



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

---

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze  
Matematiche (DIISM)

Corso di Laurea Magistrale in

***Ingegneria Meccanica***

**Progettazione e Set-up di una Cella con Robot Collaborativo  
FANUC CRX10iA/L: Test di Diverse Condizioni Operative e  
Tipologie di Utensili**

---

**Design and Set-up of a Cell with FANUC CRX10iA/L  
Collaborative Robot: Testing of Different Operating  
Conditions and Types of Tools**

**Relatore:**

Prof. Matteo Claudio Palpacelli

**Tesi di laurea di:**

Edoardo Pannacci

**A.A. 2023/2024**





# Sommario

<b>Capitolo 1</b> .....	<b>6</b>
1.1 Industria 4.0 e Robot industriali.....	6
1.2 Applicazioni collaborative.....	8
1.3 Applicazioni nell'industria manifatturiera .....	10
1.4 Normativa.....	11
<b>Capitolo 2</b> .....	<b>14</b>
Attrezzatura.....	14
2.1 FANUC CRX-10iA/L .....	14
2.2 Sensore di forza FANUC FS 15-iA .....	18
2.3 Penna levigatrice PARKSIDE 160 B2 .....	19
2.4 Mandrino di sbavatura RCV-490.....	21
2.5 Circuito dell'aria compressa.....	24
<b>Capitolo 3</b> .....	<b>36</b>
Programmazione del robot FANUC CRX-10iA/L .....	36
3.1 Teach pendant e applicazione iRProgrammer .....	36
3.1.1 Interfaccia utente .....	37
3.2 Programmazione.....	39
3.2.1 Contouring Function .....	40
<b>Capitolo 4</b> .....	<b>44</b>
Lavorazioni .....	44
4.1 Lavorazioni con penna levigatrice PARKSIDE.....	44
4.1.1 Lucidatura alluminio .....	44
4.1.2 Levigatura tavoletta di legno .....	48
<b>Capitolo 5</b> .....	<b>52</b>
Ottimizzazione topologica del supporto e riduzione delle vibrazioni .....	52
5.1 Test con penna levigatrice e supporto realizzato con stampa 3D .....	52
5.2 Analisi in ambiente ANSYS Workbench e ottimizzazione del supporto.....	55
5.3 Raccolta dati e analisi dei risultati.....	60
<b>Capitolo 6</b> .....	<b>62</b>
Programmazione del robot tramite ambiente "NX-CAM" di SIEMENS .....	62
6.1 Modellazione 3D e definizione della cinematica del robot .....	63
6.2 Inclusione del modello del robot nella libreria "machine" .....	66
6.3 Modellazione e inclusione del modello dell'end effector nella libreria "device" .....	67
6.4 Generazione della traiettoria in ambiente NX - CAM.....	68

<b>Capitolo 7</b> .....	<b>75</b>
Lavorazioni con mandrino di sbavatura SCHUNK RCV-490 .....	75
7.1 Progettazione del supporto per il montaggio del mandrino sul robot .....	75
7.2 Operazioni di fresatura del legno .....	78
<b>Capitolo 8</b> .....	<b>85</b>
Conclusioni.....	85
<b>Bibliografia e sitografia</b> .....	<b>87</b>
<b>Indice delle figure</b> .....	<b>89</b>
<b>Indice delle tabelle</b> .....	<b>91</b>

# Capitolo 1

## 1.1 Industria 4.0 e Robot industriali

Il termine “Industria 4.0” (o “Industry 4.0”) indica una tendenza dell’automazione industriale che integra alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro e aumentare la produttività e la qualità produttiva degli impianti.

Ecco che quindi tra i protagonisti troviamo i robot industriali che, insieme all’industria, hanno subito un’evoluzione passando dalla robotica più “tradizionale” a quella del “futuro”.

Non si parla solo di una evoluzione della macchina stessa, ma anche delle sue possibili applicazioni e delle nuove sfide tecnologiche che richiedono la collaborazione di team multidisciplinari, con esperti di processi industriali, di controllo, di intelligenza artificiale, di sicurezza e molto altro ancora.

Il numero di nuove installazioni nel mondo non si è arrestato, ma anzi è in crescita continua, con particolare attenzione alle applicazioni collaborative di cui parleremo in seguito.

I robot quando nascono sono delle “quasi-macchine”, ovvero non nascono con uno scopo ben specifico, questo finché non vengono installati e programmati per una particolare operazione. Pertanto, per la loro produzione, circolazione e installazione su suolo Europeo sono soggetti alle stesse normative e direttive relative alle macchine e alle quasi-macchine, di cui si parlerà più nel dettaglio successivamente, in particolare è rilevante la “Direttiva 2006/42/CE” del 17 maggio 2006 detta “Nuova Direttiva Macchine”.

I robot possono essere classificati in base alle loro caratteristiche e architetture e a vari fattori, come la velocità massima raggiungibile, payload (carico), numero di gradi di libertà, sensoristica avanzata, robot a cinematica parallela o seriali.

La maggior parte dei robot industriali sono seriali, ovvero abbiamo due elementi principali: il braccio e il polso. Troviamo un esempio riportato in Figura 1.1.1.



*Figura 1.1. 1: Esempio di Robot industriale.*

Nella robotica tradizionale i robot sono poco sensorizzati e quindi deve essere prevista la progettazione di una cella in cui deve operare il robot, la quale è ostile alla presenza umana. In Figura 1.1.2 è riportato un esempio di cella robotizzata, dove i robot non solo possono raggiungere dimensioni notevoli, ma anche elevate velocità con la possibilità di movimentare grandi carichi.

Nonostante la presenza di barriere, dispositivi di arresto di emergenza, la possibilità di trovare installati alcuni elementi come laser scanner e/o pedane di pressione, rimane comunque un problema la presenza dell'operatore umano nella zona di operatività del robot, la cui sicurezza non è garantita in modo assoluto.

Dall'esigenza di poter operare in totale sicurezza con la macchina ove possibile è quindi nata quella che è definita applicazione collaborativa.



*Figura 1.1. 2: Cella robotizzata.*

## 1.2 Applicazioni collaborative

I robot per applicazioni collaborative rappresentano l'effettiva rivoluzione della robotica industriale nata nel contesto di Industria 4.0, con essi sono innumerevoli i vantaggi, ma anche le nuove possibilità di applicazione che vedono coinvolto ora anche l'operatore umano, quest'ultimo infatti non è escluso, ma è prevista l'interazione fisica tra macchina e operatore. Proprio partendo da questa interazione definiamo meglio il significato di applicazione collaborativa; infatti, anche se spesso viene definito un robot collaborativo (cobot) l'applicazione può non esserlo in quanto possiamo trovare installato sul robot un tool che potrebbe rappresentare un pericolo per l'operatore umano, con necessità di adottare sistemi di sicurezza, quali barriere e DPI (Dispositivi di Protezione Individuale).

Ecco che quindi è preferibile parlare di applicazione collaborativa se è garantita totalmente la sicurezza dell'operatore, in questo caso il primo vantaggio è l'eliminazione di barriere e la necessità di progettare e installare una cella in cui deve operare il robot, con una conseguente riduzione dei tempi e dei costi di installazione e migliore gestione del layout dell'azienda, con maggiore flessibilità nell'utilizzo degli spazi.

I "Cobot" sono robot che hanno delle caratteristiche che li contraddistinguono dai robot industriali più tradizionali, essi presentano una struttura più leggera, assenza di parti esposte quali motori e cavi, giunti arrotondati o plastificati e spesso i membri sono ricoperti di materiale apposito che garantisce una sicurezza aggiuntiva in caso di urto accidentale con l'operatore, come possiamo vedere in Figura 1.2.1, presentano inoltre una ridondanza di sensori, sono ergonomici e facili da programmare.





*Figura 1.2. 1: Operatore umano impegnato in un'applicazione congiunta con un Cobot.*

La programmazione può avvenire in due modi:

- tramite “teach pendant”;
- tramite movimentazione manuale.

Nel primo caso si utilizza un dispositivo simile ad un tablet che può funzionare sia con connessione cablata che wireless, in questo caso deve soddisfare dei requisiti come, per esempio, tenere in considerazione la perdita di connessione ed il problema di delay nella comunicazione.

Il “teach pendant”, il tablet precedentemente introdotto, sfrutta una scrittura di codice per la programmazione del robot, anche se la tendenza è quella di utilizzare interfacce il più intuitive possibile, così da adattarsi alle diverse tipologie di operatore, anche personale meno esperto. Nella movimentazione manuale, la programmazione avviene facendo seguire al robot il comportamento desiderato, impostando la traiettoria e le coordinate dei vari punti di interesse in modo che successivamente il robot possa ripercorrere il percorso in maniera autonoma.

Per quanto riguarda la collaborazione diretta con personale umano, il campo di possibilità è veramente ampio, partendo dal livello di cooperazione, che può andare dal solo garantire la sicurezza dell'area di lavoro, fino a prevedere l'esecuzione dei compiti con contatto fisico tra operatore e robot.

Questa collaborazione permette di migliorare anche la qualità del lavoro per l'operatore, questo perché viene eliminata quella parte di lavoro che prevede azioni ripetitive e scomode e movimentazione di carichi anche pesanti, che possono portare a problematiche fisiche anche permanenti e stress.

L'essere umano rimane comunque una figura indispensabile, non viene sostituito dalla macchina, ma si parla di un lavoro congiunto, sfruttando i punti di forza di uno e dell'altro, da una parte la precisione e l'instancabilità della macchina e dall'altra la versatilità dell'operatore umano che adesso può concentrarsi sulle attività a valore aggiunto.

Riassumendo i vantaggi che essi comportano sono la semplificazione del layout produttivo, installazione semplificata, facilità di programmazione e possibilità di interazione fisica con l'operatore umano, d'altra parte, tuttavia, presentano anche degli svantaggi, quali minore velocità massima raggiungibile, minori carichi, minori precisioni e costi più elevati anche per la maggiore presenza della sensoristica, anche se va considerata l'assenza della cella e quindi dei costi ad essa collegati.

### 1.3 Applicazioni nell'industria manifatturiera

I robot industriali sono utilizzati in molti settori dell'industria, come automotive, alimentare, industria chimica, elettronica ed altri ancora.

L'industria manifatturiera sicuramente è quella che ha subito maggiori cambiamenti grazie all'integrazione dei robot.

Le sfide nel contesto della produzione riguardano l'ottenere un assemblaggio efficiente, ripetibilità, operare in ambienti difficili, massima precisione ed eliminazione dei "colli di bottiglia", per una riduzione dei tempi e dei costi e per ottenere la massima efficienza.

I robot hanno aperto nuove possibilità e siamo ancora lontani dall'espressione del loro massimo potenziale.

Grazie alla loro sensoristica è possibile raccogliere un grande volume di dati che, se opportunamente processati, permette di individuare possibili problematiche ed intervenire, introdurre miglioramenti, migliora la tracciabilità e rintracciabilità, ovvero siamo in grado di sapere in qualsiasi momento quello che sta succedendo e in quale stato si trova per esempio un prodotto di cui siamo in grado anche di ricostruirne la storia passata.

Sono quindi una risorsa oltre che un semplice strumento e come tale va opportunamente gestita.

Tutto ciò richiede comunque un grande lavoro di studio a monte con costi non indifferenti, ma che se opportunamente eseguito ed integrato porta ad innumerevoli vantaggi.

Un esempio sono i robot per la finitura superficiale, questi richiedono un duro lavoro di attenta programmazione a causa delle variabili in gioco, ma al contempo offrono soluzioni altamente efficienti.

Il loro impiego permette di automatizzare il processo eliminando la dipendenza dal lavoro manuale, così da ridurre gli errori umani e ottenere un risultato migliore.

Possono essere eseguite una vasta gamma di operazioni quali levigatura, lucidatura, sabbiatura, satinatura e taglio, con la possibilità di operare con diversi tipi di materiale come plastica, legno, vetro e metallo, garantendo una notevole flessibilità.

Questo è possibile grazie al fatto che i robot sono dotati di attrezzature specializzate, montate sul braccio robotizzato che riesce ad adattarsi a diversi ambienti di lavoro e superfici, grazie anche all'avanzata sensoristica presente nell'area di lavoro e sul robot stesso, accompagnata anche da sistemi di visione che possono riconoscere gli elementi presenti, il grado di qualità

raggiunto e quindi permettere poi al sistema di controllo di adottare delle azioni correttive real-time come la gestione della pressione, velocità ed altri parametri che caratterizzano l'intero processo.

Come se non bastasse, un'ulteriore sfida è quella di integrare in modo efficiente degli algoritmi di intelligenza artificiale al fine di migliorare ulteriormente l'intero sistema, che può ora apprendere e adattarsi a diverse situazioni in modo del tutto autonomo e in totale sicurezza nell'ambiente di lavoro, rispondendo a stimoli esterni e trovando soluzioni per ottenere il risultato migliore.

Questa è un'altra differenza con la robotica "tradizionale" e motivo per cui si parla di industria del "futuro".

Lo scopo di questo lavoro è infatti quello di raccogliere i dati necessari ad una corretta implementazione di algoritmi di intelligenza artificiale, la quale deve essere in grado di comprendere lo stato del sistema, fare per esempio "anomaly detection", rilevare l'usura degli strumenti, capire se ci sono problemi sul pezzo da lavorare, fornire indicazioni per operazioni di manutenzione predittiva, tutto questo insieme all'introduzione di sistemi di visione per il controllo di qualità e per garantire la sicurezza degli operatori umani, rilevando la loro presenza in modo che il robot rallenti, si allontani o vada in arresto temporaneo o di emergenza.

## 1.4 Normativa

La normativa tecnica, in particolare quella armonizzata, cioè uguale per tutti i Paesi UE, viene elaborata dagli organismi europei di normalizzazione allo scopo di aiutare i progettisti, i costruttori e gli organismi interessati ad interpretare i requisiti di sicurezza per raggiungere la conformità con la legislazione sulla sicurezza dei prodotti (es. Direttiva Macchine).

La norma armonizzata generalmente fornisce un'indicazione dello stato dell'arte al momento in cui è stata adottata (è soggetta quindi a continui aggiornamenti, revisioni, etc.) ed indica il livello di sicurezza che ci si può aspettare da un prodotto in quel momento.

L'applicazione delle specifiche di una norma armonizzata attribuisce la presunzione di conformità ai "Requisiti Essenziali di Sicurezza" oggetto della direttiva.

In particolare, la "Direttiva Macchine" riconosce espressamente un ruolo alle norme armonizzate europee.

Queste, infatti, sono articolate su tre livelli come mostrato in Figura 1.4.1:

- **A** (generali, es. EN 12100, sicurezza - aspetti fondamentali);
- **B** (su aspetti specifici ma trasversali, es. EN 13849-1/-2, sicurezza - sistemi di comando);
- **C** (su singoli prodotti, EN 10218-1/-2, sicurezza dei robot).

Le norme di tipo C hanno la prevalenza sulle norme più generiche di tipo A e B, le quali se applicate, attivano il principio di presunzione di conformità per i requisiti da esse coperti e che devono essere espressamente indicati nella norma.

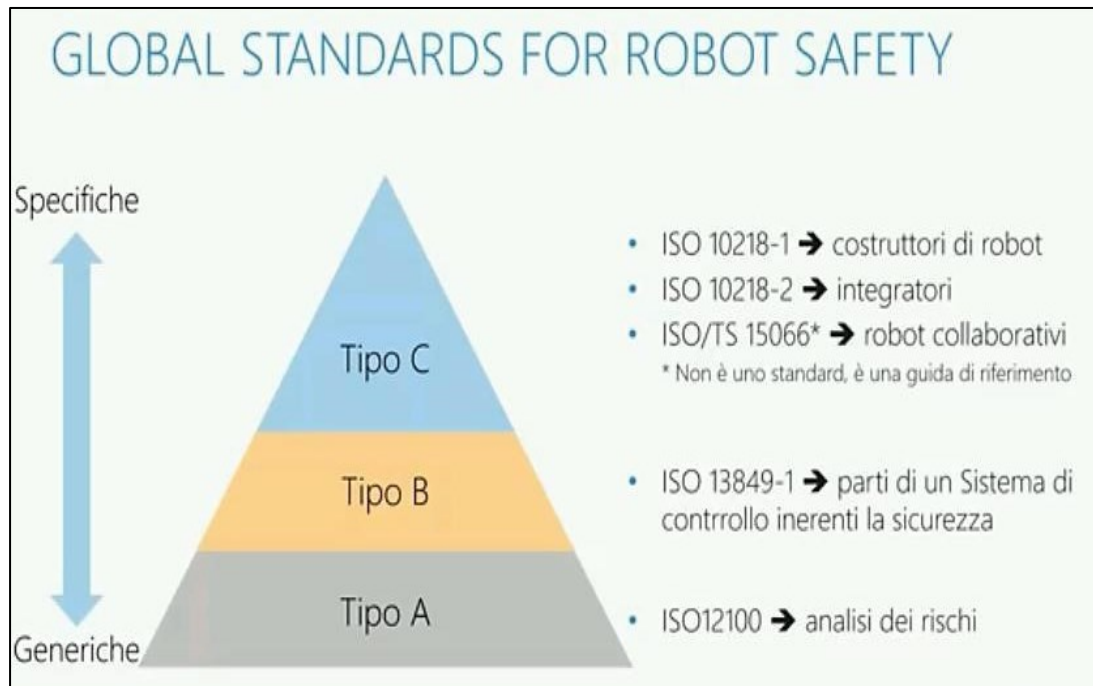


Figura 1.4. 1: "Piramide della sicurezza", normative sulla sicurezza per la robotica.

In conclusione, affinché sia applicata la presunzione di conformità ai requisiti stabiliti dalla Direttiva Macchine, la cella robotizzata e le sue parti devono soddisfare:

- **Norme per il costruttore: EN-10218-1 – Sicurezza dei robot.**  
Specifica quali caratteristiche debbano possedere i robot affinché possano essere integrati in una macchina (in questo caso una cella robotizzata) vendibile sul territorio Europeo.
- **Norme per l'integratore: EN-10218-2 – Sicurezza dei robot.**  
Spiega come vanno integrati i robot all'interno di una cella robotizzata.
- **Specifica tecnica: TS-15066 – Sicurezza dei robot collaborativi.**  
Espandono e completano le clausole riguardanti le modalità collaborative della norma UNI EN ISO 10218-2:2011.
- **Norma EN-13849-1 – Sicurezza dei sistemi di comando e di controllo.**  
Stabilisce quali caratteristiche debbano possedere le "safety functions", hardware e software, per poter garantire la sicurezza della cella robotizzata.
- **Norme per i Sistemi di Fabbricazione Integrati (IMS – Integrated Manufacturing Systems): EN-11161.**  
Specifica i sistemi di sicurezza per i sistemi di fabbricazione integrati, che incorporano due o più macchine interconnesse. La norma non tratta le singole macchine, ma tratta aspetti di sicurezza che sono importanti per l'interconnessione delle macchine.

Altre norme dettagliano i requisiti delle varie parti di una cella robotizzata: barriere, dispositivi di comando, di protezione, di emergenza, di interblocco, optoelettronici, a pressione, ripari, e moltissimi altri.

L'applicazione delle specifiche dettate da tutte queste norme deve essere conforme all'"Analisi dei Rischi", come previsto dalla "EN-12100-1/-2", che deve essere preliminarmente

svolta per ciascuna applicazione della cella robotizzata, comprese quelle collaborative, alcune delle quali sono trattate dalla specifica tecnica “TS 15066” (sicurezza dei cobot).

## Capitolo 2

### Attrezzatura

In questo capitolo viene riportata la strumentazione utilizzata e le relative caratteristiche, in particolare il manipolatore “FANUC CRX-10iA/L”, con controller “FANUC R-30iB Mini Plus”, sensore di forza “FANUC FS 15-iA”, la penna levigatrice “PARKSIDE 160 B2”, il mandrino di sbavatura “RCV-490” della SCHUNK e il relativo circuito dell’aria compressa.

### 2.1 FANUC CRX-10iA/L

Il robot “FANUC CRX-10iA/L”, mostrato in Figura 2.1.1, è dotato di sei assi, caratterizzati da altrettanti giunti rotoidali e sei gradi di libertà nello spazio.

Questo manipolatore ha un peso di circa 40 kg e una capacità massima di carico al polso pari a 10 kg.

Grazie al suo peso ridotto, il modello CRX può essere facilmente installato in un’ampia gamma di applicazioni, come i veicoli a guida automatica (AGV).

Lo sbraccio massimo ha un’estensione di 1418 mm e determina lo spazio di lavoro mostrato in Figura 2.1.2.



Figura 2.1. 1: FANUC CRX-10iA/L.

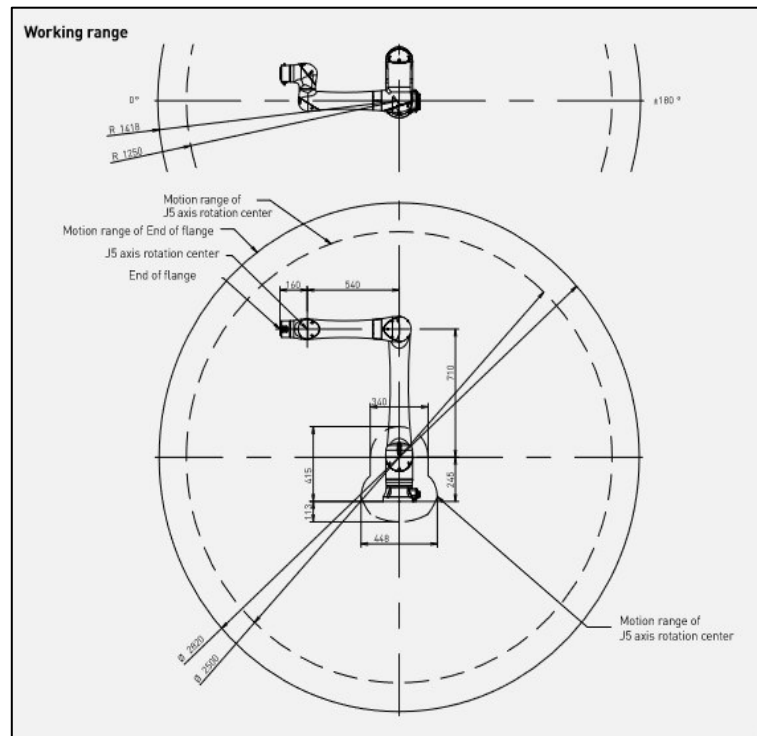


Figura 2.1. 2: Spazio di lavoro del robot.

Come tipico della categoria di appartenenza, questo robot è munito di sensori ad alta sensibilità che attivano un arresto di sicurezza immediato in caso di contatto con un corpo umano o altre superfici.

La superficie è ergonomica e totalmente priva di spigoli vivi, caratteristica dei “cobot”, al fine di facilitare e rendere sicuro il lavoro dell’operatore.

Il modello inoltre dispone di semplici software di plug-in per poter installare le interfacce di utilizzo di moltissime tipologie di periferiche, quali ad esempio pinze meccaniche e magnetiche, celle di carico e telecamere.

La programmazione, che sarà discussa dettagliatamente più avanti nella trattazione, è semplificata dalla possibilità di sfruttare la movimentazione manuale per memorizzare le posizioni che il manipolatore deve raggiungere. Il robot è conforme alle specifiche del grado di protezione IP67, e di conseguenza è completamente ermetico a polveri e fumi, caratteristica fondamentale per le lavorazioni di finitura superficiale per le quali si desidera impiegarlo. Il robot è inoltre pienamente conforme agli standard di sicurezza ISO 10218-1, caratteristica che ha concesso di lavorare in piena sicurezza ed in modo collaborativo con la macchina.

In Tabella 2.1.1 sono mostrati i range di movimento dei sei giunti rotoidali che costituiscono gli assi controllati del robot, insieme alla loro massima velocità di rotazione.

Controlled axes	Repeatability (mm)	Mechanical weight (kg)	Motion range [°]						Maximum speed [°/s] *2					
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	J1	J2	J3	J4	J5	J6
6	± 0.04*	40	360	360	540	380	360	450	120	120	180	180	180	180

Tabella 2.1. 1: Range di movimento e velocità massima dei giunti.

In Tabella 2.1.2 sono mostrate altre specifiche del CRX-10iA/L, tra cui i massimi carichi ammissibili.

Item		Specification	
Model		CRX-10iA	CRX-10iA/L
Type		Articulated type	
Controlled axes		6-axis(J1, J2, J3, J4, J5, J6)	
Reach		1249 mm	1418 mm
Installation		Floor, Upside-down, Wall & Angle mount (Note 2)	
Motion range	J1-axis	380° (6.63 rad)	360° (6.28 rad)
	J2-axis	360° (6.28 rad)	
	J3-axis	570° (9.95 rad)	540° (9.95 rad)
	J4-axis	380° (6.63 rad)	
	J5-axis	360° (6.28 rad)	
	J6-axis	380° (6.63 rad)	
Maximum speed (NOTE 3)		1000mm/s (NOTE 4) (maximum speed 2000mm/s (NOTE 5))	
Maximum load at wrist		10kg	
Allowable load moment at wrist	J4-axis	34.8Nm	
	J5-axis	26.0Nm	
	J6-axis	11.0Nm	
Allowable load inertia at wrist	J4-axis	1.28kg.m <sup>2</sup>	
	J5-axis	0.90kg.m <sup>2</sup>	
	J6-axis	0.30kg.m <sup>2</sup>	
Repeatability (NOTE 6)		±0.05mm	
Robot mass		40kg	40kg
Dust proof and drip proof mechanism (NOTE 7)		Conform to IP67	
Acoustic noise level		Less than 70dB (NOTE 8)	
Installation environment		Ambient temperature: Operating 0 to 45°C (NOTE 9) Storage, Transport -10 to 60°C Ambient humidity: Normally 75%RH or less (No dew or frost allowed) Short time 95%RH or less (Within 1 month) Permissible altitude: Above the sea 1000m or less Free of corrosive gases (NOTE 10) Vibration acceleration : 4.9m/s <sup>2</sup> (0.5G) or less (NOTE 11) Environment without fire	

Tabella 2.1. 2: Specifiche generali del robot.

Inoltre, le operazioni del “FANUC CRX-10iA/L” sono governate dal “Controller R-30iB Mini Plus”. Questo hardware alimenta il robot e impartisce a quest’ultimo istruzioni basate sui software in esso presenti, gestendo inoltre i segnali provenienti dai sensori e dalle strumentazioni presenti sul manipolatore. Il controllore rappresenta anche l’interfaccia tra il sistema e l’utente, attraverso il “teach pendant” ad esso collegato, il quale consente, tra le altre cose, la movimentazione e la programmazione del robot.

Il controllore è rappresentato schematicamente in Figura 2.1.3.



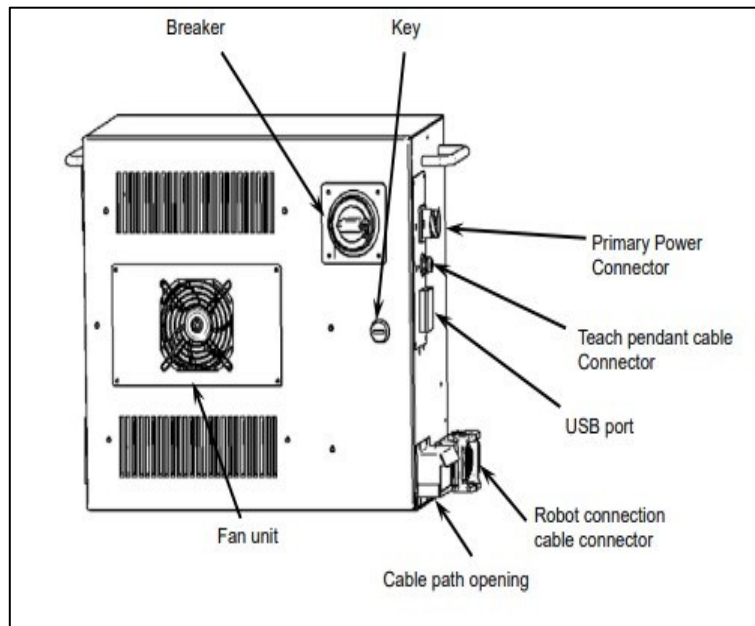


Figura 2.1. 3: Controller "FANUC R-30iB Mini Plus".

Il "Controller R-30iB Mini Plus" utilizza il software proprietario di FANUC, che a differenza dei sistemi basati su PC e Windows evita inconvenienti legati a virus, hacker o problemi di stabilità. L'ingombro è piuttosto ridotto: il componente ha una base di 410 x 277 mm e un'altezza di 370 mm, tale compattezza lo rende facilmente integrabile in celle di produzione. Il peso è di circa 20 kg.

Il robot è connesso al controllore attraverso i cavi di trasmissione dell'energia elettrica e dei segnali, dalla linea di terra e dal cavo adibito all'eventuale telecamera o alla cella di carico. Le varie connessioni tra controllore e cobot sono mostrate schematicamente in Figura 2.1.4.

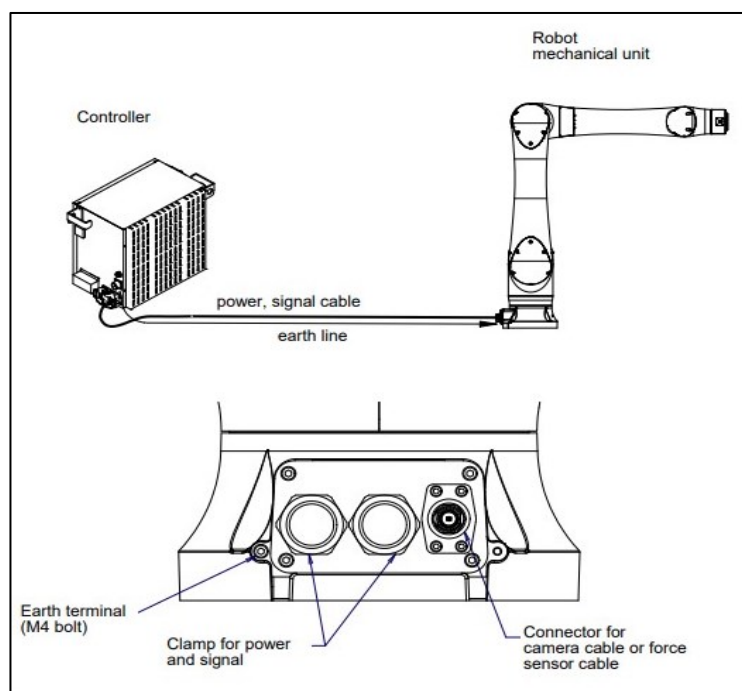


Figura 2.1. 4: Connettori del "FANUC CRX-10iA/L".

## 2.2 Sensore di forza FANUC FS 15-iA

IL "FANUC CRX-10iA/L" può avvalersi in alcuni casi esclusivamente dei propri sensori di forza e torsione interni, questo avviene per lo più per applicazioni semplici, alternativamente per operazioni più complesse o dove è richiesta una maggior precisione vengono generalmente utilizzati sensori di forza esterni montati direttamente sul polso del robot.

Il "FANUC FS 15-iA", mostrato in Figura 2.2.1, è il sensore di forza e torsione utilizzato nel nostro caso e collegato sul terminale del robot, compatibile con il "FANUC CRX-10iA/L".



Figura 2.2. 1: Sensore di forza "FANUC FS 15-iA".

Quest'ultimo, come già specificato, è in grado di monitorare forza e torsione applicate all'end effector lungo le principali direzioni  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , e  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ , come rappresentato schematicamente in Figura 2.2.2.

