

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

**SCUOLA POLITECNICA**

**DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
INGEGNERIA MECCANICA**

**Processi di produzione su macchine utensili  
ricongfigurabili: modello per la descrizione semantica  
delle lavorazioni**

**Relatori:**

Chiar.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Alessandro Bruzzone

Chiar.<sup>ma</sup> Prof. Ing. Doriana D'Addona

**Allievo:**

Pier Andrea Tornatore

Marzo 2021

# **Processi di produzione su macchine utensili riconfigurabili: modello per la descrizione semantica delle lavorazioni**

## **Sommario**

Lo sviluppo manifatturiero degli ultimi anni ha trasformato completamente la politica di produzione delle aziende, ci si è spostati infatti dalla “Mass production” alla “Mass Customization”. Per rimanere competitivi a livello settoriale è quindi necessario sapersi adattare alle rapide variazioni di domanda del mercato. A tale scopo si stanno sviluppando i Reconfigurable Machine System (RMS) che tramite l’utilizzo di Reconfigurable Machine Tools (RMT) possono raggiungere gli obiettivi prefissati di resilienza e flessibilità nella nuova realtà industriale dell’e-manufacturing. È chiaro però come le macchine riconfigurabili siano sistemi con un numero elevatissimo di gradi di libertà con flessibilità molto maggiore rispetto ai macchinari convenzionali. L’elevato numero di elementi e parti costituenti tali macchine rendono però complessa l’organizzazione del sistema manifatturiero che volge da un assetto statico a uno dinamico. Lo sviluppo di un modello semantico per la descrizione del ciclo di lavorazione eseguibile per mezzo di una RMT risulta quindi di fondamentale importanza al fine di poter poi essere integrato nel sistema di progettazione e organizzazione della produzione per migliorarne l’efficienza.

# **Manufacturing processes for reconfigurable machine tools: model for the semantic description of machining**

## **Abstract**

The development of manufacturing in recent years has completely transformed the production policy of companies, moving from "Mass Production" to "Mass Customization". To remain competitive in the manufacturing area, it is therefore necessary to be able to adapt to rapid changes in market demand. To this end, Reconfigurable Machine Systems (RMS) are being developed which, through the use of Reconfigurable Machine Tools (RMT), can achieve the objectives of resilience and flexibility in the new industrial reality of e-manufacturing. However, it's clear that reconfigurable machines are systems with a very high number of degrees of freedom with much greater flexibility than conventional machines. The high number of elements and parts composing these machines, however, make the organization of the manufacturing system complex, as it moves from a static to a dynamic structure. The development of a semantic model for the description of the machining cycle executable by means of a RMT is therefore of fundamental importance in order to be integrated into the design and organization of the manufacturing system to improve its efficiency.

# Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Alessandro Bruzzone e la Prof. Doriana D'Addona per avermi dato l'opportunità di lavorare a questo progetto, senza la loro esperienza, acume, ingegno e soprattutto pazienza non sarei qui oggi a discutere questo elaborato di tesi.

Scrivere i ringraziamenti non è mai facile; spero di non tralasciare nessuno, anche se è difficile riassumere in poche semplici righe tutte le emozioni che questo corso di studi mi ha fatto provare durante questi anni. Tutti i momenti belli, ma anche gli imprevisti che hanno contribuito a farmi maturare, vivere nuove esperienze e costruire nuove amicizie.

Iniziamo dai “compagni di battaglia”; ringrazio per primo Eugenio, fortunata conoscenza del primo anno di università, che mi ha poi accompagnato per la maggior parte del corso di studi, grande figura di appoggio in tutti i campi in cui un amico possa aver bisogno. Non dimentichiamoci poi di Marco, Jacopo, Gabriele e Luigi, mitico quartetto di studio con il quale ho passato tanti bei pranzi al sushi e indimenticabili chiacchierate sui “massimi sistemi” di cui studenti di ingegneria possano mai discutere durante le pause dallo studio (sappiamo di cosa parliamo). Ringrazio anche tutti i compagni di corso, che quotidianamente sono riusciti a rubarmi un sorriso negli intervalli fra le lezioni. Ultimo ma non per importanza, un ringraziamento a Damiano, collega e grande fungaiolo con cui condivido questa passione, per i suoi minuziosi e preziosi consigli per preparare alcuni degli ultimi esami, speriamo di vederci presto!

