM, qualora un solo dato in tutto l'iter di calcolo, non corrispondesse, il valore FF sarebbe differente e inesatto. Per quanto concerne i tempi delle fasi e scenari questi sono dati ad inserimento manuale. L'interfaccia permette anche richiamare simulazioni memorizzate.

A seguire la validazione deterministica dei dati inseriti nel dataset del software tramite corrispondenza tra numeri provenienti dal calcolo e numeri rappresentati dal software tramite GUI.

Tabelle estratta dalla teoria analitica: valori finali reali di calcolo di FF, FG, FC e FM

<b>Simulazione</b>	<b>FG</b>	<b>FC</b>	<b>FM</b>	<b>FF</b>
<b>Mascherina tasti moto</b>	0.387124	0.000000	0.227273	0.204799
<b>Rivetti</b>	0.297756	0.381665	0.545455	0.408292
<b>Manopola cambio</b>	0.261240	0.146819	0.227273	0.211777
<b>Snorkel</b>	0.375191	0.811013	0.828125	0.671443
<b>Porta consolle</b>	0.360056	0.678634	0.453125	0.497272
<b>Piastra passaruota</b>	0.485205	0.000000	0.454545	0.313250

A seguire la verifica grafica dei valori output della GUI corrispondenti al calcolo teorico per ciascun best case del pezzo analizzato:

### Mascherina: 0.204799

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | necessita di  
F3 | maneggiabilit

Scenari HRC  
F1 | uomo: 7.230000  
-> migliore: uomo  
F2 | uomo: 101.22000  
-> migliore: uomo  
F3 | esclusa (Assemb)

Valori finali  
F\_geom = 0.387124  
F\_comp = 0.000000  
F\_manov = 0.227273  
FF = 0.204799

### Rivetti: 0.408292

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | necessita di  
F3 | maneggiabili

Scenari HRC  
F1 | uomo: 16.39000  
-> migliore: uomo  
F2 | uomo: 356.0300  
-> migliore: uomo  
F3 | esclusa (Assem)

Valori finali  
F\_geom = 0.297756  
F\_comp = 0.381665  
F\_manov = 0.545455  
FF = 0.408292

### Manopola: 0.211777

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | necessita d  
F3 | maneggiabil

Scenari HRC  
F1 | uomo: 17.1100  
-> migliore: uom  
F2 | uomo: 186.730  
-> migliore: uom  
F3 | esclusa (Asse)

Valori finali  
F\_geom = 0.261240  
F\_comp = 0.146819  
F\_manov = 0.227273  
FF = 0.211777

### Snorkel: 0.671443

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | maneggiabilit

Scenari HRC  
F1 | uomo: 18.70000  
-> migliore: uom  
F2 | uomo: 694.6500  
-> migliore: uom  
F3 | uomo: 346.0900  
-> migliore: uom

Valori finali  
F\_geom = 0.375191  
F\_comp = 0.811013  
F\_manov = 0.828125  
FF = 0.671443

Porta consolle: 0.497272

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | maneggiabilita

Scenari HRC

F1 | uomo: 6.770000  
-> migliore: uomc

F2 | uomo: 188.5000  
-> migliore: uomc

F3 | uomo: 39.10000  
-> migliore: uomc

---

Valori finali

F\_geom = 0.360056  
F\_comp = 0.678634  
F\_manov = 0.453125  
FF = 0.497272

Piastra copertura arco: 0.313250

Database scenari											
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo I	Migliore F2	Tempo F:	Migliore F3	Tempo
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.20479	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.40829	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.21177	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.67144	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.49727	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

F3 | necessita d:

F3 | maneggiabil:

Scenari HRC

F1 | uomo: 14.93000  
-> migliore: uomc

F2 | uomo: 428.7100  
-> migliore: uomc

F3 | esclusa (Asser

---

Valori finali

F\_geom = 0.485205  
F\_comp = 0.000000  
F\_manov = 0.454545  
FF = 0.313250

### 8.1.2 Valutazione della capacità predittiva del modello di Machine Learning

Diversamente, per quanto concerne la componente predittiva, è stato considerato lo studio di un nuovo pezzo da stampare e simulare, selezionato in modo da risultare geometricamente e funzionalmente simile a uno dei casi già analizzati come la Piastra arco ruota identificata con S7 (Figura 20).

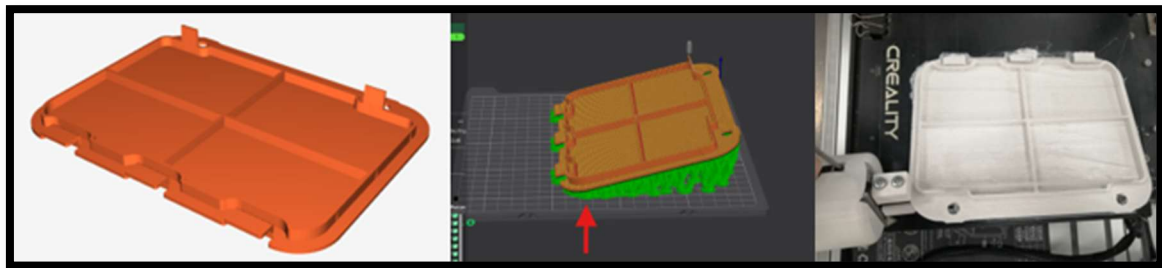


Figura 20. Piastra Arco ruota studiata nelle prime simulazioni sperimentali

Nello specifico, è stata scelta una nuova piastra cover per Renault Megane III (Figura 21) che definiremo Simulazione Nuova (SN), utilizzata come caso di prova per valutare la capacità del modello di Machine Learning di generalizzare le relazioni apprese.

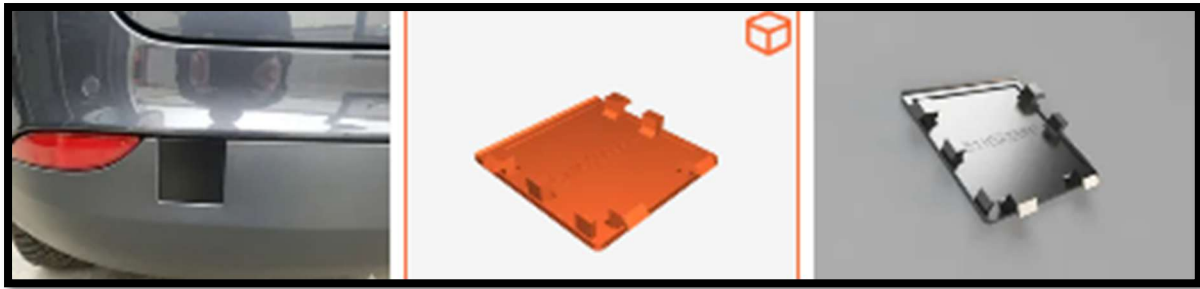


Figura 21. Nuovo Pezzo da stampare come prova per dimostrare la validazione dell'algoritmo ML implementato

È opportuno sottolineare che tale analisi non può essere considerata una validazione in senso forte, a causa della limitata numerosità del dataset disponibile, che non consente di garantire un livello di affidabilità pieno e definitivo del sistema predittivo, attualmente in una fase ancora preliminare. A supporto di tale confronto, si riportano le principali differenze dimensionali tra i due componenti (Tabella 18), da cui emerge come il nuovo pezzo presenti una scala geometrica significativamente ridotta, pur mantenendo caratteristiche morfologiche analoghe.

Componente	X_mm	Y_mm	Z_mm	Volume_mm3
<b>Piastra arco ruota – S7</b>	144,00	187,00	19,00	62654,60
<b>Nuova Piastra di studio</b>	66.65	64.95	8.50	7707.87

Tabella 18. Confronto dimensionale tra le due Piastre oggetto di studio

Per l'analisi comparativa S7 viene direttamente selezionata dallo storico del data set come rappresentato in Figura 22 mentre per SN i dati dimensionali vengono introdotti manualmente nella scheda F Geometrico come visibile in Figura 23

Database scenari					
ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.204799
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.204799
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.408292
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.211777
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.671443
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.497272
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325

Figura 22. Selezione della simulazione Piastra Copertura Ruota

Calcola Salva sessione Carica sessione Azzera Salva grafico

F\_geom F\_comp F\_manov Scenari HRC ML

Dimensioni massime  
 Vx 220.0 Vy 220.0 Vz 300.0

Dimensioni minime  
 dmin\_x 0.4 dmin\_y 0.4 dmin\_z 0.1

NC\_Max  
 Numero massimo componenti 4

Componenti  
 Numero componenti 1 Aggiorna tabella N\_c automatico: 1

Nota: per ogni componente il Volume deve essere  $\leq X*Y*Z$ . I coefficienti geometrici sono limitati automaticamente nell'intervallo [0, 1].

#	Nome	X	Y	Z	Volume
1	PIASTRA PROVA RENAUL	66.65	64.95	8.50	7707.87

Figura 23. Nuovo componente Piastra per Megane inserito nel modello

Si analizza il sistema con Algoritmo Ridge Regression e si verificano più comportamenti di funzionamento e validità del modello.

- Calcolo FG, FM e FC per SN.

Le dimensioni di SN sono inferiori rispetto S7 e il sistema imputa correttamente un valore inferiore di FG a SN. Valore FG (SN) = 0.4363

Anche il valore di FM di SN (0.303357) come mostrato in Figura 24 risulta essere inferiore a quello di S7 già noto. (0.454545)

```

SIMULAZIONE Nuova PIASTRA SN

NUOVO COMPONENTE - CONFIGURAZIONE OTTIMA
=====
Algoritmo: Ridge Regression
Fattori inseriti -> F_geom=0.436323, F_comp=0.000000, F_manov=0.303357
Origine F_manov: stimato automaticamente da FG+FC
  
```

Figura 24. Stima automatica di FM per il nuovo sistema

FM viene dunque stimato automaticamente basandosi su casi storici vicini consentendo di completare l'analisi anche in assenza dei dati legati alla manovrabilità e questi sono:

1. PIASTRA Copertura Ruota

2. Mascherina - CON supporto
3. Mascherina - SENZA supporto

Dimostrando piena coerenza decisionale di scelta dei casi storici più vicini considerando la Piastra (S7) come caso di maggiore similitudine.

Inoltre, l'assegnazione di valori ridotti di FG e FM dimostra che il modello attribuisce a SN un valore ridotto dimensionalmente e leggermente meno complesso. Il sistema risponde coerentemente a questa differenza, stimando per SN tempi inferiori rispetto S7 (Figura 25).

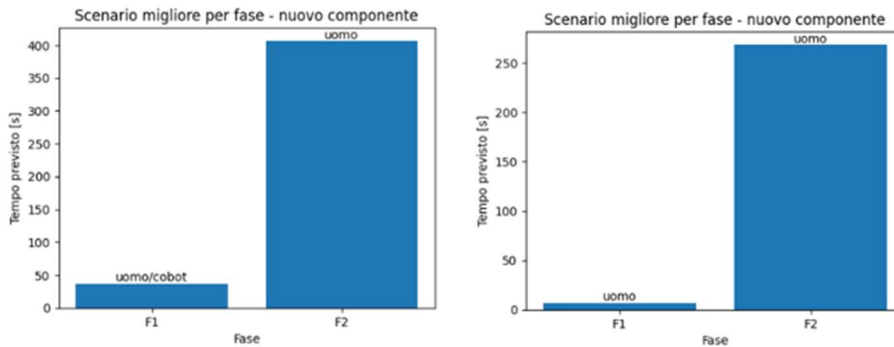


Figura 25. Scenario migliore per fase. A sinistra S7 e a destra SN

L'indice FC il modello lo legge e identifica come valore nullo automaticamente, infatti, non vi è fase di assemblaggio F3.

- Confronto scenari per fase

Nella S7 si conferma lo scenario migliore uomo-cobot mentre in SN il sistema suggerisce Uomo sia in F1 che in F2 (Figura 26). Questo è un risultato coerente perché la nuova piastra ha geometria e complessità inferiore dimostrato dai due FG e FM. Infatti, il vantaggio della collaborazione con cobot tende a ridursi quando il componente è più semplice da gestire manualmente soprattutto per quanto riguarda il distacco e presa. Questo dimostra che il modello non privilegia automaticamente uno scenario ma seleziona l'alternativa più coerente mostrando una capacità di selezione fase specifica.

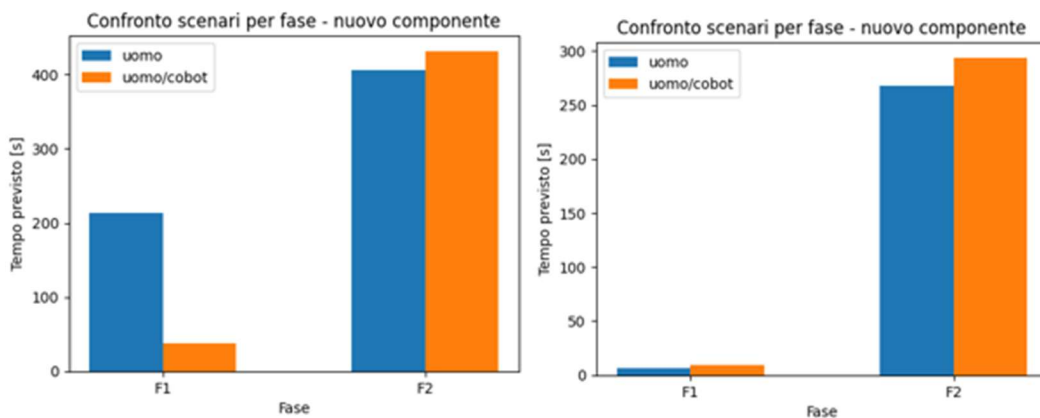


Figura 26. Confronto tra Scenario migliore per fase tra le due simulazioni. A sinistra S7 e a destra SN

- Predetto VS Reale

Le Figure 27 e 28 mostrano il confronto tra valori reali e valori predetti per le due fasi considerate. La lettura ha valore esplorativo, poiché il numero di osservazioni è limitato e non consente una piena generalizzazione del modello.

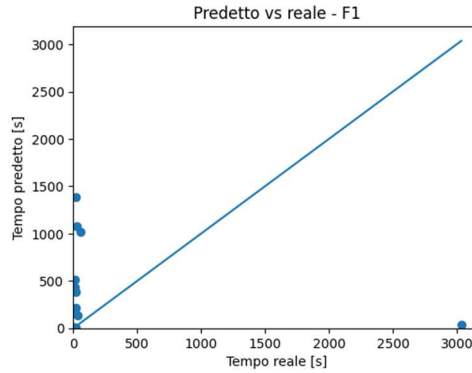


Figura 27. Predetto VS Reale. Dispersione per mancanza dati Fase 1

Per la Fase 1, i punti risultano più dispersi rispetto alla linea ideale. Questo indica una stima meno stabile, condizionata dalla variabilità dei casi osservati e dalla ridotta numerosità del dataset.

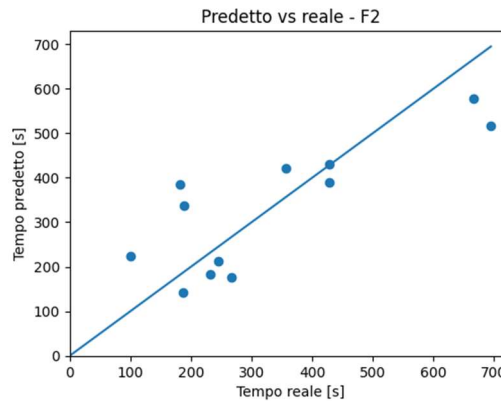


Figura 28. Predetto VS Reale. Coerenza predittiva quando il set è più popolato come nella Fase 2

Per la Fase 2, i punti appaiono più vicini alla linea ideale rispetto alla Fase 1. Minore scostamento dalla diagonale indica che il modello stia cogliendo meglio le relazioni tra i fattori descrittivi e i tempi operativi inseriti nel modello come storico. Il risultato suggerisce una maggiore coerenza della stima, pur restando all'interno di una validazione preliminare.

## - Residui

Le Figure 29 e 30 riportano i residui, cioè la differenza tra valore reale e valore predetto. La distribuzione rispetto alla linea dello zero permette di osservare l'entità e l'equilibrio degli errori di stima.

Analogamente al caso precedente nella Fase 1 i residui risultano più ampi e meno regolari. Questo conferma che la stima, per questa fase, è ancora instabile, evidenziando la necessità di ampliare il dataset di confronto

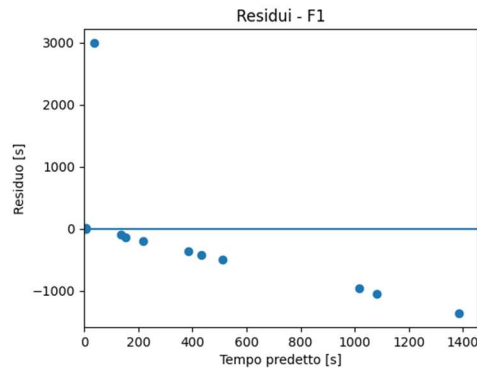


Figura 29. Residui. Dispersione per mancanza dati Fase 1

I residui nella Fase 2 risultano più equilibrati con errori distribuiti sia sopra sia sotto lo zero. La maggiore stabilità dei residui rende la previsione della Fase 2 più interpretabile e supporta l'utilizzo del sistema come strumento preliminare di confronto tra scenari avallando l'importanza di uno storico dati necessario.

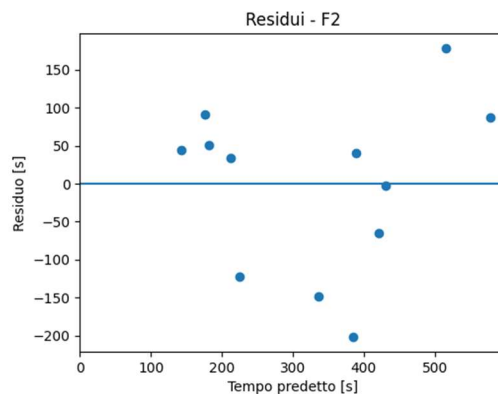


Figura 30. Residui. Coerenza predittiva quando il set è più popolato come nella Fase 2

Nel complesso, i grafici confermano il carattere preliminare dell'applicazione predittiva. La Fase 2 mostra un comportamento più regolare, mentre la Fase 1 richiede ulteriori dati per una valutazione più robusta. Il risultato principale resta quindi la costruzione di una base dati strutturata, utile per eventuali sviluppi futuri del modello. Alla luce di queste considerazioni, si può concludere che l'approccio di Machine Learning risulta coerente e funzionante e deve essere interpretato come un primo sviluppo preliminare embrionale per miglioramenti futuri, soprattutto associati al necessario popolamento del dataset.

## 8.2 BASE DATI PERSONALIZZATA

L'elemento centrale della base di dati non è la correttezza della traduzione tra modello e software ma la sua qualità informativa. Tutto lo sviluppo laboratoriale è stato condotto attribuendo valore principale alla qualità dell'input, con l'obiettivo di costruire una base dati ad alta densità tecnico-informativa, fondata su variabili operative realmente osservate nei casi di studio.

Tale base dati oggetto di studio può essere definita personalizzata perché non deriva da un insieme generico di parametri ma, al contrario, da una selezione mirata di quanto è stato ritenuto effettivamente necessario in quel contesto produttivo specifico e simulazione specifica.

La sua verifica riguarda la pertinenza delle variabili, la qualità del contenuto che esse contengono e la coerenza della knowledge base costruita. Il concetto base è che il modello e poi la sua rappresentazione in una GUI non possa compensare un input che sia debole o errato in quanto la qualità del risultato finale, scenario migliore, dipende direttamente dalla qualità tecnico informativa del dato in ingresso. Per tale motivo la robustezza del progetto di studio non risiede nel futuro, e a quale migliore algoritmo di machine learning implementare, ma nel presente reale e nella solidità della base dati, correttezza del criterio descrittivo e successiva capacità della knowledge base di rappresentare fedelmente il dominio reale che è stato osservato in laboratorio. *Solo un alto valore qualitativo alla radice oggi, può garantire il miglior sviluppo predittivo intelligente domani.*

Il sistema attuale può essere letto come una prima forma strutturata di preparazione del dato per sviluppi successivi di apprendimento supervisionato, per lo meno nella prima fase di addestramento. Tale modello resta descrittivo e comparativo ma la base dati costituisce già un risultato metodologico autonomo in quanto selezionata, costruita e verificata per sostenere futuri avanzamenti fortemente intelligenti del sistema.

## 8.3 APPROSSIMAZIONI DEL MODELLO

La principale limitazione di questo lavoro è rappresentata dal numero contenuto delle simulazioni sperimentali. Il dataset disponibile ha consentito di costruire una base reale utile per l'impostazione del modello ma, chiaramente, non sufficiente per attribuire robustezza statistica e di generalizzabilità estesa; anche a 30 simulazioni laboratoriali, comunque, il campione dati risulterebbe essere insufficiente per sostenere un reale sistema intelligente affidabile definitivo.

Con un numero molto ridotto di casi il limite non diventa più solo statistico ma anche metodologico. Un'elevata numerosità di variabili rispetto a poche simulazioni impatta negativamente sulla solidità degli output cadendo in overfitting, indebolisce la capacità di generalizzazione e sposta inevitabilmente il progetto da un piano fortemente operativo-applicativo verso un piano più ipotetico e teorico soprattutto nello studio della sua componente predittiva. Sulla base di questa consapevolezza lo studio della parte predittiva in questa ricerca non costituisce il campo conclusivo e finale del progetto di studio ma è una possibile estensione concettuale futura.

Altro vincolo è risultato l'infrastruttura di collegamento mancante tra cobot e rete tramite ethernet. Questa carenza ha impossibilitato l'integrazione del lavoro sperimentale con il software di gestione del cobot (robodk) e difficoltàato l'utilizzo dei programmi cobot. Tanto la programmazione del cobot come l'importazione degli alberi del programma è avvenuta direttamente dal teach pendant con

conseguente riduzione della flessibilità dei test simulativi, modifiche o ottimizzazioni offline dei movimenti che avrebbero agevolato campioni simulativi non reali, e quindi di potenziale verifica.

Altra limitazione è stata l'utilizzo di una sola bobina di filamento PLA disponibile, impattando lievemente su alcune scelte progettuali di stampa.

Altra limitazione è stata la disponibilità di una singola pinza come end effector del cobot. Si osserva che qualora ci fossero state altre tipologie disponibili il lavoro avrebbe avuto altri criteri di sviluppo.

Questa limitazione è stata trasformata in una ipotesi fondamentale per garantire confrontabilità.

Il vincolo complessivo più importante è stato quello temporale in quanto l'intero lavoro sperimentale è stato sviluppato in un intervallo di tempo ridotto. In questo lasso temporale si è dovuta considerare l'installazione delle macchine e loro integrazione nel layout, configurazione dei software delle macchine, organizzazione della cella, programmazione cobot e stampante, svolgimento degli esperimenti.

### 9.1 RISULTATI SUL RUOLO DELL'OPERATORE

#### 9.1.1 Risultati simulazioni laboratoriali: scenari collaborativi

Considerando ogni pezzo e componente analizzato e ciascuna fase/sottofase, emergono comportamenti differenti e, di conseguenza, scenari collaborativi variabili.

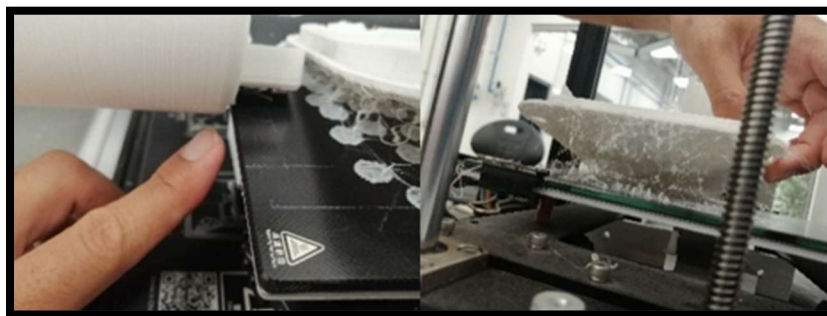
L'identificazione dello scenario non può essere effettuata soltanto a livello di fase, perché all'interno della stessa fase le sottofasi possono richiedere regole di collaborazione diverse e la relazione uomo-cobot può assumere configurazioni diverse anche all'interno della stessa fase. Di conseguenza, l'attribuzione dello scenario viene condotta al livello di sottofase, dove la ripartizione dei compiti e la dinamica di collaborazione risultano più chiaramente osservabili e quindi necessitano di una analisi più al dettaglio. Nella Tabella 19 si riportano tutte le dinamiche di collaborazione per quanto riguarda fasi e sottofasi dei best case identificati per ciascun pezzo.

L'analisi richiede che gli scenari siano identificati caso per caso, mantenendo coerenza anche con il piano di sicurezza adottato, le logiche di controllo e le strategie di arresto, così da garantire una valutazione robusta e ridurre ambiguità nelle scelte di integrazione della cella analizzata.

Quando le attività risultano integralmente eseguite dall'operatore come unico agente abilitato, mentre il cobot è presente nella cella ma non partecipa all'operazione, la configurazione osservata corrisponde a uno scenario di coesistenza, caratterizzato dall'indipendenza funzionale dei due agenti.

Quando l'operatore porta a termine l'operazione utilizzando il cobot come dispositivo di stabilizzazione (ad esempio come morsa di supporto) durante la Fase 2 e Fase 3 lo scenario è riconducibile alla sincronizzazione perché l'area di lavoro (stampante 3D, cobot e banco) è pienamente condivisa, ma i compiti rimangono distinti. Operatore e cobot operano quindi sul medesimo componente in modo parallelo, con ruoli separati che richiedono coordinamento, pur senza una dipendenza diretta di esecuzione tra le azioni.

In altri casi, la sequenza operativa evidenzia una dipendenza temporale tra i due agenti, configurando uno scenario di cooperazione. Un esempio è la fase di distacco ed estrazione dal letto di stampa della simulazione S7, in cui il cobot esegue inizialmente il distacco del componente dal piatto; successivamente l'operatore effettua la presa, lo scardinamento delle radici del materiale di supporto e l'estrazione dal volume di stampa. In questo caso, l'esito del primo step costituisce la condizione necessaria per l'avvio del secondo (Figura 31).



*Figura 31. Distacco cobot e presa uomo: scenario di cooperazione*

Infine, nelle fasi di assemblaggio, ad esempio durante l'avvitamento nelle simulazioni S5 e S6, l'azione assume natura interattiva e orientata allo stesso obiettivo. In tale circostanza lo scenario è di

collaborazione, poiché il cobot svolge un ruolo effettivamente supportivo e condivide con l'operatore non solo lo spazio di lavoro, ma anche il compito, attraverso un coordinamento stretto delle azioni.

Simulazione	Fase	Sottofase	Agenti Abilitati	Scenario Uomo-cobot
S1	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		Uomo	coesistenza
	Assemblaggio		Non prevista	-
S2	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		HRC	sincronizzazione
	Assemblaggio		Non prevista	-
S3	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		Uomo	coesistenza
	Assemblaggio		Non prevista	-
S4	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		HRC	sincronizzazione
	Assemblaggio		Non prevista	-
S5	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		HRC	sincronizzazione
	Assemblaggio		HRC	collaborazione
S6	Stacco/Estrazione		Uomo	coesistenza
	Pulizia/Asportazione		HRC	sincronizzazione
	Assemblaggio		HRC	collaborazione
S7	Stacco/Estrazione	Distacco	Cobot	cooperazione
		Presca e posizionamento	Uomo	
	Pulizia/Asportazione		Uomo	coesistenza
	Assemblaggio		Non prevista	-

Tabella 19. Identificazione degli scenari collaborativi

La distribuzione degli scenari collaborativi mostra una prevalenza della coesistenza, osservata in 9 casi su 16 configurazioni operative attive ossia pari al 56,3%. La sincronizzazione compare in 4 casi, pari al 25%, mentre cooperazione e collaborazione risultano meno frequenti, con 2 casi di collaborazione pari al 12,5% e un caso di cooperazione (6,3%). Questo risultato conferma che la collaborazione uomo-cobot non rappresenta la configurazione dominante dell'intero processo, ma emerge in modo selettivo solo in specifiche fasi operative.

### 9.1.2 Risultati simulazioni laboratoriali: operativi

Il cobot ha svolto i seguenti ruoli di:

- maneggiabilità dei componenti con operazioni di distacco, presa, movimentazione e rilascio
- stabilizzazione del pezzo come una morsa mobile e/o stabile per assistenza e supporto alla pulizia, asportazione supporto e assemblaggio quando presente.

A priori di ogni simulazione si è considerato un quadro di verifica realizzativo:

- impostazione e controllo dei parametri operativi
- pianificazione del percorso degli utensili e generazione della traiettoria del TCP
- limiti di sicurezza

- fattori umani

Il braccio antropomorfo è stato valutato non come automazione sostitutiva, ma come strumento orientato a qualità, efficienza e sicurezza.

L'impostazione e controllo dei parametri operativi si è rivelata determinante soprattutto nelle fasi di distacco oltre all'intera sequenza di movimento del ciclo operativo del cobot. Nelle simulazioni S4 e S5, variazioni di velocità, accelerazione specifica e altezza di approccio al componente sul letto di stampa hanno influenzato in modo significativo il successo del distacco dei componenti tramite cobot, evidenziando che la sola potenza del sistema non è sufficiente senza una calibrazione fine rispetto alla geometria, alla presenza di supporti o tipologia di orientamento.

La pianificazione del percorso del TCP e la generazione della traiettoria hanno inciso soprattutto nelle simulazioni con vincoli di layout e spazio di manovra. L'utilizzo di Freedrive, l'inserimento di waypoint e l'impossibilità di adottare movimenti MOVE J in prossimità del piatto e dei montanti della stampante 3D hanno mostrato come la traiettoria non sia un aspetto secondario ma una variabile critica che può determinare arresti di emergenza o importanti inefficienze temporali. La presenza dell'operatore, per considerare quale il punto esatto in cui il TCP deve essere programmato, è risultato fondamentale per motivi di realizzazione e sicurezza dell'operazione.