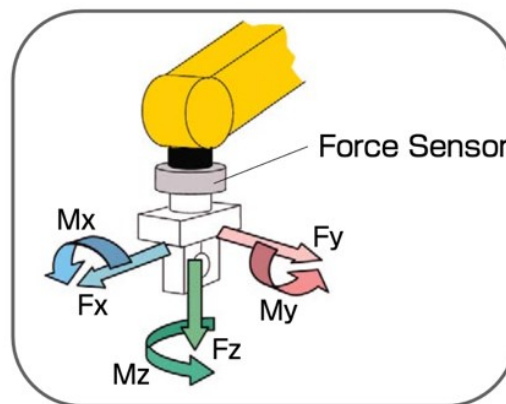


Figura 2.2. 2: Direzione delle forze e dei momenti misurati.

L'installazione fisica del sensore è rapida e facilmente realizzabile, non necessita di operazioni di calibrazione, inoltre con esso vengono forniti dei plug-in software da installare per la realizzazione di applicazioni come per esempio l'inserimento di parti, la rifinitura e la spinta a forza costante.

I sensori di forza esterna differiscono in linea di massima per dimensioni, forze e torsioni misurate.

In Tabella 2.2.1 vengono messi a confronto alcuni dati tecnici dei principali sensori di forza prodotti da FANUC ed in particolare vengono date delle informazioni quantitative sul sensore preso in esame.






	for a mini robot (3-axis)	for a mini robot	for a small robot	for a medium robot	for a large robot	
						
	FS-15iAe	FS-15iA	FS-40iA	FS-100iA	FS-250iA	
<b>Specifications</b>						
Items	Specification					
	FS-15iAe	FS-15iA	FS-40iA	FS-100iA	FS-250iA	
Dimensions	φ 90 × 36 mm	φ 94 × 43 mm	φ 105 × 47 mm	φ 155 × 59 mm	φ 198 × 85 mm	
Mass	0.31 kg	0.57 kg	0.87 kg	3.2 kg	6.9 kg	
Rated load	Fx, Fy, Fz	147 N (Fz)	147 N	392 N	980 N	2500 N
	Mx, My, Mz	11.8 Nm (Mx,My)	11.8 Nm	39.2 Nm	156 Nm	500 Nm
Static overload	Fx, Fy, Fz	1570 N (Fz)	1570 N	3920 N	9800 N	25000 N
	Mx, My, Mz	125 Nm (Mx, My)	125 Nm	392 Nm	1560 Nm	5000 Nm
Resolution	Fx, Fy, Fz	0.39 N (Fz)	0.39 N	1.0 N	2.0 N	4.9 N
	Mx, My, Mz	0.016 Nm (Mx, My)	0.016 Nm	0.029 Nm	0.08 Nm	0.25 Nm
Accuracy	3% or less		2% or less of the rated load			
Applicable robot	M-1iA, M-3iA, LR Mate 200iD, M-10iA	M-20iA, M-20iB	M-710iC	R-2000iC		
Operating Temperature	0 to 45°C					
Protection Class	IP67					

Tabella 2.2. 1: Confronto dati tecnici dei sensori di forza e torsione esterna realizzati da FANUC.

Come si può notare nonostante le dimensioni ed il peso ridotto, il carico nominale per quanto riguarda le forze è pari a 147 N ovvero 15 Kg, il che è apprezzabile se si considera che, come nel nostro caso, è applicato ad un robot che ha circa 10 Kg di payload, il tutto mantenendo una risoluzione nell'ordine dei grammi.

## 2.3 Penna levigatrice PARKSIDE 160 B2

La levigatrice a penna "PARKSIDE 160 B2" mostrata in Figura 2.3.1, è uno strumento multi-utensile a filo, leggero, versatile e di dimensioni ridotte, studiato per molteplici azioni, alcune delle quali vengono di seguito elencate:

- Fresatura.
- Incisione.
- Lucidatura.
- Smerigliatura.



Figura 2.3. 1: Levigatrice PARKSIDE 160 B2.

Generalmente viene impiegato per operazioni di precisione o per piccole lavorazioni con materiali facili da lavorare come legno e plastica, risulta in ogni caso adatto anche alla lavorazione di metallo, ceramica o pietra.

La sua versatilità è legata all'intercambiabilità delle punte, la maggior parte delle quali sono in dotazione, ma per scopi più specifici è possibile acquistare kit più adatti.

Vengono evidenziati per maggior completezza in Tabella 2.3.1 i dati tecnici dello strumento.

#### Dati tecnici

Potenza assorbita nominale	160 W
Tensione nominale	230-240 V ~, 50 Hz (tensione alternata)
Numero di giri nominale	10.000 – 40.000 rpm
Punta per trapano	Diametro max. 3.2 mm
Mole	Diametro max. 25mm
Classe di protezione	II / isolamento doppio

*Tabella 2.3. 1: Dati tecnici "PARKSIDE 160 B2".*

L'utensile, a fronte di ridotte potenze assorbite (160 W), riesce ad esprimersi in un range di numero di giri nominale tra 10.000 e 40.000 giri/ minuto.

Il manuale dello strumento fornisce dei suggerimenti sulla regolazione del numero di giri in funzione del tipo di materiale lavorato e del tipo di accessorio e dunque di lavorazione che si vuole eseguire come mostrato in Tabella 2.3.2.

#### Regolazione del numero di giri

Cifra sulla regolazione del n. di giri	Materiale da lavorare
1	Plastica e materiali con basso punto di fusione
2 – 3	Pietra, ceramica
4	Legno morbido, metallo
5	Legno duro
Max.	Acciaio

*Tabella 2.3. 2: Regolazione del numero di giri in funzione del materiale da lavorare.*

Come mostrato in Tabella 2.3.3 per materiali via via più resistenti è consigliato un incremento di velocità, che mostra le velocità da impostare a seconda delle tipologie di punte installate sull'apparecchio.


Regolazione del numero di giri ①	Accessori			Numero di giri
MAX				40000 min <sup>-1</sup>
5			mole da taglio ⑱/ mole abrasive ⑳/ nastri abrasivi ㉓/ bit per fresatura ㉑/ bit per incisione ㉒/ bit per levigatura ㉔/ mole da taglio ㉕	
4				
3				
2	spazzola metallica ㉗/ spazzola di plastica ㉘	accessori lucidanti ㉚/ punta per trapano ㉙		
1				
0				0 min <sup>-1</sup>

Tabella 2.3. 3: Regolazione del numero di giri in funzione dell'accessorio impiegato.

## 2.4 Mandrino di sbavatura RCV-490

Il mandrino di sbavatura "RCV-490" della SCHUNK può essere collegato direttamente al braccio del robot o funzionare in qualità di unità stazionaria, inoltre presenta un motore pneumatico a pistoni rotanti, alimentato tramite aria compressa filtrata (<5 µm, secca) e oliata (1-2 gocce/minuto).

L'utensile può esprimere una potenza di 490 W. Il suo peso pari a 3,36 kg rende possibile il suo utilizzo a bordo del braccio robotico, il quale ha un payload di 10 kg, alternativamente un'ulteriore configurazione è quella che prevede il mandrino RCV-490 come unità stazionaria vincolata a dei banchi da lavoro. In questa seconda configurazione per effettuare la lavorazione di finitura è possibile prevedere l'utilizzo di una pinza fissata al robot che mantiene il pezzo da lavorare e lo muova secondo opportune traiettorie a contatto con la punta del mandrino. Il dispositivo è mostrato in Figura 2.4.1, mentre nella Tabella 2.4.1 troviamo le specifiche tecniche.



Figura 2.4. 1: Mandrino di sbavatura "RCV-490" della SCHUNK.

### Specifiche tecniche

Potenza	490 W
Numeri di giri al minuto	30.000 rpm
Velocità nominale	15.000 rpm
Angolo di compensazione max. X	$\pm 3^\circ$
Compensazione max. X	$\pm 8.3$ mm
Angolo di compensazione max. Y	$\pm 3^\circ$
Compensazione max. Y	$\pm 8.3$ mm
Fissaggio degli assi	integrata
Corsa di compensazione consigliata	$\pm 4.1$ mm
Forza di compensazione radiale minima	7 N
Forza di compensazione radiale massima	53 N
Pressione di esercizio min.	1 bar
Pressione di esercizio max.	4.1 bar
Pressione di esercizio	6.2 bar
Consumo di aria massimo	19 l/s
Porta - utensili	Pinza ER – 11 6 mm e 8 mm
Collegamento dell'aria mandrino	10 mm
Collegamento dell'aria compensazione	4 mm
Peso	3.36 Kg
Temperatura ambiente min.	5°C
Temperatura ambiente max.	35°C
Diametro D	120.7 mm
Altezza Z	271.3 mm
Forza Fx max.	53 N
Forza Fy max.	53 N

*Tabella 2.4. 1: Specifiche tecniche del mandrino "RCV-490" della SCHUNK.*

Il terminale del mandrino ha la capacità di muoversi in direzione radiale grazie a un meccanismo di compensazione, anch'esso di natura pneumatica, che gli consente di adattarsi nel modo migliore alle superfici di lavorazione semplificando la programmazione dei moti relativi. Con riferimento alla Figura 2.4.2, la compensazione può anche essere bloccata in direzione Y, lasciando attiva la regolazione solo in direzione ortogonale. In entrambe le direzioni, il massimo angolo di compensazione raggiungibile è pari a  $3^\circ$ , corrispondente a una corsa di 8,3 mm all'estremità dell'utensile. La massima forza di assestamento è invece pari a 53 N, anche in questo caso in entrambe le direzioni.

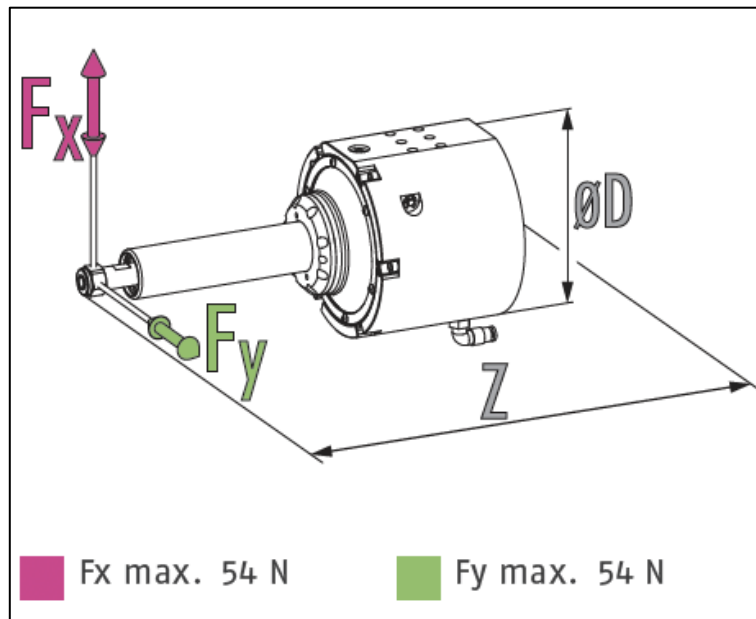


Figura 2.4. 2: Forze di compensazione massime del mandrino.

Le effettive caratteristiche della forza dipendono dalla posizione di installazione, mentre la pressione varia in base al materiale del pezzo, al tipo di utensile di asportazione e alla quantità di materiale da rimuovere.

In Figura 2.4.3 abbiamo l'andamento della forza in funzione della pressione di esercizio.

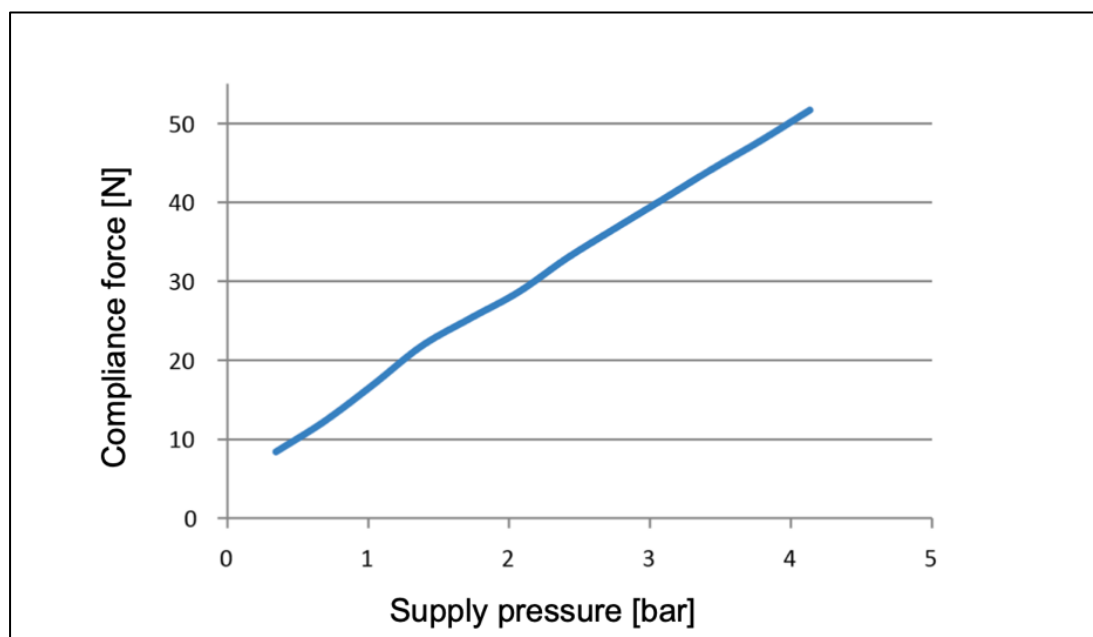


Figura 2.4. 3: Andamento della forza in funzione della pressione di esercizio.

Un'ulteriore considerazione riguarda il fatto che si possa agire solamente sulla velocità di avanzamento e sulla pressione di compensazione, ma non sulla velocità di rotazione.

Quest'ultima varia in relazione al carico applicato finché il motore non sviluppa la potenza necessaria per svolgere la specifica operazione.

Se non viene applicato alcun carico la velocità corrisponde a quella massima, ovvero di 30000 rpm, mentre quando viene applicato un carico, il motore scende ad una velocità di lavoro inferiore alla quale eroga la sua massima potenza.

Se la coppia richiesta per eseguire un compito supera la coppia di stallo disponibile, il motore viene arrestato e per questo motivo sono preferibili passaggi multipli di lavorazione e leggeri rispetto a una singola operazione di lavorazione con avanzamento elevato ed elevata asportazione di materiale.

Nella Figura 2.4.4 si riportano le curve di coppia e di potenza in funzione della velocità.

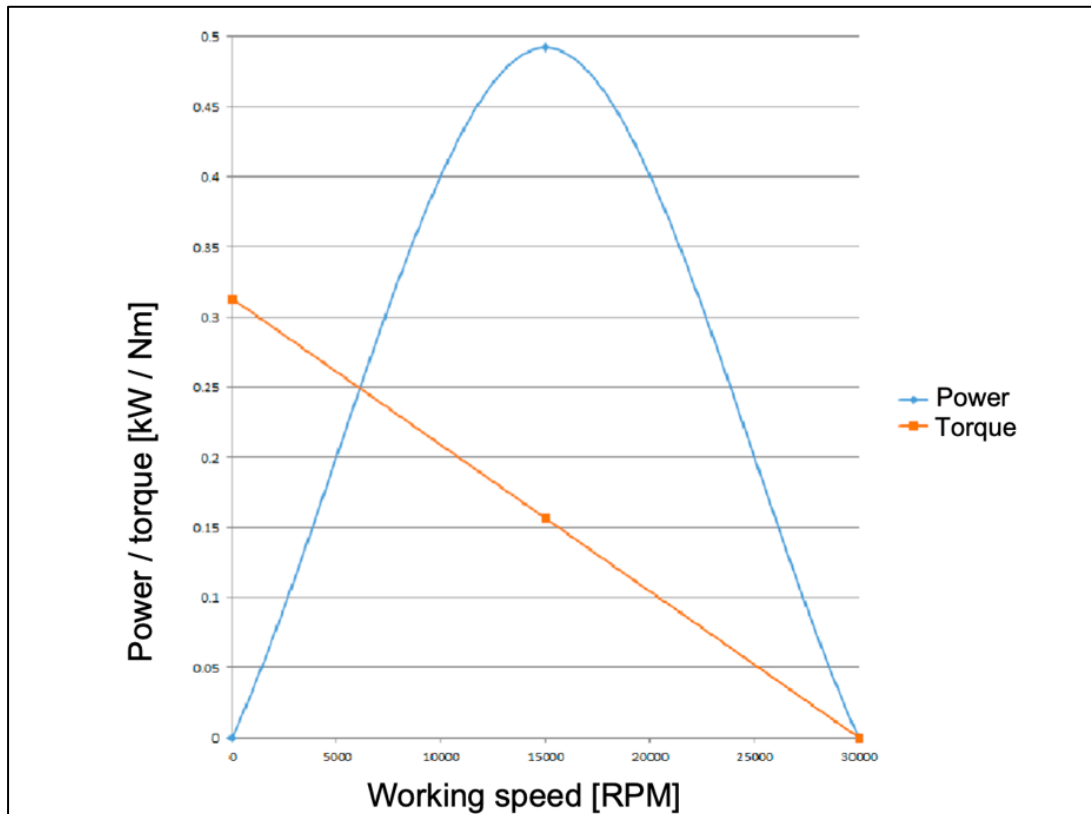


Figura 2.4. 4: Curve coppia e potenza in funzione della velocità.

## 2.5 Circuito dell'aria compressa

Per poter utilizzare il mandrino di sbavatura "RCV-490" della SCHUNK è stato effettuato un lavoro di studio a monte per la progettazione del circuito ad aria compressa, definito in base agli input e output relativi al nostro caso ed è interessante descriverne le sue caratteristiche. Innanzitutto, si inizia dalla spiegazione del perché si sia preferito utilizzare un azionamento pneumatico piuttosto che uno elettrico.

L'utilizzo di aria compressa per l'azionamento di dispositivi e utensili è molto diffuso da tempo nei settori produttivi, sia per l'assemblaggio che per la meccanica di precisione, offrendo numerosi benefici.

Nel nostro caso viene trasformata l'energia dell'aria compressa in energia meccanica di tipo rotatorio, che aziona il mandrino a cui troviamo connesso poi l'utensile scelto in base al tipo di lavorazione e di materiale.



Rispetto alle soluzioni elettriche, quella pneumatica comporta numerosi vantaggi, parliamo di maggiore versatilità, della semplicità costruttiva, della produttività, della capacità di operare in condizioni ambientali pericolose per altre tipologie di motore e dell'elevato rapporto tra la potenza erogata con peso o ingombro, questo anche grazie al ridotto numero di componenti, rendendolo perciò adatto per applicazioni in spazi limitati.

Il ridotto numero di componenti del motore pneumatico porta anche il vantaggio di una ridotta manutenzione e lunga vita del prodotto.

Per quanto riguarda la produttività, rispetto alla controparte elettrica, qui non si ha il problema del surriscaldamento, con conseguente capacità di poter mantenere la potenza nominale in modo costante ed inoltre poter lavorare senza interruzioni.

Riguardo alla resistenza alle condizioni ambientali, spesso quando si effettuano lavorazioni meccaniche come nel nostro caso, l'asportazione di materiale provoca la generazione di particelle che possono essere pericolose se entrano nel motore, tuttavia con l'impiego di un azionamento di tipo pneumatico ciò non costituisce un pericolo, in quanto il dispositivo ha una pressione interna maggiore di quella ambiente, pertanto, grazie a questa particolarità, lo rendono adatto ad ambienti di lavoro polverosi e applicazioni con asportazione di materiale. In sostanza a fronte di questi elementi la scelta del mandrino pneumatico "RCV-490" della SCHUNK è la migliore per la nostra applicazione.

Si va ora più nel dettaglio nel circuito utilizzato.

Innanzitutto, se viene utilizzato il dispositivo pneumatico sul manipolatore, ci si deve assicurare di aver installato una valvola dell'aria che interrompa l'alimentazione dell'aria al robot.

Per il corretto funzionamento dell'utensile, deve essere fornita aria compressa attraverso un adeguato circuito pneumatico, mostrato in Figura 2.5.1. Come si può notare, l'aria deve entrare nel circuito ad una pressione di 6,2 bar. In seguito al passaggio attraverso un filtro, l'aria deve essere distribuita in due rami: uno di alimentazione al motore, l'altro destinato al meccanismo di compensazione discusso in precedenza. Nel primo ramo la pressione deve rimanere a 6,2 bar, ed è necessario installare una valvola di controllo direzione 2/2 che consenta interrompere il flusso di aria destinato al motore. Nella derivazione che alimenta la compensazione deve essere possibile, al fine di ottenere la forza di assestamento desiderata, variare la pressione all'interno dell'intervallo tra 1 e 4,1 bar, ed è quindi necessaria la presenza di un regolatore di pressione, a valle del quale deve essere posizionata una valvola di controllo direzione 3/2.

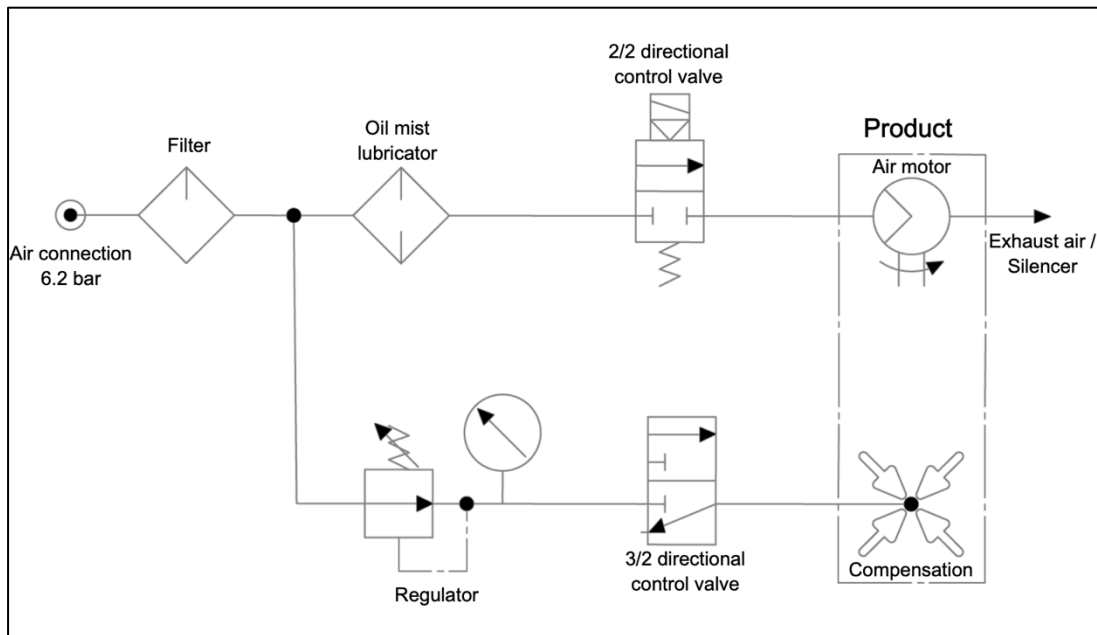


Figura 2.5. 1: Schema del circuito pneumatico.

Uno dei problemi che possono essere riscontrati con questo sistema sono possibili perdite di pressione, individuabili monitorando il comportamento del sistema.

In Figura 2.5.2 troviamo rappresentati il collegamento di compensazione dell'aria (1) e il collegamento per fornire aria al motore (2).

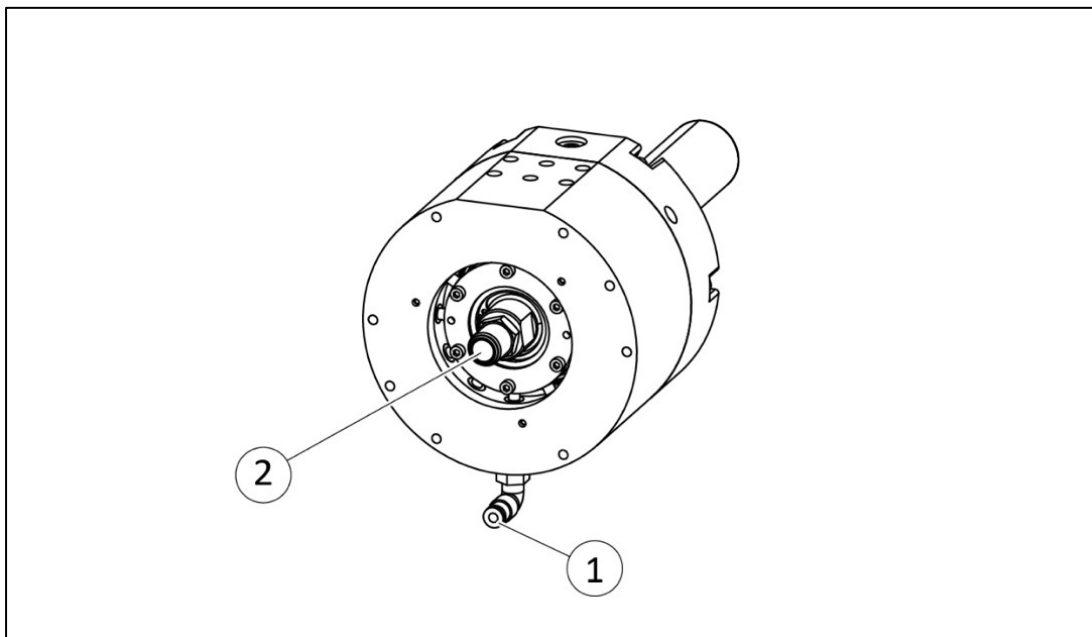


Figura 2.5. 2: Collegamento della compensazione (1) e dell'aria al motore (2).

Partendo dalle specifiche tecniche e dalle informazioni contenute nel manuale della SCHUNK è stato realizzato il circuito andando a ricercare le singole componenti.

Nel catalogo della "SMC" sono state selezionate le varie parti e realizzato il gruppo "F.R.L" serie D, taglia 40, con dimensione dell'attacco G1/2" da 339.8 x 333.2 x 128 mm.

È stata valutata anche l'opzione con lubrificazione, con presenza di lubrificatore con massimo di due gocce/min per non danneggiare lo strumento e depuratore, anche se poi si è optato per la soluzione priva di lubrificazione.

In Figura 2.5.3 si riporta un primo esempio del gruppo F.R.L. modulare, con diverse possibili combinazioni realizzabili tramite la scelta tra una vasta gamma di componenti in modo da soddisfare le proprie esigenze e in Tabella 2.5.1 la distinta base o "Bills of Materials" (BOM) del nostro circuito.

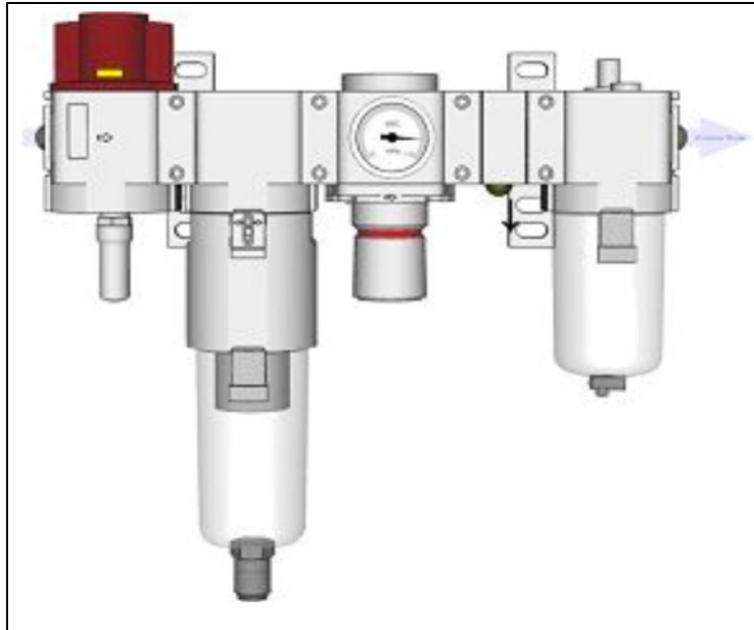


Figura 2.5. 3: Gruppo F.R.L.

#### Bills of Materials

Codice	Descrizione	Quantità	Prezzo Un. [€]
SM-2099906	VALVOLA VHS40-F04-D 1/2"	1	32,92
SM-0489	SILENZIATORE AN30-03 G.3/8`	1	9,40
SM-2000157	SQUADRA FISSAGGIO Y400T-D	2	5,13
-	FILTRO AFF40-F04D-C	1	141,18
SM-309067	MANOMETRO G46-10-01-L	1	12,77
-	BLOCCHETTO Y410-F02-D	1	9,83
SM-2000144	SQUADRA FISSAGGIO Y400-D	1	3,61
-	RIDUTTORE AR40K-F04-D	1	31,79
-	RIDUTTORE AR30K-F03BE-B	1	33,07
-	ELETTROVALV. JSXZ51-CN06F-5DS	1	121,76
SM-1058982	ELETT. VT307-5DZ1-02F-F-Q	1	43,57
			<b>Tot. [€]</b>
			<b>450,16</b>

Tabella 2.5. 1: Bill of Materials.

Analizzando le singole componenti si è quindi optato per le seguenti opzioni:

- **Valvola “VHS40-F04-D 1/2”** di rilascio della pressione mostrata in Figura 2.5.4, con manopola rotativa, dotata di un design modulare con uno stile del corpo coerente con le unità F.R.L. Inoltre, fornisce un risparmio energetico con zero colpi d'aria durante la commutazione della manopola. Questa valvola può anche prevenire gli incidenti causati da problemi dovuti dalla fornitura d'aria.



Figura 2.5. 4: Valvola di rilascio “VHS40-F04-D 1/2”.

- **Silenziatore pneumatico “AN30-03 G.3/8”**, riportato in Figura 2.5.5, per ridurre la produzione di rumore.



Figura 2.5. 5: Silenziatore pneumatico “AN30-03 G.3/8”.

- **Filtro “AFF40-F04D-C”**, mostrato in Figura 2.5.6, per il filtraggio delle particelle di polvere di grandi dimensioni, separazione di condensa, pressione massima di 1 MPa e grado di filtrazione nominale di 1  $\mu\text{m}$ ; la scelta iniziale prevedeva un filtro con grado di filtrazione di 5  $\mu\text{m}$ ; tuttavia, si è poi optato per un filtro a 1  $\mu\text{m}$  in previsione di altre applicazioni future.



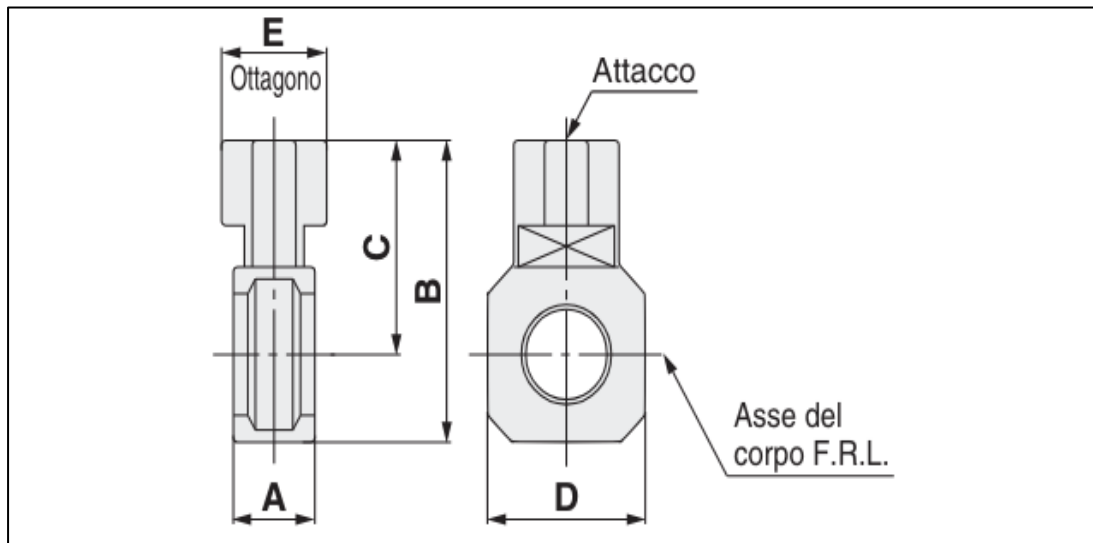
Figura 2.5. 6: Filtro “AFF40-F04D-C”.