Un caloroso ringraziamento a tutti gli amici conosciuti al di fuori dell'ambiente universitario: Bianca, Michele, Fulvio, Aurora, Pietro. Senza dimenticare degli assidui frequentatori di circoli nerd ai bordi della normale società: un grazie ai team di Kuldotha, DS e RoccaTreCorvi, di cui saluto Matteo, Arturo e tutti i ragazzi. Infine, concludendo la cerchia di conoscenti incontrati oltre provincia, un sentito ringraziamento a Tommaso, Marco, Corrado, Leonardo, Matteo, Alessio, Melis, Lorenzo, Fabio, Federico e Andrea, senza la cui compagnia, sostegno morale, infinite risate e insulti non sarei arrivato qui oggi. Quasi in conclusione, vorrei ringraziare tutti i miei amici di infanzia che per questione di spazio non posso citare, grazie a voi ragazzi, se sono qua oggi è in parte anche per merito vostro.

Un ringraziamento alla mia ragazza Chiara, anche se non vorrebbe essere citata per la sua infinita timidezza, per avermi sopportato in quest'ultima parte del percorso universitario.

Infine, ringrazio chi più di tutti mi ha supportato in questi anni, i miei genitori. Ringrazio mio padre Paolo per il grande sostegno datomi come figura paterna, nonostante i suoi impegni politici e lavorativi lo tenessero costantemente impegnato, grazie per tutti gli insegnamenti di cui ho fatto tesoro; spero un domani di poterli tramandare ai miei figli. Ringrazio mia madre Antonella, grande donna, per essere sempre stata presente come ogni madre farebbe con il proprio figlio, all'insegna di dolcezza, semplicità, presenza, amore e serietà.

Brindiamo oggi, anche se in pandemia, per non scordarci di questi bei momenti.

*A mio nonno, Alessandro*

# Indice

<b>Sommario</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>Ringraziamenti</b> .....	III
<b>1 - Introduzione</b> .....	1
1.1 – Struttura e scopo della tesi.....	1
<b>2 – Evoluzione dei sistemi manifatturieri e delle macchine utensili</b> .....	2
2.1 – Cenni storici e stato dell’arte dei sistemi manifatturieri.....	2
2.2 – Reconfigurable Machine Tools.....	4
<b>3 – Architettura RMT Profacere®</b> .....	9
3.1 – Principio di funzionamento.....	9
3.2 – Basamento e tavole.....	11
<b>4 – Approccio con ER Model</b> .....	16
4.1 – Cenni sulla progettazione di base dati.....	16
4.2 – Modello Entity-Relationship.....	16
4.2.1 – Ciclo di lavorazione delle piastre di regolazione.....	16
4.3 – Modello Enhanced Entity-Relationship.....	21
<b>5 – Definizione casi di studio</b> .....	22
5.1 – Casi Test.....	22
5.1.1 – Geometria delle piastre. ....	22
5.2 – Cenni sui cicli di lavorazione .....	25
5.3 – Designazione cicli di lavoro su Fusion360.....	26
5.3.1 – Ciclo di lavorazione delle piastre di regolazione.....	26
5.3.2 – Ciclo di lavorazione dei perni di centraggio.....	30
5.3.3 – Ciclo di lavorazione per ottenimento geometrie finali.....	31
5.4 – Stesura del foglio di lavorazione.....	31
5.5 – Approccio cicli di lavorazione convenzionali tramite ERD .....	41
5.6 – Approccio cicli di lavorazione con RMS tramite ERD .....	48
<b>6 – Analisi dei risultati</b> .....	50
<b>7 – Conclusioni e sviluppi futuri</b> .....	51

<b>Bibliografia .....</b>	<b>52</b>
<b>Abbreviazioni e acronimi.....</b>	<b>53</b>

# 1. Introduzione

Il settore manifatturiero può essere immaginato come un insieme di attività finalizzate alla trasformazione in beni commerciali o economici delle materie prime o dei semilavorati. In tale sistema manifatturiero possono distinguersi molteplici elementi fisici, fra i quali persone, strumentazioni, macchinari, hardware e attrezzature per la movimentazione dei materiali da lavorare. In prima approssimazione possiamo quindi dire che gli input di tale sistema siano le materie prime o i semilavorati; l'insieme delle trasformazioni costituiscono il processo di produzione vero e proprio (o ciclo di lavorazione), mentre gli output del sistema sono rappresentati dal bene economico finale che verrà poi immesso sul mercato.