Infine, i piani di sicurezza impostati nella parte retrostante del banco lavoro (piano sicurezza sul piano YZ) e gli importanti condizionamenti dovuti ai montanti della stampante, hanno condizionato l'intero workflow implementando dei limiti di forza, velocità ridotte e arresti protettivi.

I contributi apportati dall'operatore emergono come centrali soprattutto nelle fasi di pulizia e asportazione supporto (come nelle simulazioni S5 e S7) dove il cobot ha generato valore solo quando utilizzato come supporto stabile, liberando entrambe le mani dell'operatore e riducendo carico fisico, rischio di errore e di infortunio. Al contrario, in operazioni brevi o semplici l'introduzione del cobot ha generato criticità per la identificazione delle coordinate esatte del TCP e a volte anche con conseguente arresto di protezione e dilungamento dei tempi di programmazione.

Riassunti per singola fase:

#### Fase 1. Distacco/ Estrazione dal letto di stampa

Nei casi con ampia superficie planare, la forza richiesta per il distacco aumenta significativamente; in alcuni casi non ha effetto alcuno l'utilizzo del cobot rischiando anzi di muovere la stampante e/o abilitare un arresto di emergenza, come rappresentato in Figura 32, risultando fondamentale l'intervento dell'operatore anche a posteriori. Evento accaduto in più simulazioni (S1, S4 e S7).

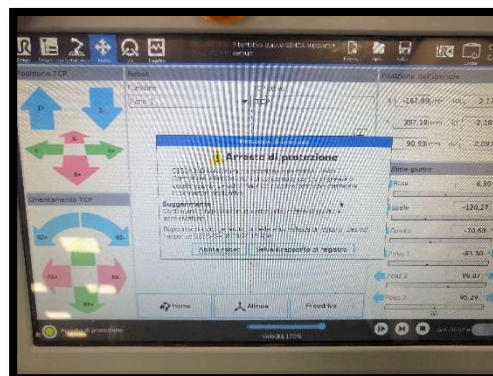


Figura 32. Avviso pendant arresto di emergenza

Il distacco con braccio robotico è spesso più lento o più complesso rispetto allo stacco manuale.

In altri casi il cobot compensa con punti di contatto ai quali, imputando una forza e accelerazione specifica, sradica la radice del materiale di supporto permettendo una presa e movimentazione più fluida a posteriori per la presa e movimentazione (S6 e S7)

Il dato sperimentale mostra che la Fase 1 si è rivelata altamente sensibile a molteplici fattori:

- quantità di superficie di contatto con il letto
- tipologia e densità dei supporti
- accessibilità per il TCP del cobot nel volume di lavoro della stampante 3D
- rigidità e spessore del componente
- posizionamento e orientamento specifico sul letto di stampa
- studio della traiettoria per eventuale estrazione dal letto di stampa
- sbraccio del cobot e raggiungibilità.

Le strategie robotiche richiedono dunque una importante riprogrammazione, controllo Freedrive, studio dei punti di raccordo, velocità e accelerazione del TCP in particolare quando la movimentazione è interna al volume di lavoro della stampante; movimentazione legata non solo alla presa e allontanamento ma anche al rischio di deformazione del pezzo e forze indesiderate sul letto della stampante. Per ovviare a questo rischio è stato affrontato uno studio preliminare sulle velocità e accelerazioni dei giunti del cobot per conoscere previamente alle simulazioni i limiti ammissibili (Appendice 11.5) mantenendo in sicurezza la cella e non compromettendo le stampe dei pezzi.

Nei casi con supporti ad albero leggeri, il distacco come anche la presa diventa più prevedibile e semplificativa ma introduce una successiva criticità nella fase successiva di pulizia e rimozione del materiale di supporto.

In definitiva, il distacco dal letto di stampa è una sottofase ad alta variabilità e decisione adattiva.

Quando si richiede l'ausilio del cobot l'operatore, per sicurezza, agisce come controllore e attuttore dinamico, non solo come programmatore dei movimenti, e, vista la precisione richiesta, risulta essere fondamentale la programmazione Freedrive.

## Fase 2. Pulizia preliminare/asportazione supporto

La fase di pulizia e/o rimozione del materiale di supporto si è dimostrata, in più casi, la fase dominante del tempo ciclo.

Nei casi con supporto (S2, S6 e S7), il tempo di asportazione supera ampiamente quello di distacco. L'analisi HRC mostra che l'utilizzo del cobot come sistema di stabilizzazione consente avere due mani libere e questo implica:

- migliorare l'ergonomia e ridurre lo sforzo per operazioni prolungate
- ridurre il rischio infortunio non mantenendo con una mano il manufatto e con l'altra gli strumenti di lavoro pericolosi
- permettere maggiore precisione nelle cavità o nei punti radice dei supporti e dove è alta la richiesta di precisione

Il miglioramento percentuale sui tempi degli scenari solo operatore è moderato ma l'impatto migliorativo è rilevante in termini di:

- carico fisico
- controllo fine e preciso che impatta direttamente sugli standard qualitativi del pezzo finale
- sicurezza operativa.

## Fase 3. Assemblaggio

L'assemblaggio ha mostrato un comportamento dipendente dalla complessità del pezzo stesso.

Nei casi semplici (S6), l'operatore è più rapido.

Nei casi con più componenti e necessità di stabilità (S5), l'HRC risulta vantaggioso.

Il cobot non accelera automaticamente l'assemblaggio ma introduce valore solo quando la stabilizzazione compensa la criticità di manipolazione.

Come anche nel caso della fase precedente di pulizia e rimozione del supporto, il cobot risulta migliorare le prestazioni generali utilizzandolo come morsa mobile e dinamica con orientamento di presa identificata dall'operatore.

In conclusione, a riguardo delle tre fasi analizzate, il cobot ha generato valore soprattutto come morsa stabile o mobile e in alcuni casi come supporto allo stacco. Nelle operazioni semplici o rapide, invece, la sua introduzione ha prodotto maggiore complessità di traiettoria, programmazione e controllo.

### 9.1.3 Variazione rispetto lo scenario "solo operatore"

Considerando nel campione di studio le 7 simulazioni e i best case identificati, si contano 16 Fasi attive, delle quali 11 coincidono con lo scenario solo uomo, 5 uomo-cobot e come già noto per ipotesi nulle le finalizzazioni di fase solo cobot (Figura 33).

Mappa dei best case per fase

Simulazione	F1	F2	F3
S1	U	U	—
S2	U	U+C	—
S3	U	U	—
S4	U	U	—
S5	U	U+C	U+C
S6	U	U+C	U
S7	U+C	U	—

Figura 33. Mappa dei best case per fase. S1=Mascherina senza supporto, S2=Mascherina con supporto, S3=Rivetti, S4=Manopola, S5= Snorkel, S6=Porta console, S7=Piastra arco ruota

Delle 7 simulazioni si osserva come scenario migliore HRC quattro casi su sette e scenario solo uomo con tre casi su sette. I casi favorevoli HRC sono:

- mascherina con supporto
- snorkel
- porta console
- piastra copertura

I casi favorevoli uomo sono:

- mascherina senza supporto
- rivetti
- manopola cambio marcia

Considerando come riferimento la baseline umana dei tempi di esecuzione, possiamo far emergere come dati di studio che la somma dei tempi nello scenario uomo (2700,49 s) è poco superiore a quella degli scenari migliori in generale (2615,96 s), quindi con l'utilizzo di cobot in almeno una operazione.

In altre parole, vi è un miglioramento con l'automatizzazione ma non di rilevanti ordini di grandezza. Nella Tabella 20 si può osservare che in questo campione di studio di 7 simulazioni il risparmio è pari a 84,53 secondi, equivalente al 3,1% per quanto riguarda la totalità delle simulazioni.

Indicatore	Valore
<b>Decisioni di fase attive</b>	16
<b>Best case uomo</b>	11
<b>Best case uomo/cobot</b>	5
<b>Best case cobot</b>	0
<b>Riduzione complessiva best vs uomo</b>	3.1%

Tabella 20. Distribuzione numerica delle decisioni di fase

L'utilizzo del cobot conferma dunque che ci sia un vantaggio, ma non un vantaggio generalizzato, perché, l'assegnazione di un compito al cobot, è stato un criterio davvero selettivo e sempre dipendente dal caso della simulazione. La collaborazione uomo-cobot è risultata efficace nei casi in cui l'articolazione operativa ha richiesto davvero una ripartizione dei compiti, al contrario nei casi più semplici e meno favorevoli alla cooperazione fra operatore e cobot, l'operatore continua a rappresentare la soluzione più efficiente.

La variazione ottenuta rispetto allo scenario uomo ci aiuta a quantificare in termini assoluti (tempi) o percentuale il margine reale di convenienza di un modello collaborativo o meno. In questa chiave di lettura si può riflettere sull'importanza che assume a livello decisionale l'eventuale sostituzione dell'operatore con la robotica collaborativa poiché si devono seguire dei motivi di scelta selettivi, funzionali e compatibili con la centralità operativa dell'operatore e non generalizzando l'implementazione del cobot in qualsivoglia cella di lavoro.

Simulazione	Variante	Uomo (s)	HRC (s)	Cobot	Best scenario tempo	$\Delta$ vs Uomo (s)	$\Delta$ vs Uomo (%)
S1	Senza supporto	108,45	108,45	Non possibile	Uomo	0	0,00%
S2	Con supporto	278,33	256,32	Non possibile	HRC	-22,01	-7,90%
S3	Senza supporto	372,42	372,42	Non possibile	Uomo	0	0,00%
S4	Senza supporto	203,84	249,66	Non possibile	Uomo	0	0,00%
S5	Con supporto	1059,44	1008,55	Non possibile	HRC	-50,89	-4,80%
S6	Senza supporto	234,37	228,3	Non possibile	HRC	-6,07	-2,60%
S7	Con supporto	443,64	438,08	Non possibile	HRC	-5,56	-1,30%

Tabella 21. Variazione tra tempo scenario uomo e tempo best case della simulazione osservata

La Tabella 21 riassume il confronto tra tempo ciclo uomo e tempo ciclo miglior scenario per ciascuna delle simulazioni. La colonna  $\Delta$  vs Uomo (s) o (%) esprime una variazione e, il valore negativo, indica un miglioramento rispetto allo scenario uomo rappresentato graficamente in Figura 34.

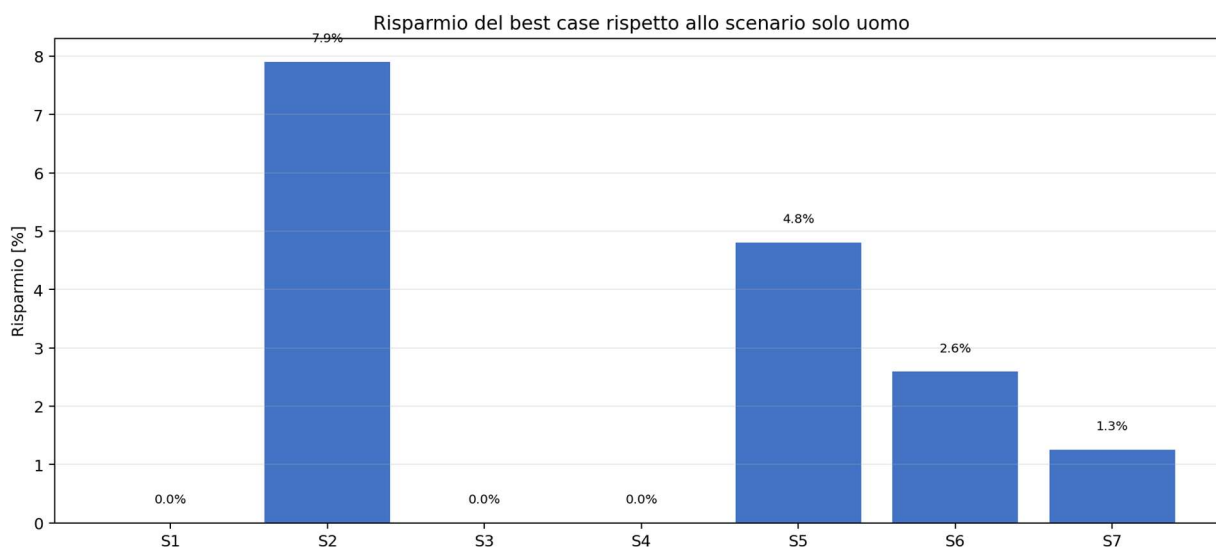


Figura 34. Risparmio del best case rispetto alla baseline solo uomo. S1=Mascherina senza supporto, S2=Mascherina con supporto, S3=Rivetti, S4=Manopola, S5= Snorkel, S6=Porta console, S7=Piastra arco ruota

### 9.1.4 Peso relativo delle fasi sul tempo totale del ciclo best case

Nello studio delle simulazioni la fase di pulizia/asportazione supporto rappresenta quasi sempre la quota prevalente del tempo complessivo. Come rappresentato in Tabella 22 i valori oscillano dal 66% dello snorkel fino ad arrivare al 97% della piastra confermando dunque che tale fase è il driver temporale del post processing rispetto la Fase 1 e Fase 3.

La fase di distacco e estrazione del piatto invece mantiene un'incidenza ridotta in tutte le simulazioni che vanno dall' 1,9% all' 8,4%. Con questo dato si dimostra che questa fase non è un reale collo di bottiglia soprattutto se è l'operatore il responsabile di questa fase.

L'assemblaggio assume anch'esso un peso significativo solo quando questa fase è presente. Per esempio, nello snorkel, costituito da tre componenti, raggiunge il 32,1% del tempo totale del ciclo contrariamente al 17,1% nella porta console. Valore nullo nelle simulazioni dove Fase 3 è disattiva.

Pezzo simulato	Supporto	Best Scenario	Stacco / Estrazione dal piatto	Pulizia / Asportazione supporto	Assemblaggio
<b>Mascherina</b>	SI	HRC	4,40%	95,60%	0,00%
<b>Mascherina</b>	NO	Uomo	6,70%	93,30%	0,00%
<b>Rivetti</b>	NO	Uomo	4,40%	95,60%	0,00%
<b>Manopola</b>	NO	Uomo	8,40%	91,60%	0,00%
<b>Snorkel</b>	SI	HRC	1,90%	66,00%	32,10%
<b>Porta console</b>	NO	HRC	3,00%	79,90%	17,10%
<b>Piastra</b>	SI	HRC	2,10%	97,90%	0,00%

Tabella 22. Peso relativo percentuale delle tre fasi operative sul tempo totale del ciclo best-case

Anche la distribuzione dei pesi relativi conferma che il beneficio della collaborazione non dipende dalla semplice presenza del cobot, ma dalla sua capacità di incidere su fasi realmente adatte alla cooperazione. Ne deriva un'impostazione Human-centred. Non risulta importante individuare chi vince il confronto temporale fra uomo, cobot o uomo-cobot ma capire dove si concentra il tempo

ciclo e in quali fasi la collaborazione riesce effettivamente a produrre un miglioramento rispetto allo scenario solo uomo.

### 9.1.5 Scomposizione delle fasi in operazioni e allocazione dei compiti

Per ogni processo produttivo, secondo logica, si considerano più fasi, ciascuna fase è costituita da più sottofasi, ciascuna sottofase da più operazioni e ciascuna operazione da più istruzioni. Qualora si considerassero anche le istruzioni (volendole definire come tali se corrispondenti ai comandi di programmazione del cobot rappresentati nell'albero di programma) il dettaglio di analisi del processo diverrebbe eccessivo in quanto il numero totale per ogni ciclo di istruzioni risulterebbe essere molto elevato (Figura 35). Per avere un esempio si riportano gli script degli alberi di programma per la programmazione di tutte le simulazioni nell' Appendice 11.10. In questa parentesi di studio per l'analisi del comportamento HRC ci fermiamo fino al livello operazioni.



Figura 35. Struttura scomposizione massima del processo

Per questioni operative reali, si è scelto dunque di identificare una tipologia di sottofasi e operazioni svolgibili e interpretabili operativamente sia dall'operatore sia dal cobot.

Fase 1: Stacco/ Estrazione dal piatto con sottofasi di “Stacco” e “Presca e posizionamento”

- Sottofase di Stacco:
  1. Movimentazione da Waypoint Start
  2. Distacco
- Sottofase di Presca e posizionamento
  3. Presca
  4. Movimentazione

Fase 2: Pulizia/asportazione

Sottofasi:

5. Pulizia/asportazione
6. Movimentazione

Fase 3: Assemblaggio

Sottofasi:

7. Assemblaggio
8. Movimentazione
9. Rilascio
10. Movimentazione a Waypoint Start (Chiusura ciclo)

Totale 10 operazioni per ogni ciclo produttivo simulato (7 quando Fase 3 non è attiva)

Con la scomposizione di ciascun ciclo in 10 operazioni fondamentali si introduce un livello di analisi intermedio e più dettagliato rispetto alla sola lettura per fase. L'operazione n° 10, chiusura ciclo, quando è presente e assegnata al cobot, rappresenta l'operazione di movimentazione di rientro del TCP dal punto peritale della deposizione del pezzo fino al punto iniziale del ciclo successivo, ossia quando il TCP ritorna al punto di partenza.

Il valore della scomposizione non è descrittivo ma risiede nella possibilità di rendere visibile il contributo collaborativo a livello micro-operativo, non nelle fasi ma nelle sue sottofasi e operazioni come rappresentato nella Tabella 23. Ad esempio, nella simulazione Piastra l'operazione singola di distacco con forza trasversale è assegnata al cobot invece quella di sradicamento e rimozione e allontanamento del pezzo dal piatto di stampa è assegnata all'operatore.

Fasi	Operazioni fondamentali	Mascherina CON supporto	Mascherina SENZA supporto	Rivetti	Manopola	Snorkel	Porta consolle	Piastra
<b>Stacco / Estrazione dal piatto</b>	Movimentazione da Waypoint Start	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo
	Distacco	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	<b>Cobot</b>
	Presa	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo
	Movimentazione	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo
<b>Pulizia / Asportazione supporto</b>	Pulizia / asportazione	<b>Uomo + Cobot</b>	Uomo	Uomo	Uomo	<b>Uomo + Cobot</b>	<b>Uomo + Cobot</b>	Uomo
	Movimentazione	<b>Cobot</b>	Uomo	Uomo	Uomo	<b>Cobot</b>	Uomo	Uomo
<b>Assemblaggio</b>	Assemblaggio	Non prevista	Non prevista	Non prevista	Non prevista	<b>Uomo + Cobot</b>	Uomo	Non prevista
	Movimentazione	Non prevista	Non prevista	Non prevista	Non prevista	<b>Cobot</b>	Uomo	Non prevista
	Rilascio	Non prevista	Non prevista	Non prevista	Non prevista	<b>Cobot</b>	Uomo	Non prevista

<b>Chiusura ciclo</b>	Movimentazione a Waypoint Start	Uomo	Uomo	Uomo	Uomo	<b>Cobot</b>	Uomo	Uomo
-----------------------	---------------------------------	------	------	------	------	--------------	------	------

Tabella 23. Scomposizione operativa delle fasi per ogni simulazione

Con la logica di scomposizione in 10 operazioni fondamentali non si vuole sostituire la tabella dei tempi generale ma solo costituire un complemento tecnico. Si vuole fornire un livello di lettura necessario per conoscere in quali operazioni il cobot, e dunque l'automazione, diventa considerabile. Per quanto concerne l'allocatione dei compiti o operazioni tra agente uomo, cobot e HRC in tutti i casi analizzati emerge una netta prevalenza dell'intervento umano.

Tale evidenza risulta coerente anche con l'osservazione diretta delle prove sperimentali, dalle quali si conferma che la presenza dell'operatore resta concretamente necessaria nello svolgimento del processo anche in molte operazioni.

A differenza delle tabelle sui tempi, con l'unità di analisi non più relativa alla durata del ciclo o delle fasi ma al numero di operazioni attribuite a ciascun scenario, si vuol verificare se il contributo collaborativo sia strutturale oppure circoscritto a passaggi specifici del processo.

Pezzi simulati	Supporto	Totale Operazioni	Uomo	Cobot	Congiunto	% Uomo	% Cobot	% Congiunto
<b>Mascherina</b>	SI	7	5	1	1	71,43%	14,29%	14,29%
<b>Mascherina</b>	NO	7	7	0	0	100,00%	0,00%	0,00%
<b>Rivetti</b>	NO	7	7	0	0	100,00%	0,00%	0,00%
<b>Manopola</b>	NO	7	7	0	0	100,00%	0,00%	0,00%
<b>Snorkel</b>	SI	10	4	4	2	40,00%	40,00%	20,00%
<b>Porta consolle</b>	NO	10	9	0	1	90,00%	0,00%	10,00%
<b>Piastra</b>	SI	7	6	1	0	85,71%	14,29%	0,00%
<b>Totale</b>		55	45	6	4	81,82%	10,91%	7,27%

Tabella 24. Ripartizione delle operazioni elementari fra gli agenti e simbioticamente

La Tabella 24 conferma nuovamente come la matrice operativa resti nettamente sbilanciata sul lato operatore in quanto sull'intero numero di operazioni che hanno costituito l'insieme delle 7 simulazioni si può riassumere che delle 55 operazioni totali:

- 45 operazioni sono destinati all' operatore, corrispondente all'81,82% delle operazioni totali
- 6 operazioni Cobot (10,91%)
- 4 operazioni simbiotiche (7,27%)

Anche da questa analisi, si evince che la regia operativa rimane prevalentemente umana, infatti anche nei casi in cui compaiono operazioni assegnabili al cobot, molte altre rimangono attribuite all' operatore.

## 9.2 INTERPRETAZIONE DEL MULTIRUOLO COME RISULTATO OPERATIVO DELLA RICERCA

Questo risultato della ricerca riguarda l'interpretazione del multiruolo come una sorta di esito operativo del percorso sviluppato. Questo risultato assume una valenza specifica in quanto il lavoro non è stato limitato alla sola osservazione di un singolo ambito tecnico ma ha richiesto un coinvolgimento diretto e integrato in più domini:

- programmazione, configurazione tecnica e stampa 3D
- pianificazione di un sistema produttivo, definizione criteri valutativi e analisi

- programmazione, configurazione parametrica ed esecuzione attività del robot antropomorfo
- progettazione dell'architettura, sviluppo del codice e implementazione del software

In tal senso il contributo maturato non è riconducibile ad una sola competenza isolata ma bensì alla costruzione progressiva di una visione tecnica molto trasversale, capace di collegare il processo produttivo, la sperimentazione laboratoriale, valutazioni ingegneristiche, logiche collaborative uomo-cobot e la formalizzazione digitale del risultato.

Il multiruolo emerge come capacità di operare contemporaneamente tra il livello applicativo, analitico e progettuale mantenendo coerenza tra le osservazioni del fenomeno, l'interpretazione del dato e lo sviluppo di uno strumento operativo. L'esito di tale interpretazione multiruolo può essere considerato soddisfacente sia da un punto di vista tecnico sia da un punto di vista formativo perché ha consentito raggiungere un insieme di obiettivi non riguardanti solo il completamento di attività differenti fra loro ma anche e soprattutto la loro effettiva integrazione in un unico percorso di ricerca.

Con tali considerazioni il percorso compiuto assume un valore personale molto significativo reso anche possibile da un contesto che ha consentito di sviluppare, verificare e consolidare obiettivi sia personali come scientifici di particolare rilievo.

### 10.1 IL RUOLO DEGLI AGENTI

Nel perimetro di questo progetto di studio, la centralità dell'operatore conferma in modo concreto il paradigma dell'Industry 5.0. L'operatore non è richiamato al centro come principio teorico, ma emerge come elemento che rende possibile interpretazione, controllo e riconfigurazione della cella HRC quando il processo varia al variare del pezzo. Il cobot assume valore proprio perché resta integrato in una regia umana capace di orientarne l'impiego in modo selettivo e coerente. In questa prospettiva, il risultato più significativo è che la tecnologia collaborativa non riduce la centralità dell'uomo, ma la rende più misurabile e strategica.

#### **Operatore attuatore e cobot abilitatore**

Dalla analisi dei risultati riscontrati dalle simulazioni, il confronto tra scenari operatore, cobot e HRC è stato affrontato attraverso cinque livelli di lettura:

1. Distribuzione degli scenari collaborativi

Su 16 configurazioni operative attive di sette simulazioni la coesistenza risulta lo scenario prevalente, con 9 casi pari quasi al 56%. Questo risultato indica che, quando la variabile di riferimento è il tempo ciclo, in oltre metà delle condizioni analizzate, l'impiego attivo del cobot non costituisce la scelta operativa più conveniente, anzi, viene escluso.

2. Allocazione funzionale nelle tre fasi

Dal punto di vista esecutivo laboratoriale le tre fasi del workflow specificamente analizzato mostrano una diversa compatibilità con l'impiego del cobot. La Fase 1 risulta ad alta variabilità e richiede traiettorie controllate, uso del Freedrive e supervisione diretta dell'operatore. La Fase 2 rappresenta la fase più critica del ciclo e costituisce il contesto in cui il cobot genera il maggiore valore come sistema di stabilizzazione del pezzo. La Fase 3 risulta conveniente in configurazione HRC solo in presenza di componenti complessi o difficili da mantenere in posizione.

Nei casi semplici l'operatore resta la soluzione più efficiente e il cobot non ottimizza il processo per semplice presenza, ma per corretta allocazione funzionale.

3. Best case e impatto tempo

Su sette simulazioni, il best case scenario complessivo risulta essere HRC in quattro casi e, solo operatore, in tre.

La somma dei tempi nello scenario operatore è pari a 2700,49 s, mentre la somma dei best case HRC è 2615,96 s, con un risparmio complessivo di 84,53 s, equivalente al 3,1%. Si tratta di un miglioramento reale ma contenuto, insufficiente a sostenere una logica sostitutiva.

Conviene sempre attenzionare cosa comporta un piccolo miglioramento HRC rispetto l'investimento nel tempo per la programmazione del cobot nelle fasi preliminari. Non si tratta soltanto di programmazione da remoto, spesso è necessario presenziare le attività per definire molteplici parametri di processo che richiedono realmente tempi spropositati rispetto al miglioramento temporale effettivo. In questo studio, il tempo di programmazione, non è stato considerato come variabile osservata e oggetto di studio ma, questa osservazione, acquisisce rilevanza nel caso di celle di produzione dinamiche e orientate a piccoli lotti di produzione.

4. Peso relativo delle fasi sul ciclo totale.

La Fase 2 di pulizia/asportazione supporto rappresenta il principale driver temporale del ciclo, con incidenze comprese tra il 66,0% e il 97,9%, mentre la Fase 1 resta marginale (1,9%–8,4%)

e la Fase 3 assume rilievo, solo nei casi con assemblaggio attivo, fino al 32,1%. Il punto non è quindi automatizzare tutto, ma intervenire dove il tempo si concentra realmente.

#### 5. Scomposizione in operazioni elementari e ripartizione finale

La riduzione del processo a 10 operazioni fondamentali per ciclo, o 7 quando l'assemblaggio non è previsto, consente di osservare che il contributo collaborativo non si distribuisce uniformemente sull'intero workflow, ma si concentra in puntuali operazioni.

Sull'insieme delle 55 operazioni osservate, 45 sono assegnate all'operatore (81,82%), 6 al cobot (10,91%) e 4 in forma congiunta (7,27%). La matrice operativa risulta quindi nettamente sbilanciata sul lato umano.

Da un punto di vista metodologico con questi cinque livelli di lettura si evince che l'operatore conserva la funzione di riferimento e il cobot invece assume prevalentemente un ruolo di abilitatore prestazionale e di supporto specifico, circoscritto e mirato.

Lo scenario HRC è risultato vantaggioso in quattro casi su sette e tuttavia il vantaggio collaborativo non è sufficiente a sostituirci la centralità dell'operatore.

Si conclude che la collaborazione uomo-cobot osservata in questa ricerca è risultata vantaggiosa quando progettata come estensione delle capacità dell'operatore ma non come sostituzione. In definitiva, il paradigma emerso dal risultato di queste analisi non è cobot-centred ma human-centred e cobot-enabled, in coerenza con le osservazioni condotte durante l'intera attività laboratoriale.

### **Operatore valutatore e validatore**

L'operatore non è centrale solo nell'esecuzione delle fasi di post processing ma anche nella:

- lettura del caso di studio della simulazione previamente, in itinere e a posteriori
- interpretazione delle criticità e problematiche già note o che si presentano in corso d'opera
- attribuzione di valori qualitativi in tutto il processo, fasi, sottofasi/operazioni
- garanzia della custodia delle informazioni per la costruzione di una knowledge base robusta

Questo aspetto è decisivo perché le variabili qualitative e descrittive non derivano da una classificazione astratta del pezzo, ma dall'osservazione tecnica diretta del comportamento reale del componente nelle diverse fasi operative. Tale approccio è particolarmente evidente nella definizione delle variabili che concorrono alla costruzione del fattore di manipolabilità FM, dove anche dettagli minimi possono incidere sulla lettura complessiva del caso simulato.

La presenza dell'operatore come valutatore non impoverisce il modello, ma lo rende più aderente allo standard produttivo reale dell'utilizzatore, che può essere un'azienda di produzione, un laboratorio o un fabbricante con proprie prassi operative. In questo senso, la componente umana introduce una forma di personalizzazione controllata della produzione perché il dato viene raccolto e interpretato secondo criteri tecnici coerenti con il contesto in cui viene generato.

In relazione ai criteri di acquisizione delle informazioni, il personale tecnico interpreta in forma coerente e condivisa la valutazione del processo, così da attribuire lo stesso peso alle variabili osservate e uniformare l'addestramento del modello secondo una linea metodologica chiara e riconoscibile.

La metodologia di lettura, valutazione e reinterpretazione dei dati non deve quindi essere considerata un vincolo, ma una reale opportunità di caratterizzazione produttiva. Il modo in cui un'azienda osserva le variabili, attribuisce valore alle criticità, interpreta il processo e alimenta la knowledge base può diventare parte del proprio stile produttivo. In questa prospettiva, la raccolta del dato primordiale non è soltanto un'operazione tecnica, ma un elemento identitario. Ne deriva che la knowledge base non rappresenta solo un archivio di dati, ma una forma strutturata di esperienza aziendale.