- **Manometro “G46-10-01-L”** da 0,0 MPa a 1,0 MPa  $\pm 3\%$  e display con diametro di 42,5 mm per la lettura della portata al motore, riportato in Figura 2.5.7.



Figura 2.5. 7: Manometro “G46-10-01-L”.

- **Modulo di derivazione a T “Y410-F02-D”**, mostrato in Figura 2.5.8, che facilita la deviazione del flusso di aria.



*Figura 2.5. 8: Modulo di derivazione a T “Y410-F02-D”.*

- **Regolatore pneumatico con riduttore serie “AR40K-F04-D”**, con regolazione da 0.05 MPa a 0.85 MPa, su cui è montato il manometro “G46-10-01-L”, per regolare la portata del motore, mostrato in Figura 2.5.9.



*Figura 2.5. 9: Regolatore pneumatico “AR40K-F04-D”.*

- **Elettrovalvola “JSXZ51-CN06F-5DS”**, per la portata del motore, riportata in Figura 2.5.10.



Figura 2.5. 10: Elettrovalvola “JSXZ51-CN06F-5DS”.

- **Squadra di fissaggio “Y400T-D” e squadra di fissaggio “Y400-D”**, mostrate in Figura 2.5.11 in alto, per l’accoppiamento del modulo intermedio con le altre componenti come nell’esempio mostrato in Figura 2.5.11 in basso.



Figura 2.5. 11: Squadra di fissaggio “Y400T-D” (in alto a sinistra) e squadra di fissaggio “Y400-D” (in alto a destra), esempio di assemblaggio (in basso).

- **Regolatore pneumatico con riduttore serie “AR30K-F03BE-B”** da 0.05 MPa – 0.85 MPa, per la regolazione della portata della compensazione, riportato in Figura 2.5.12.



*Figura 2.5. 12: Regolatore pneumatico “AR30K-F03BE-B”.*

- **Elettrovalvola “VT307-5DZ1-02F-F-Q”**, per la portata della compensazione, mostrata in Figura 2.5.13.



*Figura 2.5. 13: Elettrovalvola “VT307-5DZ1-02F-F-Q”.*

Il gruppo F.R.L e le altre componenti sono state fissate su una tavola di compensato, successivamente montata tramite supporti sul tavolo da lavoro su cui è installato il robot con il mandrino.

Il circuito pneumatico “reale” complessivo è riportato in Figura 2.5.14, dove sono poi stati collegati i tubi dell’aria compressa al circuito e al mandrino eseguendo poi dei test per verificare la presenza di eventuali perdite ed il corretto funzionamento delle elettrovalvole.

Le elettrovalvole di regolazione, rispettivamente del motore e della compensazione, sono alimentate tramite un alimentatore da banco mostrato in Figura 2.5.15 e possono essere



gestite direttamente dal controllore del robot tramite opportuni collegamenti che azionano dei relè dedicati.

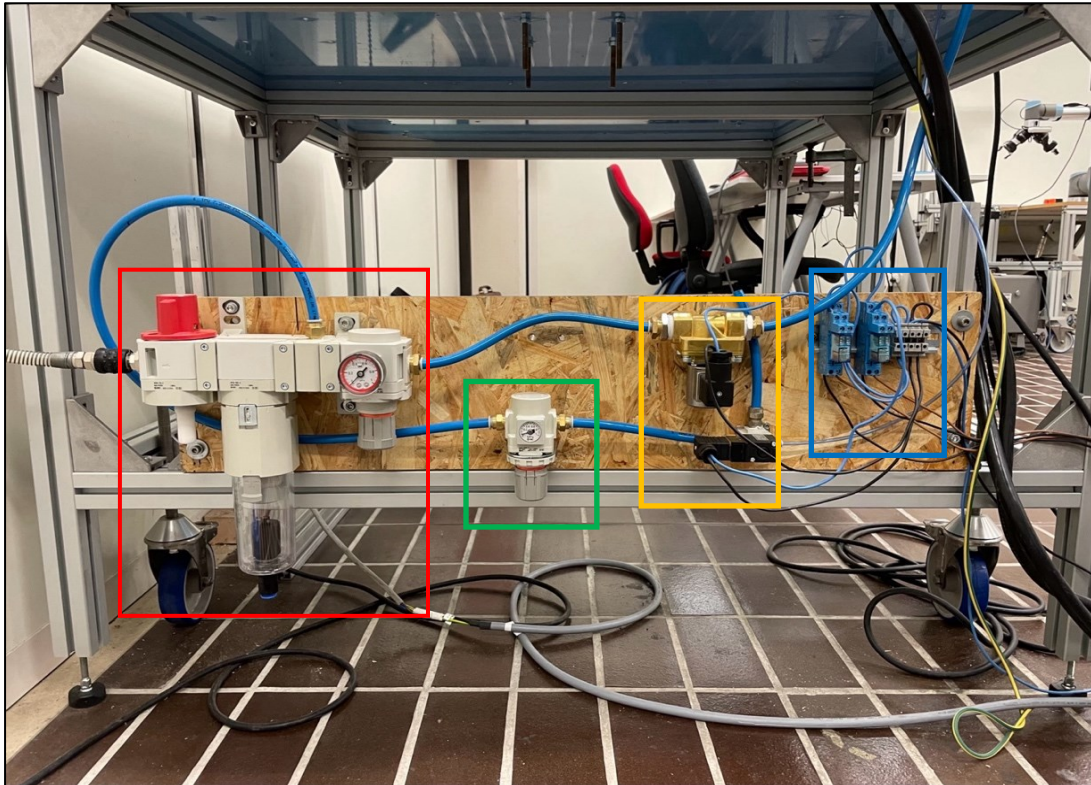


Figura 2.5. 14: Gruppo F.R.L (in rosso), regolatore pneumatico "AR30K-F03BE-B"(in verde), elettrovalvole (in arancione) e relè (in blu).

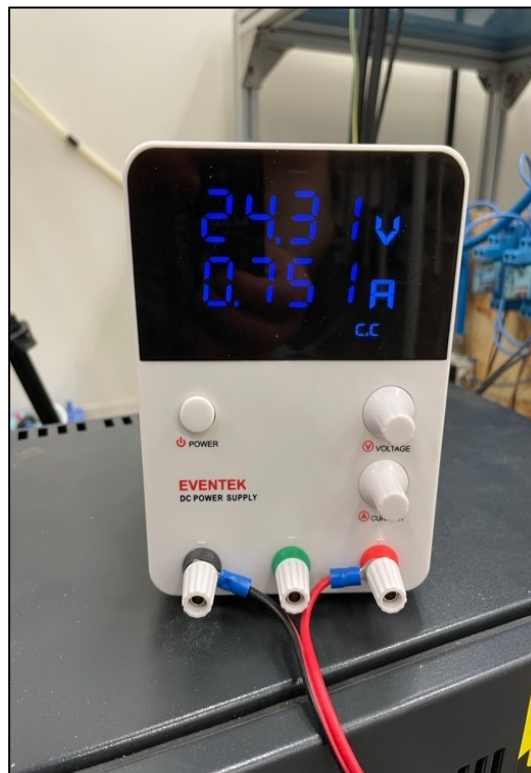


Figura 2.5. 15: Alimentatore da banco.

In Figura 2.5.16 è riportata la posizione dei pin che possono essere programmati per fornire il segnale digitale per il controllo dei relè mostrati in dettaglio in Figura 2.5.17.

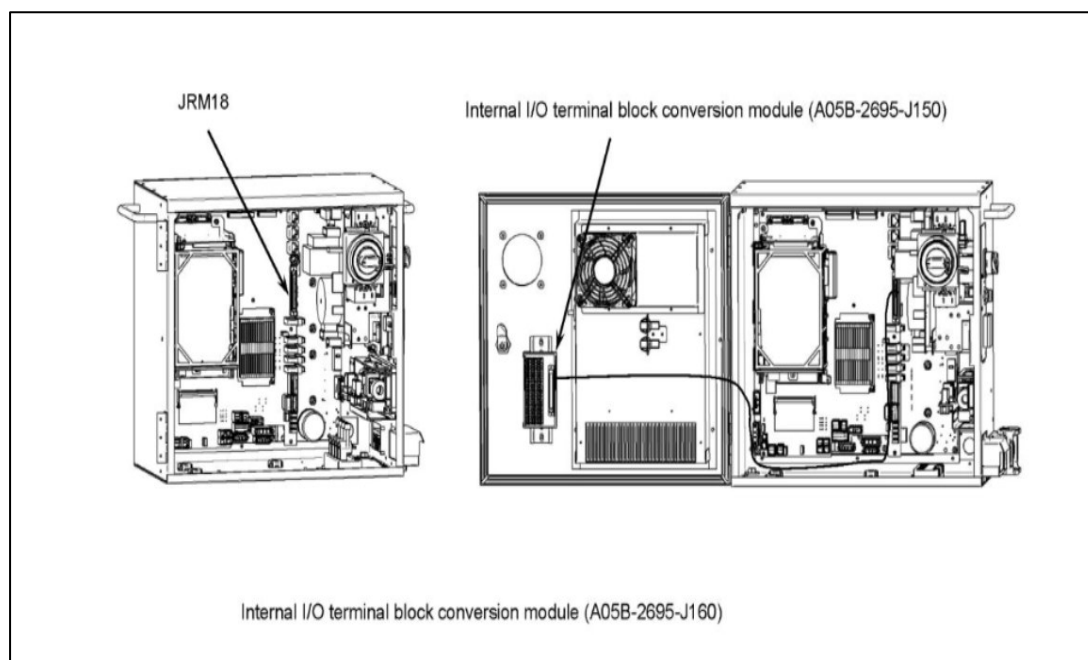


Figura 2.5. 16: Schema del modulo del blocco di conversione "A05B-2695-J150".



Figura 2.5. 17: Dettaglio dei relè per il controllo delle elettrovalvole.

Viene riportata di seguito la Tabella 2.5.2 che definisce a quali connettori mostrati in Figura 2.5.18 corrispondono gli specifici segnali.

Connector number	Signal name	Standard I/O assignment		Description	Remark
		UOP auto asg.: Simple (JRM18)	UOP auto asg.: None Full Full (Slave) Simple Simple (Slave)		
JRM18-18	DO01	DO[101]	DO[101]	Peripheral device status	General signal
JRM18-52	DO02	DO[102]	DO[102]		
JRM18-19	DO03	DO[103]	DO[103]		
JRM18-53	DO04	DO[104]	DO[104]		
JRM18-20	DO05	DO[105]	DO[105]		
JRM18-54	DO06	DO[106]	DO[106]		
JRM18-21	DO07	DO[107]	DO[107]		
JRM18-55	DO08	DO[108]	DO[108]		
JRM18-22	DO09	DO[109]	DO[109]		
JRM18-56	DO10	DO[110]	DO[110]		
JRM18-23	DO11	DO[111]	DO[111]		
JRM18-57	DO12	DO[112]	DO[112]		
JRM18-24	DO13	UO[1] CMDENBL	DO[81]	During automatic operation	

Tabella 2.5. 2: Segnali di output dell'interfaccia del dispositivo.

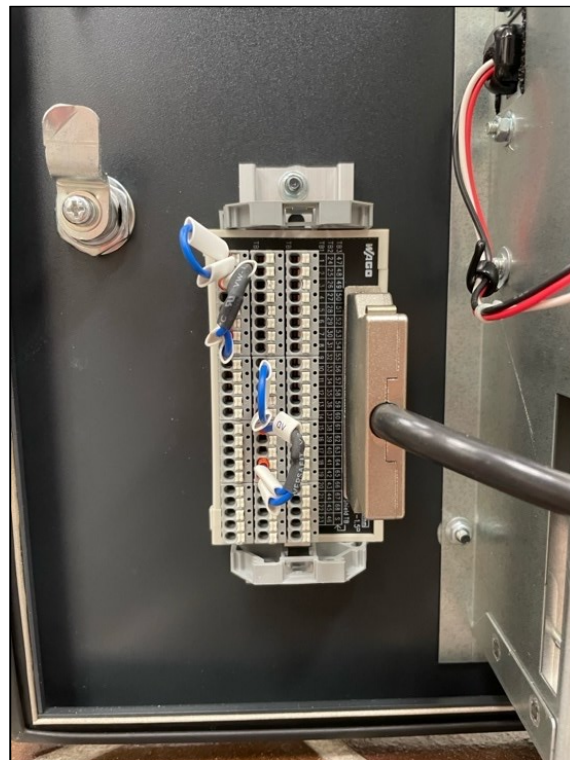


Figura 2.5. 18: Dettaglio dei pin all'interno del controllore "FANUC R-30iB Mini Plus".

Impostando il segnale alto i relè azionano le elettrovalvole, permettendo alle portate di aria compressa di raggiungere il mandrino e, durante la fase di programmazione, si ha la possibilità di interrompere i flussi di aria in base alla situazione, come per esempio operazione conclusa o in caso di pericolo di urto con un operatore umano, rendendo l'applicazione collaborativa anche con uno strumento potenzialmente pericoloso.

## Capitolo 3

### Programmazione del robot FANUC CRX-10iA/L

In questo capitolo verranno analizzati aspetti legati alla programmazione del robot “FANUC CRX-10iA/L”.

Saranno descritte le potenzialità del manipolatore e del suo linguaggio informatico e verrà introdotta e approfondita l'interfaccia di “iRProgrammer”, applicazione attraverso cui è possibile redigere un programma per questo tipo di robot.

Verrà successivamente descritta la modalità di programmazione e inoltre, tra le funzionalità disponibili, con riferimento al controllo in forza, verrà approfondita la “Conturing Function”, funzione utilizzata in larga parte per le prove effettuate, descrivendone il funzionamento e mostrandone le peculiarità.

#### 3.1 Teach pendant e applicazione iRProgrammer

Il robot “FANUC CRX-10iA/L” può essere programmato e controllato mediante un “teach pendant” costituito da un tablet, che può essere inserito in una base apposita. Tablet e base sono collegati tra loro tramite una porta USB, mentre la base è collegata al controller attraverso un cavo dedicato. La base è dotata di una presa ergonomica, che consente all'operatore di utilizzare i dispositivi in modo sicuro e confortevole. Inoltre, è previsto un pulsante d'arresto d'emergenza e un pulsante “Deadman Switch” che, una volta premuto, permette il movimento del robot e l'esecuzione di molte altre operazioni durante la fase di programmazione.

Il pulsante “Deadman Switch” ha una corsa a due scatti: se premuto o rilasciato in modo eccessivo, il robot si interrompe immediatamente per motivi di sicurezza.

In Figura 3.1.1 è possibile osservare il tablet comprensivo della base.

In sostituzione ai più datati “teach pendant” muniti di tastiera fisica e apposito schermo, il tablet è equipaggiato con l'applicazione “iRProgrammer”, supportata dai sistemi operativi Android e iOS.



Figura 3.1. 1: Teach Pendant.

### 3.1.1 Interfaccia utente

L'applicazione presenta un'interfaccia utente molto intuitiva, mostrata in Figura 3.1.1.1. Sulla parte alta dello schermo si trova la barra di status, dalla quale è possibile accedere al menù, visualizzare il nome del programma attuale oppure selezionare altri programmi. Le icone sulla destra mostrano lo stato del sistema.

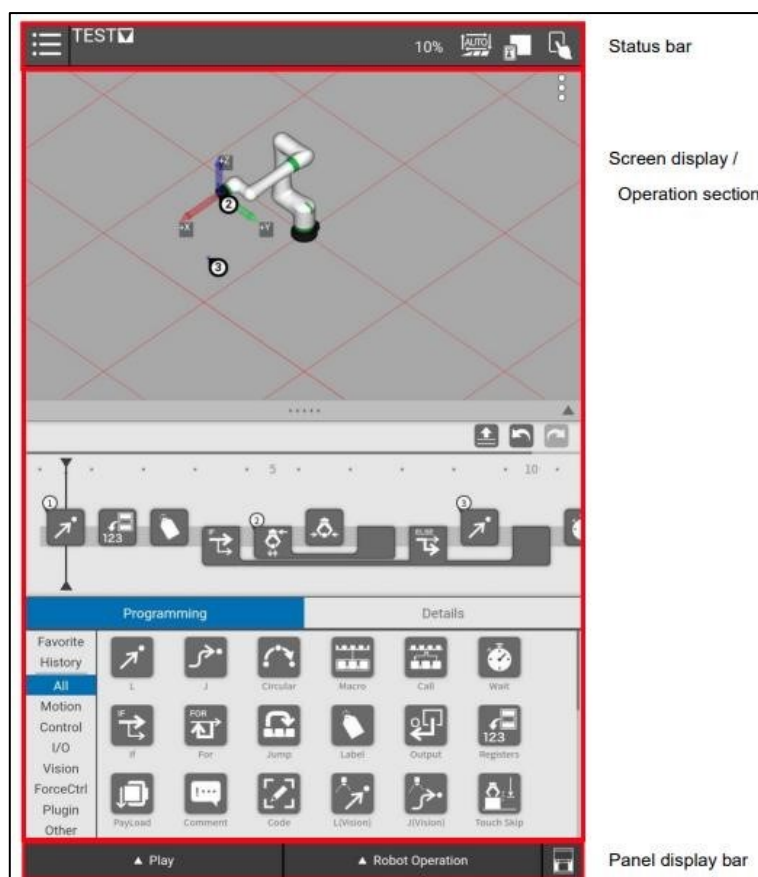


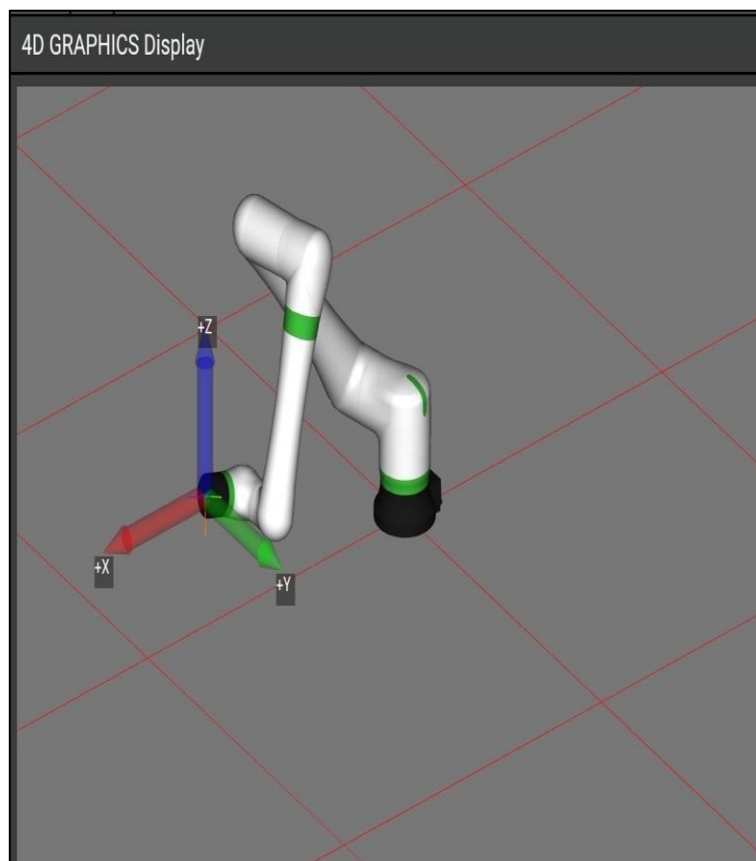
Figura 3.1.1. 1: Interfaccia utente.

La parte centrale dello schermo è occupata dalla rappresentazione grafica del robot in ambiente 3D, in cui è mostrato il manipolatore nella configurazione corrispondente a quella reale, e dall'interfaccia di programmazione, attraverso la quale è possibile definire i movimenti e le operazioni del "FANUC CRX-10iA/L".

Per una miglior visualizzazione della configurazione del robot è possibile accedere dal menu principale alla funzione "4D GRAPHICS Display", la quale ci permette di monitorare in tempo reale l'assetto del robot e di aggiungere informazioni quali ad esempio i sistemi di riferimento presenti; in Figura 3.1.1.2 viene mostrata la rappresentazione di quanto appena detto.

Riprendendo nella descrizione dell'interfaccia utente, il programma momentaneamente selezionato è mostrato sotto forma di una serie di istruzioni in sequenza, come evidenziato anche dalla barra dei tempi, rappresentate da dei blocchi operazionali. Esistono varie tipologie di blocchi, ogni diversa tipologia consente di inserire istruzioni per la realizzazione di specifici movimenti o operazioni. Dei blocchi in particolare e le loro funzionalità saranno descritti nel seguito della trattazione.

In fondo allo schermo è presente infine una seconda barra, la "Panel Display Bar", attraverso la quale è possibile accedere ai comandi che consentono l'avvio e l'arresto dei programmi, e all'interfaccia che consente la movimentazione del robot in fase di insegnamento.



*Figura 3.1.1. 2: Configurazione real time del robot.*

## 3.2 Programmazione

È possibile creare un nuovo programma selezionando “New” nella schermata “Select Program” del menù. Dopo l’inserimento del nome del programma in questione, è visualizzata la schermata già vista in Figura 3.1.1.1, dalla quale è possibile inserire e modificare le istruzioni contenute nel codice.

I blocchi presenti nella metà inferiore dello schermo sono contraddistinti da icone differenti a seconda dell’operazione a cui corrispondono e possono essere selezionati e trascinati nella sezione superiore, la “Program Line”. In Figura 3.2.1 viene mostrato l’insieme di blocchi operazionali disponibili.



Figura 3.2. 1: Blocchi di programmazione disponibili.

In questo modo si può definire una sequenza di istruzioni che costituisce la struttura fondamentale del programma. Una volta trascinato un blocco nella posizione prevista all’interno della sequenza, toccandone l’icona è possibile accedere ad una differente schermata, che consente di inserire i dati di input necessari alla specifica istruzione. Se un’istruzione richiede l’inserimento di una posizione, è possibile introdurre manualmente i valori numerici delle coordinate, o in alternativa registrare la posizione corrente del manipolatore attraverso il pulsante “Touch Up”. È possibile modificare l’ordine delle istruzioni in qualunque momento, semplicemente trascinando i blocchi e sistemandoli nella nuova sequenza desiderata. Le istruzioni possono anche essere del tutto cancellate, trascinando la relativa icona all’esterno della “Program Line”.

### 3.2.1 Contouring Function

La "Contouring Function", tra le opzioni di "Force Control", è stata la più utilizzata e permette di tracciare la superficie di un pezzo applicando una forza mirata.

Usata con un utensile come una smerigliatrice, questa funzione può eseguire la lucidatura e la rettifica. In generale, come mostrato in Figura 3.2.1.1, se il pezzo da lavorare è pesante o grande, il pezzo viene fissato su un tavolo e la smerigliatrice viene attaccata al robot. Se il pezzo da lavorare è piccolo rispetto a un utensile, quest'ultimo può essere fissato su un tavolo e il robot sostiene il pezzo. In entrambi i casi, l'operazione viene eseguita applicando una forza prestabilita.

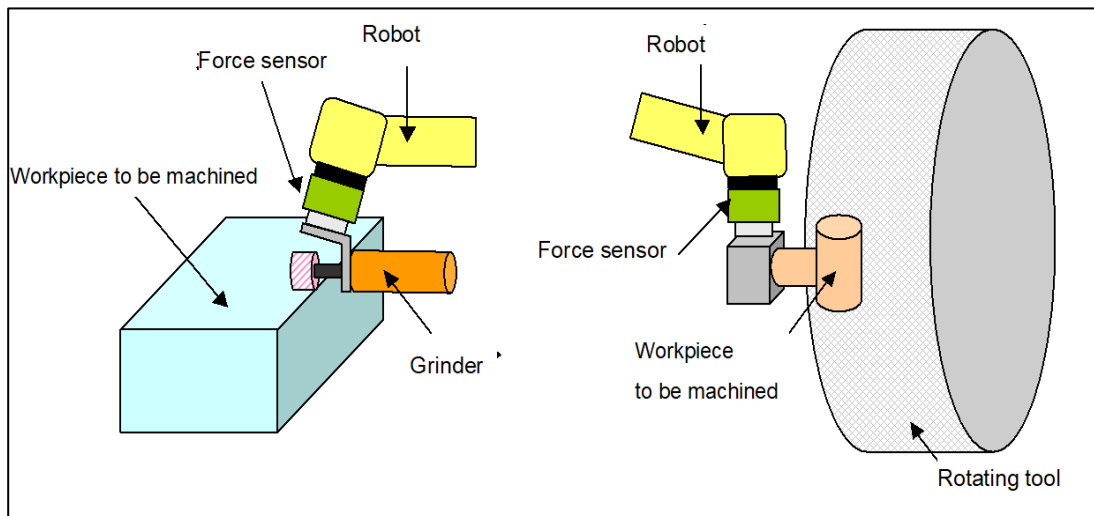


Figura 3.2.1. 1: Possibili configurazioni per la contornatura.

#### Teaching della funzione di contornatura

Quando si utilizza la funzione di contornatura, viene determinato un percorso approssimativo mediante l'apprendimento di punti, come riportato in Figura 3.2.1.2.

I punti da insegnare sono quelli di inizio e di fine della contornatura, quelli in cui la postura del robot cambia notevolmente o dove la direzione di marcia è invertita.

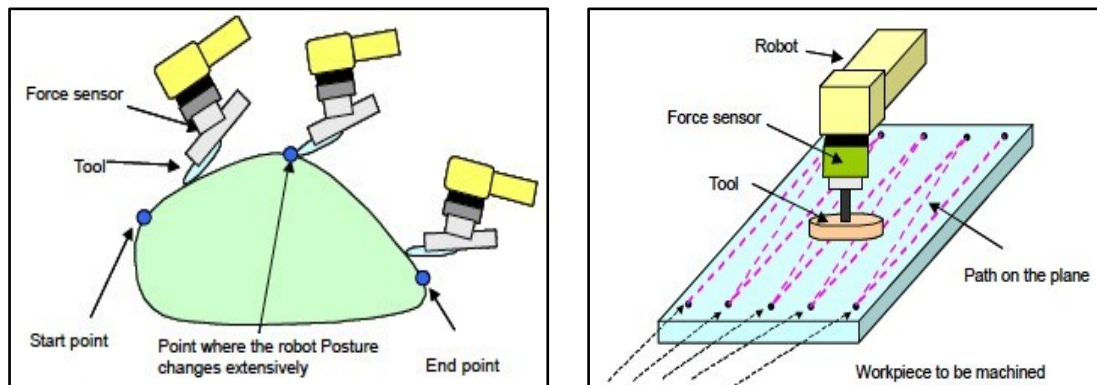


Figura 3.2.1. 2: Insegnamento dei punti con cambi notevoli di postura del robot (sinistra) e con cambio di direzione (destra).



Quando si insegnano i punti, vanno considerati altri due aspetti:

- sistema di riferimento da considerare durante la sagomatura;
- postura nei punti di apprendimento.

#### Sistema di riferimento da considerare durante la contornatura

- Se la direzione di spinta non cambia (ad esempio, quando si lucida il pezzo spingendolo nella stessa direzione di una smerigliatrice e di un tampone fissi), va selezionato come sistema di riferimento lo "User frame", come mostrato in Figura 3.2.1.3.

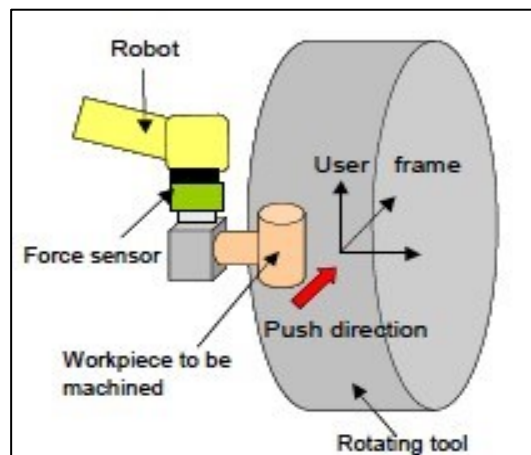


Figura 3.2.1. 3: Contornatura con direzione di spinta costante.

- Se la direzione di spinta cambia frequentemente durante l'operazione di contornatura, va selezionato il sistema di riferimento "Tool frame", facendo in modo che uno degli assi X, Y o Z del sistema corrisponda alla direzione di spinta, come riportato in Figura 3.2.1.4.

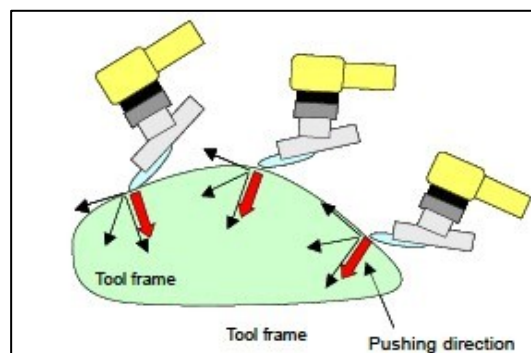


Figura 3.2.1. 4: Contornatura con direzione di spinta variabile.

#### Postura nei punti di apprendimento

Nella lucidatura o nella rettifica, è importante che l'utensile e il pezzo in lavorazione vengano a contatto con la stessa postura.

Nell'esempio riportato in Figura 3.2.1.5 è buona norma istruire il robot affinché  $\theta_1$  e  $\theta_2$  coincidano quando possibile.

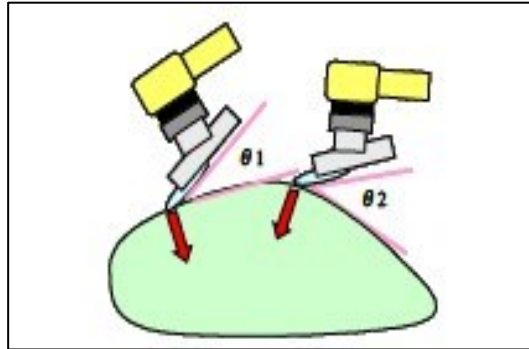


Figura 3.2.1. 5: Postura del robot nel punto di apprendimento.

Se un pezzo ha forme complicate, è necessario impostare molti punti. Per migliorare le prestazioni della funzione di contornatura, tutti i punti devono essere impostati nel modo più preciso possibile.

In Figura 3.2.1.6 sono riportati degli esempi per una corretta acquisizione dei punti.

Per ridurre il tempo e lo sforzo di apprendimento dei punti, è disponibile una funzione che imposta i punti in modo preciso e automatico, tracciando lentamente la superficie del pezzo con meno punti di apprendimento.