La configurazione di tale sistema è funzione di un innumerevole numero di fattori; fra i più importanti è utile citare il volume di produzione e la tipologia di prodotti da realizzare a seconda delle richieste di mercato. Per poter configurare quindi un sistema di produzione risulta necessario tenere in considerazione le tecnologie disponibili e la fattibilità dei processi di produzione. Evitando di approfondire l'evoluzione dell'industria manifatturiera nell'ultimo secolo in questa breve introduzione, risulta più utile forse concentrarsi sullo stato attuale di essa, trovandosi infatti al giorno d'oggi nella cosiddetta quarta rivoluzione industriale o in gergo: Industria 4.0. Tale stadio evolutivo dei sistemi di fabbricazione estende l'impiego della meccatronica, la cui origine risale agli anni '50 del secolo scorso, al fine di migliorare e ottimizzare la funzionalità di un sistema di produzione.

I mercati di oggi richiedono sempre più prodotti personalizzati ma con cicli di vita inferiori se confrontati con quelli prodotti nel XX secolo; in risposta a queste necessità i sistemi di produzione si sono evoluti dalla produzione di massa alla personalizzazione di massa. In tale campo la flessibilità delle linee di produzione risulta essere il fattore chiave per adattarsi alle repentine variazioni dei fabbisogni del mercato. Al fine di raggiungere tale risultato, i Reconfigurable Manufacturing System o RMS nascono per affrontare l'incertezza e la domanda personalizzata combinando entrambi i vantaggi delle linee di produzione dedicate e dei sistemi di produzione flessibili.

## 1.1 Struttura e scopo della tesi

Questo elaborato di tesi nasce dalla necessità di individuare un sistema semantico formale per identificare un modello con il quale ottimizzare i collegamenti fra le parti di tali macchinari. La tesi si concentrerà sull'introduzione di un possibile modello utilizzabile e sulla sua applicazione a due differenti casi di cicli di lavorazione, riguardanti un componente stesso della macchina riconfigurabile, prima secondo un metodo convenzionale e poi immaginando di eseguirlo sulla RMT. In questo modo sarà possibile eseguire un confronto fra i due cicli per evidenziare le eventuali differenze.

## 2. Evoluzione dei sistemi manifatturieri e delle macchine utensili

### 2.1 Cenni storici e stato dell'arte dei sistemi manifatturieri

Nella descrizione e organizzazione di un sistema manifatturiero un primo approccio è storicamente riconducibile a Frederick Winslow Taylor da cui prende il nome l'approccio stesso; tale modello è esposto all'interno della sua monografia "The Principle of Scientific Management" o italianizzato: L'organizzazione scientifica del lavoro. Tale teoria, nata da una forte critica alla disomogeneità dei processi produttivi e alle mansioni compiute in officina, si basa sulla razionalizzazione del ciclo produttivo attraverso la scomposizione e suddivisione di tutti i processi di lavorazione in singole e ben definite operazioni alle quali venivano assegnate tempi standard di esecuzione. Questo processo può brevemente essere riassunto in tre fasi:

- Analisi critica del compito da svolgere
- Creazione del prototipo di operaio utile a svolgere tale compito
- Selezione del lavoratore ideale, in modo da formarlo e introdurlo nell'azienda

La prima effettiva introduzione di tale metodo si deve a Henry Ford, quando nel 1913 realizzò la catena di montaggio per la costruzione e produzione del modello T, automobile divenuta padrona del mercato per via dei suoi prezzi competitivi.

I modelli di organizzazione e descrizione dei sistemi manifatturieri si sono poi evoluti nell'ultimo secolo snellendosi e perfezionandosi sempre di più, fino ad arrivare al concetto di Group Technology (GT) e Cellular Manufacturing. L'idea di base del concetto è semplice, ovvero suddividere insieme tecnologici in sottoinsiemi fra loro simili denominati famiglie. Tale suddivisione è effettuata allo scopo di ottenere vantaggi organizzativi ed economici. Le operazioni vengono quindi pianificate preferenzialmente rispettando la famiglia delle parti piuttosto che il singolo pezzo. Un esempio è mostrato nella fig. 2.1.