In questo passaggio, l'operatore valutatore e validatore diventa il punto di continuità tra esperienza reale, apprendimento del modello e identità produttiva dell'azienda, confermando ancora una volta la sua centralità non solo come esecutore del processo, ma come soggetto capace di orientare, qualificare e rendere significativa l'evoluzione del sistema.

## **10.2 MODELLO E SUA CONCETTUALIZZAZIONE INTELLIGENTE**

Il contributo metodologico non consiste unicamente nella realizzazione di un'interfaccia digitale, ma nella creazione di un modello algoritmico identificato da una procedura tecnica capace di trasformare dati sperimentali reali in una struttura organizzata, confrontabile ed estendibile. L'iter di sviluppo è stato condotto secondo una sequenza metodologica definita.

- Acquisizione di reali dati laboratoriali ottenuti dalle simulazioni dei casi di studio. La base iniziale di questo sistema radica, dunque, in osservazioni sperimentali e non dati ipotetici o costruiti artificialmente.
- Strutturazione del dato mediante l'organizzazione dei tempi di fase e dei cicli, le criticità e informazioni operative, e le condizioni di assemblaggio; questi elementi plasmano il fattore di forma FF. Su questa base è stata introdotta la costruzione di indici sintetici che potessero rappresentare anche qualitativamente i casi di studio e non solo geometricamente e per composizione. Con tale impostazione è stato poi possibile superare una lettura limitata ai soli tempi, introducendo una descrizione strutturata del pezzo e delle criticità manipolative e operative. Il sistema non legge quindi soltanto la durata del processo ma anche la natura tecnica del componente che genera quella durata.
- Stabilizzazione del riferimento metodologico. Gli indicatori sono stati ricondotti ad una logica robusta e generalizzabile ancorata a parametri assoluti della macchina e del processo. Questa forma di agire ha rafforzato la coerenza del modello migliorandone la trasferibilità verso casi futuri.
- Implementazione in ambiente software che ha consentito di raccogliere in una unica knowledge base i dati sperimentali, la descrizione del pezzo, le variabili qualitative e il confronto tra scenari operativi. L'output tecnico del sistema consiste in una descrizione strutturata dello scenario operativo migliore con allocazione dei compiti fra operatore, cobot o HRC. Il modello tramite software e interfaccia grafico, dunque, assume funzioni non solo esecutive ma anche organizzative e interpretative e predittive.

Il modello algoritmico proposto rappresenta lo sviluppo coerente di una catena tecnica composta appunto da acquisizione del dato, strutturazione, sintesi qualitativa, implementazione e possibilità di estensione predittiva.

Con questo metodo si è voluto sviluppare un modello e definire un sistema tecnico di trasformazione dell'esperienza sperimentale in conoscenza strutturata sintetica. Questa continuità tra laboratorio, formalizzazione e implementazione rende il sistema una base solida per sviluppi intelligenti futuri robusti.

## **10.3 STANDARDIZZAZIONE DISTRIBUITA DEI DATI**

Il supporto di questo progetto di ricerca consiste nella possibilità di efficientare il processo di un sistema produttivo composto da una singola cella. Se avessimo invece molteplici celle uomo-cobot

queste dovrebbero essere integrate secondo una logica uniforme e coerente interna all'azienda utilizzatrice. In questo ambiente strutturato multi-cella, ciascuna cella di lavoro (uomo, cobot e stampante 3D) opera localmente sul proprio caso produttivo però allo stesso tempo aumenta la popolazione del modulo centrale di knowledge base attraverso l'invio di dati, i risultati operativi e riconfigurazione dei processi di ciascuna cella. Allo stesso tempo, il sistema centrale alimentato continuamente ridistribuisce output specifici e personalizzati alle singole celle in funzione delle rispettive esigenze di riconfigurazione richieste.

Si vuole introdurre con questa osservazione un approccio ad una logica di standardizzazione distribuita ossia di raccolti dati, elaborazione centralizzata e ridistribuzione mirata. In questa forma si ottiene una maggiore coerenza tra le celle di lavoro, un miglioramento progressivo della base conoscitiva e quindi maggiore supporto alla riconfigurazione con incremento dell'efficienza del post processing in ogni singola cella.

Con tale impostazione si vuol rendere più concreto il processo di transizione della stampa 3D da ambienti sperimentali a sistemi produttivi industrializzabili.

Oltre a questa prospettiva, occorre tuttavia considerare che lo sviluppo della stampa 3D è accompagnato anche da una crescente democratizzazione delle tecnologie additive. Accanto a configurazioni propriamente industriali, si osserva infatti la diffusione di celle di lavoro più piccole, isolate e gestite anche da un singolo operatore, non necessariamente riconducibili a una struttura aziendale in senso stretto. Tale dinamica non riguarda soltanto la stampa FDM, ma si estende anche a processi additivi più complessi, inclusi quelli basati su letto di polvere metallica (SLS). In questo senso, il presente studio può essere letto non solo come contributo all'industrializzazione della stampa 3D in senso stretto, ma anche come supporto a una visione più capillare, distribuita e flessibile della produzione additiva, nella quale la riconfigurazione rapida, la gestione del dato e il supporto decisionale mantengono valore anche in contesti produttivi non centralizzati.

## **10.4 ESTENSIONI DEL SISTEMA**

Un primo ambito di sviluppo futuro riguarda l'estensione dell'architettura logica del sistema attualmente costruita su una base prevalentemente descrittiva e comparativa, ma ampliabile in:

- estensioni funzionali
- estensioni di usabilità e interazione uomo-sistema

### **Estensioni funzionali**

- Nuove macro-variabili decisionali

Una prima estensione potrebbe riguardare l'introduzione di nuove macro-variabili aventi alto impatto nel processo decisionale, attualmente il sistema è fondato su tempi di fase e fattori di forma e magari successivamente si potranno assumere ulteriori variabili di rilievo come per esempio: il tempo di programmazione del cobot, i costi, la riduzione degli scarti e produzione efficiente, livello di competenza tecnica degli operatori, ecc. Con l'inserimento di nuove macro-variabili si supererebbe la lettura centrata principalmente sulla prestazione temporale. In questa maniera si aprirebbe una valutazione più ampia del processo nel suo insieme.

- Pesi decisionali e media ponderata

La seconda estensione riguarda la definizione di pesi decisionali. L'impostazione al momento è basata su una logica a media semplice e potrà dunque essere evoluta verso una logica a media ponderata

attribuendo pesi percentuali differenti fra i tre fattori di forma FG, FC e FM o altri fattori rappresentanti altre nuove variabili. Questo miglioramento consentirebbe adattare il modello a priorità produttive differenti e in funzione del contesto applicativo specifico.

- Nuove logiche di ancoraggio del dataset

La terza estensione funzionale è rivedere la logica di ancoraggio del dataset. Al momento è stato reso robusto attraverso un ancoraggio a parametri di processo e macchina; tuttavia, negli sviluppi futuri potrà essere ridefinito in funzione della famiglia dei pezzi o singolo lotto di produzione, della cella produttiva, dal campione di specifiche simulazioni, o altri elementi utili. L'effetto atteso sarebbe quello di aumentare la trasferibilità e migliorare la reattività del modello a contesti produttivi sempre differenti

- Passaggio dalla fase alla sottofase o operazioni

Un'estensione naturale è il passaggio dell'analisi per fase ad analisi più capillari per sottofasi o operazioni come è stato già trattato in questo studio. Questa estensione funzionale incrementerebbe il livello di dettaglio descrittivo consentendo dunque di rappresentare in modo preciso le simulazioni. Il risultato atteso sarebbe un aumento di numero di combinazioni valutabili e maggiore sensibilità da parte del sistema, intelligente, alle differenze operative tra casi apparentemente simili. Questo sarebbe un salto qualitativo importante del modello con una visione futura predittiva.

- Estensione ad altri task di post-processing

Un altro elemento di potenziale sviluppo riguarda la capacità del sistema di estendere l'analisi anche alle altre Fasi di post processing quali per esempio la levigatura, finitura, pittura ecc., ampliando il panorama applicativo del modello e rendendolo più aderente a cicli produttivi completi.

- Estensione a nuovi algoritmi

L'ultimo ambito di sviluppo riguarda l'estensione verso nuovi algoritmi che possano essere maggiormente adatti alla futura crescita della popolazione dati del modello. Attualmente l'impostazione è coerente con la tipologia del dato e la limitatezza del dataset disponibile (Supervised learning); ciò non toglie che potrà evolversi verso differenti soluzioni algoritmiche più adatte alle future popolazioni della base dati. Con questa prospettiva la crescita del sistema dipenderà dall'incremento quantitativo della popolazione e anche dalla capacità di mantenere coerenza tra qualità del dato, struttura delle variabili e scelta del modello intelligente e dunque algoritmo di machine learning

### **Estensioni di usabilità e interazione uomo-sistema**

Altro ambito di sviluppo futuro riguardante il sistema è l'evoluzione della GUI sotto il profilo dell'usabilità, gestione del dettaglio informativo e capacità di supportare in modo efficace il processo decisionale.

- Configurabilità della GUI

In una configurazione più avanzata la GUI potrà consentire una gestione più flessibile delle variabili permettendo così all'utente di poter selezionare direttamente i fattori di forma e i suoi coefficienti, fasi e operazioni, nonché introdurre pesi decisionali all'interno di logiche a media ponderata. In questo studio si è sempre considerata una media aritmetica per evitare dispersione di informazioni.

- Miglioramento grafico e facilità di compilazione

L'interfaccia potrà essere resa ancora più usabile per agevolare il processo di compilazione, ridurre gli errori durante l'inserimento e sostenere dunque un livello quanto più elevato possibile di dettaglio informativo.

- Ampliamento informativo in uscita

Con l'incremento della popolazione dati in quantità e qualità anche l'interfaccia dovrà evolversi accompagnando questa crescita della knowledge base consentendo una visualizzazione con più casi, confronti, risultati, criticità osservate ecc.

- Rappresentazione interattiva dei trade-off tra fattori

Si potrà considerare la possibilità di rappresentare e gestire compensazioni fra differenti fattori ossia il sistema potrà consentire l'analisi di scenari in cui, ad esempio, la riduzione dei costi comporti un aumento dei tempi oppure il miglioramento della quantità richieda una diversa allocazione delle fasi oppure la riduzione di uno svantaggio produca l'incremento di un altro parametro.

- Interfacce di regolazione e mixer di priorità

Si potranno sviluppare degli strumenti grafici di regolazione, simili ai mixer con canali di priorità, attraverso i quali l'utente può definire il peso relativo dei differenti fattori in funzione degli obiettivi produttivi.

## 11 APPENDICI

### 11.1 HARDWARE, LAYOUT E SCENARIO OPERATIVO DELLA CELLA

#### Hardware della cella

Modello stampante 3D: Creality Ender-5 Pro (Figura 36)

Software: Creality Slicer

#### Caratteristiche dimensionali

- Volume utile di stampa:  $220 \times 220 \times 300$  mm
- Ingombro complessivo macchina:  $440 \times 410 \times 465$  mm

#### Parametri di deposizione (risoluzione)

- Diametro standard dell'ugello: 0,4 mm
- Diametri ugello supportati: da 0,2 mm a 0,8 mm o superiori

#### Parametri di stratificazione

- Altezza layer standard: 0,1 mm - 0,4 mm
- Altezza layer minima teorica: circa 0,04 mm – 0,08 mm

#### Filamento polimero utilizzato (Figura 3):

- 3D printer filamento white 300g
- PLA 1.75mm



Figura 36. Tipologia di filamento PLA utilizzato

Modello robot antropomorfo: UR3e - Universal Robot (Figura 37)

- Software: Polyscope
- Sbraccio: 500 mm
- Capacità di carico: 3 kg
- Peso: 11.2 kg s

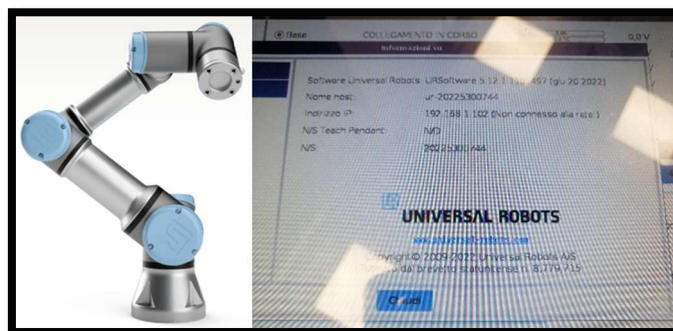


Figura 37. Modello Cobot Universal robot – U3 e

Touch pendant. Dispositivo di controllo mobile, collegato via cavo all'unità centrale del cobot. (Figura 38)

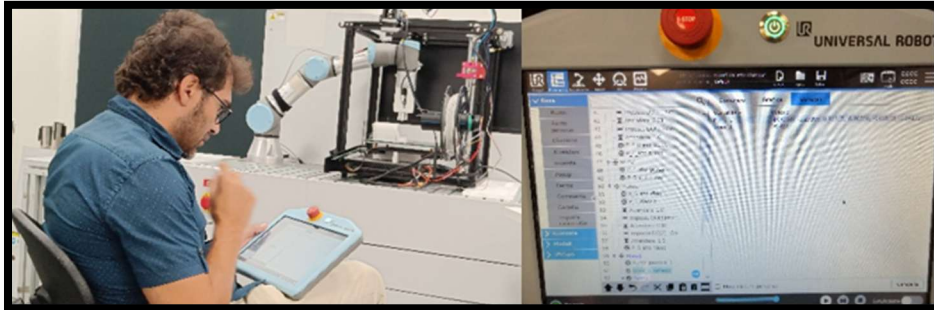


Figura 38. Touch pendant cobot

### **Banco di lavoro. Postazioni operative**

Postazioni:

- Postazione 1: banco di lavoro per operazioni di pulizia, asportazione dei supporti e assemblaggio con carrello mobile adiacente utilizzato come estensione
- Postazione 2: postazione PC e gestione dati operativi (Figura 39)

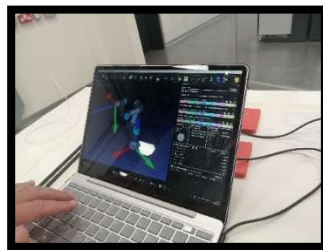


Figura 39. Postazione PC

Dimensioni del banco di lavoro e del carrello laterale (Figura 40):

Banco di lavoro

- Lunghezza: 112 cm
- Profondità: 60 cm
- Altezza: 93 cm

Carrello laterale di appoggio

- Altezza: 93 cm
- Superficie di appoggio: 40 × 40 cm



Figura 40. Misure reali dimensione banco lavoro e carrello adiacente mobile

Utensili manuali dell'operatore (Figura 41):

- Spatola (stacco dal letto di stampa):
- Tronchesina (taglio supporti, struttura ad albero e/o residui):
- Spazzola con denti in ferro (pulizia delle radici dei supporti su superficie piana):
- Pinze, con denti molto fini o con denti di grandezza media
- Taglierino
- Guanti / guanto di protezione:
- Cacciavite (operazioni di avvitamento in assemblaggio)

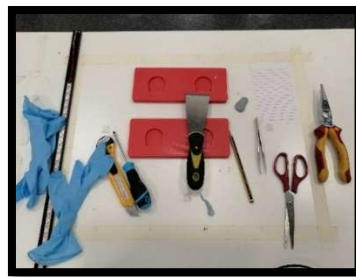


Figura 41. Tools e strumenti disponibili sul banco di lavoro

### Layout della cella

- Configurazione della cella: fissa
  - Ordine produttivo: sviluppo in senso antiorario, da destra verso sinistra
  - Layout adottato: invariato per tutte le simulazioni
- 
- Cobot-pannello-stampante (Figura 42)
    - Distanza del centro del cobot rispetto al lato antistante del banco:  $\Delta X = 32$  cm
    - Distanza del centro del cobot rispetto al lato retrostante del banco:  $\Delta X = 9$  cm
    - Distanza del centro del cobot rispetto la struttura della stampante:  $\Delta Y = 33$  cm

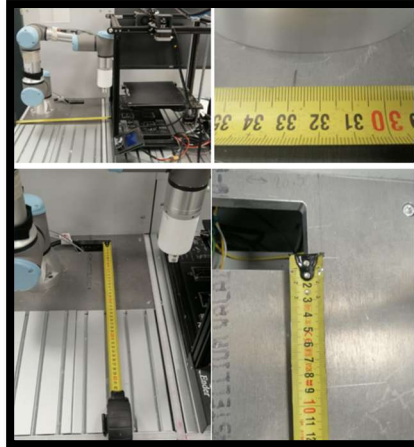


Figura 42. Misure distanze fisse tra cobot e stampante

- Profondità volume di stampa lungo Y della stampante: 41 cm
- Apertura frontale della stampante per l'ingresso cobot e manovre di entrata e uscita dal volume di stampa:  $33 \times 40$  cm (Figura 43)

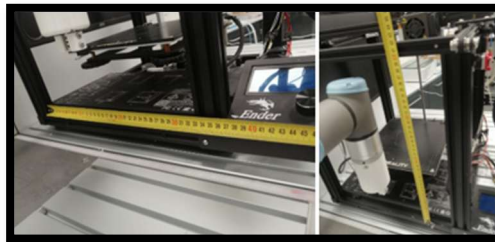


Figura 43. Superficie per manovra cobot delimitata da struttura stampante

- Letto di stampa.
  - Dimensioni del letto di stampa:  $23,5 \times 23,5$  cm
  - Altezza del letto di stampa rispetto al banco di lavoro (con supporto di protezione per ridurre i rischi legati alla deformazione del letto):  $H = 11,5$  cm (Figura 44)



Figura 44. Altezza letto di stampa rispetto al banco di lavoro

L' altezza assegnata del letto di stampa dal banco di lavoro  $H = 11,5$  cm, deriva da due azioni (Figura 15):

- abbassamento del letto di stampa, per aumentare lo spazio di manovra e ridurre il rischio di collisione tra cobot e struttura montante stampante;
- inserimento di uno spessore tra la struttura della stampante e il piatto di stampa.

La funzione della modifica è legata ad una misura adottata a scopo preventivo ossia ridurre il rischio reale di deformazioni o rotture del giunto tra piatto di stampa e montante per scorrimento (Figura 45).

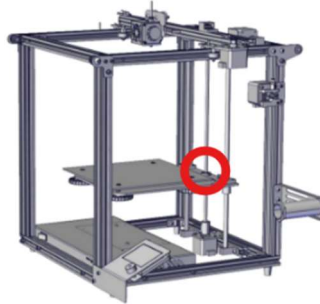


Figura 45. Potenziale punto di rottura controllato

Distanze di riferimento del centro della base del perimetro di appoggio cobot rispetto al letto di stampa:

- Distanza lungo y:  $\Delta Y = 39$  cm (Figura 46)
- Distanza rispetto al lato anteriore del letto di stampa: 23 cm
- Distanza rispetto al lato posteriore del letto di stampa: 0,5 cm

Il lato posteriore del letto è quasi allineato con l'asse Y del cobot.

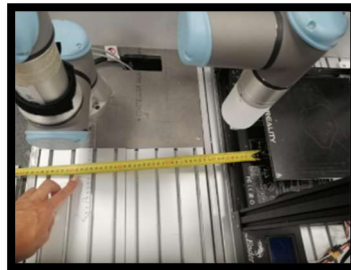


Figura 46. Distanza Cobot da letto di stampa lungo asse Y(39 cm)

- Impostazioni cobot e suo orientamento

Il posizionamento è stato impostato con il cobot orientato rivolto verso l'operatore. Il lato retrostante del banco di lavoro è delimitato da un pannello strutturale verticale rigido. (Figura 47)

Distanza cobot – pannello retrostante: X 15 cm

Tale elemento introduce una importante limitazione dello spazio operativo disponibile per il cobot:

- i movimenti utili eseguibili nella zona posteriore
- rende necessario il ricorso a un piano di sicurezza di protezione



Figura 47. Distanza cobot da pannello fisso retrostante

- Configurazione iniziale e criterio adottato per la sicurezza operativa

Il sistema robotico presenta una configurazione preliminare già impostata e non è stato quindi necessario definire ex novo l'intero set-up del manipolatore. Il criterio seguito è stato il posizionamento del TCP del cobot nello spazio disponibile in prossimità del pannello retrostante. Tale riferimento è stato utilizzato per identificare la coordinata limite lungo l'asse X. A partire da questa distanza è stato implementato un piano di sicurezza corrispondente alla coordinata X individuata, esteso sul piano YZ. (Figura 48)

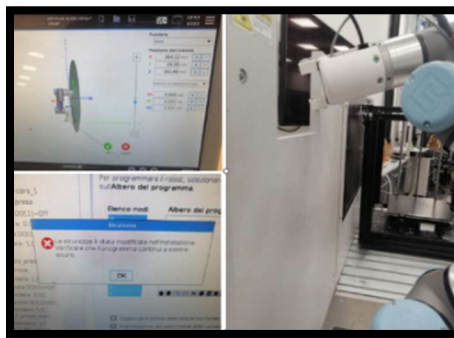


Figura 48. Setup e posizionamento TCP per safety plan

Impostazione dei piani di riferimento dei movimenti dell'effettore del cobot (TCP)

Piano 1: piano di riferimento utilizzato per la definizione dei movimenti (Figura 49)

Sistema di assi adottato:

- X crescente verso l'operatore
- Y crescente verso la stampante
- Z crescente verso l'alto

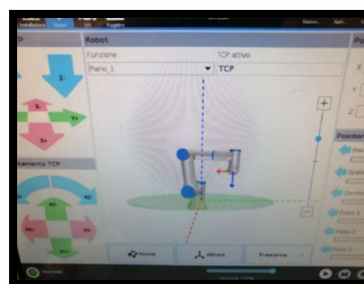


Figura 49. Impostazioni piano riferimento movimento effettore

Per l'impostazione del piano base e del piano utensile, Il TCP risultava già tarato e non è stato necessario eseguire ulteriori operazioni di set-up relative al TCP (Figura 50)

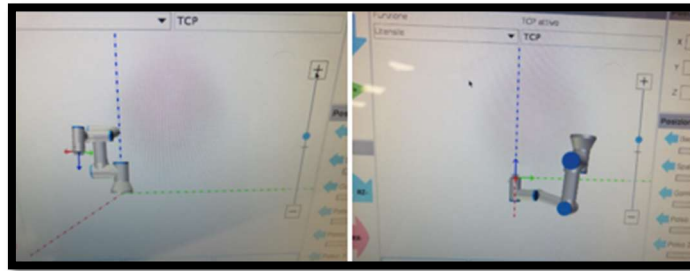


Figura 50. Mantenimento impostazioni piano base e utensile

Impostazioni carico utile (Figura 51)

- Carico utile impostato: 0,2 kg
- Valore equivalente: 200 g
- Tale valore è stato ritenuto più che sufficiente per gli studi svolti, considerando materiale PLA

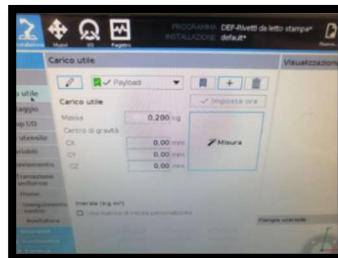


Figura 51. Set up impostazioni carico utile cobot

Il posizionamento del centro di gravità è stato impostato nelle coordinate  $X=0, Y=0, Z=0$ . (Figura 52) Questo punto indicato corrisponde alla condizione in cui tutte le coordinate del centro di gravità, e non del TCP, risultano nulle.

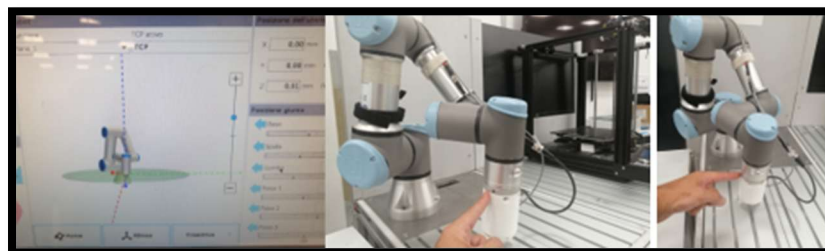


Figura 52. Set up impostazioni centro di gravità del cobot

## 11.2 ESPERIMENTO PRELIMINARE DI CALIBRAZIONE DELL'ACCELERAZIONE DEL COBOT SU CUBO IN PLA

L'esperimento è stato impostato, e necessario, per definire un ordine di grandezza dell'effetto di accelerazione generato dal cobot su un provino semplice in PLA, così da selezionare parametri iniziali utilizzabili nelle prove di stacco dei pezzi reali senza intervenire direttamente sui casi studio delle simulazioni. L'obiettivo non è stato la massimizzazione della velocità, ma la comprensione della relazione tra accelerazione impostata e risposta osservabile del pezzo su piccole distanze.

Impostazione del metodo

La logica di prova è stata mantenuta costante lungo tutto l'esperimento:

- quota Z uniforme per i punti di presa, rilascio e raccordo (Figura 53)
- eliminazione di traiettorie diagonali tra punti di azione e punti di raccordo
- valutazione dello stacco tramite comando MoveJ tra Punto 1 e Punto 2
- studio riferito a piccolissime distanze, assunte pari a 1 mm nel caso di accelerazione lineare
- inserimento dei parametri di accelerazione e velocità nel punto di arrivo.

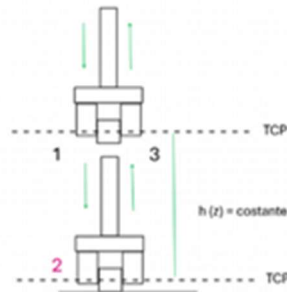


Figura 53. Traiettoria TCP e punto verticale Z costante con movimentazione lineare

La scelta di lavorare principalmente sull'accelerazione deriva dal fatto che, su spostamenti così brevi, il parametro velocità non ha mostrato variazioni apprezzabili del risultato. La velocità è quindi stata considerata non determinante nello studio locale di impatto, mentre è stata ritenuta più rilevante solo per spostamenti più lunghi tra punti di raccordo. Il valore di velocità assunto come riferimento è 250 mm/s, ma tale parametro non ha prodotto differenze significative nelle prove di stacco su 1 mm.

### 1. Accelerazione lineare parallela al letto di stampa

Prima sessione – pinza inclinata

La prima serie è stata condotta con pinza inclinata e spostamento di studio pari a 1 mm (Figura 54). Lo scopo era osservare come variasse il comportamento del cubo in PLA all'aumentare dell'accelerazione lineare parallela al piano.

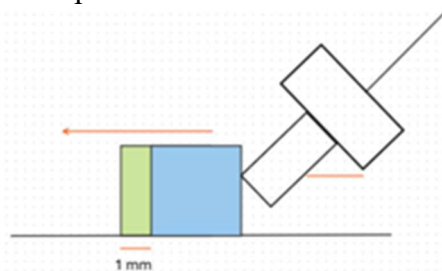


Figura 54. Rappresentazione grafica pinza inclinata

Prova	Accelerazione lineare (mm/s <sup>2</sup> )	Osservazione
1	100	

2	500	risultato non sufficiente
3	1000	risultato visibile e considerabile
4	2500	risultato considerabile
5	5000	effetto elevato, percepibile anche acusticamente
6	10000	nessuna grande differenza rispetto a 5000
7	20000	nessuna differenza significativa rispetto al precedente

Tabella 25. Risultati prova con pinza inclinata e accelerazione parallela letto

Da questa prima serie è stato assunto 2500 mm/s<sup>2</sup> come parametro più adeguato. Il valore risulta già efficace, senza introdurre gli eccessi osservati alle accelerazioni superiori (Tabella 25).

Seconda sessione – pinza perpendicolare al banco

La seconda sessione è stata svolta con pinza perpendicolare al banco, pinza posta alla distanza minima dal letto e denti in pieno contatto con la faccia laterale del cubo, con l'obiettivo di ottenere una forza più uniforme (Figura 55).

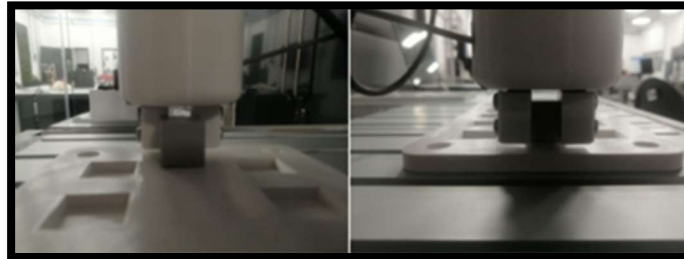


Figura 55. Immagine Pinza perpendicolare

Prima serie (Tabella 26).

Prova	Accelerazione lineare (mm/s <sup>2</sup> )	Spostamento osservato
1	800	1 mm
2	1500	2,5 mm
3	2500	3,5 mm
4	3500	4,8 mm

Tabella 26. Risultati prima serie con pinza perpendicolare

A partire da 2500 mm/s<sup>2</sup> il cubo ha iniziato a disporsi in modo poco lineare. Ciò è stato interpretato come possibile effetto di:

- forza non del tutto uniforme
- distribuzione non equa della forza sulla parete di spinta
- attrito sul piano di slittamento.

Successivamente, la prova è stata ripetuta con altre serie.

Dalla seconda serie si è aggiunto un ulteriore valore di 4500 più elevato (Tabella 27). L'obiettivo è osservare il comportamento al ripetere le prove (Figura 56 e 57) e identificare quali siano i più coerenti.



Figura 56. Immagine risultati osservati prima serie

Prova	Accelerazione lineare	Spostamento osservato
1	500	3 mm
2	1000	4 mm
3	1500	7 mm
4	3500	13 mm, con traiettoria non rettilinea e dispersione tra 15 e 30 mm
5	4500	24 mm, con traiettoria non rettilinea e dispersione tra 15 e 30 mm

Tabella 27. Risultati seconda serie con pinza perpendicolare



Figura 57. Immagine risultati osservati seconda serie

Terza serie con stessi parametri

Prova	Accelerazione lineare	Spostamento osservato
1	500	3 mm
2	1000	6 mm
3	1500	10 mm
4	3500	andamento non rettilineo, variabile tra 15 e 30 mm
5	4500	andamento non rettilineo, variabile tra 15 e 30 mm

Tabella 28. Risultati terza serie con pinza perpendicolare

Il valore 1000 è stato selezionato come riferimento operativo migliore (Tabella 28). La scelta deriva dal fatto che produce uno spostamento già visibile e utile, ma ancora gestibile e più stabile rispetto ai valori superiori, che iniziano a introdurre dispersioni e perdita di linearità.