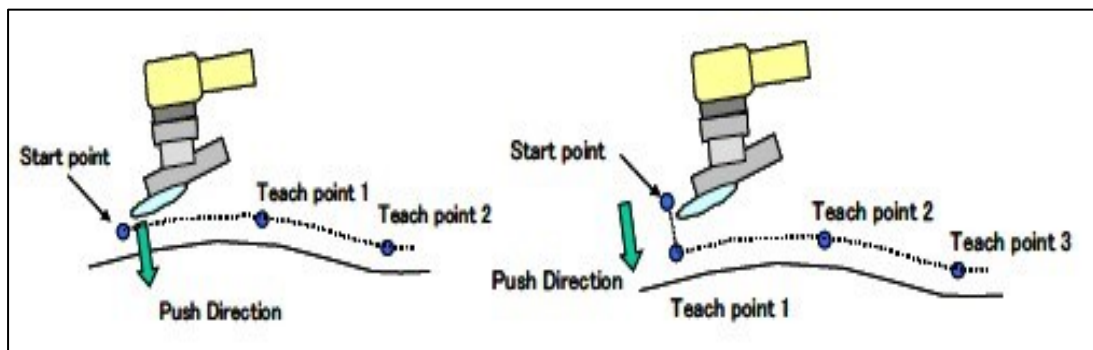


Figura 3.2.1. 6: Esempio di una buona (sinistra) ed una cattiva (destra) acquisizione di punti.

Nota dunque la teoria alla base della “Contouring Function”, passiamo alla definizione in termini di programmazione di quest’ultima.

La funzione come evidenziato si trova all’interno del blocco di programmazione “Force Control”, e si compone di due funzioni:

- “Force Contouring start”;
- “Force Contouring end”.

Come suggerito dal nome stesso, definiscono il punto di partenza ed il punto di arrivo.

Per quanto riguarda la funzione “Force Contouring Start”, come mostrato in Figura 3.2.1.7, è necessario definire inizialmente le impostazioni relative al sensore utilizzato, definendo dunque se quello che si andrà ad utilizzare è il sensore di forza integrato o se verrà utilizzato un sensore di forza esterno. Successivamente viene registrato il punto di partenza, la direzione e l’intensità con cui deve essere applicata la forza, specificando il sistema e l’asse a cui si fa riferimento.

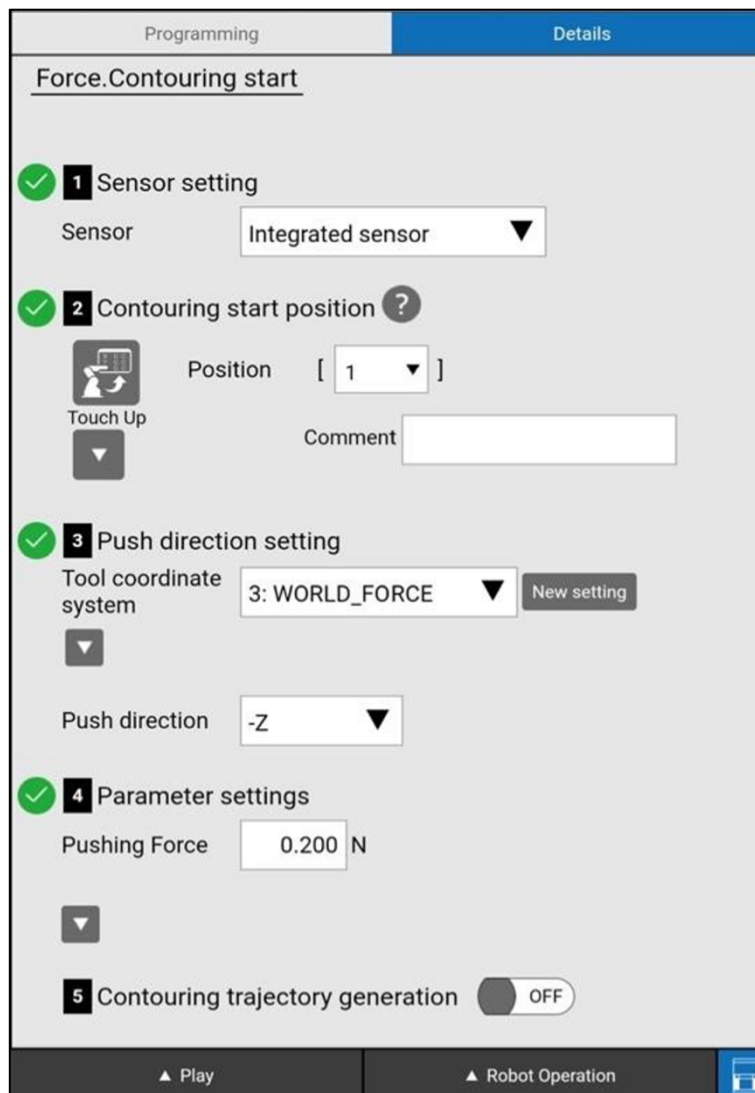


Figura 3.2.1. 7: Force Contouring Start.

Relativamente alla funzione “Force Contouring End”, riportata in Figura 3.2.1.8, questa richiede esclusivamente la definizione del punto finale, il quale può essere insegnato attraverso le coordinate o registrato in seguito alla movimentazione manuale del robot.

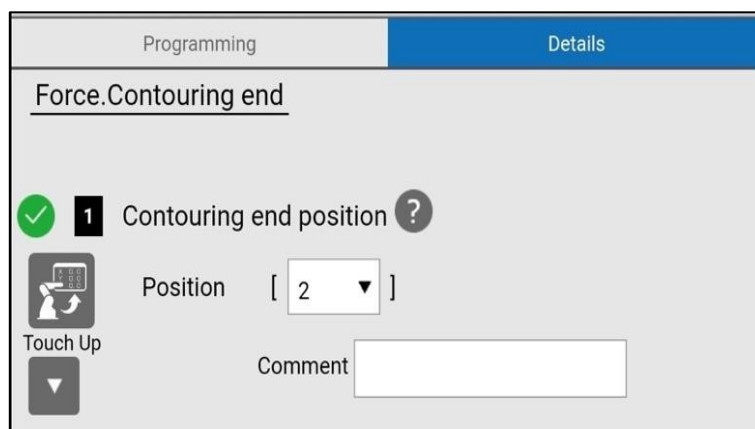


Figura 3.2.1. 8: Force Contouring End.

# Capitolo 4

## Lavorazioni

Diverse tipologie di lavorazioni sono state svolte in modo da raccogliere più dati in diverse condizioni di esercizio, set-up e punte dello strumento installato sulla flangia del robot. In questo capitolo si riportano le lavorazioni effettuate con la penna levigatrice “PARKSIDE 160 B2”, montata sulla flangia del robot tramite un supporto realizzato con stampa 3D e i corrispettivi dati raccolti: lucidatura di una piastra di alluminio e levigatura di una tavoletta in legno.

### 4.1 Lavorazioni con penna levigatrice PARKSIDE

Tramite un supporto realizzato con stampa in resina è stato possibile adattare un utensile manuale come la penna levigatrice PARKSIDE alla flangia del robot.

I primi sforzi si sono concentrati sulla lucidatura di una piastra di alluminio di dimensione 18 x 8.5 x 0.3 cm, per poi effettuare lavorazioni di levigatura di tavolette in legno di dimensione 25 x 13 x 2.7 cm.

#### 4.1.1 Lucidatura alluminio

L’obiettivo è quello di ottenere un risultato apprezzabile di lucidatura di una piastra di alluminio di dimensione 18 x 8.5 x 0.3 cm, riportata in Figura 4.1.1.1.



*Figura 4.1.1. 1: Piastra di alluminio di dimensione 18 x 8.5 x 0.3 cm.*

Sono state eseguite diverse prove raccogliendo dati sia attraverso la sensoristica integrata, sia con sensore esterno “FS-15iA” FANUC, installato sul polso del robot.

Per fare in modo che il robot esegua la lucidatura dell’intero pezzo, è stata definita una traiettoria che prevede un percorso definito solo inizialmente, per poi attuare un incremento

delle coordinate dei punti iniziali e poi ripetere l'operazione con un ciclo for fino ad arrivare al punto finale della piastra.

Il programma realizzato a blocchi è mostrato in Figura 4.1.1.2, ottenuto dallo script in linguaggio di programmazione "Karel" riportato in Figura 4.1.1.3.

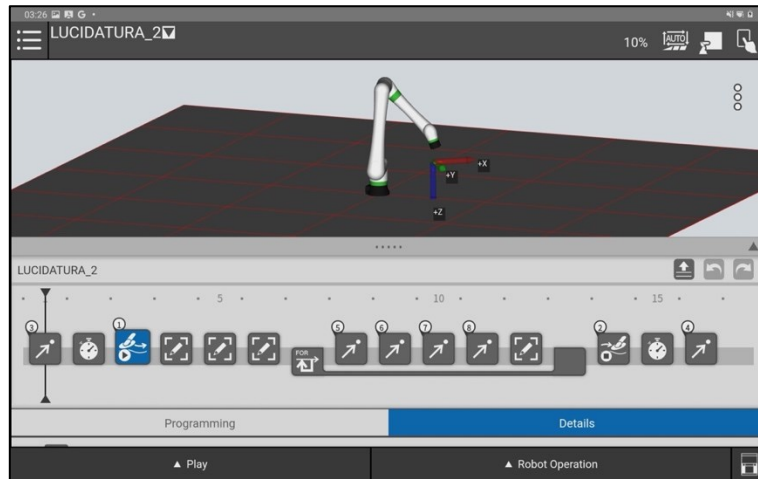


Figura 4.1.1. 2: Programma a blocchi per l'operazione di lucidatura.

```
LUCIDATURA_2  
  
1/17  
1:L P[3] 20mm/sec FINE  
2: WAIT 1.00(sec)  
3: CALL -INST_CNTRSTART(P[1],2,1,5,  
: 4,5,1,1,5,50,1,2,0,'Prova022824',  
: 1.5,3,0,10,0)  
4:  
5:  
6:  
7: FOR R[19]=1 TO 13  
8:L P[5:pY] 1mm/sec FINE INC  
9:L P[6:pX] 1mm/sec FINE INC  
10:L P[7:nY] 1mm/sec FINE INC  
11:L P[8:pX] 1mm/sec FINE INC  
12:  
13: ENDFOR  
14: CALL -INST_CNTREND(P[2])  
15: WAIT .10(sec)  
16:L P[4] 5mm/sec FINE  
[End]
```

Figura 4.1.1. 3: Script in "Karel" per l'operazione di lucidatura.

Mentre la traiettoria da seguire è rimasta fissa per le diverse prove, sono stati fatti variare altri parametri, ovvero la forza di spinta, la velocità di avanzamento dell'utensile, l'opzione per selezionare quando applicare il controllo "before contact" oppure "after contact" e il valore di "Force Control Gain", questo parametro permette, se aumentato, di seguire meglio

il valore di forza desiderato durante la lavorazione, aumentando però lo sforzo di controllo, se diminuito, invece, otteniamo l'effetto opposto, quindi diverse prove sono state eseguite per definire un ottimo che corrisponde a 2 Hz.

In Figura 4.1.1.4 è mostrato un esempio di settaggio dei parametri della funzione di "Force Contouring".

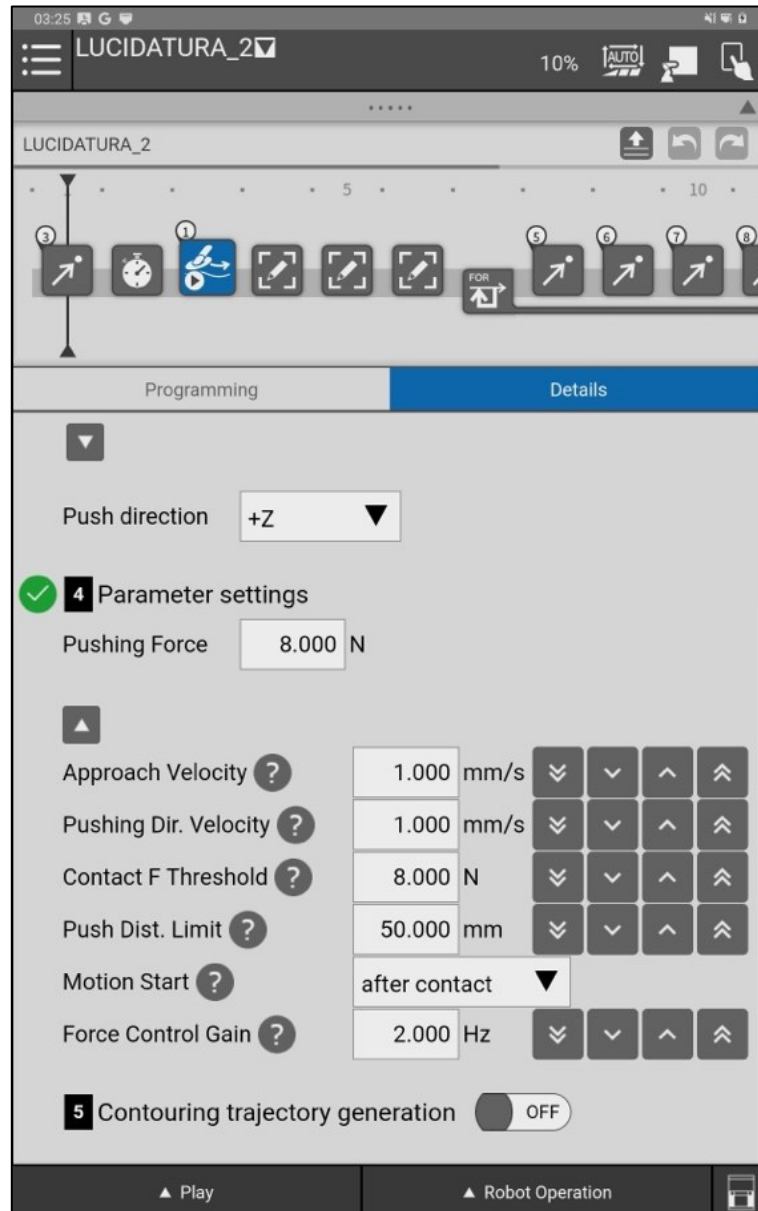


Figura 4.1.1. 4: Parametri della funzione di Force Contouring.

Attraverso una pen-drive collegata al controllore è possibile salvare dei file in formato ".dt" che contengono il database strutturato con i dati registrati dai sensori di forza esterno o integrato a seconda della selezione.

In Figura 4.1.1.5 è riportato un esempio di database convertito poi in formato ".xlsm" per facilitare l'analisi dei dati e l'estrazione dei grafici.

Inserisci funzione	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Time	01/03/24	12:53:06											
2	Program name	LUCIDATURA												
3	Schedule	910												
4	ForceCommand	2												
5	Appl_type	10												
6	Sens_type	1												
7	Push_dir	3												
8	Master_gain	0,01												
9	Approach_vel	1												
10	Cjt_force	2												
11	Uframe_num	0												
12	Uframe	0	0	0	0	0	0							
13	Utool_num	5												
14	Utool	-55,245	-54	106,119	12,961	-16,789	0							
15	Alarm_num	0	0	0	0	0								
16	Ins_depth	0,026												
17	Working_time	184,64												
18	Orient_chg	0												
19	Mean_end_force	-7,814	0,73	-18,398	0,175	2,063	-0,021							
20	Min_force	-12,233	-1,89	-26,009	-0,016	-0,011	-0,266							
21	Max_force	0,11	3,001	0,474	0,157	2,918	0,24							
22	*****													
23	Point_num	11540												
24	-----													
Gtime	Time	Fx[N]	Fy[N]	Fz[N]	Mx[Nm]	My[Nm]	Mz[Nm]	Px[m]	Py[m]	Pz[m]	Rx[rad]	Ry[rad]	Rz[rad]	
26	1452c3	0,008	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	3,60E-15	-7,89E-16	-7,81E-09
27	1452cb	0,024	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-5,57E-08	3,87E-08	9,64E-09
28	1452d3	0,04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-9,88E-09	-1,58E-09	8,23E-09
29	1452db	0,056	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-4,92E-08	1,55E-08	9,17E-09
30	1,45E+06	0,072	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-1,30E-08	-4,52E-09	2,14E-09
31	1452eb	0,088	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-4,78E-08	3,80E-08	3,20E-08
32	1452f3	0,104	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-4,05E-08	1,20E-08	-1,49E-09
33	1452fb	0,12	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-7,32E-09	3,42E-08	2,02E-09
34	145303	0,136	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	2,63E-08	-1,92E-08	7,77E-09
35	14530b	0,152	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-2,53E-08	5,07E-08	-3,57E-08
36	145313	0,168	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,80E-02	-5,08E-08	8,63E-09	2,29E-08
37	14531b	0,184	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,79E-02	-1,27E-08	3,40E-08	-3,27E-08
38	145323	0,2	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,79E-02	-1,55E-08	-5,21E-09	8,70E-09
39	14532b	0,216	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,08E-01	-3,99E-02	3,79E-02	-3,12E-08	9,91E-09	7,70E-09

Figura 4.1.1. 5: Database estratto e convertito in formato “.xslm”.

I dati sono stati successivamente importati in ambiente “Matlab”, dove sono stati ottenuti i grafici, evidenziando la linea di tendenza con riferimento al valore desiderato della forza Fz [N].

In Figura 4.1.1.6 si riportano i grafici delle seguenti prove:

- **Prova 1:**  
è stato impostato il sensore integrato, con forza di 2N, “Force Control Gain” pari a 0.01 Hz e velocità di avanzamento di 25 mm/s, velocità della penna levigatrice impostata su “Max” e direzione di spinta verso il basso.
- **Prova 2:**  
stesso set-up della prova precedente, ma è stato selezionato il sensore esterno.
- **Prova 3:**  
è stato portato il “Force Control Gain” al valore di 1 Hz.
- **Prova 4:**  
è stato impostato il “Force Control Gain” a 2 Hz.
- **Prova 5:**  
in questa prova è stata abbassata a 1 mm/s la velocità di avanzamento, mantenendo il guadagno a 2 Hz e forza di 2N.

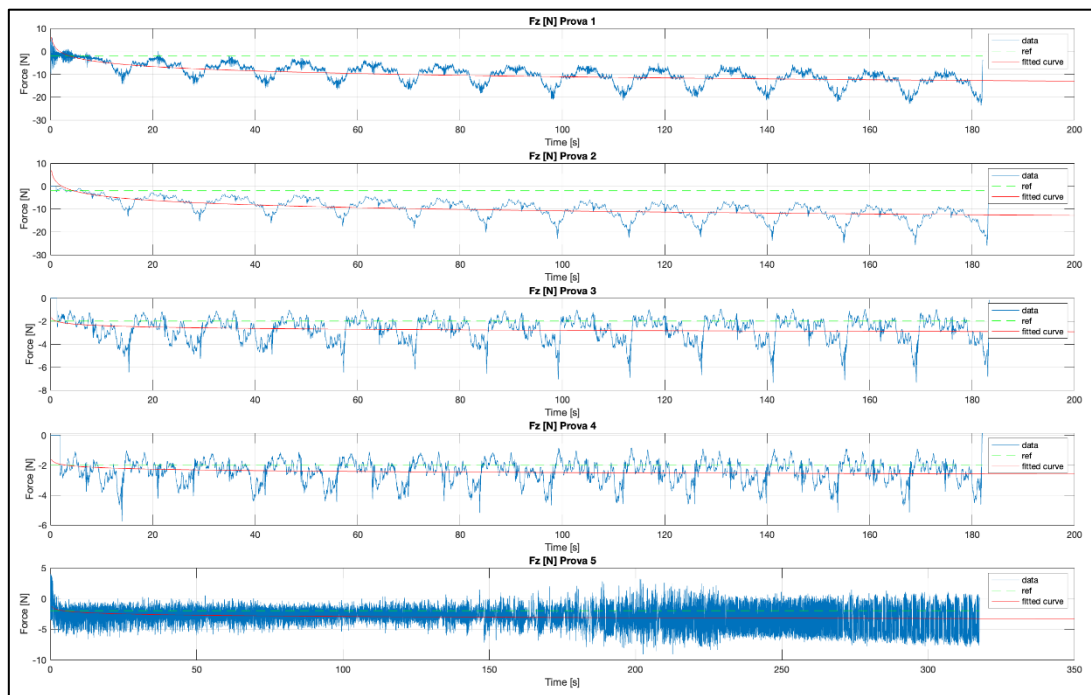


Figura 4.1.1. 6: Grafici della forza  $F_z$  [N] delle prove di lucidatura.

Aumentando quindi il “Force Control Gain” il grafico migliora il suo comportamento nel rimanere nell’intorno del valore desiderato.

Sebbene il livello di qualità della lucidatura ottenuta nei primi tratti sia promettente, l’eccessiva usura della punta dell’utensile non permette di effettuare l’operazione in modo efficiente per tutta la piastra.

È comunque possibile utilizzare la penna levigatrice per lucidare piccole componenti, ma è sicuramente impensabile di poter ottenere dei pezzi lucidati in modo ottimale, se questi sono di grandi dimensioni, immaginando un’operazione a livello industriale con questo strumento. Tuttavia, i dati raccolti e il programma realizzato per eseguire la lavorazione sono degli strumenti importanti sia come base di partenza per prove future utilizzando diverse tipologie di utensile, sia per definire quali siano certi limiti della strumentazione.

Inoltre, osservando soprattutto l’ultimo grafico, notiamo come l’andamento presenti forti oscillazioni che denotano la presenza di disturbi che possono essere collegati alle vibrazioni dello strumento e alla cedevolezza del supporto in resina.

#### 4.1.2 Levigatura tavoletta di legno

Sono state eseguite ulteriori prove posizionando la tavoletta di legno da lavorare in due configurazioni: una orizzontale e una inclinata.

Nella prima prova è stato realizzato un programma dove semplicemente si segue il profilo della tavoletta disposta orizzontalmente, come mostrato in Figura 4.1.2.1, con una velocità di avanzamento di 5mm/s e una forza di spinta di 1 N in direzione verticale.





Figura 4.1.2. 1: Disposizione orizzontale della tavoletta di legno.

In Figura 4.1.2.2 è riportato il comportamento di  $F_z$  [N] con tavoletta orizzontale.

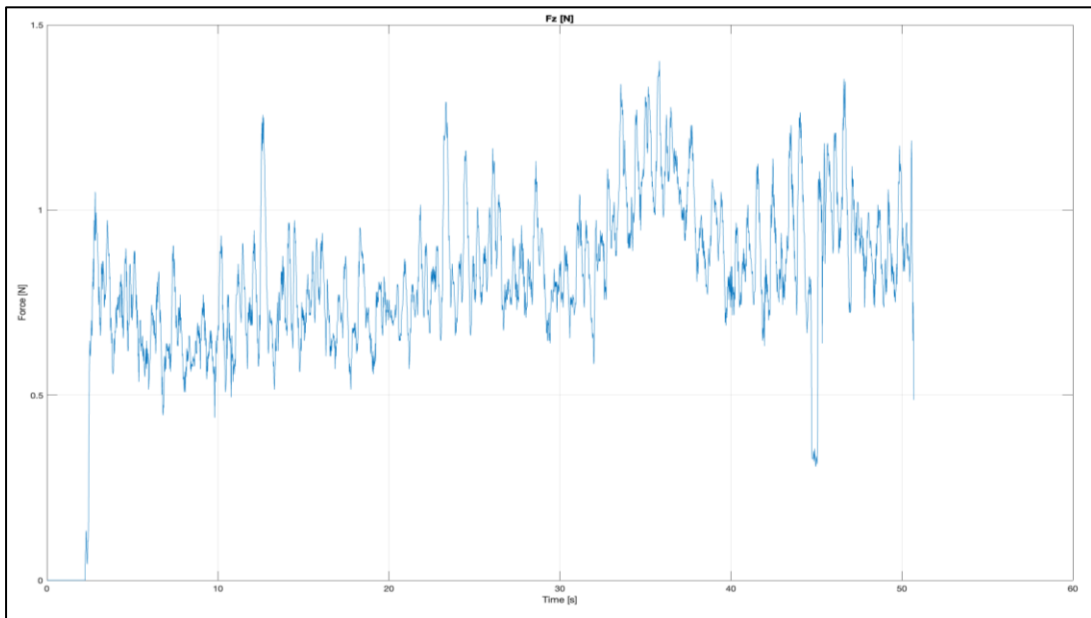


Figura 4.1.2. 2: Grafico di  $F_z$  [N] con tavoletta orizzontale.

Nella prova in cui la tavoletta è orientata con il lato inclinato, come mostrato in Figura 4.1.2.3, l'obiettivo è quello di verificare che il sistema inseguia il valore di forza desiderato in diverse condizioni, come in questo caso dove la direzione di avanzamento è indicata dalla freccia rossa.

Nel programma realizzato, il valore della velocità di avanzamento è rimasto di 5 mm/s, mentre il valore della forza di spinta è di 0.5N in direzione verticale.



Figura 4.1.2. 3: Disposizione con lato obliquo della tavoletta.

In Figura 4.1.2.4 è riportato il comportamento di  $F_z$  [N] con tavoletta inclinata.

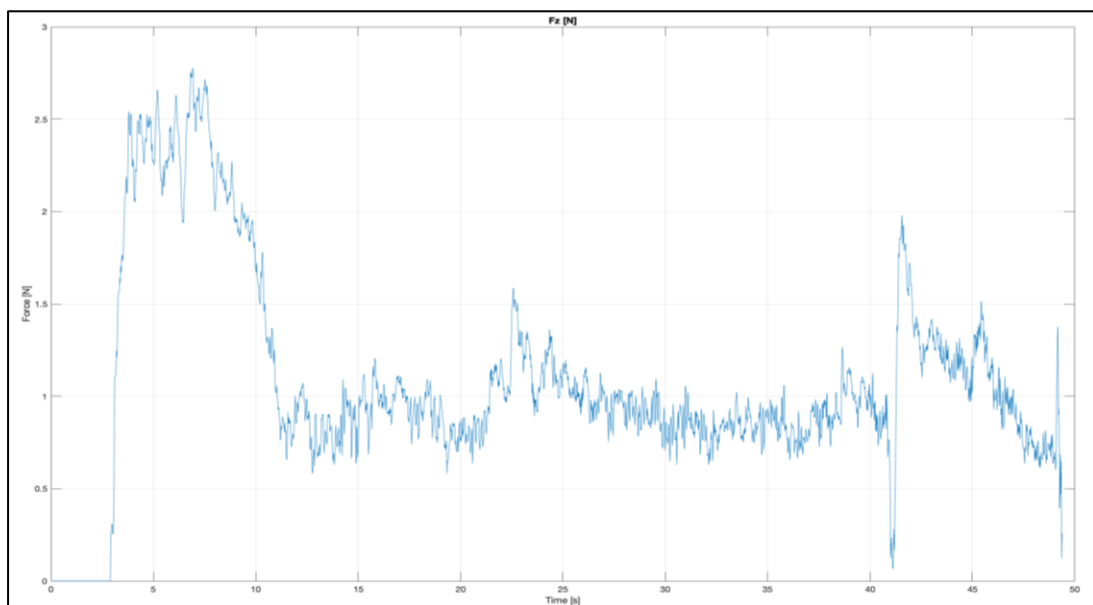


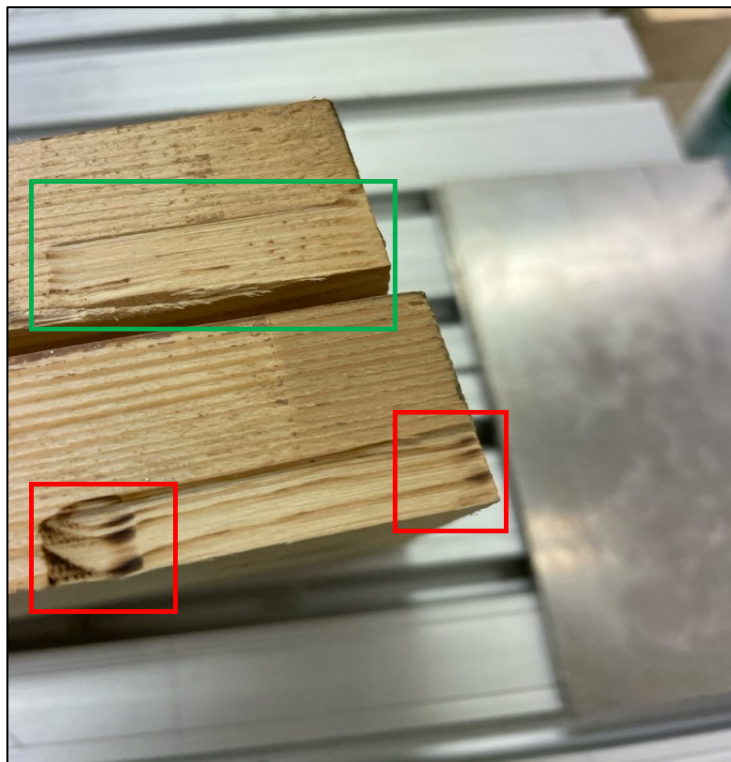
Figura 4.1.2. 4: Grafico di  $F_z$ [N] con tavoletta con lato obliquo.

Nel caso della tavoletta inclinata il grafico si assesta dopo un certo transitorio, in quanto trova maggiore resistenza rispetto al caso con tavoletta posizionata orizzontalmente, per poi inseguire il profilo del pezzo.

Pertanto, quello che è stato introdotto con la spiegazione della “Force Contouring Function”, è stato dimostrato con questo esperimento, che permette di fare la seguente considerazione, ovvero che possono essere realizzati programmi per lavorazioni meccaniche anche con profili complessi, dove il robot è in grado di adattarsi alla geometria del pezzo.

Infine, si riportano anche le differenze tra controllo di posizione e controllo di forza, con la tavoletta disposta orizzontalmente in entrambi i casi.

Nel primo caso sono state definite solo le coordinate dei punti iniziale e finale, mentre nel secondo anche il valore di forza in direzione perpendicolare al pezzo, i risultati sono mostrati in Figura 4.1.2.5.



*Figura 4.1.2. 5: Risultato della lavorazione con controllo in forza (in alto) e risultato della lavorazione con controllo di posizione (in basso).*

Rispetto al solo controllo di posizione (in basso), con il controllo in forza si ottiene un risultato più apprezzabile (in alto in verde), in quanto il robot si adatta alle imperfezioni e al posizionamento del pezzo, mentre nel caso di solo controllo di posizione raggiunge il punto finale indipendentemente dall'inclinazione e dalle caratteristiche del pezzo, andando a bruciare la tavoletta in alcuni punti (in rosso) e usurare eccessivamente la punta dell'utensile o addirittura rischiare il danneggiamento, occorre quindi una maggiore attenzione durante la programmazione del robot.

# Capitolo 5

## Ottimizzazione topologica del supporto e riduzione delle vibrazioni

Le forti oscillazioni evidenziate dai grafici hanno portato alla luce un problema legato alle possibili vibrazioni. Il lavoro riportato in questo capitolo presenta una ricerca svolta nel campo dell'ottimizzazione delle lavorazioni meccaniche in ambito della robotizzazione dei processi produttivi. Nello specifico riguarda il problema delle vibrazioni che non permettono il corretto inseguimento del comportamento desiderato da parte del robot in quanto, tramite supporto realizzato in resina con stampa 3D, era stato già precedentemente detto che è stato adattato un utensile manuale alla flangia del robot, non pensato quindi per essere utilizzato in un contesto di processo automatizzato. Si propone quindi una procedura di analisi per una progettazione volta a ottimizzare sia il comportamento della macchina, che a mantenere un costo contenuto di materiale per la realizzazione del componente.

Nei processi di lavorazione, garantire la qualità di un prodotto finito è di fondamentale importanza. Esiste quindi una necessità di monitorare l'ambiente di produzione, in modo da evitare anomalie. Una corretta implementazione di tecniche avanzate di monitoraggio del processo, abbinata a un sistema intelligente di supporto al processo decisionale, può ridurre il tempo necessario evitando di riprendere componenti con difetti ed eseguire altrimenti delle operazioni aggiuntive di rettifica.

Nel nostro caso le vibrazioni principali sono dovute dalla presenza della penna levigatrice destinata ad un utilizzo manuale, che è stata installata sulla flangia di un robot seriale tramite supporto non ottimizzato realizzato in stampa 3D.