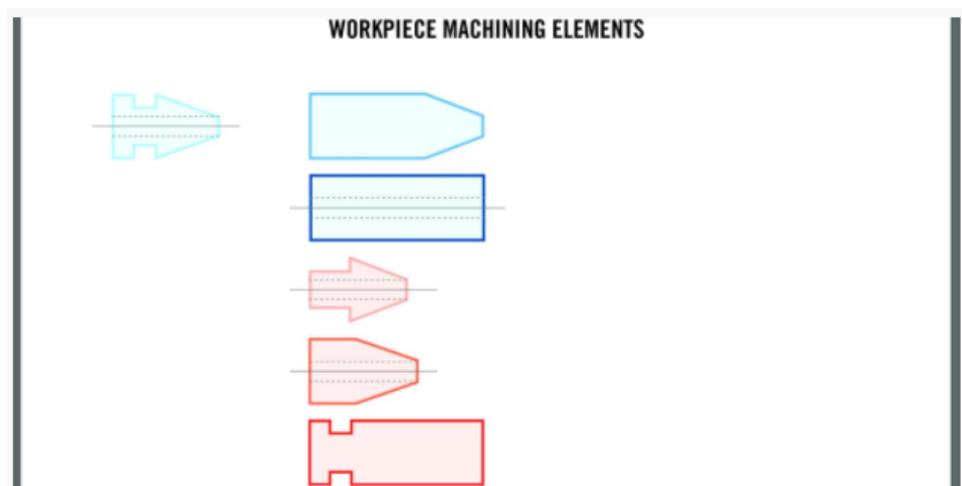


Fig. 2.1 Esempio di suddivisione secondo Group Technology [1]

Quando la produzione è organizzata per la gestione di famiglie di parti, la disposizione viene descritta come Cellular Manufacturing (Fig. 1.2). Quest'ultima è divenuta famosa negli anni '80, con l'inizio dell'era della produzione di HMLV (high-mix low-volume). La determinazione di queste famiglie si basa sulla codificazione e classificazione delle parti. A ogni parte viene assegnato un codice che può essere composto da lettere, cifre o entrambe, tale codice è rappresentante una determinata caratteristica del pezzo o una tecnica necessaria per la produzione del pezzo. I codici pezzo vengono quindi utilizzati per la pianificazione della produzione. Il vantaggio riguardante l'adozione di tale modello è quella di ridurre notevolmente i flussi produttivi con conseguente semplificazione dei trasporti ad essi legati. Purtroppo, viene meno la flessibilità dell'impianto siccome ogni cellula può produrre una sola famiglia di pezzi.

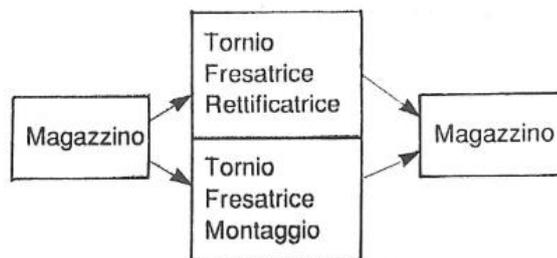


Fig. 2.2 – Cellular Line Production [2]

Un altro modello adottato dall'industria manifatturiera è la “Produzione per linee o a trasferimento” (transfer lines, Fig. 2.2. In questo caso l'insieme delle macchine è progettato per la realizzazione di una ben definita sequenza di lavorazioni, destinata a massimizzare la produzione diminuendo le varianti ottenibili dal ciclo manifatturiero. Il flusso dei materiali risulta quindi lineare da una macchina all'altra e generalmente risulta completamente automatizzato, ciò si traduce in una gestione semplificata della produzione in serie ma comporta una flessibilità quasi nulla.