## 2. Accelerazione rotazionale non parallela al letto di stampa (Figura 58)



Figura 58. Immagine rappresentativa di una presa con accelerazione rotazionale non parallela letto di stampa [116]

Per questa serie il Punto 2 è stato definito con Freedrive, così da evitare contatti tra denti pinza e piano durante la rotazione. L'osservazione sperimentale ha mostrato una rapida saturazione dell'effetto (Tabella 29).

Prova	Accelerazione rotazionale (gradi/s <sup>2</sup> )	Osservazione
1	300	ridotta, ma già opportuna
2	600	all'occhio umano sembra rallentare
3	1500	nessuna grande differenza dal precedente
4	3000	nessuna differenza apprezzabile
5	6000	nessuna differenza apprezzabile
6	15000	nessuna differenza apprezzabile
7	30000	nessuna differenza apprezzabile

Tabella 29. Risultati prove con accelerazione rotazionale non parallela al letto di stampa

La lettura tecnica della prova è che, per questa modalità, oltre un certo valore l'incremento dell'accelerazione non produce miglioramenti percepibili. Di conseguenza, il range utile resta basso e già 300 gradi/s<sup>2</sup> appare sufficiente come ordine di grandezza iniziale.

### 3. Accelerazione rotazionale parallela al letto di stampa

L'ultima serie ha riguardato l'accelerazione rotazionale parallela al letto.

Accelerazione rotazionale (gradi/s <sup>2</sup> )	Osservazione
100	evidentemente lenta per ottenere un effetto "clic"
500	lenta ma migliore del precedente
1000	migliore del precedente
5000	migliore del precedente
10000	migliore
60000	la velocità di rotazione sembra restare uguale
80000	come il precedente
100000	come il precedente

Tabella 30. Risultati prove con accelerazione rotazionale parallela al letto di stampa

L'osservazione centrale è che il miglioramento cresce fino a 10000, mentre ai valori più alti il comportamento tende a saturarsi e le differenze non risultano più distinguibili (Tabella 30). Tuttavia, per fini accademici, viene accettato anche 100000 come valore massimo di riferimento sperimentale. In Figura 59 si mostra il progressivo movimento del test



Figura 59. Presa con accelerazione rotazionale parallela letto di stampa

Sintesi conclusiva dell'esperimento

L'esperimento ha permesso di fissare alcuni criteri pratici utili per le simulazioni successive:

- su piccole distanze, l'elemento realmente sensibile è l'accelerazione, non la velocità
- per l'accelerazione lineare parallela al letto, il comportamento più utile si colloca tra 1000 e 2500 mm/s<sup>2</sup>, con 2500 mm/s<sup>2</sup> selezionato come valore adeguato nella prima serie e 1000 adottato come riferimento prudente per una successiva prova reale
- oltre 3500–4500 l'effetto cresce, ma compare anche una perdita di linearità del moto del cubo
- per l'accelerazione rotazionale non parallela, l'effetto utile è già percepibile a 300 gradi/s<sup>2</sup>, mentre gli incrementi successivi non generano differenze evidenti;
- per l'accelerazione rotazionale parallela, il miglioramento cresce fino a 10000, mentre oltre tale soglia il comportamento tende a stabilizzarsi.

Nel complesso, la prova ha fornito un riferimento sperimentale preliminare per stimare l'effetto d'urto/trasferimento di moto del cobot su un campione semplice in PLA, consentendo di definire valori iniziali ragionevoli per le simulazioni di stacco senza compromettere direttamente i pezzi oggetto di studio e i dispositivi hardware.

### 11.3 DESCRIZIONE DEI MANUFATTI SCELTI PER LE SIMULAZIONI LABORATORIALI

#### S1\_S2 Mascherina tasti moto

Il componente analizzato è una mascherina per tre tasti destinata al montaggio su manubrio per moto. Si tratta di una piastra rettangolare sottile, simmetrica rispetto a entrambi gli assi principali, caratterizzata da tre aperture passanti centrali per gli interruttori e quattro fori agli angoli per il fissaggio con vite.

La mascherina è stata scelta perché rappresenta un pezzo piatto, sottile e fragile, che richiede: precisione, delicatezza, gestione dei supporti, controllo della deformazione, presa complessa e orientamento corretto (Figura 60)

In un ambiente HRC diventa un caso perfetto per valutare:

- destrezza nella maneggiabilità dell'operatore a valle della stampa
- precisione ripetibile delle prese del cobot per eventuali produzioni in serie di piccoli lotti

Per questa simulazione si è ripetuto il processo di stampa per poter analizzare l'impatto sul processo, con la doppia variante:

- Senza supporto (S1)
- Con supporto (S2)

Fattori decisionali di scelta di S1 e S2:

- Geometria sottile. Difficoltà di presa
- Finestre interne. Struttura fragile in post-processing
- Con supporto. Necessità di supporti durante la stampa
- Senza supporto. Delicatezza nel distacco dal piatto: controllo durante la presa.
- Presenza di quattro fori negli angoli. Punti critici di stress e potenziale rottura
- Forma simmetrica. Rischio di ambiguità nella manipolazione
- Superfici ampie ma sottili. Ottimo test per la qualità della spigolatura nel post processing
- Oggetto realmente funzionale. Obiettivo qualitativo non solo estetico

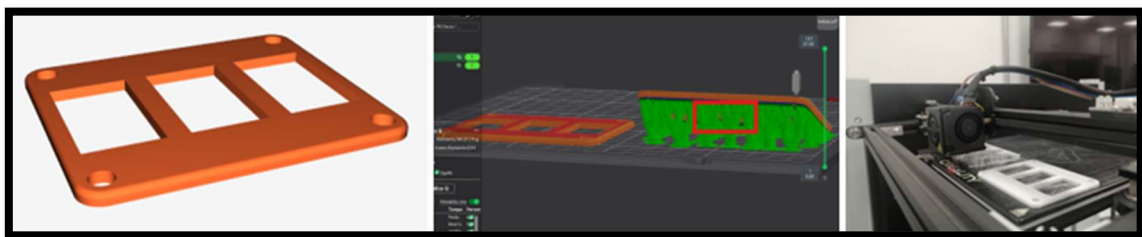


Figura 60. Mascherina tasti moto doppia variante, Senza supporto – S1 e Con supporto - S2

#### S3\_Rivetti

Funzionalmente, i due rivetti costituiti da due coppie (due Teste + due Perni) rappresentano un sistema di fissaggio maschio-femmina in cui la Testa integra la sede di accoppiamento e guida il Perno (o Gambo). Mentre il Perno costituisce l'elemento di serraggio/inserimento.

La sfida risiede nelle operazioni minuziose e precise di distacco dal letto di stampa, rimozione del materiale di supporto e gestione della presa di più componenti contemporaneamente presenti sul piatto di stampa e, molto piccoli, come per esempio i rivetti., Questi rappresentano un caso di studio significativo vista la loro dimensione.

Sono oggetti piccoli e geometricamente distinti che mettono alla prova in particolare la precisione di presa robotica e movimentazione precisa all'interno del volume di stampa, questo per rispettare la

sequenza ordinata delle fasi su più componenti, raffigurando un esempio di produzione per piccoli lotti in quantità e dimensioni (Figura 61).

Fattori decisionali di scelta di S2:

- Piccole dimensioni. Difficoltà di presa e manipolazione fine
- Geometria ingegneristica realistica (gambo + testa preformata)
- Facile deformazione durante il distacco dal letto
- Differenze geometriche tra Short e Long. Variabilità scelta intenzionalmente
- Oggetti reali e funzionali

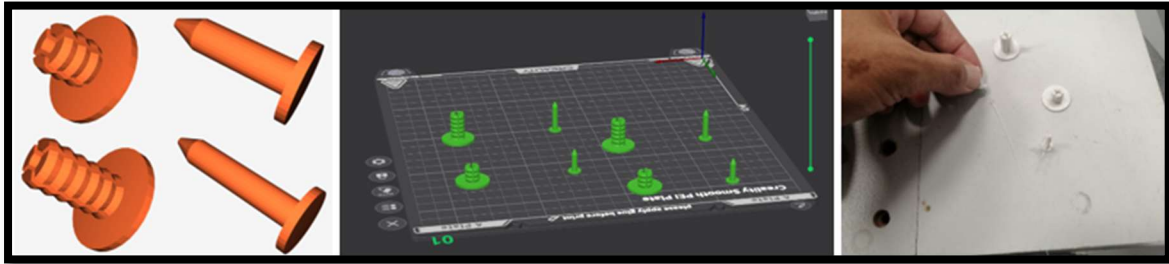


Figura 61. Rivetti – S3

#### S4\_Manopola

La manopola cambio è un organo di comando che deve trasferire in modo affidabile la forza al sistema di azionamento del cambio. I due semi gusci (superiore e inferiore) servono a racchiudere e vincolare l'interfaccia interna (sede/attacco) e, tramite viti, garantiscono serraggio, anti-rotazione e mantenimento della posizione sotto carichi ripetuti (presa, torsione, micro-urti) (Figura 62).

La manopola per cambio auto è stata selezionata come oggetto di studio per introdurre un caso sperimentale caratterizzato da geometria esterna complessa più due componenti funzionali.

La superficie esterna prevalentemente sferica rende la manopola un oggetto particolarmente adatto allo studio delle strategie di presa soprattutto robotiche.

La suddivisione dell'oggetto in due componenti stampati separatamente (superiore e inferiore) introduce inoltre una fase di assemblaggio mediante viti e dunque piccoli fori sulla superficie della base di due semisfere. Si osserva che in questo manufatto la Fase 3 (Assemblaggio) non è attiva perché è una fase che spetta al consumatore finale e non in produzione.

Le modeste dimensioni dei due componenti rendono la manopola interessante per quanto concerne la confrontabilità con l'apertura massima della pinza del cobot.

Fattori decisionali di scelta di S3:

Geometria esterna continua

- Presenza di più componenti e vincoli di assemblaggio
- Geometrie interne funzionali
- Dimensioni intermedie del pezzo
- Variabilità di orientamento durante il processo
- Rilevanza funzionale del prodotto finale

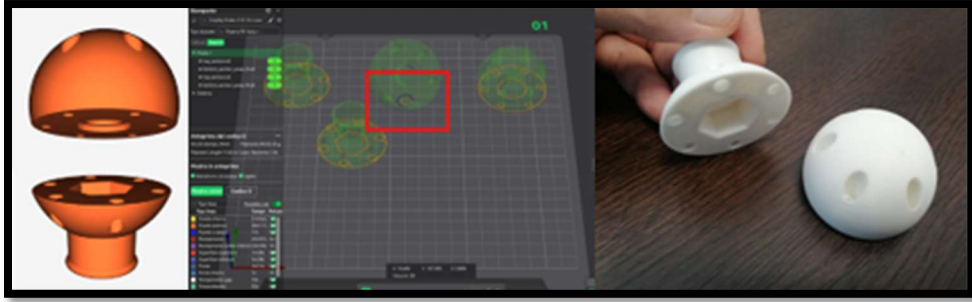


Figura 62. Manopola cambio marcia – S4

### S5. Snorkel

Geometricamente, lo snorkel è un condotto volumetrico a sviluppo longitudinale con sezione variabile e tratti raccordati e curvilinei, caratterizzato da superfici esterne sporgenti e da una cavità interna continua.

Il caso di studio dello snorkel per aspirazione aria, composto da tre componenti, è stato scelto perché consente di analizzare, in un'unica simulazione, un insieme di criticità come la presa e prova effetto “clic”, presenza di più componenti sul letto di stampa, analisi sequenza di presa e gestione di pezzi voluminosi con evidenti vincoli di manovra e impegnativa fase di assemblaggio e asportazione supporto dalle parti case di due componenti. Inoltre, poiché i tre componenti in scala reale entravano solo al limite (e non contemporaneamente) nel volume di stampa, è stato necessario procedere a un rimpicciolimento controllato. Ciò ha reso la prova abbordabile mantenendo però condizioni critiche di posizionamento e orientamento, utili per studiare in modo verosimile le complicazioni legate alla dimensionalità del pezzo scelto (Figura 63).

Fattori decisionali di scelta di S3:

- Multicomponente sul letto di stampa (3 pezzi)
- Vincolo di volume di stampa e ridimensionamento controllato
- Geometrie volumetriche e superfici non prismatiche di presa complicata
- Materiale di supporto come variabile critica di processo
- Vincoli di layout reale: sbraccio, struttura della stampante e sicurezza
- Obiettivo sperimentale specifico: “effetto clic” e integrazione stacco + presa

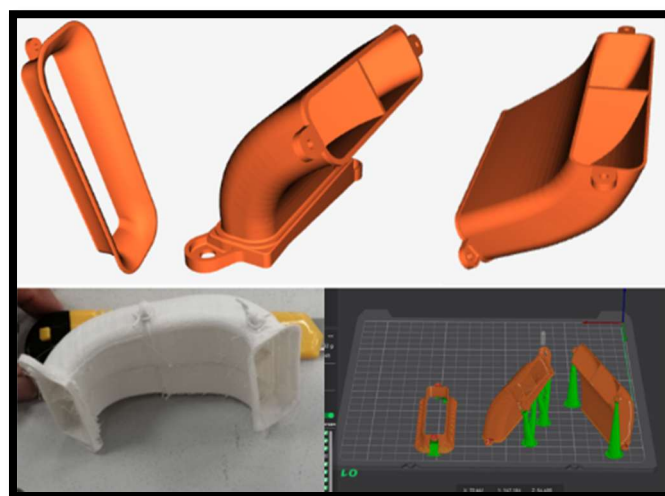


Figura 63. Snorkel – S5

## S6. Porta consolle

Geometricamente, il porta-consolle è un assieme a due componenti complementari un braccio longilineo e affusolato (sviluppo prevalente lungo un asse, con sezione ridotta e superfici che alternano tratti piani e spigoli/vertici) e una base più compatta con zone funzionali localizzate (sedi/perni/aree di accoppiamento) che creano discontinuità geometriche e vincoli di orientamento durante manipolazione e accoppiamento.

### Braccio

Elemento slanciato e tridimensionale, con sviluppo prevalente in altezza. Il profilo si configura come un braccio di supporto a geometria articolata, con sezione relativamente stretta e forma pensata per collegare e posizionare la consolle rispetto al punto di aggancio.

### Base

Elemento prevalentemente prismatico e allungato, con profilo “a piastra” a basso spessore: si presenta come una barra rettangolare compatta, con sviluppo principale lungo un asse e funzione di appoggio/fissaggio (Figura 64).

Il caso di studio del braccio porta-consolle da agganciare su cruscotto, composto da due componenti (base e braccio), è stato selezionato perché consente di analizzare la presa su profili longilinei e sottili, gestione di componenti con sviluppo prevalente lungo un asse. Inoltre, la presenza di una funzione di assemblaggio tra i due componenti (incastro e avvvitamento) rende il pezzo adatto a osservare non solo le fasi di estrazione e pulizia, ma anche l’impatto della geometria funzionale sulla gestione operativa complessiva, come, anch’esso, l’assemblaggio con viti. La simulazione include infine una variabile sperimentale rilevante come il tentativo di introdurre supporti specifici per facilitare l’“effetto clic” (distacco, presa e movimentazione in un’unica operazione sequenziale).

Fattori decisionali di scelta di S6.

- Presa non banale su geometrie affusolate
- Presenza di assemblaggio tra componenti con incastro più avvvitamento.
- Supporti come variabile sperimentale per facilitare “effetto clic” e presa
- Alcuni ripetono quelli dei casi precedenti e non si riportano

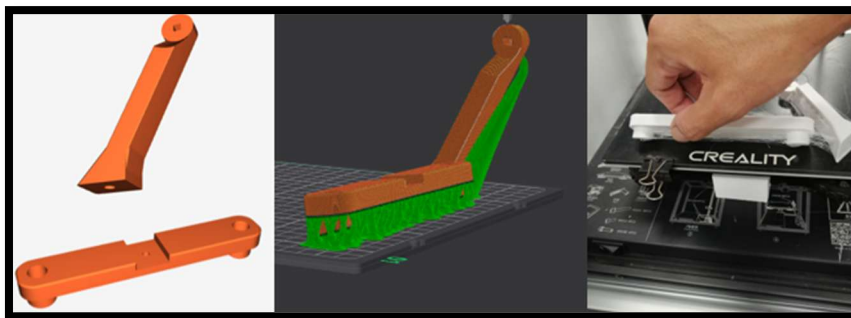


Figura 64. Porta consolle – S6

## S7. Piastra

Il pezzo è una piastra rettangolare con angoli raccordati, caratterizzata da nervature interne a croce (rinforzo), perimetro sagomato e due linguette verticali che sporgono dalla superficie principale (per aggancio) con due fori su uno dei due lati più lunghi (Figura 65).

Il caso di studio della piastra di copertura interna dell’arco passaruota (per accesso luci antinebbia) è stato selezionato perché consente di analizzare una combinazione di criticità, alcune già emerse nei casi precedenti, ma concentrate su una geometria diversa ossia un pezzo ampio, sottile e a bassa

altezza, con superficie di contatto estesa e vincoli di presa/manovra che possono compromettere l'operatività del cobot fino al rischio di arresto di emergenza. Inoltre, il ruolo del materiale di supporto come variabile di processo, la sua localizzazione, densità e struttura influenzano direttamente sia il distacco che la presa, soprattutto quando la stampa avviene con basi adiacenti al letto oppure in posizione obliqua.

Fattori decisionali di scelta di S7

- Geometria sottile e ampia (piastra larga a basso spessore)
- Presa cobot e vincoli di manovra nel layout (rischio arresto di emergenza)
- Materiale di supporto come variabile operativa (localizzazione, densità, struttura)

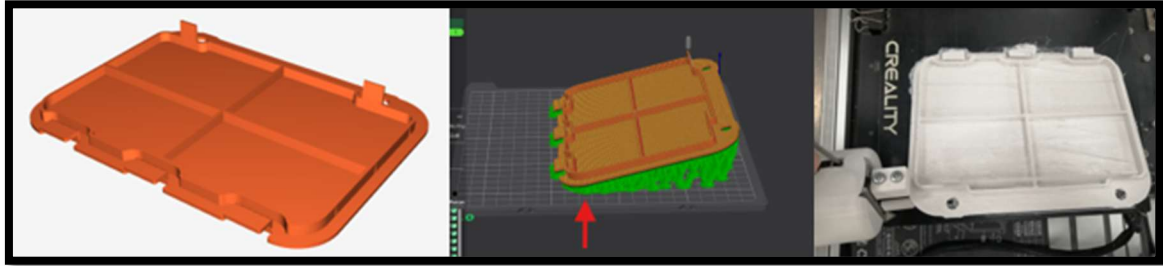


Figura 65. Piastra arco ruota – S7

## 11.4 RIASSUNTO SVOLGIMENTO DELLE SIMULAZIONI LABORATORIALI

### Mascherina tasti moto (Figura 66)

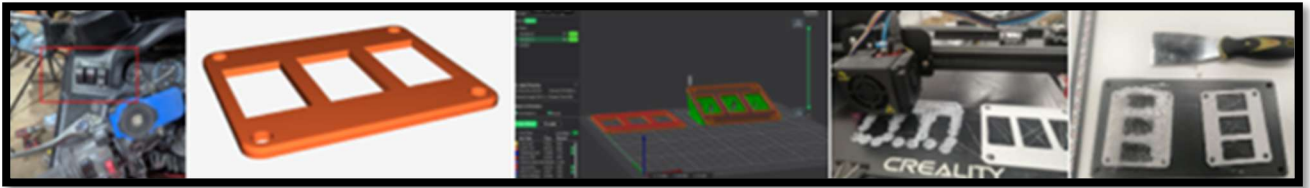


Figura 66. Illustrazione generica Mascherina

### S1 - Senza supporto

Tale simulazione ha una struttura di processo molto semplice: stacco rapido, pulizia contenuta, assenza di assemblaggio. L'operatore umano mantiene il massimo vantaggio perché agisce senza tempi indiretti di programmazione, senza criticità di presa e senza vincoli di traiettoria. Il cobot, al contrario, incontra limiti di raggiungibilità, interferenza con il pezzo, spazio ridotto e inefficacia dello stacco anche dopo più tentativi con parametri crescenti. La modalità HRC non riesce a compensare questi limiti e non migliora il risultato complessivo. Best scenario finale: Solo Uomo: 01:48,45.

#### Scenario Uomo

La prova è andata bene ed è risultata la più semplice dell'intero caso. Lo stacco è stato eseguito manualmente con spatola; il pezzo, pur aderendo bene al letto, è stato rimosso senza necessità di riconfigurazioni o prove preliminari. La fase successiva non ha riguardato una vera asportazione di supporti, ma solo la rimozione di residui e imperfezioni superficiali.

#### Scenario Cobot

La prova non è risultata efficace. Sono stati considerati più tentativi progressivi di incremento accelerazione e distanza senza risultati se non lo spostamento della stampante come rappresentato in Tabella 31. Il problema principale non è stato il tempo, ma la mancata riuscita dello stacco. Già in programmazione è emersa una criticità: il punto finale della traiettoria risultava occupato dal pezzo; quindi, il TCP non poteva raggiungerlo realmente (Figura 67).



Figura 67. Complicazioni presa con cobot e studio criterio stacco

Per rendere programmabile la manovra è stato necessario intervenire con:

- memorizzazione dei punti in condizioni modificate
- apertura pinza in programmazione
- inserimento manuale delle coordinate (Figura 68)
- uso di soli movimenti MOVE L per ridurre il rischio di urti con la stampante.

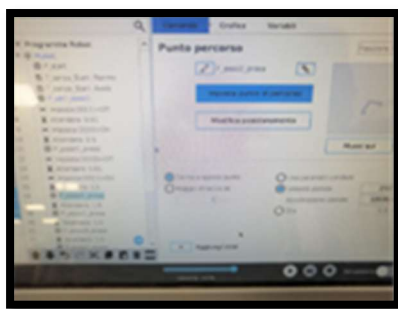


Figura 68. Riprogrammazione waypoint

Tentativo	Impostazione prova	Esito osservato
1	2 mm – 3000 mm/s <sup>2</sup> ; poi 4 mm – 4000 mm/s <sup>2</sup>	nessuno stacco; si sposta la stampante
2	4 mm – 5000 mm/s <sup>2</sup> ; poi 6 mm – 6000 mm/s <sup>2</sup>	nessuno stacco; limite geometrico oltre 4 mm
3	6 mm – 10000 mm/s <sup>2</sup> ; poi 8 mm – 15000 mm/s <sup>2</sup>	nessuno stacco; ancora spostamento stampante
4	stampante fissata con placche, coordinate riprogrammate, quota Z aggiornata; prova ripetuta con parametri alti	nessuno stacco; attivazione schermata di protezione
<b>Prova alternativa</b>	presa dall'alto, circa 10 tentativi	solo flessione locale; nessun distacco completo

Tabella 31. Riassunto tentativi distacco e scardinamento

Lettura tecnica della prova cobot

- la simulazione è stata svolta, ma non ha portato a uno stacco utile
- l'aumento di corsa e accelerazione non ha migliorato il risultato
- l'energia impressa si è trasferita soprattutto alla stampante, non al pezzo
- la presa dall'alto non ha risolto il problema
- il processo è risultato non robusto e non ripetibile

Scenario uomo–cobot

Per il caso senza supporto, la collaborazione uomo–cobot non è stata considerata conveniente.

Il motivo è operativo in quanto le due fasi effettivamente presenti, cioè stacco e pulizia leggera, sono già risolte in modo più diretto dall'operatore umano. In questo caso il cobot non introduce stabilizzazione o vantaggi di accesso tali da compensare la complessità aggiuntiva. Per questo la configurazione HRC non viene selezionata come scenario utile.

## Mascherina tasti moto

### S2 - Con supporto

Nel caso con materiale di supporto, la simulazione mostra un comportamento diverso rispetto al caso senza supporto. Lo stacco resta semplice per l'operatore umano, mentre la vera criticità si concentra nella rimozione/asportazione del supporto, che diventa la fase dominante del ciclo. Per questo il miglior assetto finale non coincide con lo scenario solo uomo né con il solo cobot, ma con una configurazione HRC, in cui lo stacco resta uomo e la pulizia viene svolta in collaborazione uomo–cobot. Best scenario finale: HRC: 04:16,32.

Scenario Uomo

Lo scenario solo uomo è stato completamente eseguibile. Lo stacco dal letto è stato eseguito con spatola ed è risultato rapido anche in presenza del supporto.

#### Scenario Cobot

Operazione tecnicamente praticabile per la fase robotica di stacco e movimentazione, grazie a una nuova impostazione di stampa e a una struttura di supporto più favorevole. In particolare, è stata adottata una configurazione con supporti ad albero a bassa densità come rappresentato in Figura 69, pensati per:

- ridurre lo sforzo necessario allo stacco
- creare un minimo di gioco
- facilitare la presa del gripper

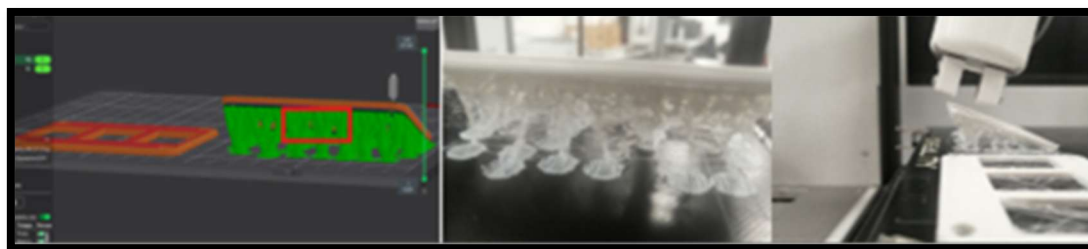


Figura 69. Illustrazione Mascherina e tipologia supporto

Sono stati inoltre introdotti adattamenti di layout:

- nuova stampa dedicata allo scenario cobot
- inversione della posizione dei componenti sul piatto
- attenzione al lato di produzione più accessibile al cobot
- mantenimento del layout fisso entro variazioni contenute

Per permettere il distacco del pezzo è stato necessario identificare 3 punti di contatto con Freedrive che permettessero finalizzare l'operazione come rappresentato in Figura 70 e poi agevolare la presa



Figura 70. Identificazione punti traiettoria per garantire distacco e successiva presa in orizzontale

Il valore del tempo ciclo per distacco e presa, e deposizione è di 25,656 sec. con conferma immediata dell'operatore con pop-up quando il TCP viene posizionato in form instabile per Fase 2; la pulizia/asportazione del supporto non è però contemplabile in solo cobot con il set-up disponibile; quindi, lo scenario non viene selezionato come configurazione finale. Nell Tabella 32 si riportano alcuni aspetti riguardanti lo scenario solo cobot.

Aspetto tecnico	Esito
Supporto adottato	struttura ad albero, bassa densità
Orientamento pinza	mantenuta trasversale al letto
Velocità lenta tratto verticale	10 mm/s
Funzione del tratto lento	scardinare gradualmente il supporto evitando sollecitazioni brusche
Gestione operatore	punto di arresto + pop-up di consenso

<b>Esito del primo tentativo</b>	positivo e validato
----------------------------------	---------------------

Tabella 32. Caratteristiche scenario solo cobot

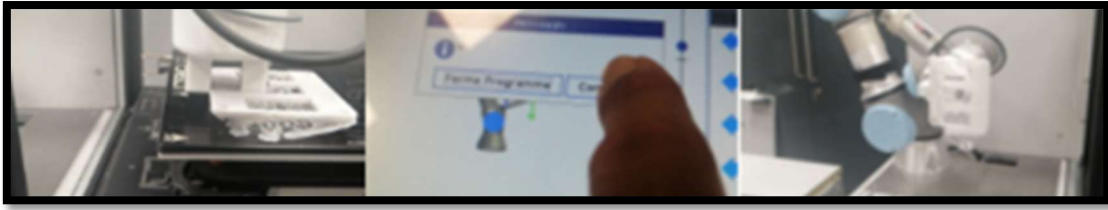


Figura 71. Comando di pop-up per consentire la deposizione del pezzo

Durante la prova, la deformazione del supporto ha portato la mascherina ad abbandonare l'inclinazione iniziale e ad assumere una configurazione più orizzontale. Questo ha migliorato la presa e ha consentito l'esecuzione dell'intero processo robotico senza criticità operative rilevanti (Figura 71). È proprio questo comportamento del supporto a rendere lo scenario con supporto radicalmente diverso dal caso senza supporto

Scenario uomo-cobot

Lo scenario uomo-cobot è quello che viene selezionato come migliore configurazione finale. La logica adottata è semplice:

- stacco affidato all'uomo
- pulizia/asportazione supporto svolta in HRC come mostrato in Figura 72.

Questa scelta evita di usare il cobot dove non è competitivo sul piano del tempo e lo si usa invece dove può fornire un vantaggio concreto come sistema di presa/stabilizzazione del pezzo durante la pulizia.

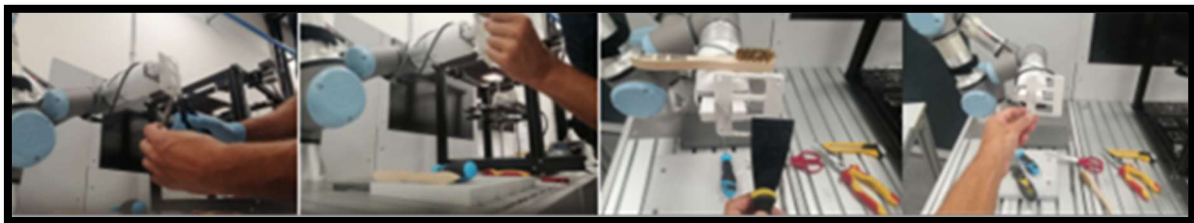


Figura 72. Operazioni pulizia e asportazione supporto con asservimento cobot come morsa stabile

### S3 – Rivetti

La simulazione dei rivetti è partita da una prima stampa di prova senza orientamenti o supporti dedicati all'automazione con cobot. La prima criticità osservata è stata la distanza troppo ridotta tra i pezzi sul letto di stampa. Proprio questa configurazione rendeva problematica la manovra della pinza, sia nello stacco sia nel prelievo come mostrato in Figura 73, con rischio di collisione con i pezzi vicini. Per questo, nella stampa successiva, è stata aumentata la distanza reciproca tra i rivetti.