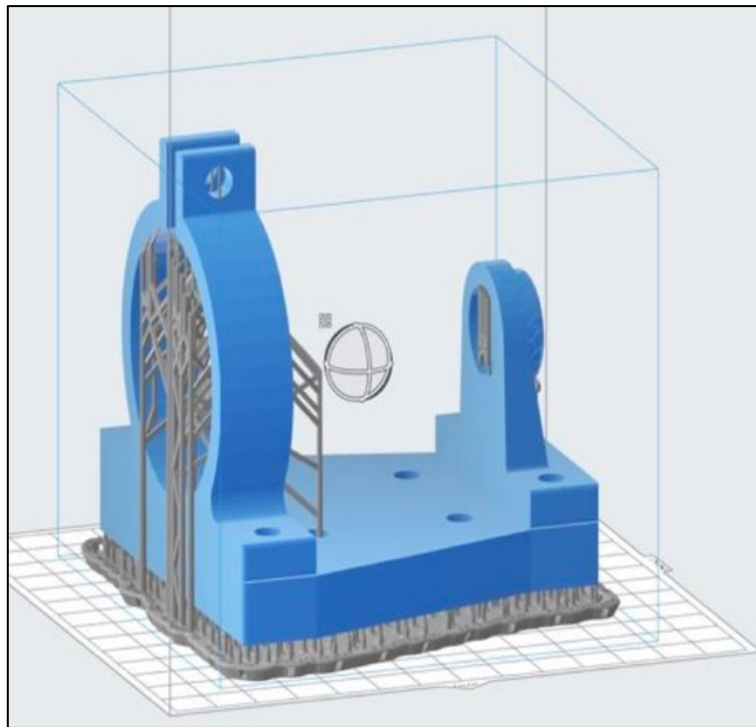
Per programmare il robot il programma viene costruito utilizzando dei blocchi che permettono di eseguire specifiche operazioni, come il blocco di "Force Contouring", il quale permette di eseguire un controllo di forza in direzione di uno degli assi, mentre si ha un controllo di posizione nelle altre direzioni. Con l'accensione dell'utensile si vengono a generare delle vibrazioni abbastanza forti da compromettere la lettura della forza tramite sensore esterno montato sul polso del robot, come conseguenza si ha una perdita sia di precisione che di controllo soprattutto se viene impostato un valore della forza di spinta basso, necessario in operazioni dove è richiesta una pressione tra utensile e pezzo molto piccola.

Quindi è stato analizzato il comportamento del supporto dell'utensile tramite simulazione con software specifici per una sua ottimizzazione ed infine viene messo a confronto il dato ottenuto con il nuovo pezzo, con quello ottenuto con la versione precedente.

### 5.1 Test con penna levigatrice e supporto realizzato con stampa 3D

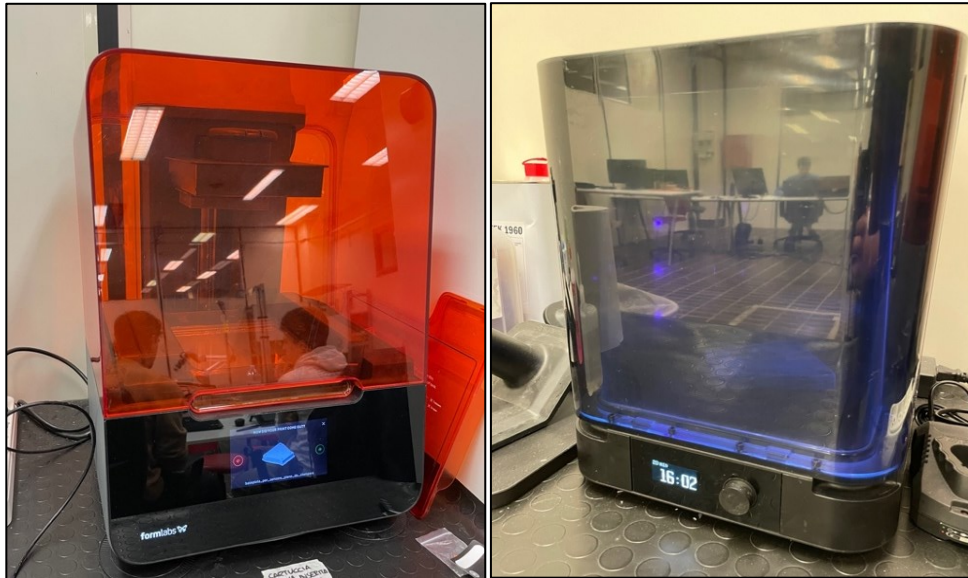
Come già accennato, la penna levigatrice è stata fissata al sensore di forza, montato sulla flangia del robot, tramite un supporto realizzato con tecnica di stampa 3D di tipo SLA, dove il materiale è resina dura caratterizzata da un modulo elastico pari a 2.7 GPa secondo l'articolo

**“SLA 3D Printing Materials Compared”**, pubblicato da “Dassault Systèmes” che riporta: “La resina dura viene utilizzata per applicazioni caratterizzate da elevati livelli di stress e carichi applicati. Da questo punto di vista, è simile all’ABS. Infatti, parti in resina dura stampate tramite SLA presentano una resistenza a trazione pari a 55.7 MPa ed un modulo elastico pari a 2.7 GPa, entrambi simili al materiale ABS. Inoltre, le resine dure sono infrangibili, il che le rende ideali per applicazioni come prototipi robusti o involucri con giunti snap-fit.”. In Figura 5.1.1 è riportato il modello per la stampa dell’intero supporto.



*Figura 5.1. 1: Modello per la stampa del supporto.*

In Figura 5.1.2 a sinistra è riportata la stampante utilizzata, dove il pezzo, quando pronto, viene rimosso, si asportano i supporti e i residui in eccesso e successivamente avviene l’immersione in un contenitore di alcool isopropilico (IPA) al 90% per alcuni minuti, infine viene posizionato all’interno di una lampada UV con temperature non troppo elevate per indurire il componente, anch’essa mostrata in Figura 5.1.2 a destra.



*Figura 5.1. 2: Stampante di tipo SLA di "Formlabs" (sinistra) e forno con lampada UV (destra).*

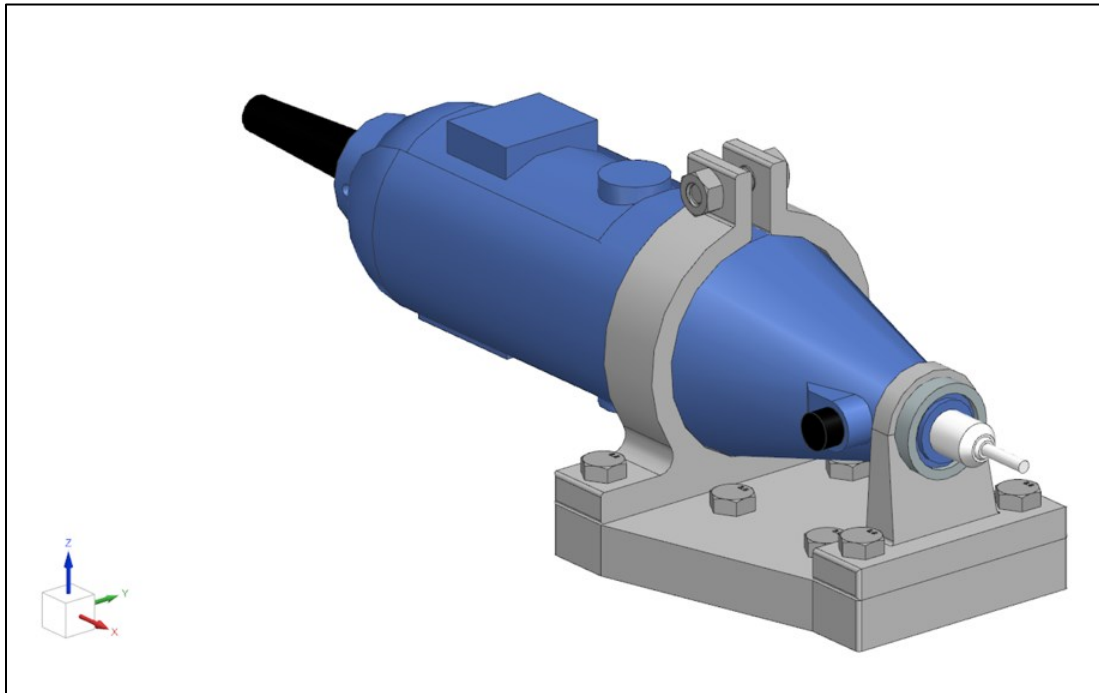
Successivamente è stata eseguita una prova di lucidatura, mostrata in Figura 5.1.3, con l'utensile installato grazie al supporto precedentemente realizzato, l'operazione è stata eseguita con una spinta in direzione verticale di 5N, velocità dell'utensile impostata su 5 e velocità di avanzamento di 1 mm/s e sono stati raccolti i dati.



*Figura 5.1. 3: Operazione di lucidatura effettuata dal robot con l'utensile installato.*

## 5.2 Analisi in ambiente ANSYS Workbench e ottimizzazione del supporto

Nel software “NX” di SIEMENS è stato realizzato il CAD della penna levigatrice agganciata al supporto come mostrato in Figura 5.2.1.



*Figura 5.2. 1: CAD della penna levigatrice e del supporto.*

Questo CAD è stato esportato in formato “STEP”.

Il formato “STEP” permette una corretta importazione in ambiente “ANSYS Workbench”, che è una piattaforma che consente di integrare i dati di simulazioni ingegneristiche per creare modelli più accurati in modo efficiente e semplifica le scelte progettuali coordinando tutti i dati di simulazione in un unico posto.

In ambiente “ANSYS Workbench” è possibile effettuare diverse tipologie di analisi come la “Modal”, che permette di individuare i modi propri di vibrare dell’oggetto e le rispettive forme modali.

Scegliendo l’analisi, modale per esempio, e importando il file “STEP”, si ottiene il blocco mostrato in Figura 5.2.2.

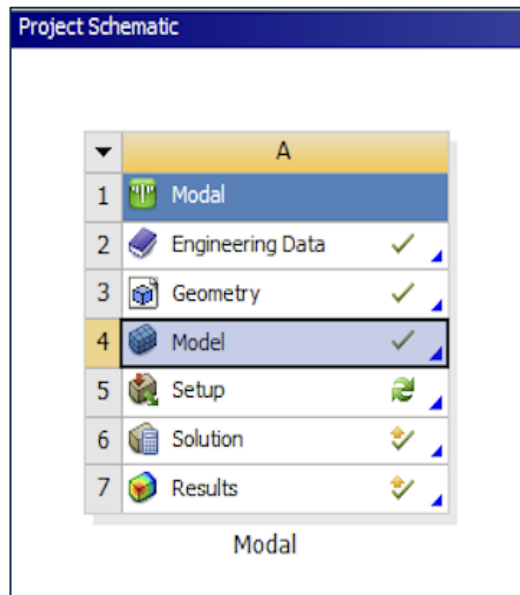


Figura 5.2. 2: Blocco dell'analisi modale in "Ansys Workbench".

Cliccando su "Model" si apre la finestra riportata in Figura 5.2.3, dove è possibile escludere elementi che non ci interessano come la bullonatura, modellare vincoli, assegnare materiali e nel nostro caso impostare la velocità di rotazione dell'utensile in rad/s, come mostrato in Figura 5.2.4.

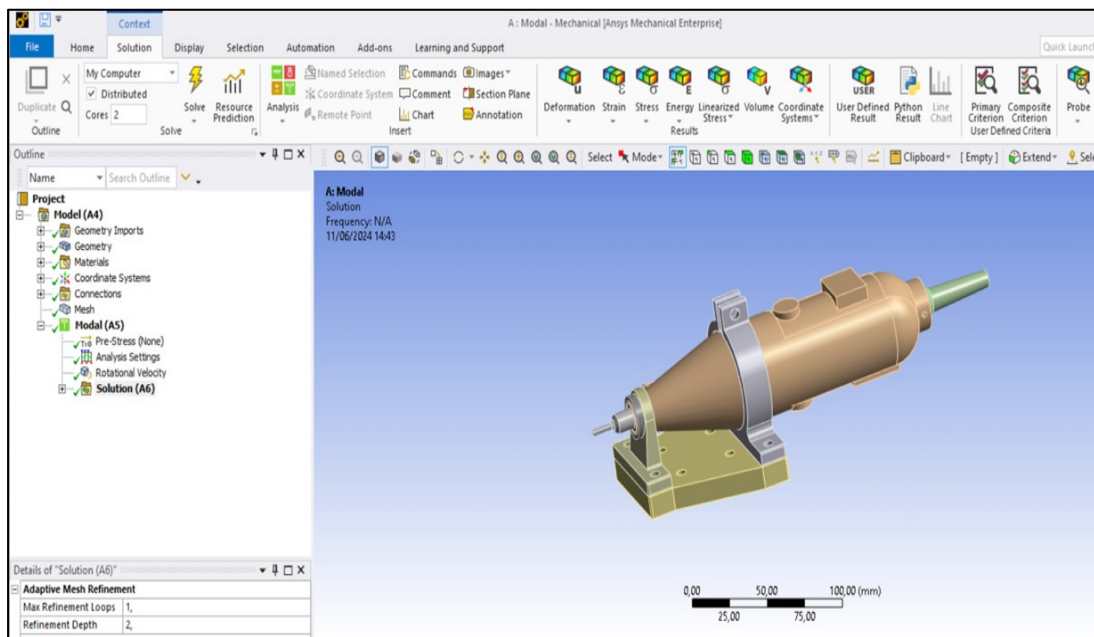


Figura 5.2. 3: Ansys Mechanical Enterprise.



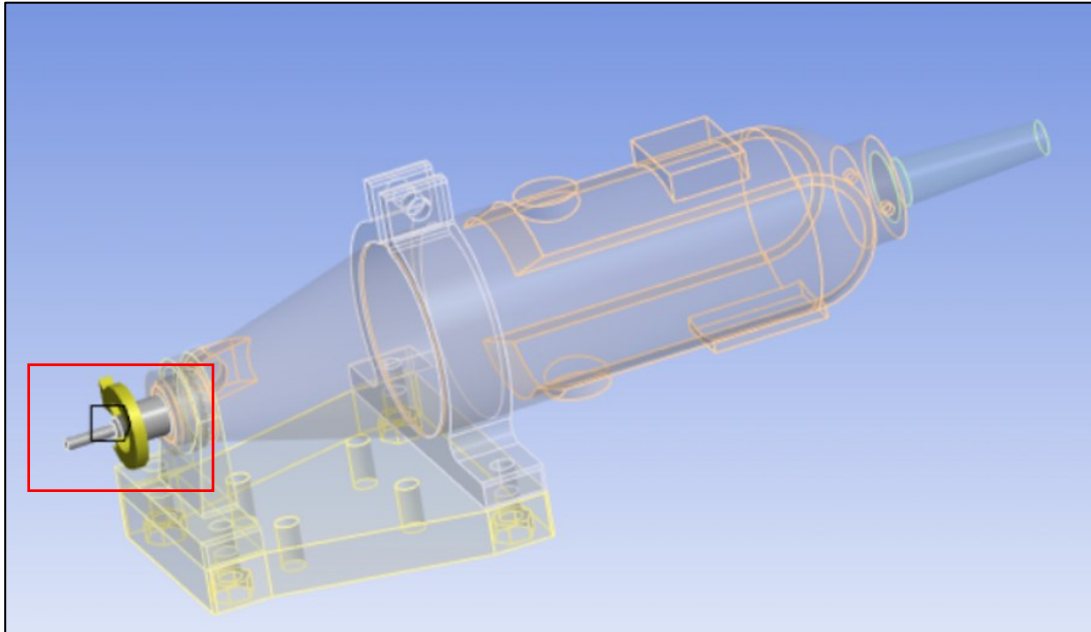


Figura 5.2. 4: Impostazione della velocità di rotazione dell'utensile (in rosso).

Eseguendo varie analisi possiamo quindi valutare il comportamento del sistema e delle singole componenti, individuando per esempio gli elementi più critici.

Dai risultati è emerso che l'elemento più sollecitato è la base del supporto come si evince dalle frecce in Figura 5.2.5 che individuano i punti critici in termini di vibrazioni.

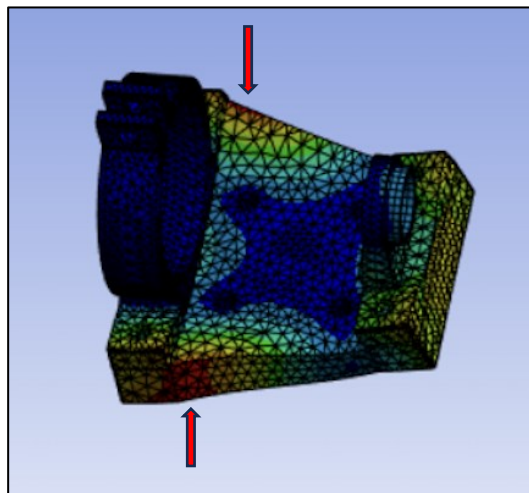


Figura 5.2. 5: Risultati dell'analisi modale del supporto.

Pertanto, si rivolge particolare attenzione alla base in quanto è l'elemento principale su cui effettuare l'ottimizzazione.

Il CAD del supporto è stato ripreso ed è stata selezionata solo la base, andando a modificare l'elemento in modo da avere il completo riempimento del pezzo rispetto alle sue due versioni precedenti come mostrato in Figura 5.2.6, questo per poter valutare successivamente con maggiore precisione dove è possibile asportare materiale nella base senza comprometterne le prestazioni, per poi esportare nuovamente il file in formato "STEP".

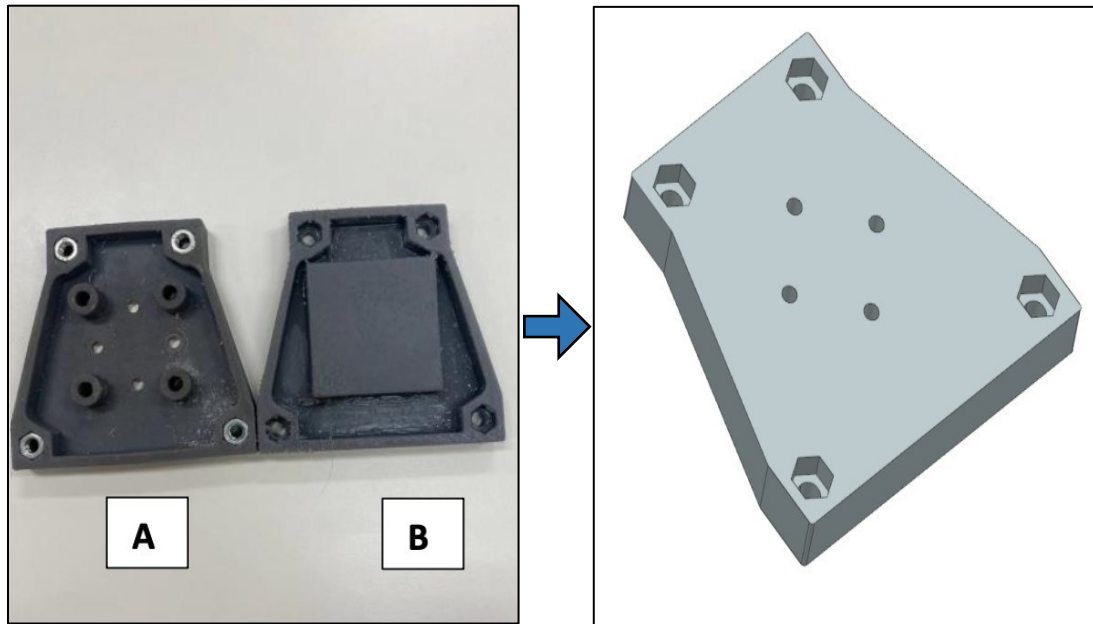


Figura 5.2. 6: Modello CAD della base del supporto pieno (destra) ottenuto a partire dalle versioni precedenti del pezzo A e B (sinistra).

In ambiente “Ansys Workbench” sono stati creati i blocchi per effettuare le analisi “Static Structural”, che permette di simulare il comportamento del componente in determinate condizioni di carico, e di nuovo la “Modal”.

I risultati di entrambe le analisi costituiscono il setup per l’ottimizzazione topologica “Structural Optimization” come mostrato in Figura 5.2.7.

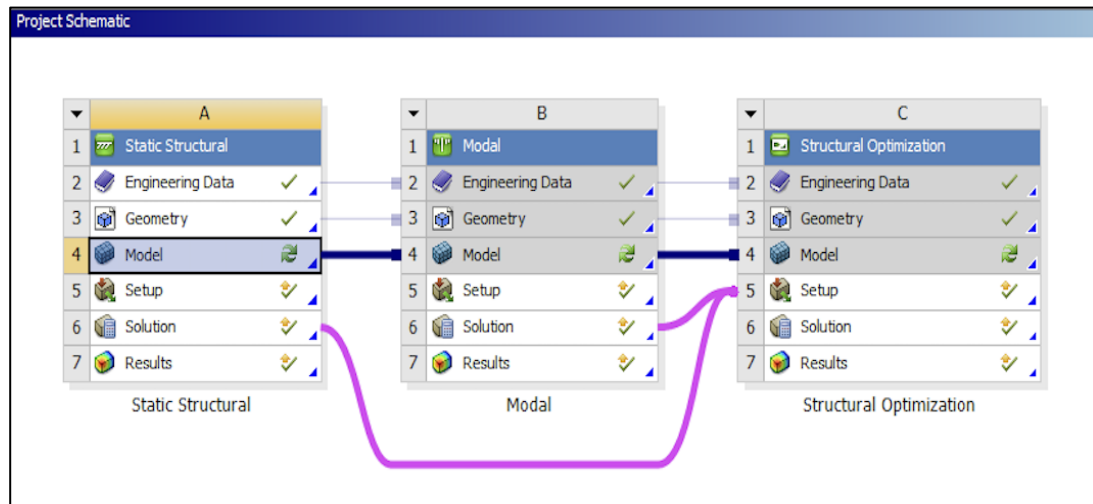


Figura 5.2. 7: Sequenza dei blocchi per le analisi in ambiente “ANSYS Workbench”.

Quindi una volta modellati i vincoli e i carichi, come il peso dell’end effector di 1.240 kg e la velocità di rotazione dell’utensile in rad/s, sono state eseguite le varie analisi fino ad ottenere l’ottimizzazione topologica in Figura 5.2.8.

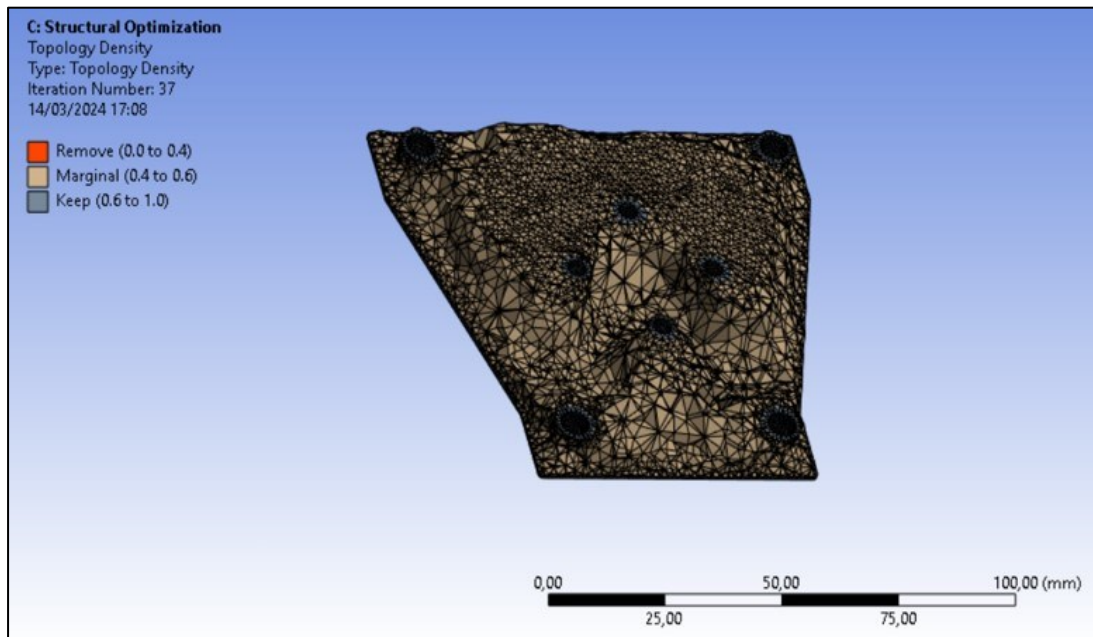


Figura 5.2. 8: Primo risultato di ottimizzazione topologica ottenuto.

Il software è quindi in grado di fornire come risultato una geometria ottimizzata, sulla quale è possibile lavorare per ottenere il componente da realizzare con la minima quantità di materiale necessaria a permettere di essere idoneo al compito per cui è stato concepito, con la possibilità anche di impostare ulteriori condizioni, come per esempio definire una soglia di quanto materiale conservare, inoltre possono essere effettuate ulteriori analisi per validare il risultato ottenuto, eseguendole sul pezzo ottimizzato, come per esempio la risposta in frequenza “Harmonic Response”. Tutto questo ha portato al risultato finale riportato in Figura 5.2.9.

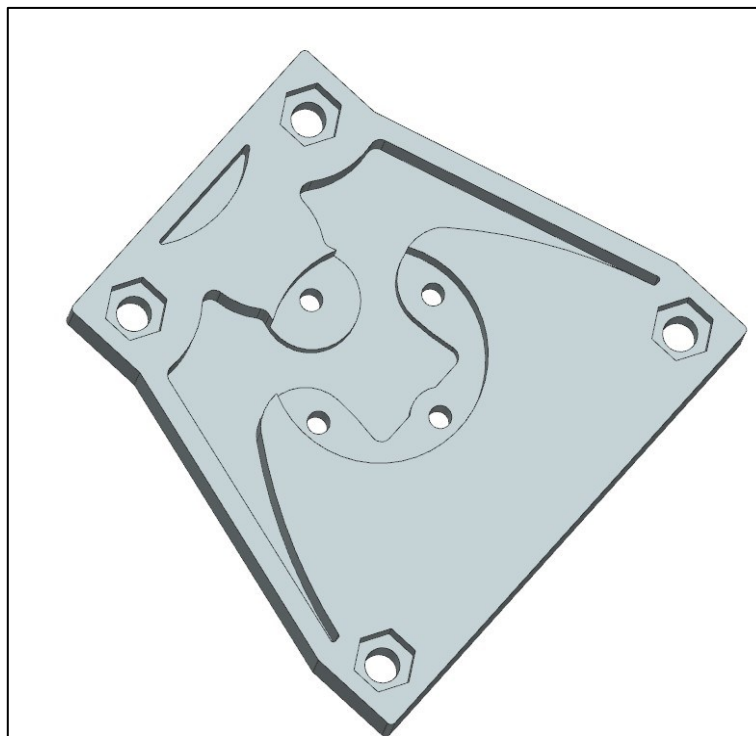


Figura 5.2. 9: Modello CAD della base del supporto ottimizzato.

Il nuovo pezzo è stato in seguito stampato e in Figura 5.2.10 abbiamo la nuova versione del componente (a destra) che affianca la sua versione precedente (a sinistra) con una differenza di materiale di circa 6 grammi in più.

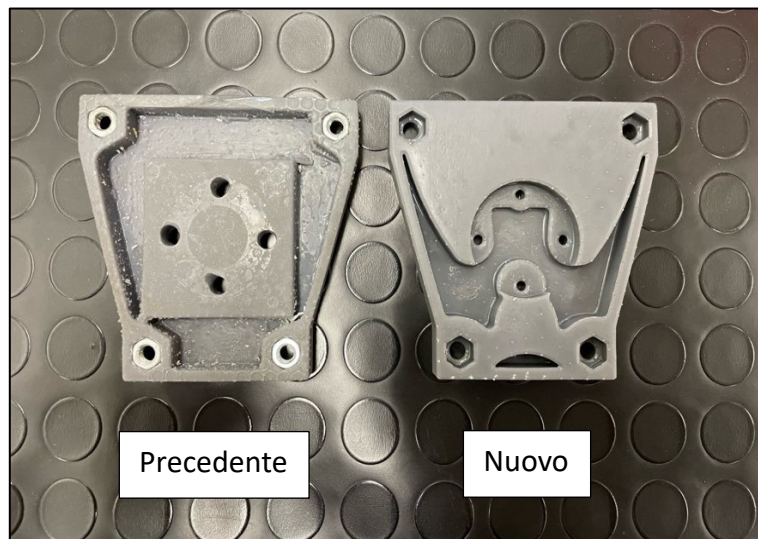


Figura 5.2. 10: Base del supporto non ottimizzata (sinistra), base ottimizzata (destra).

Il nuovo supporto è stato quindi installato ed è stata ripetuta la prova di lucidatura con il medesimo setup di prima.

### 5.3 Raccolta dati e analisi dei risultati

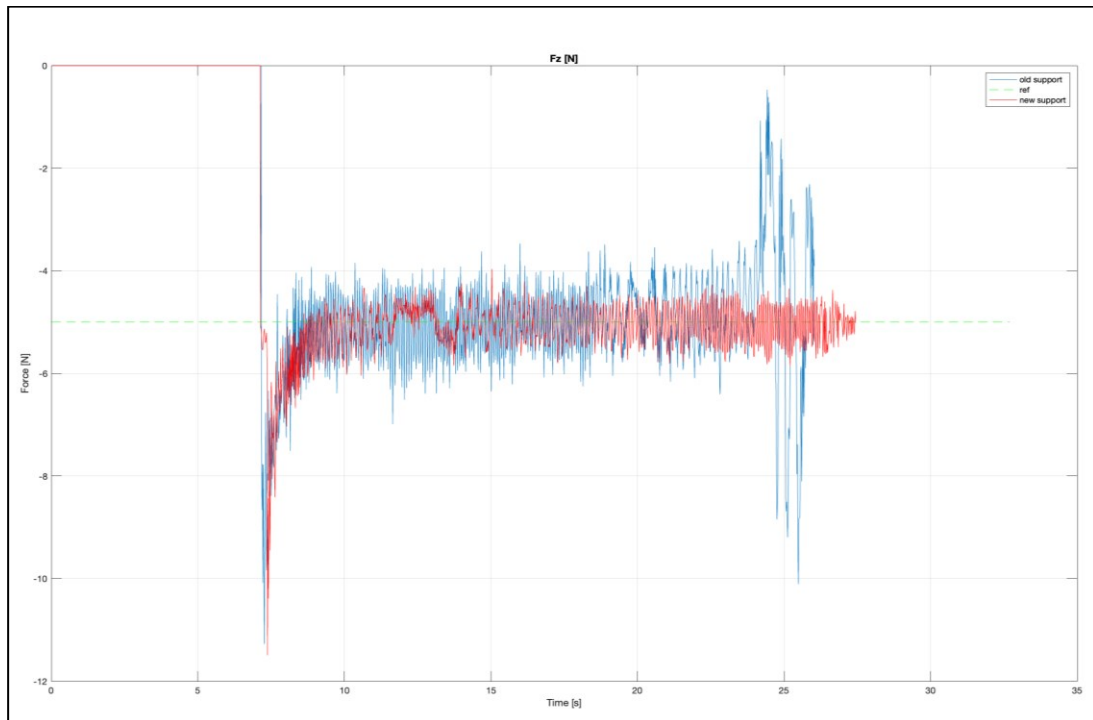
I dati raccolti provengono dal sensore di forza esterno, il quale, durante la lettura dei valori di forza nelle varie direzioni con robot completamente fermo e solo utensile acceso, ha registrato oscillazioni con un massimo di circa 6.6 N per quanto riguarda  $F_z$  [N] nel caso del vecchio supporto installato e di circa 3 N con il nuovo supporto montato.