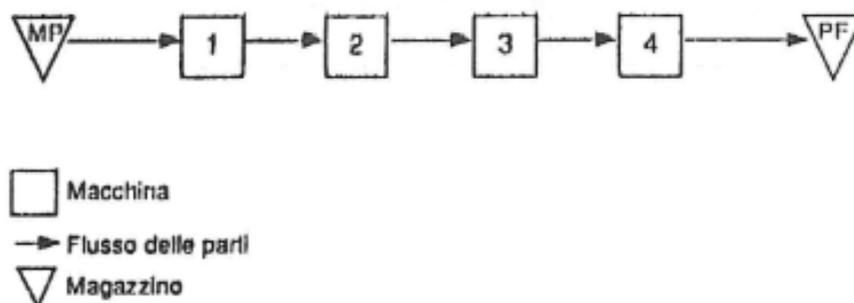


Fig. 2.3 – Transfer Lines Production [2]

Al giorno d'oggi l'economia attuale risulta spostarsi da una filosofia chiamata "Mass Production" ad una completamente nuova denominata "Mass Customization". Ciò comporta cicli di vita sempre più brevi; ciò è anche in parte dovuto all'evoluzione tecnologica che introduce quotidianamente nuovi prodotti o migliora le categorie già esistenti. L'industria necessita quindi di creare una grandissima varietà dei prodotti in periodi di tempo brevissimi e allo stesso tempo essere in grado di poter variare la produzione non appena il mercato inizia a muoversi in nuove direzioni. Da ciò nasce la necessità di determinare un modello per l'ottimizzazione di un ciclo manifatturiero basato sull'utilizzo di macchine riconfigurabili, che meglio si prestano alle repentine variazioni di domanda del mercato. I modelli tradizionali accennati poco prima si sono dimostrati validi per la trattazione di casi statici; le macchine riconfigurabili richiedono però strumenti più flessibili; si è pensato quindi di utilizzare il modello Entity-Relationship.

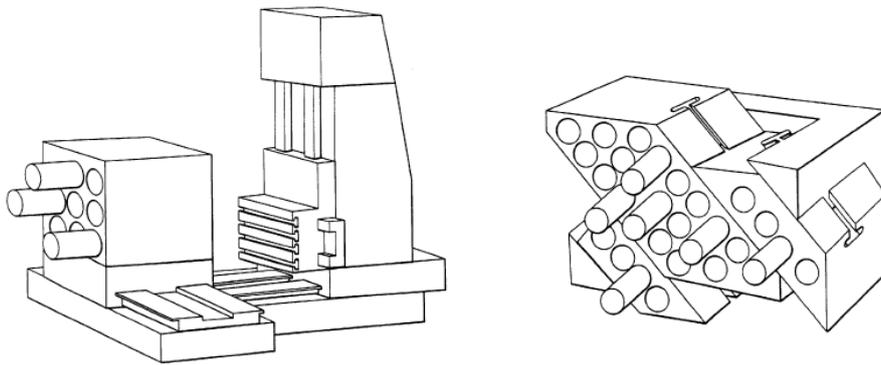
## 2.2 Reconfigurable Machine Tools

La capacità produttiva ha sempre svolto un ruolo fondamentale nella crescita della società e nello sviluppo della civiltà umana. Sin dall'età preistorica, la capacità di superare i limiti fisici umani ha fornito strumenti sempre più adatti a sfruttare le risorse naturali, consentendo di raggiungere un ruolo economico, politico, militare predominante fra le società che via via si sono sviluppate nel corso dei secoli. Con l'avvento della globalizzazione la strategia produttiva si è spostata da un'attività di produzione locale a un'organizzazione di rete globale non più limitata al singolo distretto industriale. Sfortunatamente l'avvento dell'attuale pandemia COVID-19 ha mostrato allo stesso tempo come l'organizzazione della produzione basata sulla catena degli approvvigionamenti sia messa in crisi dagli effetti di una qualunque emergenza globale; la resilienza del sistema manifatturiero dovrebbe quindi diventare un fattore chiave nella politica di produzione. Yoram Koren è stato il primo ricercatore che ha proposto un sistema di produzione riconfigurabile nel 1999.

Un RMS può essere definito come "un sistema di produzione, progettato fin dall'inizio, di modo che i componenti della specifica macchina, le celle di produzione o i sistemi di movimentazione dei materiali possano essere aggiunti rimossi, modificati o scambiati per rispondere rapidamente alle mutevoli esigenze del mercato" [3].