Dal punto di vista dell'orientamento, l'opzione "minimizza il tempo di stampa" è risultata la più coerente per le prove. L'orientamento verticale aumenta l'aderenza al letto, ma nel caso dei rivetti lo stacco resta comunque fattibile perché le superfici di contatto sono limitate. È stata invece scartata l'opzione legata alla riduzione del materiale di supporto, perché non utile nel contesto del caso. Una prima ristampa è inoltre fallita per un blocco del filamento PLA sulla bobina; il problema è stato considerato materiale e non di processo, quindi escluso dall'analisi. Best scenario finale: Solo Uomo: 06:12,42.

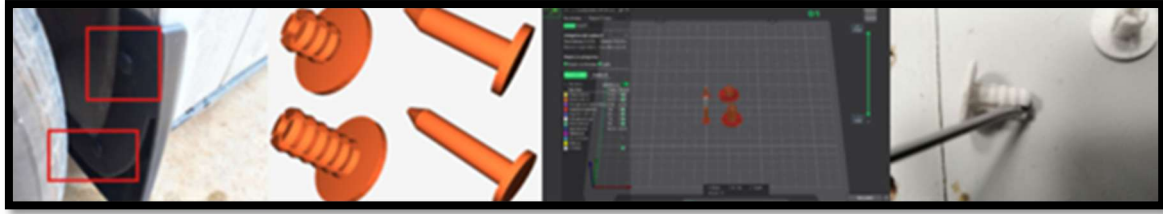


Figura 73. Illustrazione generale Rivetti, prima prova con distanziamento limitato e dimensione reale dell'oggetto

#### Scenario Uomo

Lo scenario solo uomo è risultato il più efficace e il più stabile. Il lotto di prova comprendeva 4 oggetti di stampa: 2 perni (gambi) e 2 teste, corrispondenti a 2 rivetti completi. Le prove sono state condotte senza materiale di supporto. Lo stacco è andato bene e garantito dal letto freddo, l'operazione è risultata semplice e immediata. L'effetto di distacco "clic" è stato chiaramente percepibile e ha consentito l'estrazione anche con una sola mano. Durante lo stacco si sono formati filamenti residui tra i singoli elementi, ma questi sono risultati sospesi, accessibili e eliminabili con forbicine anche se con un processo minuzioso e un po' ostico. La pulizia è risultata invece la fase dominante del ciclo. Richiede precisione elevata, controllo fine e continui cambi di orientamento del pezzo con pinza come si può osservare nella Figura 74.



Figura 74. Illustrazioni riguardanti i Rivetti, dallo stacco agli strumenti per pulizia

#### Scenario Cobot

Lo scenario solo cobot è stato studiato soprattutto come verifica dei limiti del sistema. Il problema principale non è stato solo il tempo, ma la scala molto ridotta dei componenti rispetto alla pinza disponibile. Dai risultati emerge infatti che il cobot:

- non riesce a prelevare la testa del rivetto, perché il diametro è inferiore alla chiusura minima della pinza
- riesce a lavorare solo sulla base gambo, è stato selezionato un valore di accelerazione dei giunti pari a  $1000 \text{ mm/s}^2$  per il punto di presa e, a seguire, lo stacco e il prelevamento del gambo è avvenuto senza alcuna criticità

Nonostante la finalizzazione di presa e movimentazione sia avvenuta, la stessa ha riguardato soli i gambi.

Dal punto di vista del layout, per rendere il cobot minimamente utilizzabile erano necessari:

- posizionamento dei pezzi verso il lato del piatto più vicino al cobot
- stabilizzazione del piatto di stampa (Figura 75)
- uso esclusivo di MoveL in spazi ristretti.



Figura 75. Distanziamento rivetti per permettere distacco, presa e stabilizzazione piatto stampa

#### Scenario uomo-cobot

Nel caso dei rivetti, la modalità HRC non porta benefici significativi né in termini di tempo né in termini di qualità. La motivazione è operativa in quanto la fase dominante resta la pulizia, che richiede controllo fine, adattamento immediato e sensibilità tattile elevata. Sono caratteristiche che, in questo caso, restano più efficacemente gestite dall'operatore umano

#### S4 – Manopola cambio marcia

Prima delle prove operative è stata fatta una verifica sull'orientamento di stampa delle parti superiori. L'opzione orientata alla riduzione del volume di supporto ha dato esito negativo con perdita di un appoggio utile sul letto (Figura 76), filamenti che hanno agito come tiranti tra i componenti e progressiva compromissione della stampa. Di conseguenza, questa scelta non è risultata affidabile per il caso in esame. Best scenario finale: Solo Uomo: 03:23,84.



Figura 76. Illustrazione generale Manopola e perdita appoggio con compromissione stampa

#### Scenario Uomo

La prova è risultata semplice e pienamente eseguibile. Lo stacco è stato effettuato con letto freddo e piatto abbassato, così da limitare flessioni e deformazioni. Entrambi i componenti sono stati rimossi senza criticità rilevanti. La fase successiva di pulizia è stata svolta manualmente con utensili leggeri e di precisione. Non è prevista fase di assemblaggio perché l'avvitamento viene demandato al compratore per il montaggio.

#### Scenario Cobot

Lo scenario solo cobot non è risultato applicabile. La criticità principale è geometrica in quanto la forma concava/sferica dei due componenti non è compatibile con la pinza disponibile. Questo compromette sia la spinta laterale per lo stacco sia la presa stabile del pezzo. L'apertura pinza era visibilmente inadatta alla dimensione del pezzo motivo per cui si è interrotta la stampa per risparmio PLA e lavorato sulle dinamiche di stacco con più tentativi (Tabella 33). La quota dei punti verticali di presa/rilascio è stata fissata a  $Z = 130$  mm.

Componente	Impostazione prova	Esito
Parte superiore	orientamento di distacco dall'alto; 1° tentativo con 3000 mm/s <sup>2</sup>	Negativo, spostamento stampante

<b>Parte superiore</b>	ulteriore tentativo	Negativo, prove interrotte
<b>Parte inferiore</b>	2 mm – 3000 mm/s <sup>2</sup>	negativo
<b>Parte inferiore</b>	4 mm – 3000 mm/s <sup>2</sup>	negativo
<b>Parte inferiore</b>	6 mm – 4000 mm/s <sup>2</sup>	negativo
<b>Preso dall'alto</b>	apertura pinza fino a 5 mm dopo piccolo allontanamento	non possibile, perché lo stacco non avviene

Tabella 33. Tentativi stacco Manopola

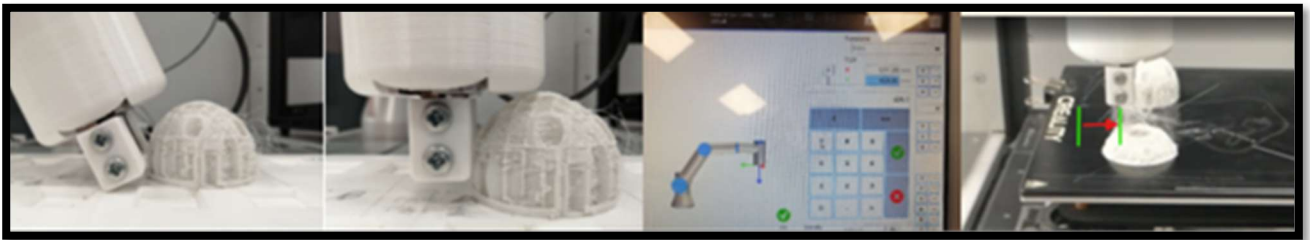


Figura 77. Illustrazione generale Manopola e perdita appoggio con compromissione stampa

In definitiva:

- la parte superiore non si stacca con accelerazione parallela al letto nemmeno con orientamento dall'alto (Figura 77)
- la parte inferiore non si stacca neppure con incremento progressivo di corsa e accelerazione
- la presa teorica è stata studiata, ma resta non utilizzabile in assenza di distacco reale
- la pulizia non è contemplabile in solo cobot per mancanza di presa stabile

Scenario uomo-cobot

Lo scenario HRC è stato studiato soprattutto per verificare se il cobot potesse aiutare nella pulizia, mantenendo il pezzo in posizione stabile. Tuttavia, poiché le difficoltà di presa emerse nello scenario cobot restano presenti, questa configurazione è stata considerata solo in forma guidata, usando Freedrive, apertura/chiusura pinze da touch pendant e una sequenza con 4 pop-up di conferma richiesti all'operatore (Figura 78). Anche in questo scenario, lo stacco resta interamente umano.

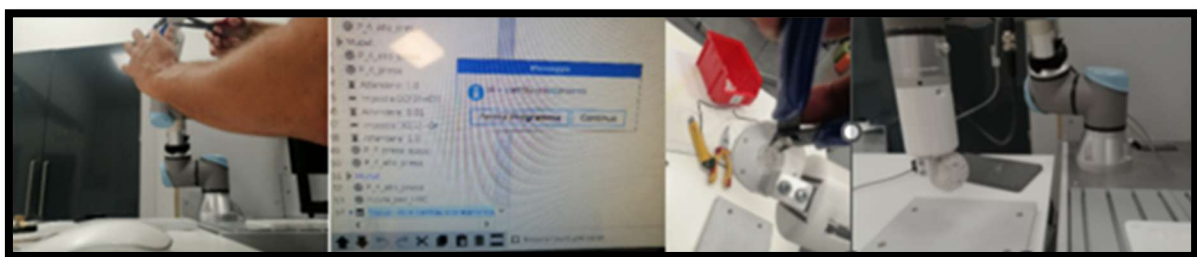


Figura 78. Pulizia e asportazione con ausilio Cobot e comando pop-up progresso ciclo

## S5 – Snorkel aspirazione aria (Figura 79).



Figura 79. Illustrazione generale Snorkel aspirazione aria

Il caso è composto da tre componenti stampati nello stesso oggetto di stampa. La criticità non è solo il distacco dal letto, ma la combinazione di quattro fattori operativi:

- presenza contemporanea di più pezzi sul piatto e diminuzione manovrabilità
- vincoli di accessibilità imposti dalla stampante e dal volume di lavoro del cobot
- forte incidenza della pulizia interna delle geometrie cave sul tempo complessivo.

Dal punto di vista funzionale, il componente 1 è più semplice da gestire, mentre i componenti 2 e 3 presentano geometrie più volumetriche, superfici non prismatiche e punti di presa meno immediati. Questo rende necessarie strategie differenziate di stacco, presa e orientamento (Figura 80). Best scenario finale: HRC: 03:48,00

### Scenario Uomo

La fase di stacco/estrazione è risultata semplice e rapida. I tre componenti sono stati rimossi con spatola e, ove possibile, anche a mani libere. Durante il distacco è stato osservato l'effetto "clic", associato al superamento dell'adesione tra pezzo e letto. La combinazione spatola + gesto manuale ha consentito uno stacco controllato senza necessità di correzioni o traiettorie accessorie.

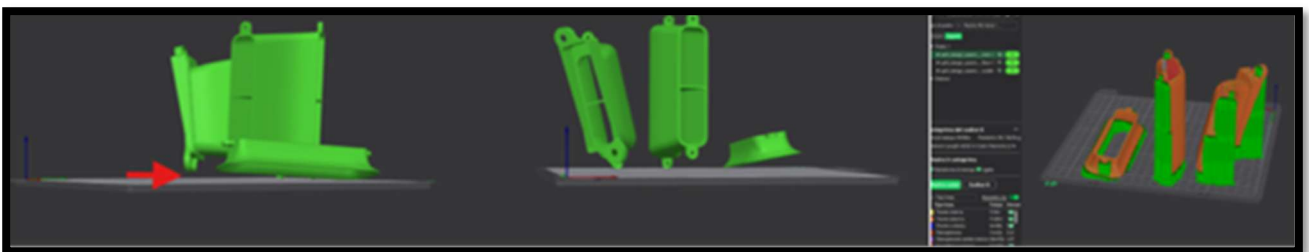


Figura 80. Analisi posizionamento e orientamento componenti per agevolare il processo

La fase di pulizia è stata invece la più onerosa. La criticità principale è localizzata nelle parti cave, dove l'accesso è ridotto e l'asportazione dei residui richiede precisione, strumenti specifici e frequenti micro-correzioni. È stata rilevata anche una criticità ergonomica dovuta al fatto che una mano era impegnata nel mantenimento del componente e l'altra dedicata alla pulizia, con conseguente perdita di efficacia e aumento delle azioni correttive, e rischio infortunio. Il limite non è lo stacco, ma la maneggiabilità durante la pulizia delle cavità. Il caso conferma che, per geometrie cave e accessi stretti, la qualità del risultato dipende fortemente dalla stabilizzazione del pezzo e dalla disponibilità di entrambe le mani.

### Scenario Cobot

Lo scenario solo cobot è stato verificato come tecnicamente realizzabile nella sola fase di stacco / estrazione (Figura 81), ma non è risultato conveniente né sufficiente a chiudere il ciclo. Il tempo misurato per lo stacco/estrazione dei tre componenti è 50,362 s, nettamente superiore al corrispondente tempo umano di 00:18,70. Pulizia e assemblaggio non risultano praticabili in autonomia con il setup considerato.

Le prove hanno mostrato che:

- il componente 1 può essere gestito con sequenze di stacco e rilascio relativamente lineari
- il componente 2 è la parte più critica. Durante la programmazione il sistema ha selezionato traiettorie inverse e complesse, con ingresso in arresto di emergenza
- per il componente 2 è stata necessaria una riprogrammazione con Freedrive e waypoint per forzare una traiettoria compatibile con lo spazio disponibile
- il componente 3 ha richiesto una sequenza dedicata di approccio, presa e rilascio, ma sempre entro un ciclo dominato da spostamenti, verticali intermedie e manovre conservative
- i tempi parziali di stacco dei singoli componenti non coincidono con il tempo totale della fase perché il valore finale include anche spostamenti tra componenti, punti verticali, waypoint e sequenze di rilascio.



*Figura 81. Operazioni di presa, con effetto clic, del cobot per ciascuno dei tre componenti*

#### Scenario uomo–cobot

La modalità HRC è stata adottata solo dove produce un vantaggio reale:

- stacco mantenuto all'operatore umano, per rapidità e sicurezza
- pulizia eseguita in HRC, con cobot usato come sistema di presa e mantenimento
- assemblaggio eseguito in HRC, con il cobot come supporto stabile durante l'accoppiamento.

La fase di pulizia in HRC è quella che giustifica il ricorso alla collaborazione. Il cobot opera come una morsa orientabile:

- mantiene il pezzo fermo nella posizione desiderata
- libera entrambe le mani dell'operatore
- migliora la visibilità
- consente di adattare luce, lato di lavoro ed ergonomia
- riduce i micromovimenti correttivi
- aumenta il controllo fine nelle zone cave e nei punti più intricati.

Il vantaggio non è solo qualitativo ma anche temporale: la pulizia passa da 11:34,65 nello scenario solo uomo a 11:05,66 in HRC. Il miglioramento è quindi contenuto ma reale, e diventa rilevante perché agisce sulla fase dominante del ciclo.

Da osservare che comunque la modalità collaborativa non elimina tutte le criticità. Il sistema non riesce a ruotare il pezzo secondo tutta la sua profondità; alcune superfici restano quindi meno accessibili e richiedono ulteriori riposizionamenti con conseguente attivazione/disattivazione del Freedrive e riposizionamento del TCP. Rimane inoltre un costo operativo dovuto ad aperture/chiusure della pinza e ai cambi di orientamento necessari durante la lavorazione.

L'assemblaggio è risultato più efficiente in HRC, con 05:24,19. Il vantaggio deriva dalla stabilizzazione del pezzo e dalla possibilità di eseguire l'inserimento/accoppiamento con due mani libere, in una posizione scelta secondo la comodità operativa). Questo riduce il rischio di danneggiamento e migliora il controllo durante l'allineamento dei componenti (Figura 82)

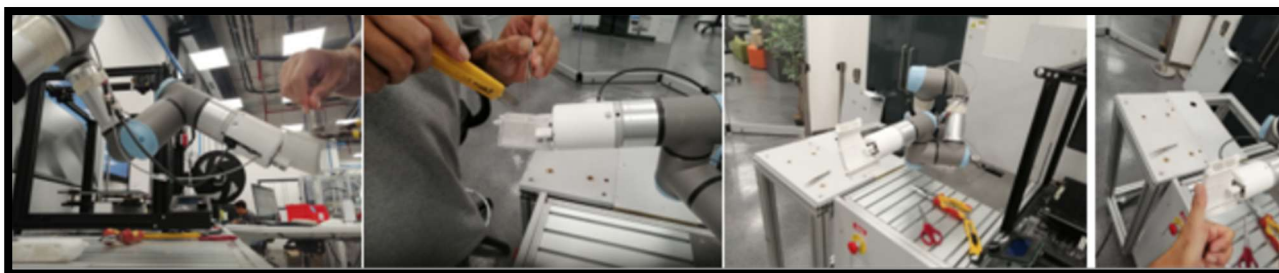


Figura 82. Operazioni di pulizia e assemblaggio in HRC

## S6 – Porta consolle (Figura 83)

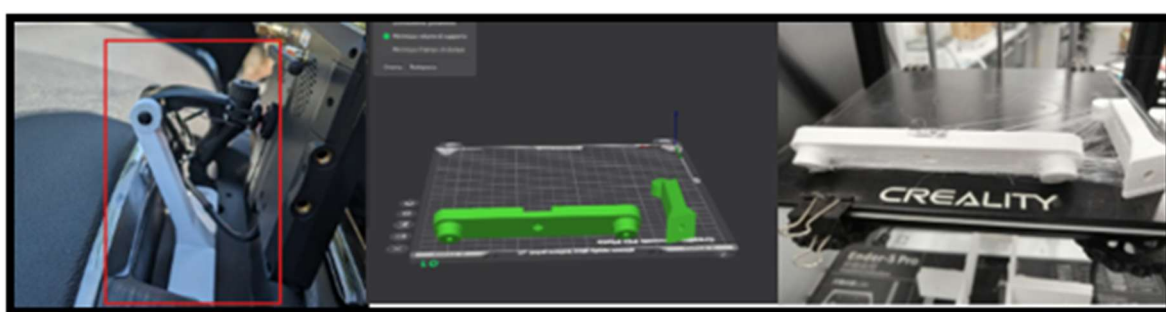


Figura 83. Illustrazione generale Porta consolle e riposizionamento sul piatto

Le criticità operative principali sono tre:

- presa robotica sensibile alla zona di contatto sul braccio
- incompatibilità pinza–sezione utile sulla base

Il caso include anche una fase di assemblaggio reale con incastro più una vite e dunque una la valutazione che non si limita a stacco e pulizia, ma riguarda anche stabilizzazione, allineamento e serraggio. Lo scenario solo uomo risulta leggermente più lento, con 03:54,37. Lo scenario solo cobot copre solo l'estrazione dei due componenti, con 00:26,058, senza chiudere il ciclo. Prima dell'avvio operativo si è resa necessaria una fase preliminare di sistemazione del lotto:

- scelta delle porzioni del piatto più accessibili al cobot
- approccio prudente nelle traiettorie interne alla stampante
- ricorso a Freedrive nei punti più critici di presa e di stacco.

Best scenario finale: HRC: 16:48,55

Scenario Uomo

La fase di stacco / estrazione è risultata immediata. Il tempo di riferimento è 00:06,77, valore che conferma una rimozione rapida e ripetibile, senza necessità di programmazione o aggiustamenti di traiettoria. La fase di pulizia ha richiesto un tempo superiore, 03:08,50, ed è risultata la fase più pesante del ciclo manuale. La criticità non è stata nello stacco, ma nella gestione continua del pezzo durante la finitura. L'assemblaggio è stato svolto con incastro + una vite ed è risultato molto rapido: 00:39,10. In questo caso il lavoro a mani libere ha mantenuto il vantaggio temporale rispetto a ogni ipotesi di supporto robotico.

Scenario Cobot

Lo scenario solo cobot è risultato parzialmente fattibile, ma non conveniente come ciclo completo. Il cobot riesce a coprire la sola fase di estrazione, con un tempo di 00:26,058 per i due componenti,

valore quasi quattro volte superiore allo stacco umano. Pulizia e assemblaggio non vengono chiusi in autonomia.

#### Componente 1 – braccio

La presa è risultata possibile solo scegliendo una zona molto precisa, con:

- un lato piano
- un lato a vertice

in modo da garantire contatto efficace su entrambi i denti della pinza. In questo caso non è stata necessaria una spinta parallela al piatto e la presa dall'alto è risultata sufficiente come logica di comando.

#### Componente 2 – base

La criticità è stata più severa. A pinza chiusa, lo spazio residuo risultava pari a 12 mm, mentre la sezione utile del componente era di 10 mm. La presa diretta non generava quindi un bloccaggio stabile. Per garantire lo stacco è stato necessario (Figura 84):

- ricorrere a Freedrive
- introdurre una manovra specifica;
- eseguire uno spostamento orizzontale di 5 cm prima di proseguire con la sequenza.
- 



Figura 84. Analisi dimensioni presa e considerazioni di risoluzione

#### Scenario uomo–cobot

La modalità HRC risulta vantaggiosa solo se selettiva. L'uso efficace del cobot si concentra sulla pulizia, dove il pezzo richiede stabilizzazione continua, mentre non conviene né sullo stacco né sull'assemblaggio. La pulizia scende da 03:08,50 a 03:02,43. Il miglioramento è contenuto ma misurabile e replicabile. Il vantaggio non deriva da un'accelerazione robotica della lavorazione, ma dal fatto che il cobot agisce come supporto stabile, lasciando all'operatore:

- due mani libere;
- controllo continuo della posizione;
- migliore gestione della zona di lavoro.

L'assemblaggio con supporto cobot è risultato più lento di quello manuale (Figura 85):

- Uomo: 00:39,10
- HRC: 01:09,38

Il rallentamento è dovuto a:

- gestione della presa
- inserimento ed estrazione del pezzo dalla pinza
- necessità di limitare la forza di serraggio per evitare deformazioni.



Figura 85. Analisi dei tempi durante le Fasi 2 e 3

## S7- Piastra copertura arco ruota (Figura 86)

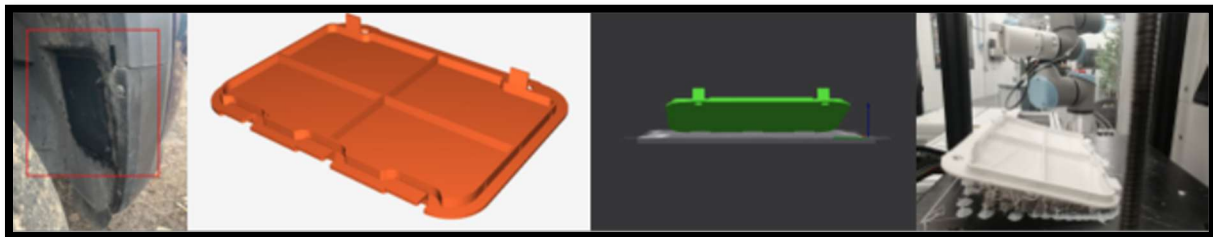


Figura 86. Illustrazione generale Piastra e orientamento per supporto necessario

La criticità principale non è la volumetria, ma la combinazione tra:

- aderenza elevata al letto
- presa robotica difficile su una geometria molto ampia e piana
- forte dipendenza dal materiale di supporto per rendere praticabile lo stacco
- rischio di arresti durante la programmazione del cobot in spazi ristretti.

La configurazione finale più efficiente è una ripartizione HRC selettiva con una micro-fase di stacco affidata al cobot, completamento dell'estrazione affidato all'operatore umano e pulizia interamente uomo. Lo scenario solo uomo chiude a 07:23,64. Lo scenario solo cobot non è completabile, perché il cobot riesce soltanto a eseguire uno scardinamento parziale del pezzo, senza presa e senza sollevamento affidabili sia per dimensioni pinze sia per vincoli con supporto. Le opzioni automatiche di orientamento proposte dal software non sono risultate coerenti con le esigenze di post-processing:

- “Minimizza volume di supporto”: troppo penalizzante per lo stacco, con eccesso di supporto tra letto e pezzo e necessità di una presa profonda non garantita da un gripper standard
- “Minimizza tempo di stampa”: accessibilità sfavorevole e supporti attesi come più rigidi e più difficili da gestire nella fase successiva.

È stata quindi adottata una terza soluzione di orientamento, definita in funzione delle manovre a valle, cioè stacco e possibilità reale di accesso. In questo caso il supporto non è stato trattato come elemento secondario, ma come variabile operativa abilitante. Best scenario finale: HRC: 07:18,08

Scenario Uomo (Figura 87)

Lo stacco/estrazione solo uomo è risultato rapido e affidabile. La rimozione manuale è risultata fattibile anche su una superficie ampia, purché la leva fosse gestita in modo controllato. La criticità principale non è emersa nello stacco, ma nella fase successiva.

La pulizia/asportazione ha richiesto 07:08,71 ed è risultata la vera fase dominante del ciclo. Il tempo è assorbito dalla rimozione dei punti radice del supporto distribuiti sulla superficie della Piastra. Anche quando lo stacco viene agevolato dal supporto, il costo temporale si trasferisce quasi interamente sulla pulizia



Figura 87. Fase 1 e Fase 2 nello scenario solo Uomo

### Scenario Cobot

Lo scenario solo cobot non è completabile. Il cobot riesce a dare un contributo solo come attuttore di distacco, non come sistema completo di presa, sollevamento e trasferimento del pezzo. Il tempo misurato per questa micro-fase di solo scardinamento è 5,71 s, ma non può essere assunto come tempo di ciclo, perché manca la presa completa e manca la possibilità di proseguire con pulizia/asportazione. La simulazione ha mostrato che il punto di presa teoricamente migliore non è risultato realmente utilizzabile. In particolare:

- la presa centrale non è praticabile
- l'ender arriva a toccare il letto e impedire l'accelerazione di spinta trasversale
- non c'è spazio sufficiente per inserire i denti della pinza in modo sicuro (Figura 88)
- i tentativi con Freedrive e touch pendant generano arresti ricorrenti
- la prova viene quindi fermata alla sola fase di distacco, senza passare a presa e sollevamento.

La strategia utile è risultata una sola ossia quella di usare il cobot per una spinta controllata destinata a separare il pezzo dai vincoli del supporto. La velocità è stata impostata volutamente a 30 mm/s, quindi in modo conservativo, proprio per evitare sollecitazioni eccessive e collisioni.



Figura 88. Analisi per condizioni di stacco dal letto di stampa con Cobot

### Scenario uomo-cobot

La modalità HRC è risultata la configurazione migliore, ma in forma molto selettiva. La logica efficace è:

- cobot: scardinamento iniziale del pezzo dal supporto
- uomo: completamento dell'estrazione rimuovendo gli ultimi filamenti
- uomo: pulizia/asportazione completa.

Il tempo di stacco/estrazione HRC è 00:09,37, ottenuto come combinazione di:

- stacco cobot (solo scardinamento): 5,71 s
- estrazione finale uomo: 00:03,66.

La collaborazione non è stata impostata come presa condivisa, ma come sequenza di ruoli complementari:

- il cobot esegue una spinta controllata sui vincoli del supporto
- il pezzo viene parzialmente liberato
- l'operatore completa l'estrazione sugli ultimi punti ancora vincolati
- la pulizia resta tutta manuale, perché il cobot non dispone della presa necessaria per mantenerlo in modo utile durante l'asportazione.

## 11.5 RELAZIONE OTTIMIZZAZIONE MOVIMENTI COBOT: RAGGI RACCORDO, VELOCITÀ E ACCELERAZIONE GIUNTI

L'analisi complessiva delle simulazioni mostra che l'ottimizzazione dei movimenti del cobot mediante raggi di raccordo, incremento di velocità e modifica delle accelerazioni dei giunti è stata quasi sempre valutata solo in via teorica e, nella sostanza, non assunta come leva decisiva di miglioramento del processo. La ragione principale è che il limite prestazionale non è risultato cinematico, ma operativo e geometrico: accessibilità al pezzo, qualità della presa, presenza della stampante come vincolo fisico, necessità di traiettorie conservative, arresti di sicurezza, e soprattutto peso temporale delle fasi manuali di pulizia e finitura.

In termini generali, i raggi di raccordo sono stati individuati solo su alcuni punti del percorso robotico, quasi sempre:

- in corrispondenza di verticali di rilascio/deposito sul banco di lavoro
- punti intermedi fuori dal volume interno della stampante che riprendevano e univano il ciclo (punti della verticale di rilascio, punto stop, punto start).

Tuttavia, il beneficio è risultato marginale, perché concentrato su tratti brevi. Inoltre, nelle zone interne alla stampante o vicine ai componenti, l'introduzione di raccordi è stata esclusa per ragioni di sicurezza e di rischio collisione.

Lo stesso vale per accelerazione e velocità dei giunti. L'aumento dei parametri dinamici avrebbe prodotto un recupero minimo senza modificare l'esito comparativo tra scenari. Nei casi più vincolati, al contrario, l'incremento di velocità avrebbe aumentato il rischio di arresti del sistema o perdita del pezzo durante la movimentazione. Per questo motivo la logica di programmazione adottata è stata sistematicamente orientata a garanzia dell'operazione e sicurezza più che alla massimizzazione della velocità.

L'analisi porta a quattro considerazioni:

- i raccordi servono solo a rifinire, non a risolvere criticità strutturali del processo
- velocità e accelerazioni non compensano limiti di presa, accessibilità o geometria del pezzo
- nelle celle studiate, gli spazi ristretti e la vicinanza della stampante impongono un uso prudente delle traiettorie, spesso con movimenti lineari e controllati (come MoveL e non MoveJ);

L'ottimizzazione di raggi di raccordo, velocità e accelerazione dei giunti non rappresenta, nelle simulazioni considerate, il fattore determinante per la scelta dello scenario migliore. Essa può produrre solo correzioni marginali su tempi già misurati, ma non modifica l'esito tecnico generale.