Successivamente è stato ripreso il database della prima prova con il vecchio supporto durante l'operazione di lucidatura.

Selezionando i valori di  $F_z$  [N] otteniamo il grafico in blu riportato in Figura 5.3.1.

Da quest'ultimo si evince, dopo un certo transitorio, come il sistema tenti di inseguire il valore desiderato di 5 N, ma a causa dei disturbi l'andamento presenta delle oscillazioni per poi perdere il controllo in fase finale.

Prendendo il database ottenuto con la seconda prova, ovvero con il nuovo supporto installato, invece, si ottiene il grafico in rosso riportato in Figura 5.3.1, il quale mostra sempre l'andamento di  $F_z$  [N].



*Figura 5.3. 1: Grafico di  $F_z$  [N] con supporto non ottimizzato (in blu) e grafico di  $F_z$  [N] con supporto ottimizzato (in rosso).*

Dal grafico ora emerge come il sistema, con il nuovo supporto, riesca ad inseguire con più precisione il comportamento desiderato e non vi è più la perdita di controllo in fase finale come nel caso precedente.

## Capitolo 6

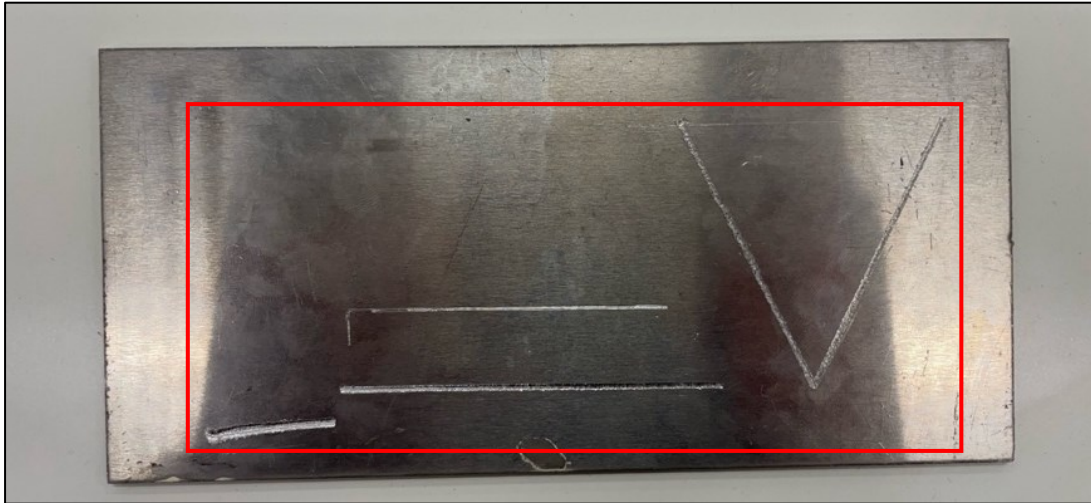
### Programmazione del robot tramite ambiente “NX-CAM” di SIEMENS

In questo capitolo si fa particolare attenzione alle operazioni di incisione; in primo luogo, si riportano le incisioni effettuate su una piastra in alluminio “reale” di dimensione 18 x 8.5 x 0.3 cm ed in secondo luogo, la generazione della traiettoria in ambiente “NX-CAM” di SIEMENS, per un’operazione di incisione di una tavoletta in legno di dimensione 25 x 13 x 2.7 cm, in questo caso è stato generato solo il programma e non è stato effettuato poi il test fisico.

Le prime incisioni effettuate sono semplici e lineari, come mostrato in Figura 6.1 e più nel dettaglio in Figura 6.2.



*Figura 6. 1: Operazione di incisione su piastra in alluminio.*



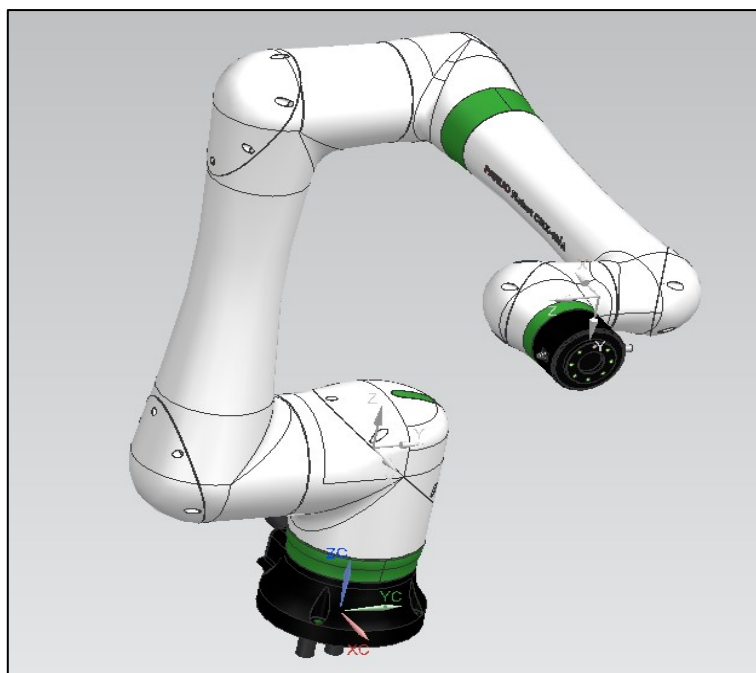
*Figura 6. 2: Prove di incisione sulla piastra di alluminio.*

Anche in questo caso sono stati raccolti i dati ottenuti tramite la sensoristica in diverse condizioni.

In un secondo momento si prevedeva di programmare il robot al fine di eseguire operazioni più complesse, per questo motivo è stato definito il comportamento del robot in ambiente "NX-CAM" di SIEMENS, con lo scopo di dimostrare che si possono lavorare componenti con profili complessi.

## 6.1 Modellazione 3D e definizione della cinematica del robot

Per poter inserire il robot nella libreria di "NX", dobbiamo innanzitutto disporre del modello tridimensionale del robot, in questo caso è stato fornito dalla FANUC stessa. Il modello 3D è riportato in Figura 6.1.1.



*Figura 6.1. 1: Modello 3D del robot.*

Per costruire il cinematismo del robot dobbiamo utilizzare il “Machine Tool Builder” presente in “NX-CAM” così da definire i diversi corpi e realizzare i giunti che li collegano.

Per prima va selezionata la base del robot e poi si deve cliccare sulla finestra del “tool builder” con il tasto destro del mouse, in questo modo comparirà la finestra in Figura 6.1.2 che chiederà che tipo di componente va inserito e quindi si seleziona “Machine Base Component”.

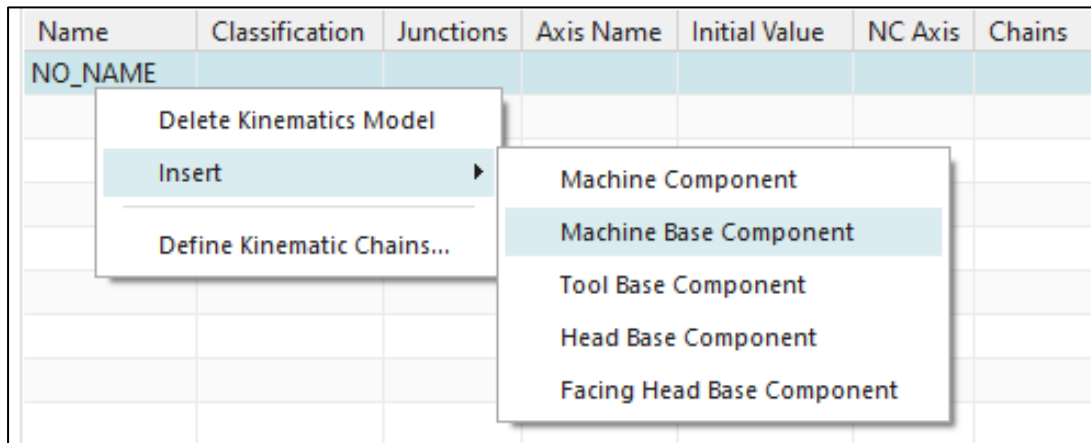


Figura 6.1. 2: Finestra per l’inserimento del “Machine Base Component”.

Nella nuova finestra si può impostare il sistema di riferimento del pezzo e la classificazione del componente.

Successivamente, per aggiungere un nuovo elemento, va selezionato il corrispettivo modello 3D, per poi cliccare col tasto destro sulla base per aggiungere un nuovo componente macchina e anche in questo caso definire un sistema di riferimento adeguato, si posizionano poi i sistemi di riferimento dei corpi al centro della coppia rotoidale che li collega al corpo precedente, ripetendo questo processo fino a quando tutte le parti del robot non sono state aggiunte.

Dopo aver definito tutte le parti vanno definite due tipi di componenti, che non sono caratterizzati da alcuna geometria, ovvero il “part setup element” e il “pocket”; il primo dei due verrà posto dopo la base della macchina e sarà caratterizzato dall’attributo “\_PART”, necessario per il controllo delle collisioni durante il processo lavorativo, e dall’attributo “\_SETUP\_ELEMENT”, il quale è un segnaposto per i componenti futuri che potranno essere montati sul robot.

Per quanto riguarda il secondo componente denominato “ToolMount”, esso verrà posto con una dipendenza dall’ultimo giunto “J6” e verrà caratterizzato da un sistema di riferimento posto sulla faccia dello “spindle” in cui l’asse Z sarà ortogonale alla faccia di “J6”; da questo sistema di riferimento dipenderà l’orientamento dei portautensili ed utensili montati durante la pianificazione delle mansioni nel software CAM, inoltre il componente verrà classificato come “Dynamic Holder” il quale servirà a comunicare ad “NX” dove può montare gli utensili ed i “toolhead”.

Lo step successivo è quello di definire i diversi assi del robot che permetteranno di ricreare il modello cinematico del robot, per ogni componente esiste la possibilità di creare un asse basandosi su quello che è il sistema di riferimento solidale al corpo, verrà poi chiesto quale è



l'asse di riferimento e se la coppia è di tipo prismatica o rotoidale, infine vanno definite le proprietà cinematiche e dinamiche dell'asse secondo i limiti caratteristici del robot, gli intervalli di posizioni angolari e le velocità massime angolari relative ai giunti. Per verificare l'asse, è possibile premere il tasto "play" della finestra in Figura 6.1.3 per simulare il movimento del corpo in funzione dell'asse appena definito.

Edit Axis	
▼ Name	
Axis Name	JCT1
▼ Junction	
Selection	Name
Name	J1@J1
Direction	z i
▼ Axis Settings	
Axis Type	Rotary
<input type="checkbox"/> NC Axis	
Axis Number	1
Initial Value [deg]	0.0000
Upper Limit [deg]	180.0000
Upper Soft Limit [deg]	180.0000
Lower Soft Limit [deg]	-180.0000
Lower Limit [deg]	-180.0000
▼ Dynamic Properties	
Max Velocity [deg/s]	120.0000
Max Acceleration [deg/s <sup>2</sup> ]	250.0000
Max Deceleration [deg/s <sup>2</sup> ]	250.0000
Jerk Limit [deg/s <sup>3</sup> ]	-1.0000
Jump Velocity [deg/s]	0.0000
Kv	0.0000
Fine Precision [deg]	0.0100
Coarse Precision [deg]	0.0100
▼ Preview Motion	
Step Size	10.0000
Current Value	0
◀ ◁ ▷ ▶	
OK Cancel	

Figura 6.1. 3: Finestra "Edit Axis".

Una volta che tutti gli assi sono stati definiti possiamo procedere alla definizione della catena cinematica del robot, ritornando sulla finestra del "Machine Tool Builder" e cliccando su

“Define Kinematic Chains”, si ottiene la finestra di dialogo riportata in Figura 6.1.4 che ci chiederà di definire il tipo di macchina, il componente sulla quale verranno installati gli utensili e la parte di setup, se la selezione è stata fatta in maniera adeguata ci si ritroverà con la parte degli assi compilata in maniera automatica.

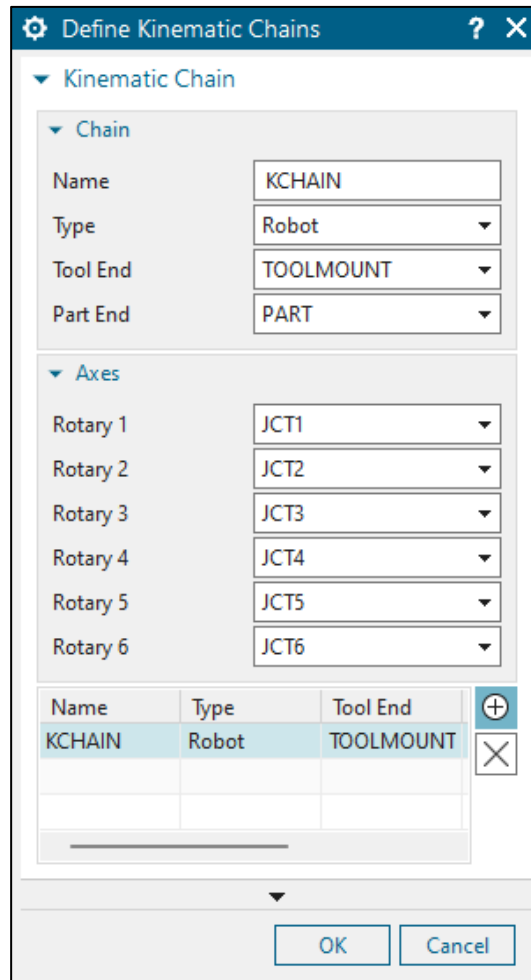


Figura 6.1. 4: Finestra “Define Kinematic Chains”.

Con questo passaggio si conclude la modellazione della macchina e del suo modello cinematico e rimane solamente l’inserimento nella libreria di “NX-CAM”.

## 6.2 Inclusione del modello del robot nella libreria “machine”

Dopo aver salvato il file del “Machine Tool Builder” e gli assiemi del robot in un’unica cartella denominata “graphics”, si crea una nuova cartella in cui si copierà quella precedente e va denominata con lo stesso nome del file “Machine Tool Builder”; successivamente si taglia la cartella per incollarla nella directory della libreria di “NX”, raggiungibile dalla cartella di installazione di “NX” seguendo il percorso:

“MACH\resource\library\machine\installed\_machines”.

Si va ora a copiare dalla cartella “Fanuc\_R\_2000iB\_210F” tutto tranne “graphics” per poi inserire i file nella cartella del robot “CRX 10iA-L”, va poi rinominato il file già presente con l’estensione “.dat” in modo che esso condivida il nome della cartella.

Si sostituisce ora il suo contenuto con:

```
“FANUC RJ,${UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR}Fanuc CRX 10IA-L  
\postprocessor\FANUC_RJ\FANUC_RJ_post.tcl,${UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR}Fanuc CRX 10IA-L\postprocessor\FANUC_RJ\FANUC_RJ_post.def”.
```

Successivamente si torna dentro la cartella “machine”, per poi cliccare su “ascii” ed aprire “machine\_database.dat” dove va incollata la seguente stringa:

```
“DATA|Fanuc CRX 10IA-L|MDM0401|6-Ax robot|FANUC RJ|FANUC|  
{UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR}Fanuc CRX 10IA-L/Fanuc CRX 10IA-L.dat|1.000000|${UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR}Fanuc CRX 10IA-L/graphics/Fanuc CRX 10IA-L”.
```

È stato completato il processo di modellazione del robot.

### 6.3 Modellazione e inclusione del modello dell’end effector nella libreria “device”

Oltre al CAD del robot si necessita anche del modello della penna levigatrice e del supporto, che sono stati realizzati in ambiente “NX” e già visti in Figura 5.2.1.

Si procede con la costruzione del “toolhead” nel “Machine Tool Builder”, il quale richiede all’utente di selezionare la geometria del giunto e di impostare i sistemi di riferimento relativi all’attacco della testa con il robot, e l’attacco dell’utensile con il robot.

Il sistema “HEAD\_BASE”, riportato in Figura 6.3.1, è stato realizzato a partire dalla geometria del “toolholder”, successivamente è stato definito il sistema di riferimento classificato come “toolbase” con il quale supporto verrà fissato sul robot, cercando di allineare i sistemi di riferimento tra le parti.

Lo “SPINDLE” è un componente intermedio non descritto da alcuna geometria e sistema di riferimento, il quale ha lo scopo di separare la base dal componente “HOLDER”.

Il componente “HOLDER” non viene descritto da alcuna geometria ma solo dal sistema di riferimento sulla quale verranno montati i diversi utensili, sistema che verrà classificato come “DYNAMIC HOLDER”.

Va sottolineato che è fondamentale che il sistema di riferimento abbia l’asse X orientato verso l’interno della faccia del “toolholder” per garantire un corretto montaggio degli utensili.

Name	Classification	Junctions	Axis Name	Initial Value	NC Axis	Chains
DREMEL HOLDER						
HEAD_BASE	_HEAD_DEVICE	HEAD_MOUNT*				
SPINDLE						
HOLDER	_DYNAMIC HOLDER	HOLDER_JCT_2				

Figura 6.3. 1: Sistema "HEAD\_BASE".

Una volta completato il "machine tool building", va copiato il modello appena realizzato nella cartella di SIEMENS seguendo il percorso:

"MACH\resource\library\device\graphics", dove si crea una cartella che condivide il nome del file ".prt" del modello 3D, per poi inserirlo al suo interno.

Tornando nella cartella "device", si entra in quella denominata "ascii", dove va selezionato il file "device\_database.dat" in cui va inserita la seguente stringa al suo interno:

"DATA |**HOLDERTIR** |3 | **HOLDERTIR**, mount jct +Z | HEAD", dove in grassetto sono state evidenziate le parti in cui va sostituito il nome della nuova cartella e del modello.

## 6.4 Generazione della traiettoria in ambiente NX-CAM

Si riporta ora la procedura di generazione della traiettoria in ambiente "NX-CAM" per un'operazione di incisione di una tavoletta in legno di dimensioni 25 x 13 x 2.7 cm, riportata in Figura 6.4.1.

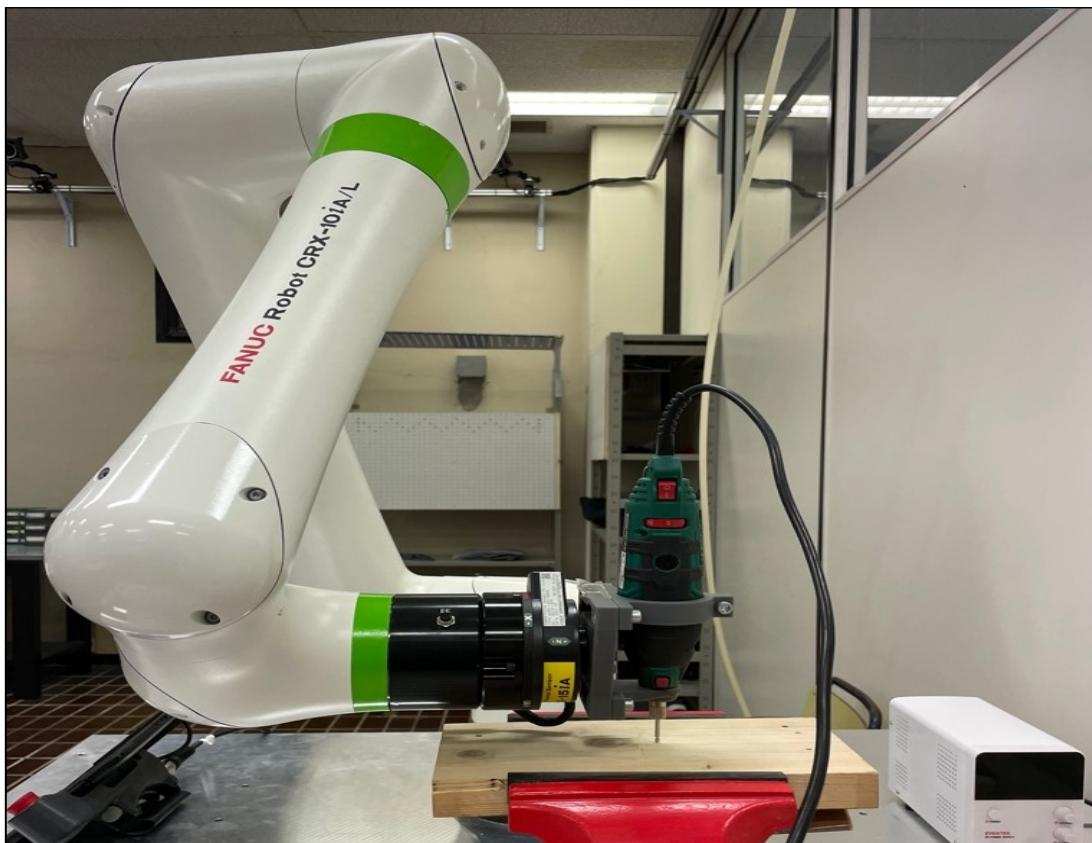
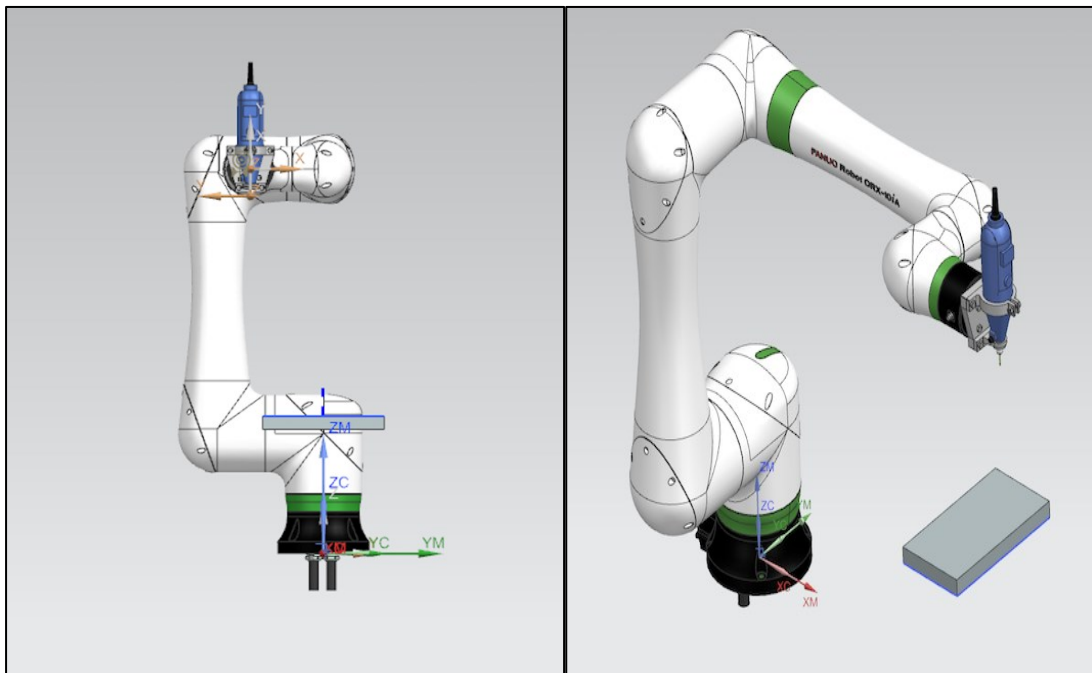


Figura 6.4. 1: Operazione di incisione su tavoletta in legno.

Il primo passo consiste nel prendere il robot “FANUC CRX-10iA/L” in ambiente “NX-CAM” e selezionare come end effector la nostra penna levigatrice con il relativo supporto precedentemente creati, inoltre, si modella la tavoletta posizionandola alla stessa altezza e con stesso orientamento del caso “reale”.

Per fare questo, una volta caricato il robot e inserito il CAD della tavoletta, si va in “vista macchina utensile” nella sezione dell’albero di sinistra e si clicca con il tasto destro del mouse su “TOOLMOUNT” e si va a selezionare la penna levigatrice dalla libreria utensili sotto la voce “Toolholder”.

Quello che si ottiene in ambiente “NX-CAM” è riportato in Figura 6.4.2, dove i giunti del robot sono tutti nella configurazione di “zero”.



*Figura 6.4. 2: Due viste del sistema robot – utensile in ambiente NX-CAM.*

Possiamo ora selezionare diversi tipi di punte a seconda della lavorazione, cliccando con il tasto destro su “HOLDER” sempre in “Vista macchina utensile” e si va a selezionare la “Fresa Sferica”, ovvero la punta più adatta al nostro caso specifico, come mostrato in Figura 6.4.3.

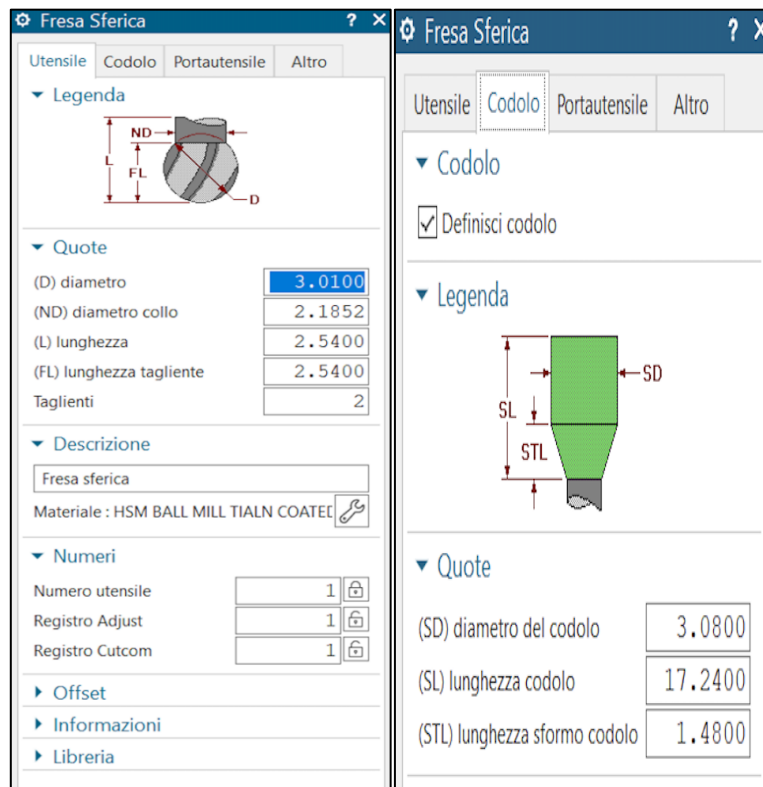


Figura 6.4. 3: Parametri della fresa sferica.

Qui è possibile inserire le dimensioni delle varie parti della punta come, per esempio, il diametro e le caratteristiche del codolo.

Eseguite le opportune misure e inseriti i dati andiamo ora a costruire i vari step del programma della lavorazione in esame.

Per prima cosa si genera un percorso per l'avvicinamento dell'utensile alla tavoletta in legno. Si procede andando a cliccare con il tasto destro del mouse su "SPHERICAL\_MILL" in "Vista macchina utensile" e si definisce con "POSA\_INIZIO", selezionando "Inserisci", successivamente "Operazione" ed infine "Robot Generic Motion", una traiettoria con tre configurazioni come riportato in Figura 6.4.4.

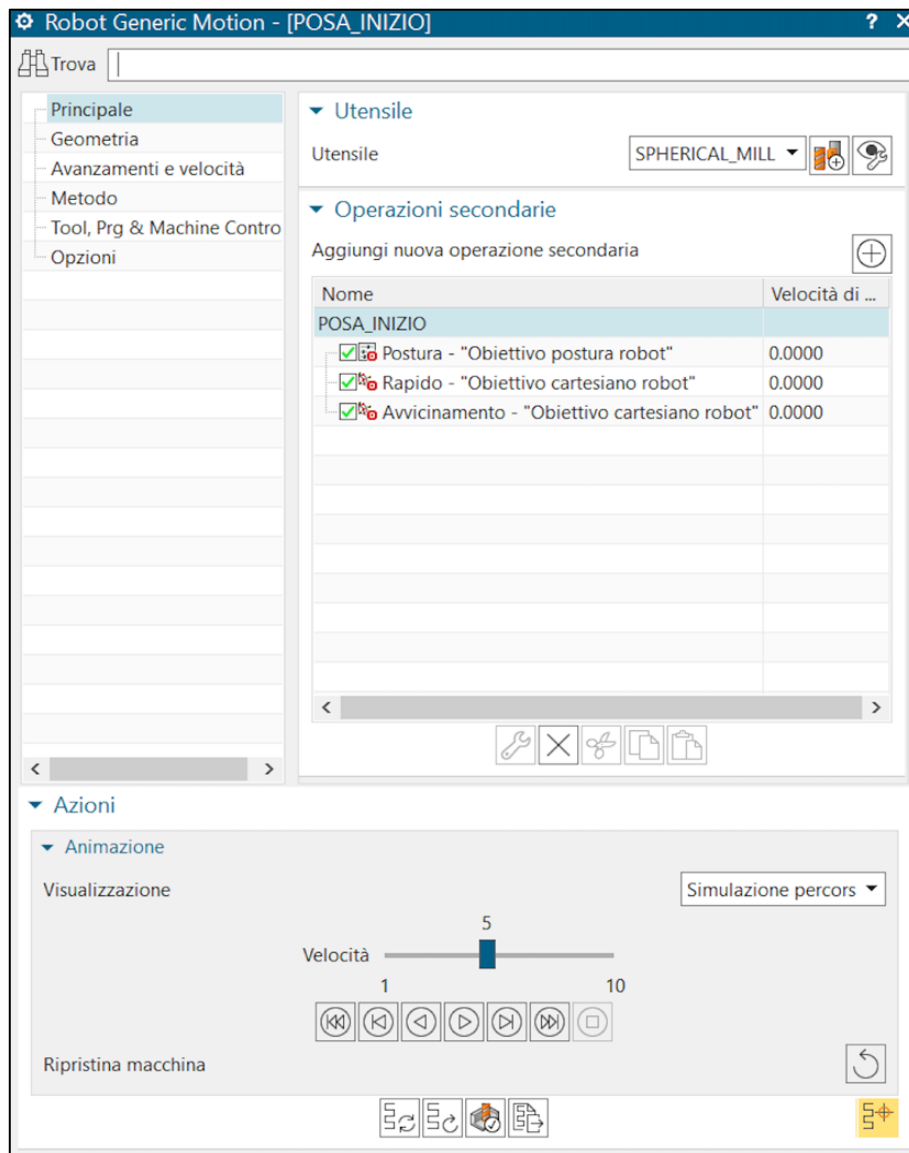


Figura 6.4. 4: Finestra per generare la traiettoria della "POSA\_INIZIO".

Nella prima configurazione il robot si trova nella posa con tutti i giunti a "zero" come in Figura 6.4.2.

Nella seconda configurazione il robot viene movimentato in modo da abbassare l'utensile verso la tavoletta, andando a definire un tipo di movimento "Rapido" come mostrato in Figura 6.4.5 a sinistra.

Nella finestra "Spostamento cartesiano robot" possono essere visualizzati i valori real time degli assi guidati ed inoltre conoscere nello spazio di lavoro le coordinate del sistema di riferimento associato all'utensile, come è possibile notare in Figura 6.4.5 a destra.