## 11.6 RISULTATI SIMULAZIONI LABORATORIALI: VARIABILE TEMPO

### Simulazione S1. Mascherina Senza supporto

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:07,23	7,23
Uomo	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		01:41,22	101,22
Uomo	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
<b>Uomo</b>	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		01:48,45	<b>108,45</b>
Cobot	Senza supporto	Stacco/Estrazione		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Cobot	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	
HRC	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:07,23 - Uomo	7,23
HRC	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		01:41,22 - Uomo	101,22
HRC	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
HRC	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		01:48,45	108,45

### Simulazione S2. Mascherina Con supporto

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:11,23	11,23
Uomo	Con supporto	Pulizia/Asportazione		04:27,10	267,10
Uomo	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Uomo	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		04:38,33	278,33
Cobot	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:16,752	16,75
Cobot	Con supporto		Stacco	00:02,82	2,82
Cobot	Con supporto		Presca e posizionamento	00:13,932	13,93
Cobot	Con supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Con supporto		Pulizia e Rimozione	Non possibile	
Cobot	Con supporto		Dal Fermo alla deposizione	00:04,6	4,55
Cobot	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Cobot	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Eccetto puliz e.	25,65
HRC	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:11,23 - Uomo	11,23
HRC	Con supporto	Pulizia/Asportazione		04:05,09 - HRC	245,09
HRC	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
<b>HRC</b>	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		04:16,32	<b>256,32</b>

### Simulazione S3. Rivetti

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:16,39	16,39
Uomo	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		05:56,03	356,03
Uomo	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
<b>Uomo</b>	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		06:12,42	<b>372,42</b>

Cobot	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:52,6 (2gambi e 2 teste) – Non completa	52,60
Cobot	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Cobot	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	
HRC	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:16,39 – Uomo	16,39
HRC	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		05:56,03 – Uomo	356,03
HRC	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
HRC	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		06:12,42	372,42

#### Simulazione S4. Manopola cambio marcia

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:17,11	17,11
Uomo	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		03:06,73	186,73
Uomo	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
<b>Uomo</b>	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		03:23,84	203,84
Cobot	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00: 34.972	34,97
Cobot	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Cobot	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	
HRC	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:17,11 - Uomo	17,11
HRC	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		03:52,55 - HRC	232,55
HRC	Senza supporto	Assemblaggio		Non prevista	
HRC	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		04:09,66	249,66

#### Simulazione S5. Snorkel aspirazione

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:18,7	18,70
Uomo	Con supporto	Pulizia/Asportazione		11:34,65	694,65
Uomo	Con supporto	Assemblaggio		05:46,09	346,09
Uomo	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		17:39,44	1059,44
Cobot	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:50,362	5036,00
Cobot	Con supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Con supporto	Assemblaggio		Non possibile	
Cobot	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	
HRC	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:18,7 Uomo	18,70
HRC	Con supporto	Pulizia/Asportazione		11:05,66 HRC	665,66
HRC	Con supporto	Assemblaggio		05:24,19 HRC	324,19
<b>HRC</b>	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		16:48,55	1008,55

#### Simulazione S6. Porta consolle

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:06,77	6,77
Uomo	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		03:08,5	188,50
Uomo	Senza supporto	Assemblaggio		00:39,1	39,10

Uomo	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		03:54,37	234,37
Cobot	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:26,058	26,05
Cobot	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	Assemblaggio		Non possibile	
Cobot	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	
HRC	Senza supporto	Stacco/Estrazione		00:06,77 Uomo	6,77
HRC	Senza supporto	Pulizia/Asportazione		03:02,43 HRC	182,43
HRC	Senza supporto	Assemblaggio		01:09,38 HRC	69,38
<b>HRC</b>	Senza supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		03:48,3	<b>228,30</b>

#### Soluzione S7. Piastra copertura arco

Scenario	Variante	Fase	Sottofase	Tempo	Tempo_s
Uomo	Con supporto	Stacco/Estrazione		0:14,93	14,93
Uomo	Con supporto	Pulizia/Asportazione		07:08,71	428,71
Uomo	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Uomo	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		07:23,64	443,64
Cobot	Con supporto	Stacco/Estrazione			
Cobot	Con supporto		Stacco	00:05,71	5,71
Cobot	Con supporto		Pres e posizionamento	Non possibile	
Cobot	Con supporto	Pulizia/Asportazione		Non possibile	
Cobot	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
Cobot	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		Non possibile	5,71
HRC	Con supporto	Stacco/Estrazione		00:09,37	9,37
HRC	Con supporto		Stacco	00:05,71 Cobot	5,71
HRC	Con supporto		Pres e posizionamento	00:03,66 Uomo	3,66
HRC	Con supporto	Pulizia/Asportazione		07:08,71 Uomo	428,71
HRC	Con supporto	Assemblaggio		Non prevista	
<b>HRC</b>	Con supporto	<b>Tempo totale CICLO</b>		07:18,08	<b>438,08</b>

## 11.7 TABELLE E VALORI DI CALCOLO PER L'ANALISI DEGLI INDICI FG, FC E FM

### Dettaglio del fattore geometrico FG

**Mascherina tasti moto** - FG = 0.387124

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Mascherina	85.710000	73.030000	3.710000	11796.000000	23222.378823	22.763808	0.507958	23.102426	0.043285	0.092371	0.007370	0.956715	0.492042	0.387124	1.000000	0.387124

**Rivetti** - FG = 0.297756

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Gambo short	20.160000	20.160000	10.400000	796.977000	4226.826240	9.271470	0.188552	1.938462	0.515873	0.037009	0.000313	0.484127	0.811448	0.333224	0.359213	0.119698
2	Testa short	8.000000	8.000000	14.400000	161.956000	921.600000	5.450868	0.175734	1.800000	0.555556	0.021332	0.000267	0.444444	0.824266	0.322577	0.072997	0.023547
3	Gambo long	20.150000	20.150000	17.660000	1050.190000	7170.357350	10.164577	0.146463	1.140997	0.876427	0.040674	0.000047	0.123573	0.853537	0.254458	0.473341	0.120445
4	Testa long	8.000000	8.000000	19.400000	209.554000	1241.600000	5.939711	0.168777	2.425000	0.412371	0.023338	0.000475	0.587629	0.831223	0.360666	0.094450	0.034065

**Manopola cambio** - FG = 0.261240

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Manop_Comp. Sup.	50.800000	50.800000	33.260000	44769.600000	85832.086400	35.508125	0.521595	1.527360	0.654724	0.144664	0.000176	0.345276	0.478405	0.242130	0.746056	0.180643
2	Manop_Comp. Inf.	48.080000	48.080000	29.070000	15238.800000	67200.723648	24.792306	0.226765	1.653939	0.604617	0.100695	0.000218	0.395383	0.773235	0.317383	0.253944	0.080598

**Snorkel - FG = 0.375191**

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Comp. 1	29.46 0000	83.90 0000	12.22 0000	3074.9 10000	30204.1 00680	14.54 1553	0.10 1804	6.86 5794	0.14 5650	0.05 8633	0.00 1956	0.85 4350	0.89 8196	0.453 284	0.17 5396	0.07 9504
2	Comp. 2	53.87 0000	82.27 0000	54.60 0000	7408.9 40000	241980. 915540	19.49 4796	0.03 0618	1.52 7195	0.65 4795	0.07 8958	0.00 0176	0.34 5205	0.96 9382	0.348 430	0.42 2614	0.14 7252
3	Comp. 3	43.68 0000	77.61 0000	54.60 0000	7047.3 60000	185094. 262080	19.17 2356	0.03 8074	1.77 6786	0.56 2814	0.07 7635	0.00 0259	0.43 7186	0.96 1926	0.369 251	0.40 1989	0.14 8435

**Porta consolle - FG = 0.360056**

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Braccio (Comp.1)	22.95 0000	104.5 80000	19.80 0000	21713.5 00000	47522.1 97800	27.89 8227	0.45 6913	5.28 1818	0.18 9329	0.11 3439	0.00 1428	0.81 0671	0.54 3087	0.367 156	0.38 1204	0.13 9961
2	Base (Comp.2)	105.0 50000	27.78 0000	26.03 0000	35246.8 00000	75963.0 62670	32.78 7369	0.46 3999	4.03 5728	0.24 7787	0.13 3500	0.00 1012	0.75 2213	0.53 6001	0.355 682	0.61 8796	0.22 0094

**Piastra passaruota - FG = 0.485205**

Comp_Ordine	Nome_Componente	X_m	Y_m	Z_m	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_c omp,i	w_i	c_i
1	Piastra	144.0 00000	187.0 00000	19.00 0000	62654.6 00000	511632. 000000	39.71 7721	0.12 2460	9.84 2105	0.10 1604	0.16 1937	0.00 2948	0.89 8396	0.87 7540	0.485 205	1.00 0000	0.48 5205

## Tabella riassuntiva generale per ogni coefficiente di FG di ciascun pezzo simulato

Simulaz	Nome Compon	X_mm	Y_mm	Z_mm	V_i	V_box,i	L_eq,i	phi_raw,i	phi_i	AR_i	TR_i	K_S_raw,i	K_A_raw,i	K_S,i	K_A,i	K_T,i	K_Q,i	FG_com p,i	V_tot	w_i	c_i
<b>Mascherina tasti moto</b>	Mascherina	85,71	73,03	3,71	11796	23222,38	22,8	0,51	0,5	23	0	0,1	0	0,1	0	1	0,49	0,39	11796	1	0,4
<b>Rivetti</b>	Gambo short	20,16	20,16	10,4	796,98	4226,83	9,27	0,19	0,2	1,9	0,5	0	0	0	0	0,5	0,81	0,33	2218,68	0,4	0,1
<b>Rivetti</b>	Testa short	8	8	14,4	161,96	921,6	5,45	0,18	0,2	1,8	0,6	0	0	0	0	0,4	0,82	0,32	2218,68	0,1	0
<b>Rivetti</b>	Gambo long	20,15	20,15	17,7	1050,2	7170,36	10,2	0,15	0,2	1,1	0,9	0	0	0	0	0,1	0,85	0,25	2218,68	0,5	0,1
<b>Rivetti</b>	Testa long	8	8	19,4	209,55	1241,6	5,94	0,17	0,2	2,4	0,4	0	0	0	0	0,6	0,83	0,36	2218,68	0,1	0
<b>Manopola cambio</b>	Manopola Comp. Sup.	50,8	50,8	33,3	44770	85832,09	35,5	0,52	0,5	1,5	0,7	0,1	0	0,1	0	0,4	0,48	0,24	60008,4	0,8	0,2
<b>Manopola cambio</b>	Manopola Comp. Inf.	48,08	48,08	29,1	15239	67200,72	24,8	0,23	0,2	1,7	0,6	0,1	0	0,1	0	0,4	0,77	0,32	60008,4	0,3	0,1
<b>Snorkel</b>	Comp. 1	29,46	83,9	12,2	3074,9	30204,1	14,5	0,1	0,1	6,9	0,2	0,1	0	0,1	0	0,9	0,9	0,45	17531,2	0,2	0,1
<b>Snorkel</b>	Comp. 2	53,87	82,27	54,6	7408,9	241980,9	19,5	0,03	0	1,5	0,7	0,1	0	0,1	0	0,4	0,97	0,35	17531,2	0,4	0,2
<b>Snorkel</b>	Comp. 3	43,68	77,61	54,6	7047,4	185094,3	19,2	0,04	0	1,8	0,6	0,1	0	0,1	0	0,4	0,96	0,37	17531,2	0,4	0,2
<b>Porta consolle</b>	Braccio (Comp.1)	22,95	104,6	19,8	21714	47522,2	27,9	0,46	0,5	5,3	0,2	0,1	0	0,1	0	0,8	0,54	0,37	56960,3	0,4	0,1
<b>Porta consolle</b>	Base (Comp.2)	105,1	27,78	26	35247	75963,06	32,8	0,46	0,5	4	0,3	0,1	0	0,1	0	0,8	0,54	0,36	56960,3	0,6	0,2
<b>Piastra passaruota</b>	Piastra	144	187	19	62655	511632	39,7	0,12	0,1	9,8	0,1	0,2	0	0,2	0	0,9	0,88	0,49	62654,6	1	0,5

### Dettaglio del fattore compositivo FC

Caso	N_c	Assemblaggio	Giunzioni	V_tot	V_max	K_N	K_do m	K_D	F_com p
Mascherina tasti moto	1	0	0	11796.0000	11796.0000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000
Rivetti	4	0	0	2218.677000	1050.190000	1.000000	0.473341	0.526659	0.381665
Manopola cambio	2	0	0	60008.400000	44769.600000	0.333333	0.746056	0.253944	0.146819
Snorkel	3	1	1	17531.210000	7408.940000	0.666667	0.422614	0.577386	0.811013
Porta consolle	2	1	1	56960.300000	35246.800000	0.333333	0.618796	0.381204	0.678634
Piastra passaruota	1	0	0	62654.600000	62654.600000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000

### Dettaglio del fattore di manovrabilità FM

Nelle tabelle seguenti score<sub>j</sub> indica il punteggio numerico usato in ingresso. Per Le variabili binarie la normalizzazione coincide con score<sub>j</sub>. Per le variabili qualitative la normalizzazione è data da (score<sub>j</sub> - 1) / 4. Le variabili di Fase 3 entrano nel calcolo soltanto nei casi con Assemblaggio = 1.

#### Mascherina tasti moto

Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
Mascherina tasti moto	F1	Supporto presente	No	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Quantità supporto	Molto buono	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Rischio residui	No	Assenza di residui
		Difficoltà di presa	Medio	Pezzo sottile e piano; presa delicata ma gestibile manualmente.
		Accessibilità cobot	Molto buono	Raggiungibilità buona; criticità legata a presa e stacco, non alla sola accessibilità.
		Sequenza di stacco e manovra	Buono	Stacco rapido ma con leva controllata, corretta distribuzione della forza e cautela anti-deformazione.
	F2	Rigidità / flessibilità	Scarso	Spessore ridotto, finestre interne e bordi sottili penalizzano la robustezza durante la manipolazione.
		Danneggiabilità	Scarso	Elevata sensibilità a piega e stress localizzato sugli spigoli. Rischio rottura divisori spazio tasti (come avvenuto nel primo tentativo)
		Tool specifici	No	Utensileria standard di banco.
		Necessità di fissaggio	No	Nessun dispositivo di bloccaggio dedicato.
	Maneggiabilità / pulizia	Buono	Fase gestibile, ma con cautela per fragilità, planarità e qualità superficiale.	

	<b>F3</b>	Variabili di Fase 3	0	Assenza di assemblaggio.
--	-----------	---------------------	---	--------------------------

### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabile	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria		
Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa		
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Maneggiabilità	Qualitativa		

Sintesi: n\_valid = 11; Somma\_norm\_j = 2.500000; F\_manov = 0.227273

### Rivetti

#### Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
<b>Rivetti</b>	<b>F1</b>	Supporto presente	No	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Quantità supporto	Molto buono	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Rischio residui	Sì	Sono presenti filamenti residui in prossimità del foro assiale del gambo, dei dentini della testa e nella cavità dei tronchi.
		Difficoltà di presa	Scarso	La micro-scala del componente, la vicinanza reciproca dei pezzi e la non compatibilità del tronco con la chiusura minima della pinza rendono la presa poco affidabile.
		Accessibilità cobot	Molto scarso	La raggiungibilità dell'area è possibile, ma non si traduce in accessibilità operativa effettiva, perché la micro-scala dei componenti, la vicinanza tra pezzi, la chiusura minima della pinza e il rischio di interferenza rendono il prelievo robotico poco affidabile.
		Sequenza di stacco e manovra	Scarso	Pezzi ravvicinati, filamenti condivisi e rischio di trascinarsi di componenti adiacenti rendono la sequenza un poco ostica.
	<b>F2</b>	Rigidità / flessibilità	Scarso	Gambo, dentini e zone di innesto hanno bassa tolleranza a carichi localizzati, urti laterali ed errori di presa.
		Danneggiabilità	Scarso	Il danno può compromettere direttamente la funzione meccanica del rivetto; sono state osservate rotture della base della testa e della colonna guida del gambo nei primi tentativi.

		Tool specifici	Sì	La pulizia richiede utensili minuti e rifinitura locale in spazi molto ridotti.
		Necessità di fissaggio	No	Il controllo del pezzo avviene tramite presa diretta con pinza piccola, utensile e micro-manovre manuali richiesti, senza fissaggio dedicato obbligatorio.
		Maneggiabilità / pulizia	Scarso	Orientamento continuo del componente, controllo tattile e asportazione selettiva di residui, risultando la fase dominante del tempo ciclo.
	<b>F3</b>	Variabili di Fase 3	0	Assenza di assemblaggio.

#### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabile	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	5.000000	1.000000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria		
Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa		
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Maneggiabilità	Qualitativa		

Sintesi: n\_valid = 11; Somma\_norm\_j = 6.000000; F\_manov = 0.545455.

### Manopola cambio

#### Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
<b>Manopola cambio</b>	<b>F1</b>	Supporto presente	No	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Quantità supporto	Molto buono	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Rischio residui	Sì	Filamenti residui tra componenti richiedono taglio preliminare alla presa qualora vi siano per permettere l'accesso al cobot.
		Difficoltà di presa	Buono	Presa manuale gestibile; geometria curva non rende la presa immediata per il posizionamento della pinza.
		Accessibilità cobot	Buono	Raggiungibilità sufficiente, ma presa non pienamente compatibile con la forma. Allineare bene il TCP sulla curvatura.
		Sequenza di stacco e manovra	Buono	Distacco rapido con spatola, ma richiede gesto tecnico controllato.

F2	Rigidità/flessibilità	Molto buono	Rigidezza percepita favorevole e nulla tendenza a flessione.
	Danneggiabilità	Buono	Criticità moderata su finitura e impronte da contatto.
	Tool specifici	No	Utensileria standard di banco.
	Necessità di fissaggio	No	Assenza di bloccaggi dedicati necessari per pulizia. La rotondità del pezzo facilita la presa manuale
	Maneggiabilità/pulizia	Medio	Fase gestibile attenzionando i lati sferici.
F3	Variabili di Fase 3	0	Assenza di assemblaggio.

#### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabale	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria		
Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa		
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Maneggiabilità	Qualitativa		

Sintesi: n\_valid = 11; Somma\_norm\_j = 2.500000; F\_manov = 0.227273.

#### Snorkel

##### Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
Snorkel	F1	Supporto presente	Sì	Il supporto è parte integrante del caso e condiziona sia le strategie di stacco sia il carico operativo della pulizia.
		Quantità supporto	Scarso	La quantità di supporto non è trascurabile, ma non raggiunge un livello tale da bloccare integralmente lo stacco; resta comunque penalizzante nella pulizia, soprattutto interna.
		Rischio residui	Sì	Le geometrie cave e le zone interne favoriscono la permanenza di residui dopo la rimozione primaria del supporto.
		Difficoltà di presa	Molto scarso	La presa è fortemente penalizzata da multicomponente, superfici irregolari, cavità, supporti e necessità di orientamenti specifici.

		Accessibilità cobot	Molto scarso	L'accessibilità robotica è limitata dalla struttura della stampante, dal volume di manovra, dallo sbraccio utile e dai vincoli di safety.
		Sequenza di stacco e manovra	Molto scarso	La sequenza non è lineare né uniforme sui tre componenti; richiede strategie differenziate di stacco, taglio preliminare di filamenti e gestione accurata dell'ordine di prelievo.
	<b>F2</b>	Rigidità/flessibilità	Medio	I componenti non sono assimilabili a pezzi estremamente flessibili, ma la presenza di superfici non prismatiche e zone cave riduce la robustezza uniforme del sistema.
		Danneggiabilità	Medio	Il rischio di danno esiste nelle zone cave, nei bordi e durante pulizia/assemblaggio, ma il pezzo mantiene una robustezza sufficiente a un trattamento operativo con adeguata cautela.
		Tool specifici	Sì	La geometria interna e la pulizia dei supporti richiedono utensili specifici di precisione, non una sola manipolazione generica.
		Necessità di fissaggio	Sì	Nelle fasi di pulizia e manipolazione il pezzo beneficia di mantenimento stabile per evitare vibrazioni, rotazioni o perdita dell'orientamento.
		Maneggiabilità/pulizia	Scarso	La pulizia è operativamente onerosa a causa di cavità, accessi ridotti, residui interni e necessità di rifiniture controllate.
	<b>F3</b>	Necessità giunzioni	Sì	Il caso richiede montaggio di tre componenti e quindi presenza reale di giunzioni.
		Danneggiabilità in assemblaggio	Medio	Durante il montaggio esiste rischio medio di danneggiamento per cattivo allineamento nei fori, carichi localizzati o inserimenti non corretti. Alette sporgenti a rischio.
		Tool assemblaggio	Sì	L'assemblaggio richiede supporti operativi, strumenti o accorgimenti dedicati per mantenere e orientare correttamente i componenti.
		Necessità di fissaggio/assemblaggio	Sì	Il fissaggio o mantenimento durante l'assemblaggio è utile per garantire posizione, orientamento e accoppiamento ripetibile. Ripetibile la necessità di cambio posizione del componente con sblocco presa cobot con utilizzo teach pendant.
Maneggiabilità in assemblaggio		Buono	Pur essendo presente una fase di montaggio reale, la manipolazione finale dei componenti assemblativi risulta complessivamente gestibile quando il pezzo è stabilizzato e correttamente orientato.	

#### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabile	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	5.000000	1.000000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	5.000000	1.000000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	5.000000	1.000000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria	1.000000	1.000000

Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 3	Maneggiabilità	Qualitativa	2.000000	0.250000

Sintesi: n\_valid = 16; Somma\_norm\_j = 13.250000; F\_manov = 0.828125.

## Porta consolle

### Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
Porta consolle	F1	Supporto presente	No	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Quantità supporto	Buono	Nessuna considerazione perché senza supporto.
		Rischio residui	Sì	Sono presenti residui sul letto e filamenti tra i due componenti che richiedono taglio per evitare trascinamenti.
		Difficoltà di presa	Buono	La presa è fattibile ma non banale perché sul braccio si richiede selezione accurata della zona di contatto, sulla base richiede punti alternativi di aggancio per incompatibilità sezione-pinza.
		Accessibilità cobot	Buono	Il cobot raggiunge le zone di lavoro, ma la manipolazione efficace dipende da traiettorie prudenti, validazione distanze e assenza di interferenze tra componenti.
		Sequenza di stacco e manovra	Buono	Lo stacco è ben controllabile dall'operatore; sul lato robotico richiede invece passi aggiuntivi di validazione, presa selettiva e, sulla base, spostamento orizzontale di sicurezza.
	F2	Rigidità/flessibilità	Molto buono	I componenti mantengono sufficiente robustezza strutturale durante presa, pulizia e orientamento, senza comportamento marcatamente cedevole.
		Danneggiabilità (stacco/pulizia)	Buono	Il pezzo non è estremamente fragile, ma le superfici di incastro, i riferimenti geometrici e i bordi funzionali devono essere preservati da schiacciamenti, bave o segni da utensile. Attenzione alle superfici di incastro nel rispetto del gioco fra le forme.
		Tool specifici	Sì	Sono necessari utensili per taglio filamenti/residui e per alcune operazioni di rifinitura durante la pulizia nei fori di giuntura con vite.
		Necessità di fissaggio	No	Può essere gestito efficacemente dall'operatore manualmente.
		Maneggiabilità/pulizia	Buono	La pulizia è gestibile e beneficia di stabilizzazione del pezzo; il cobot è utile come supporto orientabile nel lato lungo, mentre l'operatore resta decisivo per i micro-adattamenti.
	F3	Necessità giunzioni	Sì	Il caso include accoppiamento reale tra base e braccio con incastro e una vite di serraggio.
		Danneggiabilità (assemblaggio)	Medio	Durante incastro e avvitamento occorre evitare eccessi di pressione, disallineamenti e serraggi che deformino le aree di contatto in quanto piccole e non sostituibili con altri punti d'unione.
		Tool assemblaggio	Sì	L'avvitamento richiede utensile dedicato e gestione corretta della vite.

	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Sì	In assemblaggio è necessaria stabilizzazione del pezzo o del sottoinsieme per garantire allineamento, inserzione vite e serraggio controllato.
	Maneggevolezza (assemblaggio)	Buono	L'assemblaggio è ben eseguibile manualmente grazie alla libertà di orientamento e alla gestione diretta di incastro e vite.

#### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabile	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Maneggevolezza/pulizia	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 3	Maneggevolezza	Qualitativa	2.000000	0.250000

Sintesi: n\_valid = 16; Somma\_norm\_j = 7.250000; F\_manov = 0.453125.

#### Piastra passaruota

##### Valutazione operatore

Simulazione	Fase	Variabile	Valore finale	Spiegazione tecnica conclusiva
<b>Piastra passaruota</b>	<b>F1</b>	Supporto presente	Sì	Il supporto è parte integrante del caso e condiziona sia lo scardinamento sia il carico della pulizia successiva.
		Quantità supporto	Scarso	Il supporto è leggero e poco fitto e favorisce il distacco iniziale ma lascia punti radice da rifinire.
		Rischio residui	Sì	La rimozione del supporto genera residui e ultimi filamenti che dominano la fase di pulizia.
		Difficoltà di presa	Medio	La presa completa è critica, ma il pezzo resta gestibile tramite scardinamento controllato cobot e movimentazione fine manuale.
		Accessibilità cobot	Scarso	La zona ideale di presa non ha clearance sufficiente; il layout induce arresti e tentativi ripetuti.
		Sequenza di stacco e manovra	Medio	Lo stacco è fattibile, ma richiede ripartizione selettiva, spinta controllata ed estrazione finale manuale.

F2	Rigidità/flessibilità	Molto buono	Il pezzo mantiene un buon equilibrio tra elasticità e rigidità durante lo scardinamento iniziale.
	Danneggiabilità	Buono	Richiede cautela su bordi e residui di supporto, ma non mostra fragilità estrema sotto carichi ben dosati.
	Tool specifici	No	Le criticità dipendono dalla manovra e dalla pulizia, non dall'uso di attrezzature specialistiche.
	Necessità di fissaggio	No	Non serve un dispositivo dedicato di bloccaggio; la criticità è l'accesso sul letto e non il fissaggio in stazione.
	Maneggiabilità/pulizia	Buono	Dopo lo scardinamento la gestione manuale è praticabile, ma la pulizia dei punti radice resta onerosa.
F3	Variabili di Fase 3	0	Assenza di assemblaggio.

#### Sintetizzazione dei dati

Fase	Var_Nome	Tipo_variabibile	score_j	norm_j
Fase 1	Supporto presente	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Quantità supporto	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 1	Rischio residui	Binaria	1.000000	1.000000
Fase 1	Difficoltà di presa	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 1	Accessibilità cobot	Qualitativa	4.000000	0.750000
Fase 1	Sequenza di stacco e manovra	Qualitativa	3.000000	0.500000
Fase 2	Rigidità/flessibilità	Qualitativa	1.000000	0.000000
Fase 2	Danneggiabilità	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 2	Tool specifici	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Necessità di fissaggio	Binaria	0.000000	0.000000
Fase 2	Maneggiabilità/pulizia	Qualitativa	2.000000	0.250000
Fase 3	Necessità giunzioni	Binaria		
Fase 3	Danneggiabilità	Qualitativa		
Fase 3	Tool assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Necessità di fissaggio/assemblaggio	Binaria		
Fase 3	Maneggiabilità	Qualitativa		

Sintesi: n\_valid = 11; Somma\_norm\_j = 5.000000; F\_manov = 0.454545.

## 11.8 ESEMPIO CODICE PYTHON PER ALCUNI BLOCCHI LOGICI PIÙ RAPPRESENTATIVI

L'integrazione tra modello analitico e implementazione computazionale consente di trasformare la formulazione teorica in uno strumento operativo, capace di supportare sia l'analisi dei casi studio sia l'estensione predittiva verso configurazioni non direttamente osservate. A seguire si riportano alcune parti del codice fra i più importanti.

- **Implementazione computazionale del fattore di forma complessivo**

Il fattore di forma complessivo FF è stato implementato mediante una struttura modulare che riproduce fedelmente la decomposizione analitica del modello, articolata nei tre contributi: fattore geometrico FG, fattore compositivo FC e fattore di manovrabilità FM. Ciascun termine è calcolato attraverso funzioni che operano su parametri opportunamente normalizzati nell'intervallo [0,1], garantendo coerenza dimensionale e confrontabilità tra contributi eterogenei. Il valore finale è ottenuto come combinazione media dei tre fattori:

$$FF = \frac{FG + FC + FM}{3}$$

Dal punto di vista implementativo, la struttura del codice riflette una pipeline deterministica in cui i dati di input vengono validati, trasformati e successivamente aggregati secondo pesature coerenti con la formulazione teorica.