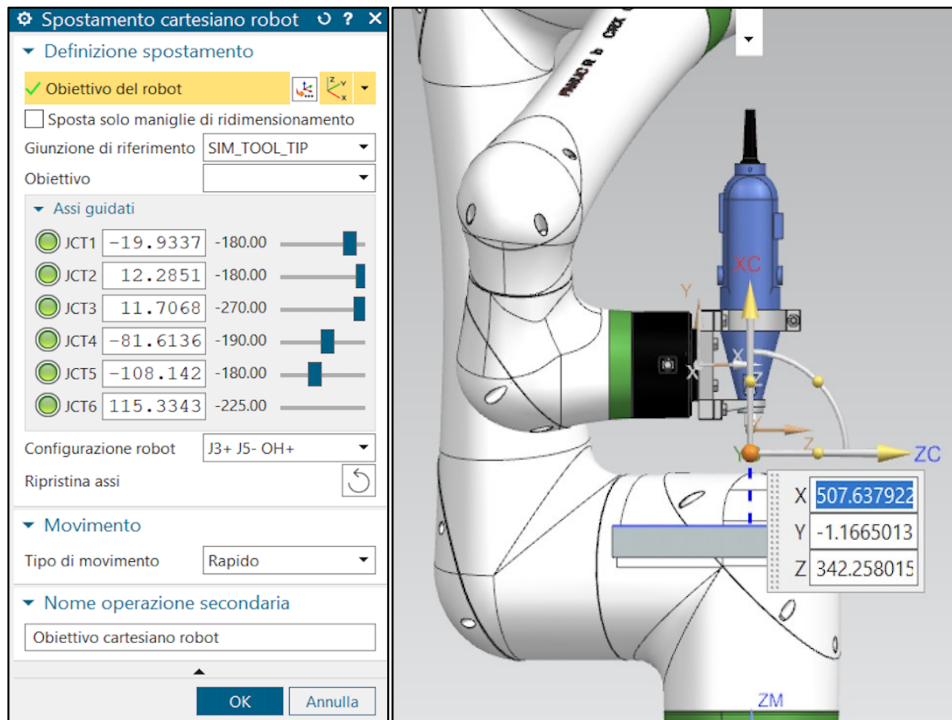


Figura 6.4. 5: Posizione dei giunti (sinistra) e posa del robot (destra) nella seconda configurazione.

Infine, nella terza configurazione, si avvicina la punta dell'utensile alla tavoletta con un tipo di movimento "Avvicinamento", portando il robot nella posa in cui è pronto per eseguire l'operazione di incisione come mostrato in Figura 6.4.6.

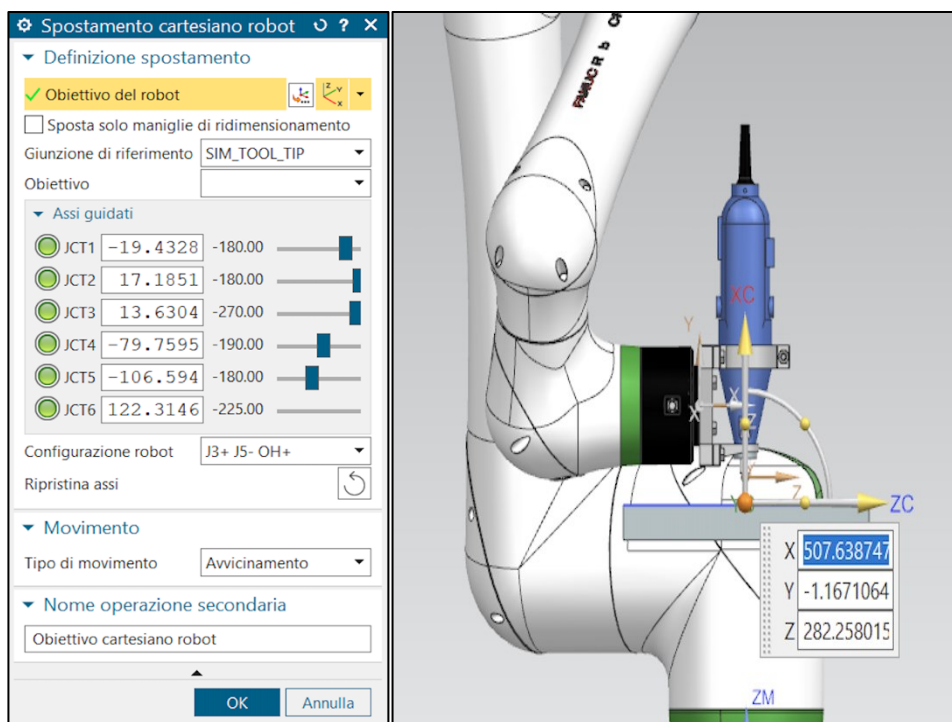


Figura 6.4. 6: Posizione dei giunti (sinistra) e posa del robot (destra) nella terza configurazione.

Lo step successivo consiste nell'impostare l'operazione di incisione vera e propria.



Si va di nuovo a cliccare con il tasto destro del mouse su “SPHERICAL\_MILL” e stavolta si seleziona un’operazione di incisione come, per esempio, quella di “CONTOUR\_TEXT”, che permette di incidere dei caratteri sulla superficie selezionata.

Nella finestra che si viene ad aprire, mostrata in Figura 6.4.7, è possibile selezionare, per l’incisione, una stringa di testo precedentemente creata, posizionata sulla superficie della tavoletta ed impostare vari parametri, tra cui la profondità della lavorazione.

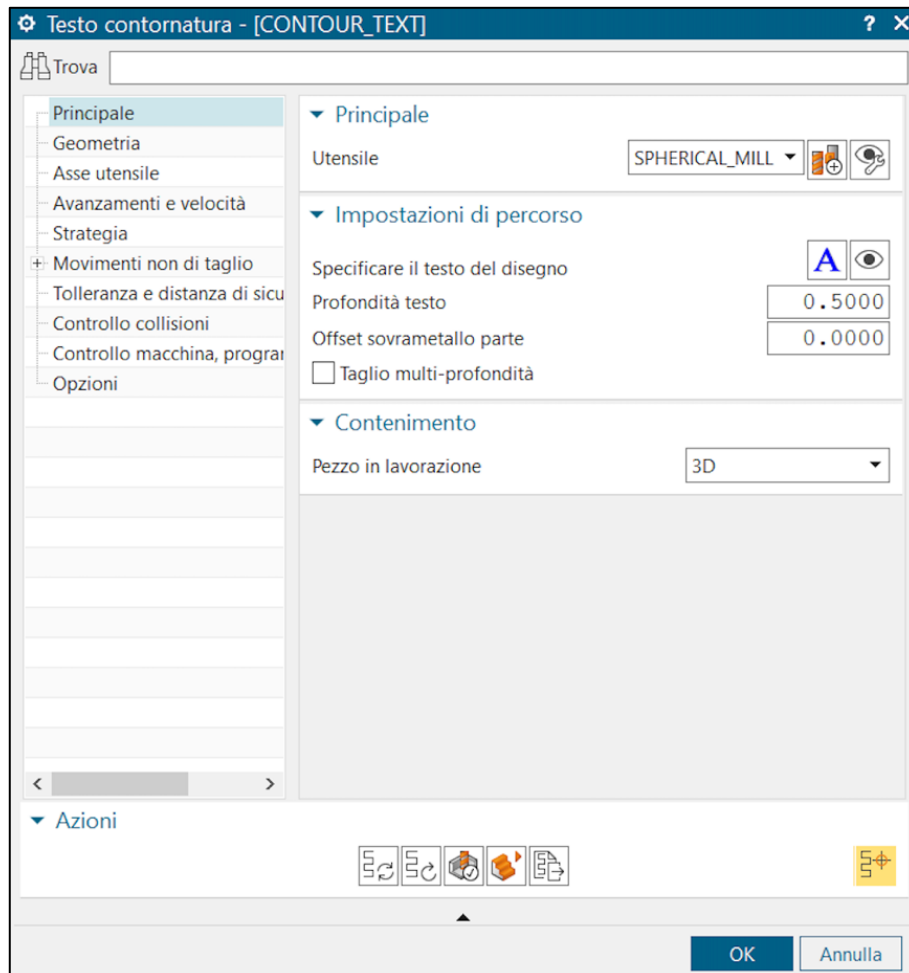


Figura 6.4. 7: Parametri per l’operazione di “CONTOUR\_TEXT”.

Definite le impostazioni desiderate, alla fine si ottiene il programma in Figura 6.4.8.

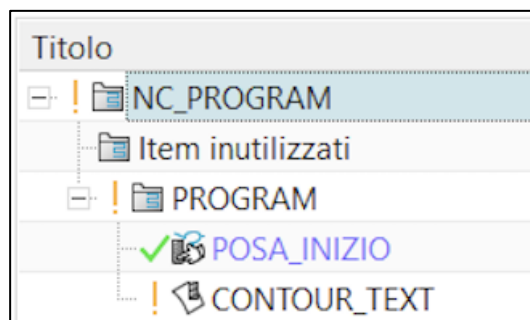
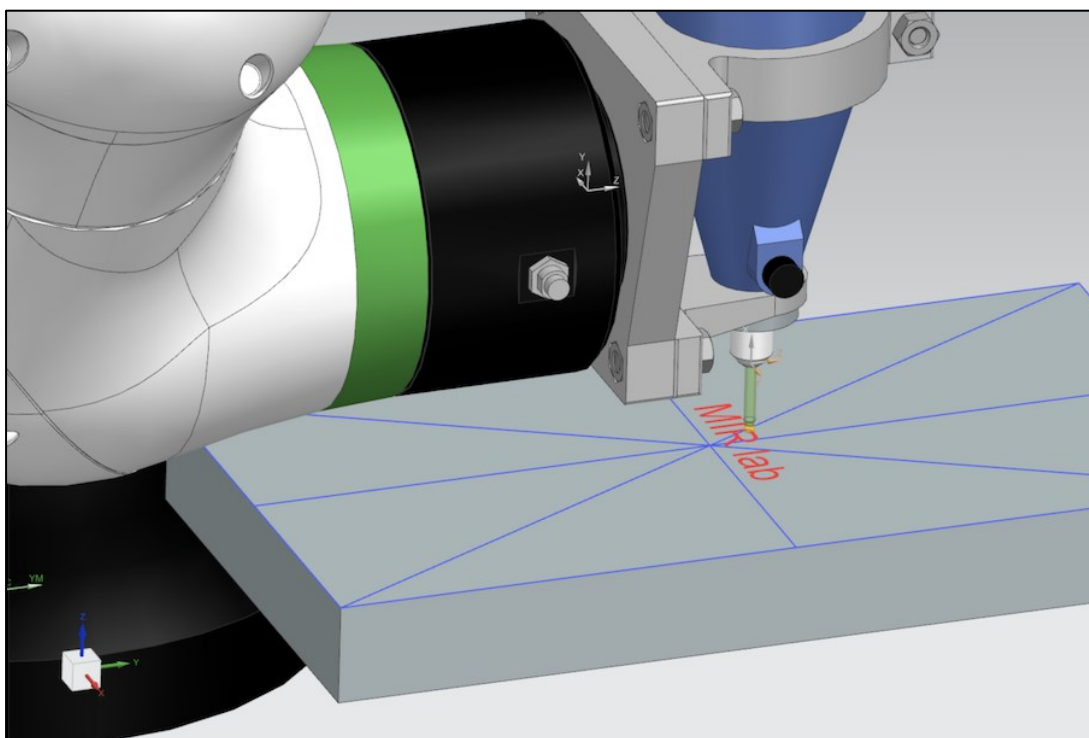


Figura 6.4. 8: Programma complessivo.

Cliccando con il tasto destro del mouse su “POSA\_INIZIO” e successivamente “CONTOUR\_TEXT”, si può generare il percorso utensile ed il punto esclamativo diventa la spunta in verde, come per la “POSA\_INIZIO” in Figura 6.4.8; si può ora avviare la simulazione andando su “Simulazione macchina” presente nel menù in alto e osservare come si comporta il robot.

In Figura 6.4.9 è mostrato un dettaglio del robot che sta effettuando l’incisione sulla tavoletta, che ha raggiunto partendo dalla posa iniziale.



*Figura 6.4. 9: Dettaglio dell’operazione di incisione in ambiente NX-CAM della scritta “MIR lab” sulla tavoletta.*

Attraverso la simulazione si possono valutare diversi fattori, è possibile, per esempio, visualizzare il percorso utensile durante la movimentazione e il materiale asportato durante l’incisione.

Infine, definita l’operazione e la traiettoria in ambiente NX-CAM, viene esportato il tutto in un file in formato “.Is”, che può successivamente essere importato, tramite opportuna procedura, nel software “ROBOGUIDE” di FANUC, per generare il programma che andrà a movimentare il robot fisico, permettendo così di lavorare anche con componenti che presentano geometrie complesse.

## Capitolo 7

### Lavorazioni con mandrino di sbavatura SCHUNK RCV-490

In questo capitolo si riporta lo studio eseguito con il mandrino di sbavatura “RCV-490” della SCHUNK, montato sul polso del robot, per operazioni di levigatura di tavolette in legno di dimensione 25 x 13 x 2.7 cm.

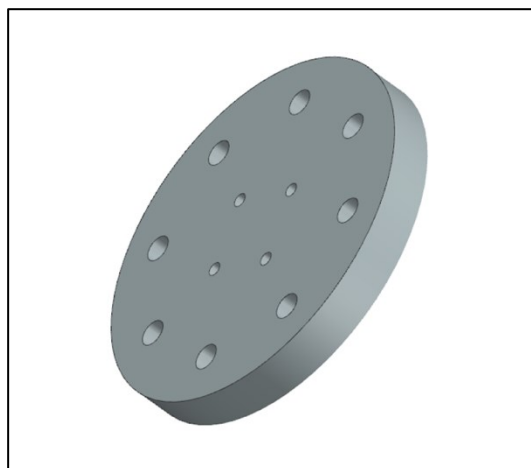
Il mandrino può essere anche installato in posizione fissa nello spazio di lavoro; tuttavia, in quel caso il componente da lavorare va movimentato dal robot, limitando le lavorazioni a componenti di dimensioni contenute, ecco perché si è optato per il posizionamento sul polso del robot dell’utensile, così che sia il robot a seguire la geometria del pezzo.

#### 7.1 Progettazione del supporto per il montaggio del mandrino sul robot

In ambiente “NX” di SIEMENS è stato realizzato il CAD del supporto per l’agganciamento del mandrino alla flangia del robot.

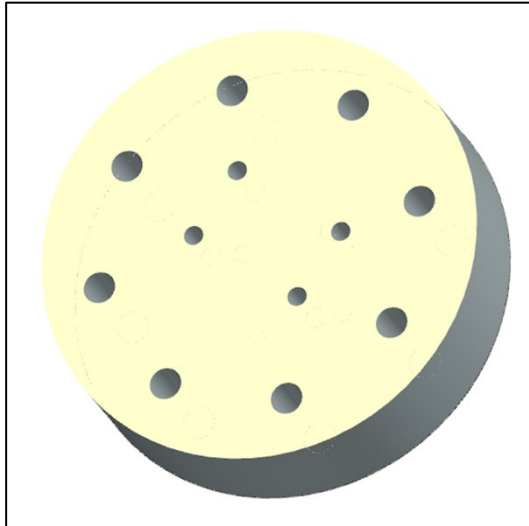
Il supporto è caratterizzato da tre componenti in alluminio per poter facilitare il montaggio ed il serraggio delle viti e della bullonatura.

Il primo elemento del supporto è il disco che viene direttamente connesso alla flangia del robot, riportato in Figura 7.1.1.



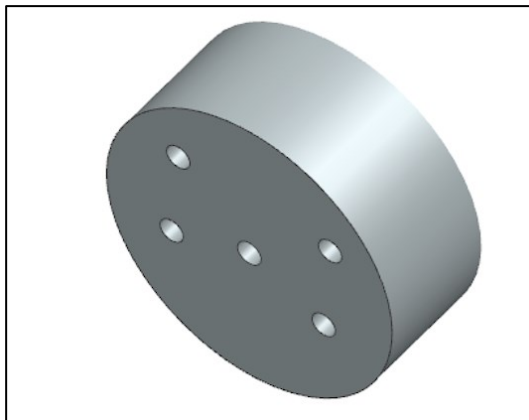
*Figura 7.1. 1: Elemento per la connessione alla flangia del robot.*

Gli otto fori esterni consentono il collegamento con il secondo elemento del supporto, che è il disco riportato in Figura 7.1.2, che permette la connessione con il mandrino, garantendo una maggiore libertà nell’orientamento dell’utensile in base al posizionamento della seconda piastra rispetto la prima.



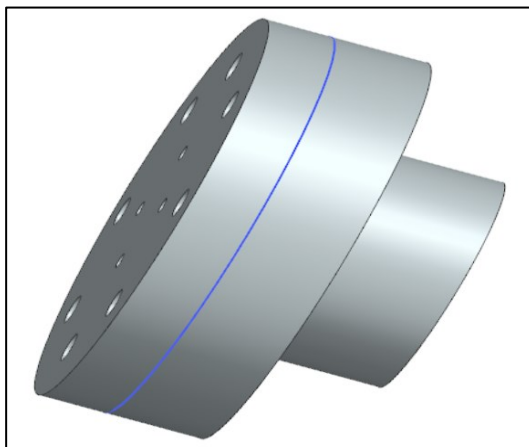
*Figura 7.1. 2: Elemento intermedio del supporto.*

Infine, il terzo elemento del supporto, riportato in Figura 7.1.3, è un distanziale che permette di lasciare lo spazio necessario alla bullonatura per l'assemblaggio degli elementi precedenti e facilitarne il serraggio.



*Figura 7.1. 3: Distanziale per la connessione con il mandrino.*

Il CAD del supporto completo è mostrato in Figura 7.1.4, da cui si è partiti per la sua realizzazione in officina.



*Figura 7.1. 4: Modello del supporto complessivo.*

Una volta realizzate le componenti fisiche del supporto si procede al loro montaggio, alcune fasi sono mostrate in Figura 7.1.5, e si può procedere successivamente ai test con il nuovo strumento.

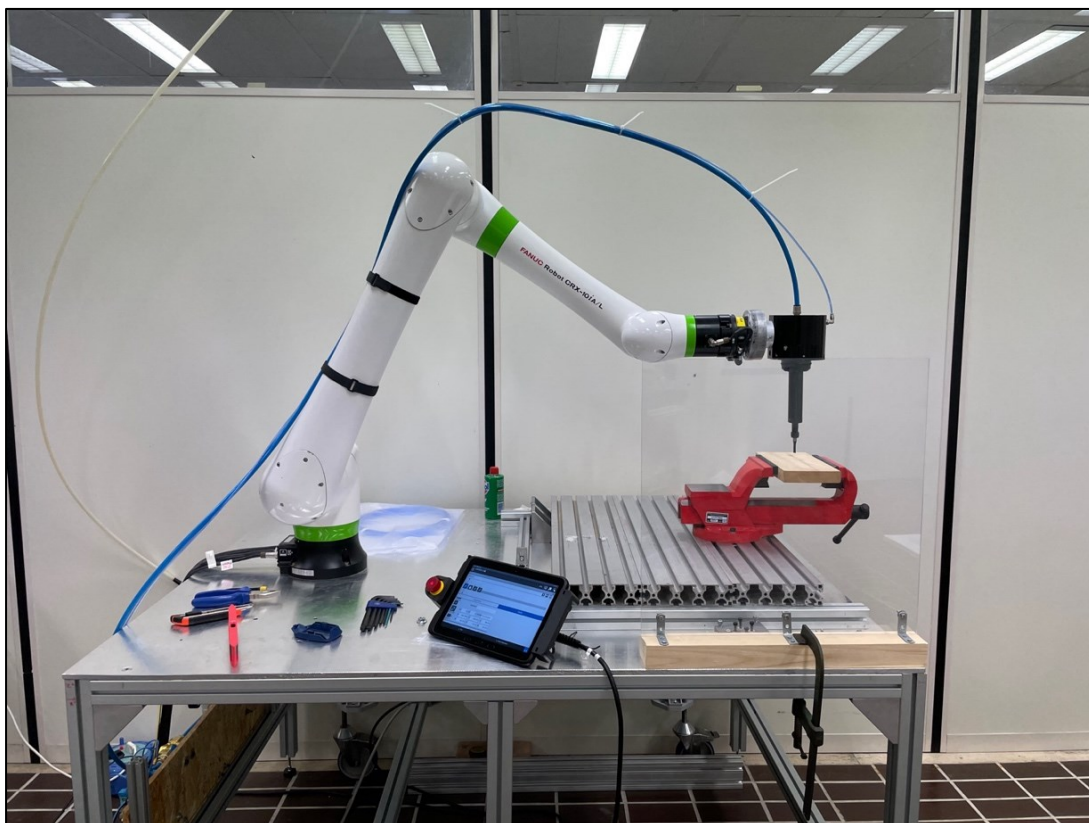


*Figura 7.1. 5: Montaggio del primo elemento alla flangia del robot (in alto a sinistra), montaggio dell'elemento intermedio con distanziale al mandrino (in alto a destra) e montaggio completo (in basso).*

## 7.2 Operazioni di fresatura del legno

Per testare i limiti del robot, la tavoletta di legno da lavorare è stata fissata tramite una morsa quasi ai limiti dello spazio di lavoro e, come mostrato in Figura 7.2.1, il robot è in una configurazione con il braccio disteso e con un payload di circa 5.7 kg, ovvero più della metà del carico massimo.

Questa configurazione può essere critica, infatti può portare ad una deflessione della struttura e alla generazione di vibrazioni che possono compromettere la precisione e i risultati delle operazioni.



*Figura 7.2. 1: Configurazione della cella robotizzata.*

L'obiettivo è quello di ottenere un profilo desiderato di uno dei lati della tavoletta, asportando una certa quantità di materiale e ottenere una certa accuratezza.

Facendo riferimento all'articolo "***Selection of Robotic Machining Parameters with Pneumatic Feed Force Progression***", per una buona ripetibilità del processo, bisogna considerare dei parametri quali la velocità di avanzamento dell'utensile e forza di contatto con il componente. Nell'articolo si vuole eseguire una smussatura a 45° su elementi in acciaio come il campione riportato in Figura 7.2.2.

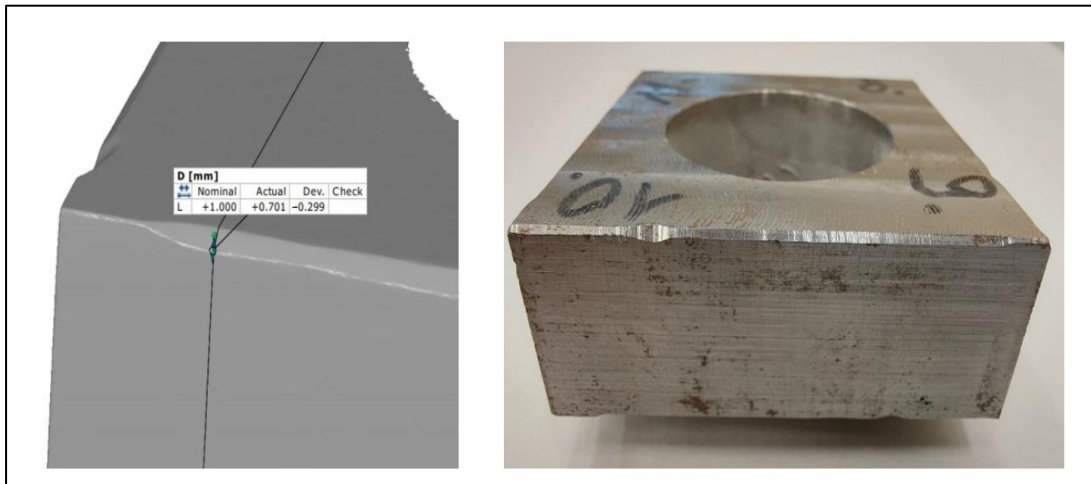


Figura 7.2. 2: Modello del campione (sinistra) e campione in acciaio (destra).

La traiettoria per la lavorazione è costituita da cinque punti come mostrato in Figura 7.2.3 dove:

1. P10 start point;
2. P20 per stabilire profondità della smussatura;
3. P30 distanza di circa 12 mm da P20 (basato sull'esperienza, varia da caso a caso);
4. P40 fine del processo di fresatura;
5. P50 end point.

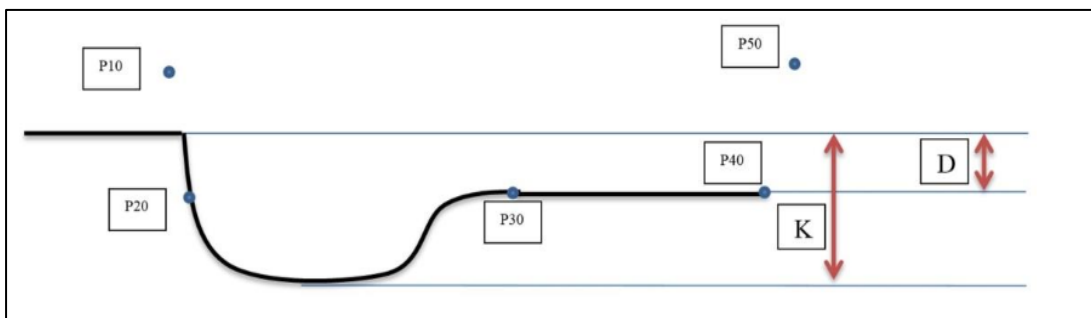


Figura 7.2. 3: Punti della traiettoria per l'operazione di asportazione del materiale.

Con (K) si indica la profondità di lavorazione all'avvio del processo di taglio e (D) la profondità nominale presunta di asportazione del materiale.

Quindi è fondamentale impostare la forza di avanzamento del mandrino tra i punti P20 e P30 o la variazione della velocità di movimento del robot in modo che la profondità di lavorazione su tutta la lunghezza sia D.

Lo scopo, quindi, è di minimizzare la differenza D-K (mm).

Si procede ora ad eseguire il test con la nostra attrezzatura e il programma utilizzato è mostrato in Figura 7.2.4, dove si vuole contornare il profilo superiore della tavoletta di legno, che prevede quattro operazioni di incremento delle coordinate in direzione X e Y in modo da descrivere il profilo rettangolare del pezzo.

Lo strumento opera alla sua velocità massima con una portata di aria compressa al motore di 0.6 MPa e con compensazione massima a 0.4 MPa.

```
SCHUNK_MANDRINO2 ▾ 10% AUTO
SCHUNK_MANDR SYST-045 TP enabled in AUTO mode RESET
1/11
1:L P[1] 100mm/sec FINE
2: WAIT 1.00(sec)
3:L P[2] 10mm/sec FINE
4:
5:L P[3:pY] 10mm/sec FINE INC
6:L P[4:pX] 10mm/sec FINE INC
7:L P[5:nY] 10mm/sec FINE INC
8:L P[6:nX] 10mm/sec FINE INC
9:
10:L @P[7] 10mm/sec FINE
[End]
```

Figura 7.2. 4: Script in "Karel" per l'operazione con il mandrino.

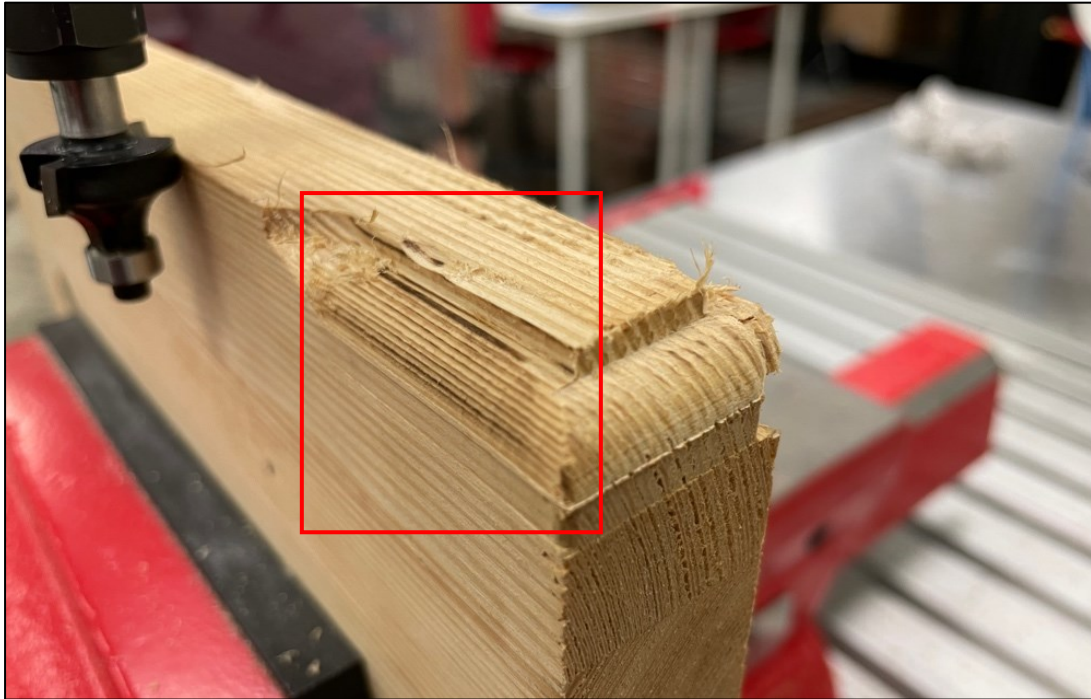
La punta montata, mostrata in Figura 7.2.5, è una punta per fresatura del legno con codolo di 8 mm marca PARKSIDE e si vuole lavorare tutto il profilo rettangolare della tavoletta tramite solo controllo di posizione del robot, valutando i risultati al variare della velocità di avanzamento e raccogliendo i dati provenienti dal sensore di forza.



Figura 7.2. 5: Punta per fresatura del legno PARKSIDE.

Durante la prima prova, l'operazione è stata interrotta in quanto, con una velocità di avanzamento impostata a 5 mm/s, il pezzo presentava delle bruciature in alcuni punti, come evidenziato dal rettangolo rosso in Figura 7.2.6.