### F Geometrico:

“

```
def compute_fg(components, machine_ranges):
    leq_min = machine_ranges["LEQ_MIN"]
    leq_max = machine_ranges["LEQ_MAX"]
    ar_min = machine_ranges["AR_MIN"]
    ar_max = machine_ranges["AR_MAX"]
    total_v = sum(c["v"] for c in components)
    fg = 0.0
    for c in components:
        x, y, z, v = c["x"], c["y"], c["z"], c["v"]
        vbox = x * y * z
        leq = v ** (1.0 / 3.0)
        phi = clamp01(v / vbox)
        ar = max(x, y, z) / min(x, y, z)
        tr = min(x, y, z) / max(x, y, z)
        ks = clamp01((leq - leq_min) / (leq_max - leq_min))
        ka = clamp01((ar - ar_min) / (ar_max - ar_min))
        kt = clamp01(1.0 - tr)
        kq = clamp01(1.0 - phi)
        fg_comp = (ks + ka + kt + kq) / 4.0
```

```
    fg += (v / total_v) * fg_comp
    return clamp01(fg)
```

“

#### F Compositivo:

“

```
def compute_fc(total_v, components, assemblaggio, giunzioni, nc_max):
    n_c = len(components)
    max_v = max(c["v"] for c in components)
    k_n = (n_c - 1) / (nc_max - 1)
    k_dom = max_v / total_v
    k_d = 1.0 - k_dom
    f_c = (k_n + assemblaggio + giunzioni + k_d) / 4.0
    return clamp01(f_c)
```

“

#### F Manovrabilità:

“

```
def compute_fm(fm_rows, phase3_exists):
    valid = []
    for r in fm_rows:
        if r["phase"] == "F3" and not phase3_exists:
            continue
        score = r["score"]
        if r["score_type"] == "binary":
            xmin, xmax = 0.0, 1.0
        else:
            xmin, xmax = 1.0, 5.0
        norm = (score - xmin) / (xmax - xmin)
        valid.append(norm)
    if phase3_exists:
        return sum(valid) / 16.0
    else:
        return sum(valid) / 11.0 “
```

“

### Fattore Finale di Forma FF:

“

$$FF = (F\_geom + F\_comp + F\_manov) / 3$$

“

Dal punto di vista implementativo, la struttura del codice riflette una pipeline deterministica in cui i dati di input vengono validati, trasformati e successivamente aggregati secondo pesature coerenti con la formulazione teorica.

- **Criterio di selezione dello scenario operativo**

La selezione dello scenario operativo ottimale viene formalizzata come un problema di minimizzazione su un insieme discreto di alternative, corrispondenti alle configurazioni Uomo, Uomo/Cobot e Cobot. Per ciascuna fase del processo, il modello considera i tempi associati alle diverse modalità operative e identifica lo scenario ottimale come quello che minimizza il tempo di esecuzione:

$$S^* = \arg\min_{s \in \{U, U/C, C\}} T_s$$

dove  $T_s$  rappresenta il tempo associato allo scenario  $s$ , eventualmente non definito nel caso di configurazioni non applicabili. L'implementazione computazionale gestisce esplicitamente la presenza di valori non assegnabili, garantendo robustezza del processo decisionale anche in presenza di dati incompleti.

“

```
def select_best_scenario(times_dict):
    valid_times = {
        s: t for s, t in times_dict.items()
        if t is not None
    }
    if not valid_times:
        return None, None
    best = min(valid_times, key=valid_times.get)
    return best, valid_times[best]
```

“

Tale formulazione consente di integrare in modo diretto i risultati sperimentali nella logica decisionale, rendendo il modello immediatamente applicabile in contesti reali di valutazione HRC

- **Integrazione di modelli di apprendimento automatico**

Al fine di estendere le capacità analitiche del modello e supportare attività di previsione e generalizzazione, è stata implementata una componente di apprendimento automatico basata su tecniche di regressione supervisionata.

In particolare, sono stati adottati due approcci complementari:

- Ridge Regression, per la modellazione di relazioni lineari regolarizzate
- Gaussian Process Regression, per la cattura di comportamenti non lineari e l'inferenza probabilistica in condizioni di limitata disponibilità di dati.

Tali modelli consentono di stimare i tempi di processo o indicatori derivati a partire dai fattori di forma, abilitando analisi predittive e scenari what-if.

Ridge Regression:

“

```
from sklearn.linear_model import Ridge
model = Ridge(alpha=1.0)
model.fit(X_train, y_train)
y_pred = model.predict(X_test)
```

”

L'introduzione del termine di regolarizzazione consente di mitigare fenomeni di overfitting, particolarmente rilevanti in presenza di dataset di dimensioni contenute.

Gaussian Process Regression:

“

```
from sklearn.gaussian_process import GaussianProcessRegressor
from sklearn.gaussian_process.kernels import RBF, ConstantKernel, WhiteKernel
kernel = ConstantKernel(1.0) * RBF() + WhiteKernel()
gpr = GaussianProcessRegressor(kernel=kernel)
gpr.fit(X_train, y_train)
y_pred = gpr.predict(X_test)
```

“

L'approccio basato su processi gaussiani permette di modellare la distribuzione a posteriori delle predizioni, fornendo non solo una stima puntuale ma anche una misura dell'incertezza associata.

## 11.9 ARCHITETTURA GRAFICA DEL SOFTWARE

1° Finestra. Iniziale. Paramenti di contesto e indice FG

La prima finestra visualizzabile richiede dati per elaborazione calcolo FG (Figura 89). Vengono richiamati:

- parametri assoluti macchina/processo che costituiscono il riferimento del sistema
- nome, numero e dimensioni del pezzo o del gruppo di componenti

Figura 89. Area di compilazione dei parametri geometrici del manufatto e parametri di contesto

2° Finestra. Indice FC. Richiede dati per elaborazione calcolo FC (Figura 90). Riporta le variabili binarie di A e G nel calcolo FC.

- A Assemblaggio

$A = 0$  Non è prevista la fase di assemblaggio

$A = 1$  È prevista la fase di assemblaggio

- G Giunzioni

$G = 0$  Non sono previste giunzioni e l'assemblaggio avviene tramite gioco meccanico

$G = 1$  Sono previste giunzioni o sistemi appositi come rivetti, clipper, viti o incollaggio

Figura 90. Area di compilazione dei parametri compositivi del manufatto caso studio

3° Finestra. Indice FM. Richiede dati per elaborazione calcolo FM (Figura 91).  
 Richiama tutti gli indicatori qualitativi e binari che alimentano il fattore manipolativo FM.

- Binarie, con dominio:  
 $\{\text{No/Si}\} = s_j \in \{0,1\}$
- Quantitative ordinarie, con dominio:  
 $\{\text{molto buono/buono/medio/scarso/molto scarso}\} = s_j \in \{1,2,3,4,5\}$

Calcola Salva sessione Carica sessione Azzera Salva grafico

F\_geom F\_comp F\_manov Scenari HRC ML

Identificazione caso / pezzo

Nome caso/pezzo

Campo opzionale ma utile per riconoscere subito il caso quando si compila F\_manov e quando si salva

Regola di calcolo

Assemblaggio = si: F3 inclusa. F\_manov media su 16 valori.

#	Fase	Variabile	Score
1	F1	supporto presente	si
2	F1	quantita supporto	scarso
3	F1	rischio residui	si
4	F1	difficolta di presa	medio
5	F1	accessibilita cobot	scarso
6	F1	sequenza di stacco e manovra	medio
7	F2	rigidita/flessibilita	molto buono
8	F2	danneggiabilita	buono
9	F2	tool specifici	no
10	F2	necessita di fissaggio	no
11	F2	maneggiabilita/pulizia	buono
12	F3	necessita giunzioni	
13	F3	danneggiabilita	
14	F3	tool assemblaggio	
15	F3	necessita di fissaggio/assemblaggio	
16	F3	maneggiabilita	

Figura 91. Area di compilazione dei parametri manipolativi del manufatto caso studio

Questa finestra è particolarmente rilevante perché la sua logica traduce quella che è stata l'osservazione sperimentale vissuta umanamente in un laboratorio, in una struttura ordinata e confrontabile cui scopo è rendere trasparente il motivo per cui una simulazione venga considerata più o meno problematica nella sua operatività e manipolabilità nelle diverse fasi del processo

4° Finestra. Scenario HRC. Richiede i dati necessari per elaborazione calcolo tempi e scenario migliore che vengono inseriti manualmente

The screenshot shows a software window with a left sidebar for input and a main area for text output. The sidebar includes a table for 'F\_comp' and 'F\_manov' values, and a 'Tempo Uomo/Cobot [s]' field. The main area displays 'Risultati' (Results) and 'Scenari HRC' (HRC Scenarios) in a text-based format.

**Risultati**

```

F3 attiva = si
F1 | supporto presente -> 1.000000
F1 | quantita supporto -> 0.750000
F1 | rischio residui -> 1.000000
F1 | difficolta di presa -> 1.000000
F1 | accessibilita cobot -> 1.000000
F1 | sequenza di stacco e manovra -> 1.000000
F2 | rigidita/flessibilita -> 0.500000
F2 | danneggiabilita -> 0.500000
F2 | tool specifici -> 1.000000
F2 | necessita di fissaggio -> 1.000000
F2 | maneggiabilita/pulizia -> 0.750000
F3 | necessita giunzioni -> 1.000000
F3 | danneggiabilita -> 0.500000
F3 | tool assemblaggio -> 1.000000
F3 | necessita di fissaggio/assemblaggio -> 1.000000
F3 | maneggiabilita -> 0.250000
  
```

**Scenari HRC**

```

F1 | uomo: 18.700000 | uomo/cobot: NA | cobot: 3036.00
-> migliore: uomo | tempo: 18.700000
F2 | uomo: 694.650000 | uomo/cobot: 665.660000 | cobot:
-> migliore: uomo/cobot | tempo: 665.660000
F3 | uomo: 346.090000 | uomo/cobot: 324.190000 | cobot:
-> migliore: uomo/cobot | tempo: 324.190000
  
```

**Valori finali**

```

F_geom = 0.375191
F_comp = 0.811013
F_manov = 0.828125
FF      = 0.671443
  
```

Figura 92. Restituzione finale in testo dei risultati delle variabili operative tempi fase, matrice HRC

Questa finestra (Figura 92). è il cuore comparativo del software ed è necessario l'inserimento dei tempi osservati (reali) per ciascuna fase e per ciascun scenario disponibile. Individua anche automaticamente lo scenario migliore.

Nella sezione sulla destra vengono riportati e sintetizzati i risultati numerici come tutti i fattori di forma e i suoi contributi FF, FG, FC e FM, tutte le combinazioni degli scenari migliori per fase e tutti i valori delle variabili inserite. In questa finestra è anche possibile selezionare una simulazione già memorizzata e inserita nel sistema. (Figura 93)

The screenshot shows a software window with a top menu bar and a main table area. The table displays 'Scenari HRC - tempi per fase e per scenario' with columns for 'Fase', 'Tempo Uomo [s]', 'Tempo Uomo/Cobot [s]', 'Tempo Cobot [s]', 'Scenario migliore', and 'Tempo migliore [s]'. Below the table is a 'Database scenari' section with a table of scenario details.

**Scenari HRC - tempi per fase e per scenario**

Fase	Tempo Uomo [s]	Tempo Uomo/Cobot [s]	Tempo Cobot [s]	Scenario migliore	Tempo migliore [s]
F1	18.7		3036.0	uomo	18.700000
F2	694.65	665.66		uomo/cobot	665.660000
F3	346.09	324.19		uomo/cobot	324.190000

**Database scenari**

ID	Caso	F_geom	F_comp	F_manov	FF	Migliore F1	Tempo F1	Migliore F2	Tempo F2	Migliore F3	Tempo F3
1	Mascherina - SENZA supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.204799	uomo	7.23	uomo	101.22		
2	Mascherina - CON supporto	0.387124	0.0	0.227273	0.204799	uomo	11.23	uomo/cobot	245.09		
3	RIVETTI - 4 comp.1 shot e 1 long	0.297756	0.381665	0.545455	0.408292	uomo	16.39	uomo	356.03		
4	Manopola cambio - 2 componenti	0.26124	0.146819	0.227273	0.211777	uomo	17.11	uomo	186.73		
5	SNORKEL - 3 Comp.	0.375191	0.811013	0.828125	0.671443	uomo	18.7	uomo/cobot	665.66	uomo/cobot	324.19
6	PORTA CONSOLLE - 2 Comp.	0.360056	0.678634	0.453125	0.497272	uomo	6.77	uomo/cobot	182.43	uomo	39.1
7	PIASTRA Copertura Ruota	0.485205	0.0	0.454545	0.31325	uomo/cobot	9.37	uomo	428.71		

Figura 93. Area di visualizzazione dei parametri inseriti e risultati di calcolo

## 5° Finestra. ML

Con l'intenzione di plasmare questa logica concettuale è stata inserita all'interno della GUI del nostro modello una finestra denominata “Calcolo Fattori di Forma + ML” (Figura 94).

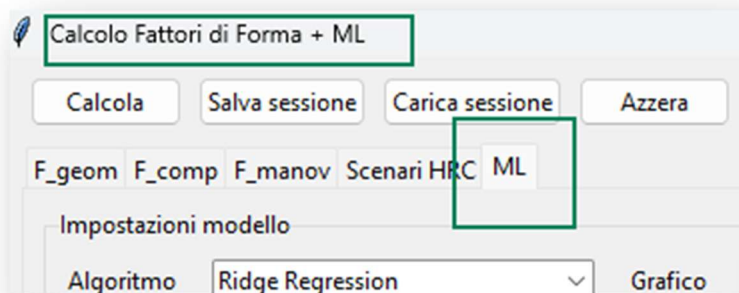


Figura 94. Finestra GUI “Calcolo Fattori di Forma + ML

La finestra ML non è un modulo isolato in quanto usufruisce delle informazioni di scenari e fattori di forma dalle altre schede. Con questa struttura si cerca di riportare all'interno del sistema la descrizione geometrica del pezzo, la sua struttura compositiva, la valutazione di manovrabilità, formalizzazione dei tempi sperimentali per ogni scenario e, con ML, l'estensione predittiva.

ML utilizza dunque come input i fattori di forma e il database degli scenari raccolti nel software.

La scheda ML è costituita da tre aree funzionali (Figura 95):

- “Impostazioni modello”. Si selezionano gli algoritmi di apprendimento e la tipologia di grafico da visualizzare
- “Analisi principale ciclo completo F1+F2+F3“. Contiene i campi FG, FC, FM, i quali vengono visualizzati una volta caricata la stringa del pezzo di interesse.
- Ultima sezione è “Modalità avanzata”. Permette l'analisi di una singola fase dove l'utente può isolare F1, F2, e F3 e lanciare valutazioni quindi locali e non più globali del processo produttivo.

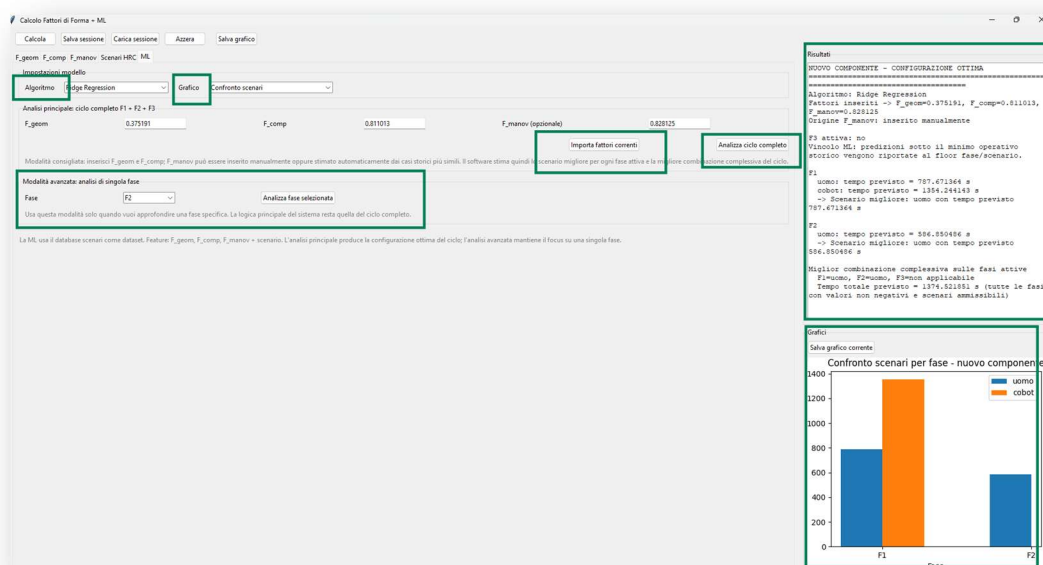


Figura 95. Architettura della finestra ML e sue funzionalità

L'architettura così definita richiede un inserimento manuale dei dati e la sua usabilità potrà essere migliorata, nonostante tutto l'alta ottimizzazione architeturale dell'interfaccia GUI non è uno degli obiettivi di studio.

All'interno nella sezione "Analisi principale" si ritrova il comando "Analizza ciclo completo", il quale attiva quella che è la logica principale di questo modulo in quanto:

- il sistema predice i tempi per ogni scenario nelle fasi attive
- costruisce le combinazioni complessive del ciclo
- restituisce la configurazione con tempo totale minimo (best case)

La sezione "Impostazioni modello" è costituita da due finestre multifunzione:

- Algoritmo
- Grafico

### Finestra Algoritmo

Nella scheda Algoritmi si scelgono i modelli intelligenti predittivi rappresentati dai due algoritmi di ML quali Ridge Regression (Figura 96) e Gaussian Process Regression. (Figura 97)

- Scheda: Coefficienti Ridge

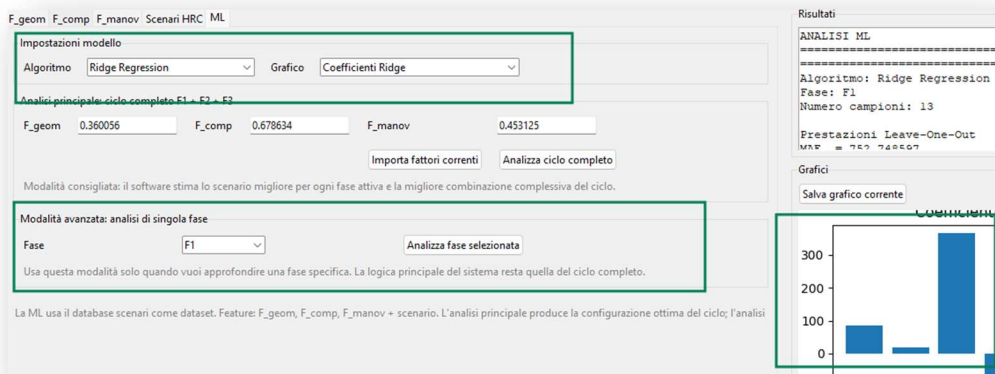


Figura 96. Selezione algoritmo Ridge Regression

- Scheda: Incertezza GPR

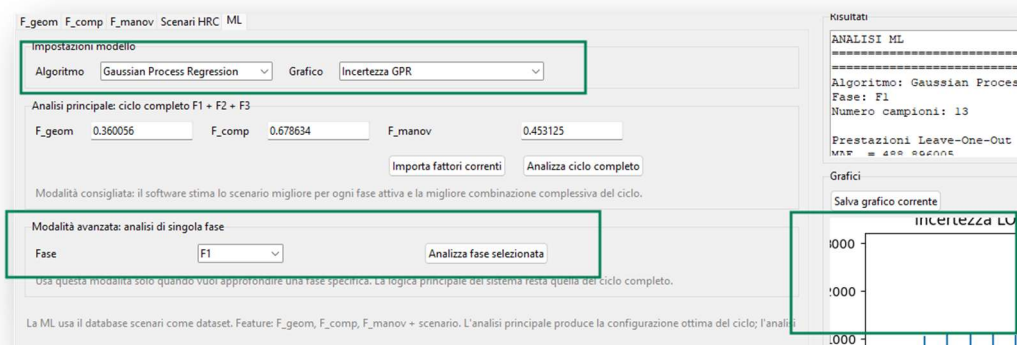


Figura 97. Finestra selezione algoritmo GPR

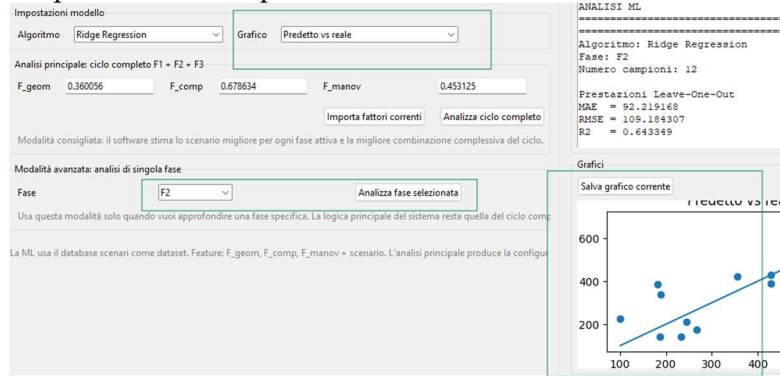
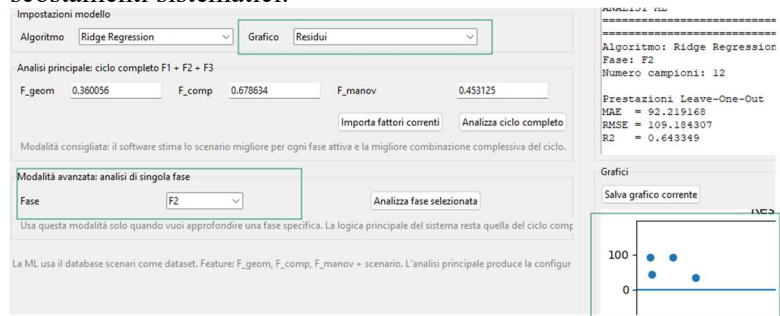
## Finestra Grafico

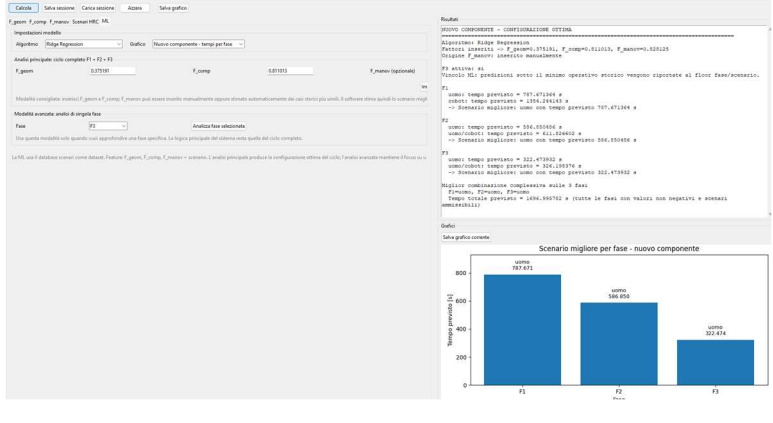
La sezione “Grafico” rappresenta graficamente il comportamento del modello. Al momento, le opzioni disponibili nel software di visualizzazione grafica sono relative alle differenti modalità di analisi del sistema.

I grafici sono uno strumento di supporto per la lettura del comportamento del modello e permettono di osservare tre livelli diversi ma complementari:

- qualità della previsione
- competitività relativa degli scenari operativi
- configurazione ottima suggerita per il caso di studio.

Nella tabella 34 si riporta l’interpretazione dall’analisi associata a ciascuna scheda e l’illustrazione grafica di ciascuna di esse.

Opzioni del grafico	Modalità	Interpretazione
<b>Predetto vs reale</b>	Solo per singola fase	<p>Verifica la coerenza della previsione ossia l’allineamento tra tempi osservati e tempi stimati.</p> 
<b>Residui</b>	Solo per singola fase	<p>Permette capire se l'errore ha una distribuzione casuale o se dipende da pattern di dominio aiutando a leggere eventuali scostamenti sistematici.</p> 
<b>Confronto scenari</b>	Singola fase o ciclo completo	<p>Analizza la competitività tra i tre scenari uomo, cobot, uomo-cobot in relazione ai tempi previsti o osservati</p>

		
<p><b>Scenario ottimo corrente</b></p>	<p>Singola fase o ciclo completo</p>	<p>È il grafico più decisionale. Aiuta a identificare quale l'allocazione dei compiti più conveniente sia per fase che per ciclo.</p> 
<p><b>Nuovo componente - tempi per fasi</b></p>	<p>Analisi del ciclo completo</p>	<p>Confronto immediato tra F1, F2 e F3, evidenziando quali le fasi più gravose e quindi i principali colli di bottiglia del ciclo. Mostra il miglior tempo previsto per ciascuna fase di un nuovo pezzo in entrata.</p> 
<p><b>Nuovo componente - combinazioni totali</b></p>	<p>Analisi del ciclo completo</p>	<p>Permette di conoscere la combinazione ottima degli scenari ma anche le alternative più vicine. Utile per valutare la robustezza della decisione e il margine tra prima scelta e altre soluzioni concorrenti.</p>

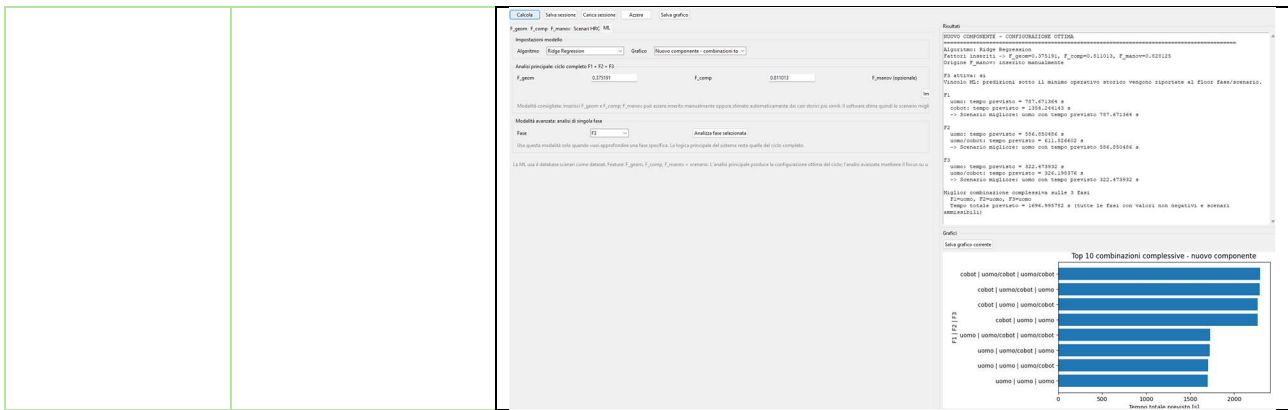


Tabella 34. Architettura della finestra ML e sue funzionalità

## 11.10 SCRIPT ALBERI PROGRAMMA DEL COBOT PER I SEI MANUFATTI

A seguire si riportano tutti i file script dei comandi per esecuzione di operazioni, movimenti, punti di presa, spostamento e qualsiasi manovra riguardante il movimento del cobot.

Si riportano gli alberi dei sei manufatti soggetti all'osservazione in uno scenario HRC, eccetto per manufatto Manopola dove si riporta anche la programmazione solo cobot.

Il caso del manufatto Snorkel evidenzia la complessità associata all'operatività e dinamica cinematica e di posizionamento da considerare.

Per quanto riguarda il manufatto Piastra si riporta solo l'albero programma riguardante la sottofase distacco dal letto di piatto.