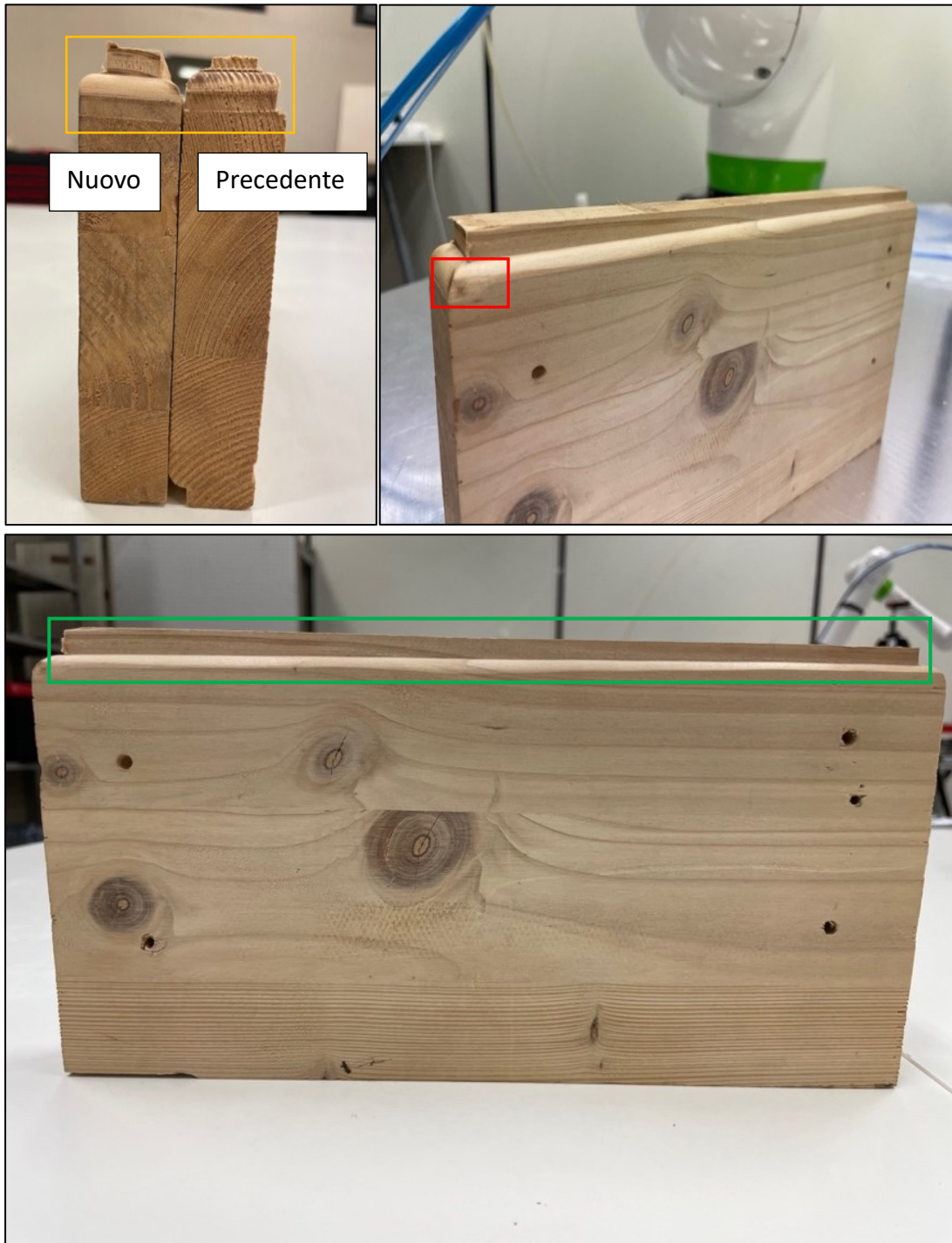
*Figura 7.2. 6: Dettaglio del risultato della prima prova.*

Quindi sono state eseguite altre prove testando diverse velocità e ottenendo diversi risultati come quello mostrato in Figura 7.2.7, con velocità di avanzamento pari a 8 mm/s, anche se, come evidenziato dal rettangolo rosso, persistono delle bruciature.



*Figura 7.2. 7: Dettaglio della prova con velocità di avanzamento di 8 mm/s.*

Confrontando i risultati con il test di primo tentativo si notano dei miglioramenti, come visibile in alto a sinistra nel rettangolo arancione in Figura 7.2.8, come per esempio per quanto riguarda la pulizia del pezzo.

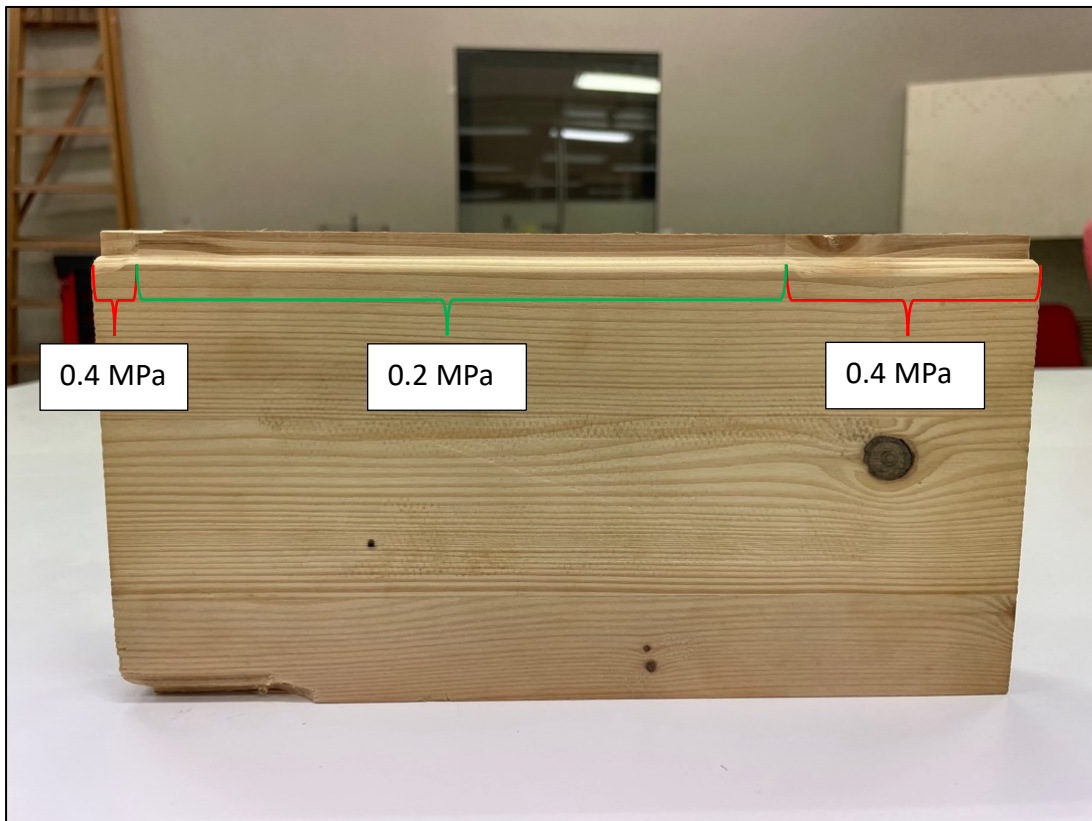


*Figura 7.2. 8: Confronto tra il nuovo risultato e di primo tentativo (in alto a sinistra), risultato della nuova prova (in alto a destra) e dettaglio dello scalino del profilo superiore della tavoletta della nuova prova (in basso).*

Tuttavia, oltre alla presenza di imperfezioni in termini di materiale asportato e precisione della lavorazione, evidenziate dal rettangolo verde, che mostra la differenza di spessore dello scalino tra il punto iniziale e finale della tavoletta, compaiono ancora delle bruciature in alcuni punti, come nel punto individuato dal rettangolo in rosso; pertanto, sono state eseguite diverse misurazioni per compensare gli errori dovuti dalla deflessione e dalle vibrazioni introdotte dall'installazione e dall'azionamento dello strumento.

Inoltre, la velocità è stata portata a 10 mm/s valore per cui si ottiene un ottimo risultato senza la presenza di bruciature indesiderate sul pezzo.

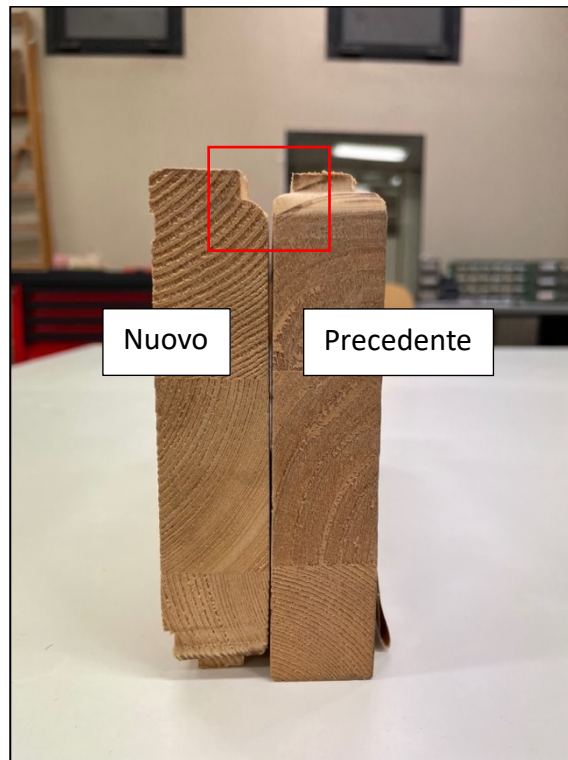
Ripetendo i test si è giunti al risultato riportato in Figura 7.2.9, dove è stata eseguita la lavorazione del lato più lungo della tavoletta e sono stati testati anche due diversi valori di compensazione; infatti, ad inizio operazione è stato impostato il valore a 0.4 Mpa, ovvero compensazione massima, in modo da avere lo strumento alla massima rigidità e poi è stato valutato il comportamento con un valore a 0.2 MPa, per valutare la differenza della quantità di materiale asportato.



*Figura 7.2. 9: Risultato della prova con diversi valori di compensazione.*

Nei primi centimetri del profilo superiore, a partire da sinistra, si può notare come, con la compensazione al massimo, la quantità di materiale asportato sia quella desiderata, per poi avere uno scalino che indica un abbassamento della pressione di compensazione e, sebbene la pulizia del pezzo sia comunque notevole, abbiamo asportato meno materiale, in virtù delle caratteristiche intrinseche dello strumento, nato per applicazioni di sbavatura che permettono di adattarsi alla geometria del pezzo; infine, nel tratto finale, è presente un altro salto che corrisponde di nuovo al valore massimo di compensazione.

Effettuando un confronto con la tavoletta precedente, come mostrato in Figura 7.2.10, il profilo non solo è migliore, ma è stata asportata la quantità di materiale desiderato, con un'eccellente pulizia del pezzo e nessuna bruciatura del legno.



*Figura 7.2. 10: Confronto dei risultati della nuova prova (sinistra) con quelli della prova precedente (destra).*

Una considerazione che va messa in evidenza è che la punta utilizzata ha codolo 8 mm e la pinza elastica “ER11”, per l’inserimento della punta durante le lavorazioni, è stata danneggiata. La pinza elastica “ER11” da 8 mm non è uno standard molto diffuso e sebbene il mandrino non sia stato concepito per lavorazioni con grandi quantità di materiale asportato i risultati sono comunque ottimi, anche se le prove di fresatura sulla tavoletta in legno hanno portato al danneggiamento del componente sopra citato; sarebbe quindi meglio provare con lavorazioni più modeste, utilizzando punte con codolo da 6 mm, ripetendo più passaggi per l’asportazione di materiale e limitandosi dove possibile a operazioni di sbavatura con il mandrino.

Tuttavia, non sono da escludere possibili altre tipologie di lavorazioni con asportazione di truciolo con questo strumento, con il giusto setup, e la possibilità di ottenere risultati ancora migliori e anche con geometrie complesse del componente da lavorare, sfruttando per esempio la funzione di “Force Contouring”, mostrata durante lo studio con la penna levigatrice PARKSIDE.

## Capitolo 8

### Conclusioni

La robotica industriale ha subito un forte incremento in termini di installazioni di macchine negli ultimi anni e va data particolare attenzione alla robotica collaborativa, la quale anch'essa è caratterizzata da un trend in aumento.

Sebbene i "cobot" presentino delle prestazioni inferiori e un costo maggiore rispetto alle soluzioni "tradizionali", il loro potenziale li rende oggetto di ricerca e di sviluppo.

Dallo studio svolto emerge come la versatilità di queste macchine non solo permetta di raggiungere ottimi risultati, ma anche di contribuire ad una semplificazione del layout aziendale, eliminando la progettazione e l'ingombro della cella.

Queste aree dedicate sono ostili alla presenza di un operatore umano e con la robotica collaborativa, o meglio va specificato con le applicazioni collaborative, non è più necessaria la presenza di celle chiuse.

Con una ridondanza di sensori, sistemi di visione e l'implementazione dell'intelligenza artificiale si può raggiungere un grado di convivenza con l'essere umano mai visto prima, dove il luogo di lavoro diventa ora sicuro e fatto a misura di uomo, dove è possibile e anzi è inclusa la presenza degli operatori umani.

Con i risultati ottenuti dai lavori riportati nella prima parte dello studio, è stata dimostrata la potenzialità dei cobot, come nel caso della penna levigatrice PARKSIDE come end effector.

Sebbene l'utilizzo di tale strumento non sia applicabile a lavorazioni industriali, i dati raccolti hanno permesso di rilevare delle problematiche utili all'"anomaly detection", che hanno portato allo studio dell'ottimizzazione topologica del supporto dello strumento.

Questo dimostra l'importanza non solo del raccogliere semplicemente dei dati, ma anche di tradurli in informazioni utili, attraverso le quali si possono descrivere fenomeni di diversa natura, come nel caso dei dati del sensore di forza associati alle vibrazioni, dati che inoltre possono essere incrociati con altri ancora, provenienti da diverse fonti come sistemi di visione, e che, se opportunamente processati, possono essere utilizzati per l'addestramento dell'intelligenza artificiale, così da rilevare anomalie come l'usura dell'utensile, problemi riguardanti il componente da lavorare oppure malfunzionamenti del robot, in modo da intervenire tempestivamente con una manutenzione predittiva e allo stesso tempo utilizzare questi dati per migliorare continuamente il sistema.

Attraverso l'analisi e la successiva progettazione di un supporto tramite stampa 3D, è stato possibile ottenere una prima riduzione al problema delle vibrazioni che compromettevano il comportamento del robot durante l'utilizzo di un utensile manuale non originariamente pensato per un contesto automatizzato.

La metodologia adottata ha permesso di analizzare il comportamento del sistema attraverso i dati forniti dal sensore di forza esterno, evidenziando le inefficienze del supporto precedente e i miglioramenti ottenuti con il nuovo supporto ottimizzato. Grazie alla modifica del modello CAD e all'implementazione di un processo di ottimizzazione topologica tramite software

ANSYS, è stato possibile mantenere limitata la quantità di materiale necessaria per la realizzazione del componente, quindi in termini di risparmio di materia prima, senza comprometterne l'efficacia durante l'utilizzo.

I risultati ottenuti mostrano un netto miglioramento nella capacità del sistema robotico di mantenere il controllo durante l'utilizzo dell'utensile, riducendo le oscillazioni e garantendo un inseguimento più preciso del comportamento desiderato. Questo dimostra l'efficacia della metodologia proposta nel migliorare sia il comportamento della macchina che nel mantenere un costo di produzione del componente contenuto, efficacia che può essere migliorata con ulteriori prove, analisi e raccolta dati ancora più accurate, evidenziando le potenzialità di questo studio.

Pertanto, questa ricerca mette in evidenza l'importanza dell'ottimizzazione dei componenti e dei supporti per garantire prestazioni ottimali pur mantenendo costi contenuti nell'ambito delle lavorazioni meccaniche automatizzate e dell'additive manufacturing e, inoltre, l'importanza di monitorare il comportamento nell'ambiente di lavoro per evidenziare anomalie oppure intervenire preventivamente come già detto in precedenza.

Il metodo adoperato per generare una traiettoria complessa in ambiente NX-CAM ha dimostrato come si possano produrre codici senza dover programmare manualmente punto per punto e mansione per mansione il percorso e le operazioni eseguite dal robot. In questo modo possiamo programmare il robot per lavorare anche componenti con geometrie complesse. Inoltre, i processi mostrati possono essere ripetuti per ogni macchina o robot e utensili presenti sul mercato, dando la possibilità di rendere la programmazione robotica ancora più accessibile.

In conclusione, per quanto riguarda lo studio con il mandrino "RCV-490" della SCHUNK, sfruttando le diverse possibilità di configurazione, possiamo ottenere non solo diversi comportamenti dello strumento, ma anche diversi risultati, dimostrando che si possono realizzare diverse tipologie di operazioni, come la fresatura nel nostro caso, anche con un importante grado di materiale asportato e quindi non solo lavorazioni di sbavatura del pezzo per cui è stato pensato il mandrino, evidenziando l'ottima versatilità non solo dello strumento, seppur con qualche accorgimento, ma anche del robot classificato come collaborativo, lasciando ancora campo aperto a molte possibilità di ricerca e di sviluppo, per ottenere sistemi sempre più stabili, efficienti, pronti, affidabili e sicuri, tutti fattori che contribuiscono al successo delle applicazioni industriali e di automazione.

## Bibliografia e sitografia

M. Callegari. Dispense del corso di Robotica Industriale: "Robotica collaborativa", 2021.

"Automazione industriale e robotica applicata". <https://www.atec.srl/>

Omar Palazzotto. "Studio E Realizzazione Di Una Cella Robotica Collaborativa Per Applicazioni Di Lucidatura Robotizzata", 2023.

Talal El Beick. "Progettazione Dei Compiti Di Un Robot Collaborativo Industriale Per La Finitura Superficiale Di Componenti Stampati In 3D", 2023.

"I robot mobili stanno rivoluzionando l'industria manifatturiera".  
<https://www.kivnon.com/it/mobile-robots-revolutionizing-the-manufacturing-industry/>

"Robot Industriali: cosa sono, a cosa servono e i principali vantaggi".  
<https://www.arco.srl.com/robot-industriali-cosa-sono-a-cosa-servono-e-i-principali-vantaggi/>

"La robotica in Italia, il 2023 è l'anno della svolta", 2023.  
<https://www.avvenire.it/economia/pagine/la-robotica-in-italia>

"Lo stato dell'arte della robotica avanzata in Italia", 2020.  
<https://blog.artes4.it/robotica-e-intelligenza-artificiale-lo-stato-dellarte-in-italia>

"Maschiatore pneumatico: funzionamento e come sceglierlo", 2023.  
<https://www.ober.it/it/new/maschiatore-pneumatico-funzionamento-come-sceglierlo>

"Utensili pneumatici: quali sono i vantaggi e come funzionano", 2022.  
<https://www.ober.it/it/new/utensili-pneumatici-quali-sono-i-vantaggi-e-come-funzionano>

Dassault Systèmes. "SLA 3D Printing Materials Compared".  
<https://www.3ds.com/make/solutions/blog/sla-3d-printing-materials-compared>

"Selection of Robotic Machining Parameters with Pneumatic Feed Force Progression", 2022.  
<https://www.mdpi.com/2079-9292/11/19/3211>

"Xcelerator Academy by Siemens".  
<https://training.plm.automation.siemens.com/index.cfm>

"Curve Fitter". <https://it.mathworks.com/help/curvefit/curvefitter-app.html>

Bobby K Pappachan, Wahyu Caesarendra, Tegoeh Tjahjowidodo and Tomi Wijaya, "Frequency Domain Analysis of Sensor Data for Event Classification in Real-Time Robot Assisted Deburring", *Sensors* 2017, 17(6), 1247. <https://doi.org/10.3390/s17061247>

FANUC Robot CRX-10iA, CRX-10iA/L, Mechanical Unit Operator's Manual, FANUC Corporation.

FANUC Robot series R-30iB Mini Plus Controller Tablet UI Operator's Manual.

FANUC Robot series R-30iB Mini Plus Controller Operator's Manual (Basic Function).

FANUC Robot series R-30iB Mini Plus Controller Operator's Manual (Collaborative Robot Function).

FANUC Robot series R-30iB Mini Plus Controller Dual Check Safety Function Operator's Manual.

FANUC Robot series R-30iB Mate Plus Controller Force Control Deburring Package Operator's Manual.

FANUC Robot series R-30iB Mini Plus Controller Force Sensor Operator's Manual.

FANUC Robot series R-30iB/ R-30iB Mate Controller Operator's Manual (Alarm Code List).

SCHUNK, Assembly and Operating Manual, RCV, Radially Compliant Vane Motor Deburring Tool.

Manuale utilizzatore PARKSIDE PFBS 160 B2.

"FANUC sensore di forza FS-15iA". <https://crx.fanuc.eu/it/fanuc-force-sensing/>

"Controller R-30iB Plus", sito FANUC.  
<https://www.fanuc.eu/it/it/robot/accessori/robot-controller-and-connectivity>

"Robot CRX-10iA/L", sito FANUC. <https://www.fanuc.eu/it/it/robot/robot-filter-page/robot-collaborativi/crx-10ial>

"OSHA Standard Compliant Pressure Relief 3-Port Valve with Locking Holes".  
<https://docs.rs-online.com/7b4f/A700000009341215.pdf>

"Silencer". <https://docs.rs-online.com/0c31/0900766b813dc1b0.pdf>

"Pressure Gauge Guide". <https://docs.rs-online.com/0a0b/A700000006739558.pdf>

"Guía de válvulas para fluidos industriales".  
[https://static.smc.eu/binaries/content/assets/smc\\_es/soluciones/smc\\_guia-rapida-valvulas-fluidos\\_jsx.pdf](https://static.smc.eu/binaries/content/assets/smc_es/soluciones/smc_guia-rapida-valvulas-fluidos_jsx.pdf)

"Elettrovalvola servopilotata a 2 vie". [https://static.smc.eu/pdf/VXZ2-A\\_IT.pdf](https://static.smc.eu/pdf/VXZ2-A_IT.pdf)

"Elettrovalvola a 3 vie Ad azionamento diretto". [https://static.smc.eu/pdf/VT\\_A\\_IT.pdf](https://static.smc.eu/pdf/VT_A_IT.pdf)

"Filtro disoleatore/Silenziatore di scarico". [https://static.smc.eu/pdf/AMC\\_IT.pdf](https://static.smc.eu/pdf/AMC_IT.pdf)

"Unità F.R.L modulari". [https://static.smc.eu/pdf/AC-B-B\\_IT.pdf](https://static.smc.eu/pdf/AC-B-B_IT.pdf)

"Unità F.R.L modulari". [https://static.smc.eu/pdf/ACD-C\\_IT.pdf](https://static.smc.eu/pdf/ACD-C_IT.pdf)

"Filtri per il trattamento dell'aria compressa".  
[https://content2.smcetech.com/pdf/AFF\\_AM\\_AMD\\_AMK-C\\_IT.pdf](https://content2.smcetech.com/pdf/AFF_AM_AMD_AMK-C_IT.pdf)



# Indice delle figure

Figura 1.1. 1: Esempio di Robot industriale. ....	7
Figura 1.1. 2: Cella robotizzata. ....	8
Figura 1.2. 1: Operatore umano impegnato in un'applicazione congiunta con un Cobot. ....	9
Figura 1.4. 1: "Piramide della sicurezza", normative sulla sicurezza per la robotica. ....	12
Figura 2.1. 1: FANUC CRX-10iA/L. ....	14
Figura 2.1. 2: Spazio di lavoro del robot. ....	15
Figura 2.1. 3: Controller "FANUC R-30iB Mini Plus". ....	17
Figura 2.1. 4: Connettori del "FANUC CRX-10iA/L". ....	17
Figura 2.2. 1: Sensore di forza "FANUC FS 15-iA". ....	18
Figura 2.2. 2: Direzione delle forze e dei momenti misurati. ....	18
Figura 2.3. 1: Levigatrice PARKSIDE 160 B2. ....	19
Figura 2.4. 1: Mandrino di sbavatura "RCV-490" della SCHUNK. ....	21
Figura 2.4. 2: Forze di compensazione massime del mandrino. ....	23
Figura 2.4. 3: Andamento della forza in funzione della pressione di esercizio. ....	23
Figura 2.4. 4: Curve coppia e potenza in funzione della velocità. ....	24
Figura 2.5. 1: Schema del circuito pneumatico. ....	26
Figura 2.5. 2: Collegamento della compensazione (1) e dell'aria al motore (2). ....	26
Figura 2.5. 3: Gruppo F.R.L. ....	27
Figura 2.5. 4: Valvola di rilascio "VHS40-F04-D 1/2". ....	28
Figura 2.5. 5: Silenziatore pneumatico "AN30-03 G.3/8". ....	28
Figura 2.5. 6: Filtro "AFF40-F04D-C". ....	29
Figura 2.5. 7: Manometro "G46-10-01-L". ....	29
Figura 2.5. 8: Modulo di derivazione a T "Y410-F02-D". ....	30
Figura 2.5. 9: Regolatore pneumatico "AR40K-F04-D". ....	30
Figura 2.5. 10: Elettrovalvola "JSXZ51-CN06F-5DS". ....	31
Figura 2.5. 11: Squadra di fissaggio "Y400T-D" (in alto a sinistra) e squadra di fissaggio "Y400-D" (in alto a destra), esempio di assemblaggio (in basso). ....	31
Figura 2.5. 12: Regolatore pneumatico "AR30K-F03BE-B". ....	32
Figura 2.5. 13: Elettrovalvola "VT307-5DZ1-02F-F-Q". ....	32
Figura 2.5. 14: Gruppo F.R.L (in rosso), regolatore pneumatico "AR30K-F03BE-B" (in verde), elettrovalvole (in arancione) e relè (in blu). ....	33
Figura 2.5. 15: Alimentatore da banco. ....	33
Figura 2.5. 16: Schema del modulo del blocco di conversione "A05B-2695-J150". ....	34
Figura 2.5. 17: Dettaglio dei relè per il controllo delle elettrovalvole. ....	34
Figura 2.5. 18: Dettaglio dei pin all'interno del controllore "FANUC R-30iB Mini Plus". ....	35
Figura 3.1. 1: Teach Pendant. ....	37
Figura 3.1.1. 1: Interfaccia utente. ....	37
Figura 3.1.1. 2: Configurazione real time del robot. ....	38
Figura 3.2. 1: Blocchi di programmazione disponibili. ....	39
Figura 3.2.1. 1: Possibili configurazioni per la contornatura. ....	40
Figura 3.2.1. 2: Insegnamento dei punti con cambi notevoli di postura del robot (sinistra) e con cambio di direzione (destra). ....	40
Figura 3.2.1. 3: Contornatura con direzione di spinta costante. ....	41
Figura 3.2.1. 4: Contornatura con direzione di spinta variabile. ....	41
Figura 3.2.1. 5: Postura del robot nel punto di apprendimento. ....	42
Figura 3.2.1. 6: Esempio di una buona (sinistra) ed una cattiva (destra) acquisizione di punti. ....	42
Figura 3.2.1. 7: Force Contouring Start. ....	43
Figura 3.2.1. 8: Force Contouring End. ....	43
Figura 4.1.1. 1: Piastra di alluminio di dimensione 18 x 8.5 x 0.3 cm. ....	44
Figura 4.1.1. 2: Programma a blocchi per l'operazione di lucidatura. ....	45
Figura 4.1.1. 3: Script in "Karel" per l'operazione di lucidatura. ....	45
Figura 4.1.1. 4: Parametri della funzione di Force Contouring. ....	46
Figura 4.1.1. 5: Database estratto e convertito in formato ".xlsm". ....	47
Figura 4.1.1. 6: Grafici della forza Fz [N] delle prove di lucidatura. ....	48
Figura 4.1.2. 1: Disposizione orizzontale della tavoletta di legno. ....	49

Figura 4.1.2. 2: Grafico di Fz [N] con tavoletta orizzontale.....	49
Figura 4.1.2. 3: Disposizione con lato obliquo della tavoletta.....	50
Figura 4.1.2. 4: Grafico di Fz[N] con tavoletta con lato obliquo.....	50
Figura 4.1.2. 5: Risultato della lavorazione con controllo in forza (in alto) e risultato della lavorazione con controllo di posizione (in basso).....	51
Figura 5.1. 1: Modello per la stampa del supporto.....	53
Figura 5.1. 2: Stampante di tipo SLA di "Formlabs" (sinistra) e forno con lampada UV (destra).....	54
Figura 5.1. 3: Operazione di lucidatura effettuata dal robot con l'utensile installato.....	54
Figura 5.2. 1: CAD della penna levigatrice e del supporto.....	55
Figura 5.2. 2: Blocco dell'analisi modale in "Ansys Workbench".....	56
Figura 5.2. 3: Ansys Mechanical Enterprise.....	56
Figura 5.2. 4: Impostazione della velocità di rotazione dell'utensile (in rosso).....	57
Figura 5.2. 5: Risultati dell'analisi modale del supporto.....	57
Figura 5.2. 6: Modello CAD della base del supporto pieno (destra) ottenuto a partire dalle versioni precedenti del pezzo A e B (sinistra).....	58
Figura 5.2. 7: Sequenza dei blocchi per le analisi in ambiente "ANSYS Workbench".....	58
Figura 5.2. 8: Primo risultato di ottimizzazione topologica ottenuto.....	59
Figura 5.2. 9: Modello CAD della base del supporto ottimizzato.....	59
Figura 5.2. 10: Base del supporto non ottimizzata (sinistra), base ottimizzata (destra).....	60
Figura 5.3. 1: Grafico di Fz [N] con supporto non ottimizzato (in blu) e grafico di Fz [N] con supporto ottimizzato (in rosso).....	61
Figura 6. 1: Operazione di incisione su piastra in alluminio.....	62
Figura 6. 2: Prove di incisione sulla piastra di alluminio.....	63
Figura 6.1. 1: Modello 3D del robot.....	63
Figura 6.1. 2: Finestra per l'inserimento del "Machine Base Component".....	64
Figura 6.1. 3: Finestra "Edit Axis".....	65
Figura 6.1. 4: Finestra "Define Kinematic Chains".....	66
Figura 6.3. 1: Sistema "HEAD_BASE".....	68
Figura 6.4. 1: Operazione di incisione su tavoletta in legno.....	68
Figura 6.4. 2: Due viste del sistema robot – utensile in ambiente NX-CAM.....	69
Figura 6.4. 3: Parametri della fresa sferica.....	70
Figura 6.4. 4: Finestra per generare la traiettoria della "POSA_INIZIO".....	71
Figura 6.4. 5: Posizione dei giunti (sinistra) e posa del robot (destra) nella seconda configurazione... ..	72
Figura 6.4. 6: Posizione dei giunti (sinistra) e posa del robot (destra) nella terza configurazione.....	72
Figura 6.4. 7: Parametri per l'operazione di "CONTOUR_TEXT".....	73
Figura 6.4. 8: Programma complessivo.....	73
Figura 6.4. 9: Dettaglio dell'operazione di incisione in ambiente NX-CAM della scritta "MIR lab" sulla tavoletta.....	74
Figura 7.1. 1: Elemento per la connessione alla flangia del robot.....	75
Figura 7.1. 2: Elemento intermedio del supporto.....	76
Figura 7.1. 3: Distanziale per la connessione con il mandrino.....	76
Figura 7.1. 4: Modello del supporto complessivo.....	76
Figura 7.1. 5: Montaggio del primo elemento alla flangia del robot (in alto a sinistra), montaggio dell'elemento intermedio con distanziale al mandrino (in alto a destra) e montaggio completo (in basso).....	77
Figura 7.2. 1: Configurazione della cella robotizzata.....	78
Figura 7.2. 2: Modello del campione (sinistra) e campione in acciaio (destra).....	79
Figura 7.2. 3: Punti della traiettoria per l'operazione di asportazione del materiale.....	79
Figura 7.2. 4: Script in "Karel" per l'operazione con il mandrino.....	80
Figura 7.2. 5: Punta per fresatura del legno PARKSIDE.....	80
Figura 7.2. 6: Dettaglio del risultato della prima prova.....	81
Figura 7.2. 7: Dettaglio della prova con velocità di avanzamento di 8 mm/s.....	81
Figura 7.2. 8: Confronto tra il nuovo risultato e di primo tentativo (in alto a sinistra), risultato della nuova prova (in alto a destra) e dettaglio dello scalino del profilo superiore della tavoletta della nuova prova (in basso).....	82
Figura 7.2. 9: Risultato della prova con diversi valori di compensazione.....	83
Figura 7.2. 10: Confronto dei risultati della nuova prova (sinistra) con quelli della prova precedente (destra).....	84

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 2.1. 1: Range di movimento e velocità massima dei giunti. ....</i>	<i>15</i>
<i>Tabella 2.1. 2: Specifiche generali del robot. ....</i>	<i>16</i>
<i>Tabella 2.2. 1: Confronto dati tecnici dei sensori di forza e torsione esterna realizzati da FANUC. ....</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 2.3. 1: Dati tecnici "PARKSIDE 160 B2". ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 2.3. 2: Regolazione del numero di giri in funzione del materiale da lavorare. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 2.3. 3: Regolazione del numero di giri in funzione dell'accessorio impiegato.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 2.4. 1: Specifiche tecniche del mandrino "RCV-490" della SCHUNK.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 2.5. 1: Bill of Materials. ....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 2.5. 2: Segnali di output dell'interfaccia del dispositivo. ....</i>	<i>35</i>