**MASCHERINA  
TASTI MOTO**  
*Albero programma  
cobot:in scenario  
HRC*

MuoviL  
P\_START  
T\_ciclo: Riarmo  
T\_ciclo: Avvio  
P\_vert\_spost1

T\_Stacco\_e\_uomo:  
Riarmo

T\_Stacco\_e\_uomo:  
Avvio  
T\_stacco: Riarmo  
T\_stacco: Avvio  
Attendere: 0.5  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
P\_spost1  
p\_spost2  
P\_spost3  
P\_vert\_spost3  
T\_stacco: Arresto  
T\_presa\_e\_uomo:  
Riarmo  
T\_presa\_e\_uomo:  
Avvio  
P\_vert\_presa  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0  
P\_presa  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
P\_vert\_presa

P\_banco\_lav  
P\_con\_uomo  
T\_presa\_e\_uomo:  
Arresto

T\_Stacco\_e\_uomo:  
Arresto  
Popup: ok

T\_uomo\_e\_deposi:  
Riarmo

T\_uomo\_e\_deposi:  
Avvio  
P\_banco\_lav  
P\_deposito\_pezz  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0

T\_uomo\_e\_deposi:  
Arresto  
P\_START  
T\_ciclo: Arresto  
Ferma

**RIVETTI**  
*Albero programma  
cobot:in scenario  
HRC*

timer\_1: Riarmo  
timer\_1: Avvio  
MuoviL  
Punto\_percors\_1  
P\_2\_Alto\_presa  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0  
MuoviL  
P\_2\_Alto\_presa  
P\_2\_presa

Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
P\_2\_presa\_stacc  
Attendere: 1.0  
P\_2\_Alto\_presa  
MuoviL  
P\_2\_Alto\_presa  
P\_3\_alto\_rilasc  
MuoviL  
P\_3\_alto\_rilasc  
P\_3\_rilascio  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0  
P\_3\_alto\_rilasc  
MuoviL  
P\_3\_alto\_rilasc  
P\_4\_alto\_presa  
MuoviL  
P\_4\_alto\_presa  
P\_4\_presa  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
P\_4\_presa\_stacc  
P\_4\_alto\_presa  
MuoviL  
P\_4\_alto\_presa  
P\_5\_alto\_rilasc  
MuoviL  
P\_5\_alto\_rilasc  
P\_5\_rilascio  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0  
P\_5\_alto\_rilasc

MuoviJ  
Punto\_percors\_1  
timer\_1: Arresto  
Ferma

**MANOPOLA  
CAMBIO**  
*Albero programma  
cobot:in scenario **Only**  
Cobot*

Programma Robot:  
Cobot  
timer\_1: Riarmo  
timer\_1: Avvio  
MuoviL  
Punto\_start  
P\_ver\_spint\_pz1  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
MuoviL  
P\_ver\_spint\_pz1  
Attendere: 1.0  
Pos1\_spinta\_pz1  
Attendere: 1.0  
Pos2\_spinta\_pz1  
Attendere: 0.5  
P\_ver\_spint\_pz1  
P\_ver\_pres\_pz1  
Imposta  
DO[1]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[0]=On  
Attendere: 1.0  
P\_presa\_pz1  
Attendere: 1.0  
Imposta  
DO[0]=Off  
Attendere: 0.01  
Imposta  
DO[1]=On  
Attendere: 1.0  
P\_ver\_pres\_pz1  
MuoviL

P\_ver\_pres\_pz1  
 P\_ver\_ril\_pz1  
 MuoviL  
 P\_ver\_ril\_pz1  
 P\_ril\_pz1  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_ver\_ril\_pz1  
 MuoviL  
 P\_ver\_ril\_pz1  
 Punto\_start  
 P\_ver\_spint\_pz2  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 0.01  
 MuoviL  
 P\_ver\_spint\_pz2  
 Pos1\_spint\_pz2  
 Attendere: 1.0  
 Pos2\_spint\_pz2  
 Attendere: 0.5  
 P\_ver\_spint\_pz2  
 P\_vert\_pres\_pz2  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_presa\_pz2  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_pres\_pz2  
 MuoviL  
 P\_vert\_pres\_pz2  
 P\_ver\_rilas\_pz2  
 MuoviL  
 P\_ver\_rilas\_pz2

P\_ril\_pz2  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_ver\_rilas\_pz2  
 MuoviJ  
 Punto\_start  
 timer\_1: Arresto  
 Ferma

*Albero programma  
 cobot:in scenario*

**HRC**

timer\_1: Riarmo  
 timer\_1: Avvio  
 MuoviL  
 Punto\_percors\_1  
 P\_2\_Alto\_presa  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 MuoviL  
 P\_2\_Alto\_presa  
 P\_2\_presa  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_2\_presa\_stacc  
 Attendere: 1.0  
 P\_2\_Alto\_presa  
 MuoviL  
 P\_2\_Alto\_presa  
 P\_3\_alto\_rilasc  
 MuoviL  
 P\_3\_alto\_rilasc  
 P\_3\_rilascio  
 Attendere: 1.0

Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_3\_alto\_rilasc  
 MuoviL  
 P\_3\_alto\_rilasc  
 P\_4\_alto\_presa  
 MuoviL  
 P\_4\_alto\_presa  
 P\_4\_presa  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_4\_presa\_stacc  
 P\_4\_alto\_presa  
 MuoviL  
 P\_4\_alto\_presa  
 P\_5\_alto\_rilasc  
 MuoviL  
 P\_5\_alto\_rilasc  
 P\_5\_rilascio  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_5\_alto\_rilasc  
 MuoviJ  
 Punto\_percors\_1  
 timer\_1: Arresto  
 Ferma

**SNORKEL  
 ASPIRAZIONE  
 ARIA**

*Albero programma  
 cobot:in scenario*  
**HRC**

MuoviL

START  
 T\_ciclo: Riarmo  
 T\_ciclo: Avvio  
 MuoviL  
 P\_vert1\_Stac\_C1  
 T\_Stacco\_C1:  
 Riarmo  
 T\_Stacco\_C1:  
 Avvio  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_Stacco1A\_C1  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_Stacco1B\_C1  
 P\_Stacco1A\_C1  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert1\_Stac\_C1  
 P\_vert2\_Stac\_C1  
 P\_Stacco2A\_C1  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_Stacco2B\_C1  
 P\_Stacco2A\_C1  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert2\_Stac\_C1  
 T\_Stacco\_C1:  
 Arresto  
 P\_vert\_Rilas\_C1  
 P\_Rilasc\_C1  
 Attendere: 1.0

Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_Rilas\_C1  
 START  
 MuoviL  
 P\_ver\_PresC2  
 T\_Stacco\_C2:  
 Riarmo  
 T\_Stacco\_C2:  
 Avvio  
 P\_Presa\_C2  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_ver\_PresC2  
 T\_Stacco\_C2:  
 Arresto  
 START  
 P\_raccord\_C2  
 P\_vert\_Rilas\_C2  
 P\_Rilasc\_C2  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_Rilas\_C2  
 START  
 MuoviL  
 P\_Approc\_PresC3  
 T\_stacco\_C3:  
 Riarmo  
 T\_stacco\_C3:  
 Avvio  
 P\_Presa\_C3  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_Approc\_PresC3

START  
 P\_vert\_Rilas\_C3  
 P\_Rilasc\_C3  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_Rilas\_C3  
 T\_stacco\_C3:  
 Arresto  
 START  
 T\_ciclo: Arresto  
 Ferma

## PORTA CONSOLLE

*Albero programma  
 cobot:in scenario  
**HRC***

MuoviL  
 START  
 T\_ciclo: Riarmo  
 T\_ciclo: Avvio  
 MuoviL  
 P\_ver\_PresC1  
 T\_Stacco\_C1:  
 Riarmo  
 T\_Stacco\_C1:  
 Avvio  
 P\_Presa\_C1  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_ver\_PresC1  
 T\_Stacco\_C1:  
 Arresto  
 P\_vert\_Rilas\_C1  
 P\_Rilasc\_C1  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=Off

Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_Rilas\_C1  
 START  
 MuoviL  
 P\_Vert\_PresC2  
 T\_stacco\_C2:  
 Riarmo  
 T\_stacco\_C2:  
 Avvio  
 P\_Orizzont\_PrC2  
 P\_Presa\_C2  
 Attendere: 1.0  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_spost\_presaC1  
 P\_Presa\_C2  
 P\_Vert\_PresC2  
 P\_vert\_Rilas\_C2  
 P\_Rilasc\_C2  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=On  
 Attendere: 1.0  
 P\_vert\_Rilas\_C2  
 T\_stacco\_C2:  
 Arresto  
 START  
 T\_ciclo: Arresto  
 Ferma

## PIASTRA COPERTURA ARCO RUOTE

*Albero programma  
 cobot:in scenario **Only**  
**Cobot, solo stacco***

MuoviL  
 START

Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[0]=Off  
 Attendere: 0.01  
 Imposta  
 DO[1]=On  
 Attendere: 0.01  
 T\_ciclo: Riarmo  
 T\_ciclo: Avvio  
 MuoviL  
 P\_Stac1\_spost\_1  
 Attendere: 1.5  
 P\_Stac1\_spost2  
 P\_Stac1\_spost\_1  
 Attendere: 1.0  
 P\_stac2\_spost1  
 P\_stac2\_spost2  
 P\_stac2\_spost1  
 T\_ciclo: Arresto  
 START  
 Ferma

1. Dhanda, M., Rogers, B. A., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
2. Cohen, Y., Shoal, S., Faccio, M., & Minto, R. (2022). Deploying cobots in collaborative systems: Major considerations and productivity analysis. *International Journal of Production Research*, 60(6), 1815–1831. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1870758>
3. Fiaidhi, J., Mohammed, S., & Mohammed, S. (2018). The Robotization of Extreme Automation: The Balance Between Fear and Courage. *IT Professional*, 20(6), 87–93. <https://doi.org/10.1109/MITP.2018.2876979>
4. Weistroffer, V., Keith, F., Bisiaux, A., Andriot, C., & Lasnier, A. (2022). Using Physics-Based Digital Twins and Extended Reality for the Safety and Ergonomics Evaluation of Cobotic Workstations. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 781830. <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.781830>
5. Umbrico, A., Orlandini, A., Cesta, A., Faroni, M., Beschi, M., Pedrocchi, N., Scala, A., Tavormina, P., Koukas, S., Zalonis, A., Fourtakas, N., Kotsaris, P. S., Andronas, D., & Makris, S. (2022). Design of Advanced Human–Robot Collaborative Cells for Personalized Human–Robot Collaborations. *Applied Sciences*, 12(14), 6839. <https://doi.org/10.3390/app12146839>
6. Hasan, R.-U., Rashid, T., Bhadra, H., Hasan, M. M., Faruq, O., Rashid, F., & Hoque, E. (2024). Managing Blended Human-Robot Collaboration (HRC) Challenges in Industrial Systems: A Review. 16(1).
7. Fast-Berglund, Å., & Romero, D. (2019). Strategies for Implementing Collaborative Robot Applications for the Operator 4.0. In F. Ameri, K. E. Stecke, G. Von Cieminski, & D. Kiritsis (Eds), *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future* (Vol. 566, pp. 682–689). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30000-5\\_83](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30000-5_83)
8. Baptista, J., Castro, A., Gomes, M., Amaral, P., Santos, V., Silva, F., & Oliveira, M. (2024). Human–Robot Collaborative Manufacturing Cell with Learning-Based Interaction Abilities. *Robotics*, 13(7), 107. <https://doi.org/10.3390/robotics13070107>
9. Borboni, A., Reddy, K. V. V., Elamvazuthi, I., AL-Quraishi, M. S., Natarajan, E., & Azhar Ali, S. S. (2023). The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works. *Machines*, 11(1), 111. <https://doi.org/10.3390/machines11010111>
10. Chowdhury, H. (2023). Human-Robot Collaboration in Manufacturing Assembly Tasks. *Engineering*. <https://doi.org/10.20944/preprints202310.0049.v2>
11. Flores, A. M., Bauer, P., & Reinhart, G. (2019). Concept of a learning knowledge-based system for programming industrial robots. *Procedia CIRP*, 79, 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.076>
12. Inkulu, A. K., Bahubalendruni, M. V. A. R., Dara, A., & K., S. (2022). Challenges and opportunities in human robot collaboration context of Industry 4.0—A state of the art review. *Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application*, 49(2), 226–239. <https://doi.org/10.1108/IR-04-2021-0077>
13. Dworschak, B., & Zaiser, H. (2014). Competences for Cyber-physical Systems in Manufacturing – First Findings and Scenarios. *Procedia CIRP*, 25, 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.048>
14. Gustavsson, P., Syberfeldt, A., Brewster, R., & Wang, L. (2017). Human-robot Collaboration Demonstrator Combining Speech Recognition and Haptic Control. *Procedia CIRP*, 63, 396–401. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.126>
15. Ciccarelli, M., Forlini, M., Papetti, A., Palmieri, G., & Germani, M. (2024). Advancing human–robot collaboration in handcrafted manufacturing: Cobot-assisted polishing design boosted by virtual reality and human-in-the-loop. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 132(9–10), 4489–4504. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13639-z>

16. Peruzzini, M., Prati, E., & Pellicciari, M. (2024). A framework to design smart manufacturing systems for Industry 5.0 based on the human-automation symbiosis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(10–11), 1426–1443. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2257634>
17. Djuric, A. M., Urbanic, R. J., & Rickli, J. L. (2016). A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 09(2), 457–464. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0337>
18. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
19. Diniță, A., Neacșa, A., Portoacă, A. I., Tănase, M., Ilinca, C. N., & Ramadan, I. N. (2023). Additive Manufacturing Post-Processing Treatments, a Review with Emphasis on Mechanical Characteristics. *Materials*, 16(13), 4610. <https://doi.org/10.3390/ma16134610>
20. Tedla, G., Jarabek, A. M., Byrley, P., Boyes, W., & Rogers, K. (2022). Human exposure to metals in consumer-focused fused filament fabrication (FFF)/ 3D printing processes. *Science of The Total Environment*, 814, 152622. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152622>
21. Michaelis, J. E., Siebert-Evenstone, A., Shaffer, D. W., & Mutlu, B. (2020). Collaborative or Simply Uncaged? Understanding Human-Cobot Interactions in Automation. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376547>
22. Aaltonen, I., Salmi, T., & Marstio, I. (2018). Refining levels of collaboration to support the design and evaluation of human-robot interaction in the manufacturing industry. *Procedia CIRP*, 72, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.214>
23. Tsarouchi, P., Spiliotopoulos, J., Michalos, G., Koukas, S., Athanasatos, A., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2016). A Decision Making Framework for Human Robot Collaborative Workplace Generation. *Procedia CIRP*, 44, 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.103>
24. Reinhardt, D., Haeusler, M. H., London, K., Loke, L., Feng, Y., De Oliveira Barata, E., Firth, C., Dunn, K., Khean, N., Fabbri, A., Wozniak-O'Connor, D., & Masuda, R. (2020). CoBuilt 4.0: Investigating the potential of collaborative robotics for subject matter experts. *International Journal of Architectural Computing*, 18(4), 353–370. <https://doi.org/10.1177/1478077120948742>
25. Christiernin, L. G. (2017). How to Describe Interaction with a Collaborative Robot. *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 93–94. <https://doi.org/10.1145/3029798.3038325>
26. Wang, K., Ding, L., Dailami, F., & Matthews, J. (2025). A Contemporary Review of Collaborative Robotics Employed in Manufacturing Finishing Operations: Recent Progress and Future Directions. *Machines*, 13(9), 772. <https://doi.org/10.3390/machines13090772>
27. Schmidbauer, C. (2022). Adaptive task sharing between humans and cobots in assembly processes [Dissertation, Technische Universität Wien]. <https://doi.org/10.34726/hss.2022.81342>
28. Dzedzickis, A., Subačiūtė-Žemaitienė, J., Šutinys, E., Samukaitė-Bubnienė, U., & Bučinskas, V. (2021). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. *Applied Sciences*, 12(1), 135. <https://doi.org/10.3390/app12010135>
29. El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., & Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116, 162–180. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.03.003>
30. Xiong, Y., Tang, Y., Kim, S., & Rosen, D. W. (2023). Human-machine collaborative additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.004>
31. Taesi, C., Aggogeri, F., & Pellegrini, N. (2023). COBOT Applications—Recent Advances and Challenges. *Robotics*, 12(3), 79. <https://doi.org/10.3390/robotics12030079>
32. Villani, V., Pini, F., Leali, F., & Secchi, C. (2018). Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55, 248–266. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>
33. S. M. B. P. B., S., Valori, M., Legnani, G., & Fassi, I. (2025). Assessing Safety in Physical Human–Robot Interaction in Industrial Settings: A Systematic Review of Contact Modelling and Impact Measuring Methods. *Robotics*, 14(3), 27. <https://doi.org/10.3390/robotics14030027>

34. Behrens, R., Pliske, G., Umbreit, M., Piatek, S., Walcher, F., & Elkmann, N. (2022). A Statistical Model to Determine Biomechanical Limits for Physically Safe Interactions With Collaborative Robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 667818. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.667818>
35. Regolamento (UE) 2023/... del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 giugno 2023, relativo alle macchine e che abroga la direttiva 2006/42/CE e la direttiva 73/361/CEE
36. EU Machinery Legislation
37. Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
38. Velu, R., Vaheed, N., & Raspall, F. (2018). Design and Robotic Fabrication of 3D Printed Moulds for Composites. University of Texas at Austin. <https://doi.org/10.26153/TSW/17105>
39. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F., Ungureanu, L., & Munteanu, I. (2024). Post-Production Finishing Processes Utilized in 3D Printing Technologies. *Processes*, 12(3), 595. <https://doi.org/10.3390/pr12030595>
40. Li, H.-Y., Ma, Y., Miswadi, M. N. A. B., Luu, L. N. N., Yang, L., Foong, S., Soh, G. S., Sivertsen, E., & Tan, U.-X. (2022). Detect-Remove-Replace: A Robotic Solution That Enables Unmanned Continuous 3D Printing. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 29(2), 33–45. <https://doi.org/10.1109/MRA.2021.3103478>
41. Bajrami, A., & Palpacelli, M. C. (2023). A Flexible Framework for Robotic Post-Processing of 3D Printed Components. Volume 7: 19th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA), V007T07A006. <https://doi.org/10.1115/DETC2023-109746>
42. Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review. (2020). *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 27(02). <https://doi.org/10.56042/ijems.v27i2.45920>
43. Ajoudani, A., Zanchettin, A. M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K., & Khatib, O. (2018). Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42(5), 957–975. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2>
44. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., & Suman, R. (2022). Significant applications of Cobots in the field of manufacturing. *Cognitive Robotics*, 2, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>
45. Nguyen, H., Adrian, N., Xin Yan, J. L., Salfity, J. M., Allen, W., & Pham, Q.-C. (2020). Development of a Robotic System for Automated Decaking of 3D-Printed Parts. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 8202–8208. <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197110>
46. Aroca, R. V., Ventura, C. E. H., De Mello, I., & Pazelli, T. F. P. A. T. (2017). Sequential additive manufacturing: Automatic manipulation of 3D printed parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(4), 653–659. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2016-0029>
47. Kim, H.-J., & Lee, J.-H. (2021). Cyclic robot scheduling for 3D printer-based flexible assembly systems. *Annals of Operations Research*, 298(1–2), 339–359. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3098-2>
48. Sigurjónsson, V., Johansen, K., & Rösiö, C. (2022). Exploring the operator’s perspective within changeable and automated manufacturing – A literature review. *Procedia CIRP*, 107, 369–374. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.060>
49. Morgan, J., Halton, M., Qiao, Y., & Breslin, J. G. (2021). Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 481–506. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.001>
50. Yelles-Chaouche, A. R., Gurevsky, E., Brahimi, N., & Dolgui, A. (2021). Reconfigurable manufacturing systems from an optimisation perspective: A focused review of literature. *International Journal of Production Research*, 59(21), 6400–6418. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1813913>
51. Wang, L., Gao, R., Váncza, J., Krüger, J., Wang, X. V., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2), 701–726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>
52. Cohen, Y., Naseraldin, H., Chaudhuri, A., & Pilati, F. (2019). Assembly systems in Industry 4.0 era: A road map to understand Assembly 4.0. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(9), 4037–4054. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04203-1>

53. Nikolakis, N., Kousi, N., Michalos, G., & Makris, S. (2018). Dynamic scheduling of shared human-robot manufacturing operations. *Procedia CIRP*, 72, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.007>
54. Nikolakis, N., Sipsas, K., & Makris, S. (2018). A cyber-physical context-aware system for coordinating human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 72, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.033>
55. Mo, F., Rehman, H. U., Monetti, F. M., Chaplin, J. C., Sanderson, D., Popov, A., Maffei, A., & Ratchev, S. (2023). A framework for manufacturing system reconfiguration and optimisation utilising digital twins and modular artificial intelligence. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 82, 102524. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102524>
56. Argyrou, A., Giannoulis, C., Sardelis, A., Karagiannis, P., Michalos, G., & Makris, S. (2018). A data fusion system for controlling the execution status in human-robot collaborative cells. *Procedia CIRP*, 76, 193–198. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.01.012>
57. Nikolakis, N., Sipsas, K., Tsarouchi, P., & Makris, S. (2018). On a shared human-robot task scheduling and online re-scheduling. *Procedia CIRP*, 78, 237–242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.055>
58. Munzer, T., Toussaint, M., & Lopes, M. (2018). Efficient behavior learning in human-robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42(5), 1103–1115. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9674-5>
59. Mukherjee, D., Gupta, K., Chang, L. H., & Najjaran, H. (2022). A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102231>
60. Malik, A. A. (2025). Future of industrial assembly: Intelligent reconfigurable & repurposable adaptive assembly (IRRAA). *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(9), 6497–6512. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02220-3>
61. Caesar, B., Tilbury, D. M., Barton, K., & Fay, A. (2022). Requirements for Reconfiguration Management for Manufacturing Systems. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 3214–3219. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.147>
62. Andrisano, A. O., Leali, F., Pellicciari, M., Pini, F., & Vergnano, A. (2012). Hybrid Reconfigurable System design and optimization through virtual prototyping and digital manufacturing tools. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 6(1), 17–27. <https://doi.org/10.1007/s12008-011-0133-9>
63. Gervasi, R., Mastrogiamco, L., Maisano, D. A., Antonelli, D., & Franceschini, F. (2022). A structured methodology to support human-robot collaboration configuration choice. *Production Engineering*, 16(4), 435–451. <https://doi.org/10.1007/s11740-021-01088-6>
64. Stief, P., Burgat, G., Pour-Massahian-Tafti, M., Dantan, J.-Y., & Siadat, A. (2023). A pragmatic optimization-based approach for analysis and configuration of a reconfigurable multi-product assembly line in the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(9–10), 3993–4010. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12545-0>
65. Wang, K., Ding, L., Dailami, F., & Matthews, J. (2025). A Contemporary Review of Collaborative Robotics Employed in Manufacturing Finishing Operations: Recent Progress and Future Directions. *Machines*, 13(9), 772. <https://doi.org/10.3390/machines13090772>
66. Kim, W., Lorenzini, M., Balatti, P., Nguyen, P. D. H., Pattacini, U., Tikhanoff, V., Peternel, L., Fantacci, C., Natale, L., Metta, G., & Ajoudani, A. (2019). Adaptable Workstations for Human-Robot Collaboration: A Reconfigurable Framework for Improving Worker Ergonomics and Productivity. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 26(3), 14–26. <https://doi.org/10.1109/MRA.2018.2890460>
67. Tsarouchi, P., Matthaiakis, A.-S., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2017). On a human-robot collaboration in an assembly cell. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(6), 580–589. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2016.1187297>
68. Schuh, G., Prote, J.-P., Dany, S., Molitor, M., & Giner, B. (2018). Process model for generative assembly planning in the highly iterative product development. *Procedia CIRP*, 72, 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.006>
69. Maschler, B., Müller, T., Löcklin, A., & Weyrich, M. (2022). Transfer Learning as an Enhancement for Reconfiguration Management of Cyber-Physical Production Systems. *Procedia CIRP*, 112, 220–225. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.095>
70. Ranz, F., Hummel, V., & Sihm, W. (2017). Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration. *Procedia Manufacturing*, 9, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.011>

71. Kousi, N., Gkournelos, C., Aivaliotis, S., Lotsaris, K., Bavelos, A. C., Baris, P., Michalos, G., & Makris, S. (2021). Digital Twin for Designing and Reconfiguring Human–Robot Collaborative Assembly Lines. *Applied Sciences*, 11(10), 4620. <https://doi.org/10.3390/app11104620>
72. Dean, M. (2022). A Practical Guide to Multi-Criteria Analysis. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15007.02722>
73. Pansare, R., Yadav, G., & Nagare, M. R. (2023). A hybrid framework to prioritize the performance metrics of reconfigurable manufacturing system (RMS) using fuzzy AHP–TOPSIS method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(3–4), 863–885. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10440-8>
74. Wątróbski, J., Karczmarczyk, A., & Rymaszewski, S. (2020). Multi-criteria decision making approach to production line optimization. *Procedia Computer Science*, 176, 3820–3830. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.005>
75. Nenzhelele, T., Trimble, J. A., Swanepoel, J. A., & Kanakana-Katumba, M. G. (2023). MCDM Model for Evaluating and Selecting the Optimal Facility Layout Design: A Case Study on Railcar Manufacturing. *Processes*, 11(3), 869. <https://doi.org/10.3390/pr11030869>
76. Paradigms, Methods, and Tools for Multicriteria Decision Models in Sustainable Industry 4.0-Oriented Manufacturing Systems
77. Dimitropoulos, N., Kaipis, M., Giartzas, S., & Michalos, G. (2025). Generative AI for automated task modelling and task allocation in human robot collaborative applications. *CIRP Annals*, 74(1), 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2025.04.081>
78. Barravecchia, F., Bartolomei, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2025). Designing Symbiotic Human–Robot Collaboration in assembly tasks. *Production Engineering*, 19(3–4), 629–661. <https://doi.org/10.1007/s11740-025-01333-2>
79. Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R., & Matt, D. T. (2020). Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design Guidelines and Requirements. *Procedia CIRP*, 91, 367–372. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.188>
80. Rea Minango, N., Hedlind, M., & Maffei, A. (2024). Handling features in assembly: Integrating manufacturing considerations early in design discussions. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 1077–1100. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.11.012>
81. Castro, A., Silva, F., & Santos, V. (2021). Trends of Human-Robot Collaboration in Industry Contexts: Handover, Learning, and Metrics. *Sensors*, 21(12), 4113. <https://doi.org/10.3390/s21124113>
82. Salami, M., Bilancia, P., Peruzzini, M., & Pellicciari, M. (2026). A framework for integrated design of human–robot collaborative assembly workstations. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 97, 103108. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103108>
83. Bohg, J., Morales, A., Asfour, T., & Kragic, D. (2014). Data-Driven Grasp Synthesis—A Survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2), 289–309. <https://doi.org/10.1109/TRO.2013.2289018>
84. Giammaria, V., Capretti, M., Del Bianco, G., Boria, S., & Santulli, C. (2024). Application of Poly(lactic Acid) Composites in the Automotive Sector: A Critical Review. *Polymers*, 16(21), 3059. <https://doi.org/10.3390/polym16213059>
85. Cuenca Pérez, D. E., Zumba Novay, E. G., Castillo Mazón, H. P., & Quinchuela Llamuca, J. P. (2024). Elasticity and plasticity of PLA, PETG, ABS polymers for printing automotive parts. *Espirales Revista Multidisciplinaria de Investigación*, 8(4). <https://doi.org/10.31876/er.v8i4.875>
86. Akampumuza, O., Wambua, Paul. M., Ahmed, A., Li, W., & Qin, X. (2017). Review of the applications of biocomposites in the automotive industry. *Polymer Composites*, 38(11), 2553–2569. <https://doi.org/10.1002/pc.23847>
87. Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., Harussani, M. M., Hakimi, M. Y. A. Y., Haziq, M. Z. M., Atikah, M. S. N., Asyraf, M. R. M., Ishak, M. R., Razman, M. R., Nurazzi, N. M., Norrahim, M. N. F., Abral, H., & Asrofi, M. (2021). Polylactic Acid (PLA) Biocomposite: Processing, Additive Manufacturing and Advanced Applications. *Polymers*, 13(8), 1326. <https://doi.org/10.3390/polym13081326>
88. Capponi, M., Mastrogiacomo, L., & Franceschini, F. (2025). Empirical comparison of assembly complexity assessment approaches in manufacturing. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19(5), 3219–3243.
89. Verna, E., Genta, G., & Galetto, M. (2023). A new approach for evaluating experienced assembly complexity based on Multi Expert-Multi Criteria Decision Making method. *Research in Engineering Design*, 34(3), 301–325. <https://doi.org/10.1007/s00163-023-00409-3>

90. Sinha, K. (n.d.). Structural Complexity and its Implications for Design of Cyber--- Physical Systems. *Physical Systems*.
91. Alkan, B., & Harrison, R. (2019). A virtual engineering based approach to verify structural complexity of component-based automation systems in early design phase. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.001>
92. Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2005). Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide (OECD Statistics Working Papers) [OECD Statistics Working Papers]. <https://doi.org/10.1787/533411815016>
93. Zaeh, M. F., Wiesbeck, M., Stork, S., & Schubö, A. (2009). A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. *Production Engineering*, 3(4–5), 489–496. <https://doi.org/10.1007/s11740-009-0171-3>
94. Verna, E., Genta, G., Galetto, M., & Franceschini, F. (2021). Defect Prediction For Assembled Products: A Novel Model Based On The Structural Complexity Paradigm. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-792386/v1>
95. Khan, M. T. H., Han, S., Jauhar, T. A., & Noh, C. (2025). A Review of 3D Shape Descriptors for Evaluating Fidelity Metrics in Digital Twin. *Machines*, 13(9), 750. <https://doi.org/10.3390/machines13090750>
96. Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: New insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6), 853–862. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>
97. Becker, W., Saisana, M., Paruolo, P., & Vandecasteele, I. (2017). Weights and importance in composite indicators: Closing the gap. *Ecological Indicators*, 80, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056>
98. Alkan, B. (2019). An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 13(3), 1145–1157. <https://doi.org/10.1007/s12008-019-00556-10>
99. Roa, M. A., & Suárez, R. (2015). Grasp quality measures: Review and performance. *Autonomous Robots*, 38(1), 65–88. <https://doi.org/10.1007/s10514-014-9402-3>
100. Terzi, S., Otoi, A., Grimaccia, E., Mazziotta, M., & Pareto, A. (2021). Open issues in composite indicators: A starting point and a reference on some state-of-the-art issues. Roma TrE-Press. <https://doi.org/10.13134/979-12-5977-001-1>
101. Zhu, X., Hu, S. J., Koren, Y., & Huang, N. (2012). A complexity model for sequence planning in mixed-model assembly lines. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.07.006>
102. ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Tomiyama, T., & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals*, 61(2), 793–814. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>
103. Iodice, F., Momi, E. D., & Ajoudani, A. (2025). Intelligent Framework for Human-Robot Collaboration: Dynamic Ergonomics and Adaptive Decision-Making (arXiv:2503.07901). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.07901>
104. Falck, A.-C., Örtengren, R., Rosenqvist, M., & Söderberg, R. (2017). Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 58, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.12.001>
105. Flores, A. M., Bauer, P., & Reinhart, G. (2019). Concept of a learning knowledge-based system for programming industrial robots. *Procedia CIRP*, 79, 626–631. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.076>
106. Morgan, J., Halton, M., Qiao, Y., & Breslin, J. G. (2021). Industry 4.0 smart reconfigurable manufacturing machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 481–506. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.001>
107. Mukherjee, D., Gupta, K., Chang, L. H., & Najjaran, H. (2022). A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102231. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102231>
108. Stief, P., Burgat, G., Pour-Massahian-Tafti, M., Dantan, J.-Y., & Siadat, A. (2023). A pragmatic optimization-based approach for analysis and configuration of a reconfigurable multi-product assembly line in the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(9–10), 3993–4010. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12545-0>

109. Goh, G. D., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2021). A review on machine learning in 3D printing: Applications, potential, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 54(1), 63–94. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09876-9>
110. Semeraro, F., Griffiths, A., & Cangelosi, A. (2023). Human–robot collaboration and machine learning: A systematic review of recent research. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102432. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102432>
111. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2017). Machine learning of linear differential equations using Gaussian processes. *Journal of Computational Physics*, 348, 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.07.050>
112. Hoerl, A. E., & Kennard, R. W. (2000). Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems. *Technometrics*, 42(1), 80–86. <https://doi.org/10.2307/1271436>
113. Ridge Regularization: an Essential Concept in Data ScienceHastie, T. (2024). Ridge Regularization: An Essential Concept in Data Science (arXiv:2006.00371). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.00371>
114. Data-Driven Prediction and Uncertainty Quantification of Process Parameters for Directed Energy DepositionHermann, F., Michalowski, A., Brünnette, T., Reimann, P., Vogt, S., & Graf, T. (2023). Data-Driven Prediction and Uncertainty Quantification of Process Parameters for Directed Energy Deposition. *Materials*, 16(23), 7308. <https://doi.org/10.3390/ma16237308>
115. Williams, C. K. I., & Rasmussen, C. E. (n.d.). *Gaussian Processes for Regression*.
116. Andrews, K., Granland, K., Chen, Z., Tang, Y., Chen, C. (2023). Automated 3D-Printer Maintenance and Part Removal by Robotic Arms. In: Duan, W., Zhang, L., Shah, S.P. (eds) *Nanotechnology in Construction for Circular Economy*. NICOM 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 356. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-3330-3\\_27](https://doi.org/10.1007/978-981-99-3330-3_27)

Grazie.

*Sergio Scibilia*