Le caratteristiche chiave che rendono i sistemi RMS innovativi ed efficienti rispetto ai loro predecessori sono:

- **Modularità:** In un sistema riconfigurabile tutte le componenti principali, come gli elementi strutturali, assi, sistemi di controllo, software ed utensili, sono modulari. Quindi in caso di necessità le componenti possono essere sostituite o aggiornate per adattarsi al meglio alle nuove funzionalità e applicazioni richieste. Tramite l'utilizzo e la selezione di moduli di base e metodologie di sintesi, si possono creare sistemi facilmente integrabili, convertibili e personalizzabili. Un esempio di tale modularità è raffigurato nella Fig. 2.4



*Fig. 2.4 – Vari esempi di modularità [3]*

- **Integrabilità:** come supporto alla progettazione di tali sistemi viene utilizzato un insieme di regole formali per la configurazione e integrazione dei moduli. Ogni modulo è dotato di apparati per l'integrazione, ovvero appropriati dispositivi meccanici ed elettrici che si prestano quale interfaccia fra i vari moduli per lo scambio di informazioni e la trasmissione di potenza.
- **Customizzazione:** al fine di ridurre i costi del sistema e degli apparati di controllo, gli elementi di un RMS devono poter essere modificati in modo da adattarsi alle caratteristiche dominanti di una famiglia di parti o alle applicazioni.
- **Convertibilità:** la conversione del sistema, caratteristica rappresentante della sua capacità di adattamento, deve essere portata a termine in tempi brevi in modo da risultare il più efficace possibile. Al fine di ottenere tale risultato, un RMS contiene meccanismi e controlli avanzati che permettono una rapida riconfigurazione, mentre i sistemi di sensori e controllo permettono una veloce e semplice calibrazione delle macchine dopo tale riconfigurazione.

All'interno di tali sistemi riconfigurabili si possono utilizzare le macchine utensili riconfigurabili, le RMT (Reconfigurable Machine Tools). Tali macchine sono state ideate per poter far fronte alla richiesta di volumi variabili di prodotti; allo stesso tempo le RMT devono essere poco costose e altamente customizzabili in modo tale da poter seguire l'andamento del mercato. Lo spin-off Profacere<sup>®</sup> riconosciuto dall'Università di Genova e dall'Università Federico II di Napoli, si sta occupando della progettazione e configurazione di una RMT innovativa, per la quale sono stati depositate già diverse domande di brevetto, alcuni dei quali già concessi [5, 6, 7].

L'architettura della RMT Profacere<sup>®</sup>, per mezzo di elementi modulari, ha una struttura completamente scalabile che permette di ospitare ed integrare dinamicamente differenti tecnologie di lavorazione [8]. Tale tecnologia, assieme alle sue caratteristiche, fornisce un modo efficiente per implementare un sistema di produzione riconfigurabile, consentendo inoltre il reshoring della produzione e promuovendo un'organizzazione distrettuale della produzione tramite la condivisione dei moduli costituenti le macchine riconfigurabili.

Storicamente l'evoluzione delle macchine utensili è stata resa possibile dalle varie innovazioni tecnologiche che di pari passo seguivano la domanda del mercato. In base alla loro flessibilità, le macchine utensili possono essere classificate come [4, 7]:

- Macchine universali (o polivalenti) di tipo convenzionale o a controllo numerico (CNC). Tali macchine hanno la massima flessibilità e si adattano alle differenti tipologie di lavorazione;
- Macchine automatiche per elevati volumi di produzione. Tali macchine purtroppo necessitano di lunghi tempi di attrezzaggio al variare delle caratteristiche del prodotto fabbricato;
- Macchine speciali monouso. Quest'ultime non hanno alcuna flessibilità in quanto sono progettate per particolari tipologie di lavorazione (macchine custom).

Al fine di migliorare l'efficienza fornendo al tempo stesso un'elevata capacità di produzione, furono sviluppate le Dedicated Manufacturing Line (DML), caratterizzate da un altissimo livello di automazione ed elevati rendimenti. Tuttavia, tale approccio non fornisce la flessibilità necessaria per affrontare la variabilità del prodotto. Fissando come obiettivo quest'ultimo aspetto, negli ultimi '50 anni sono state presentate diverse soluzioni basate sul Flexible Manufacturing System (FMS). Tali sistemi includono macchine utensili a controllo numerico collegate fra loro da sistemi automatizzati per la movimentazione del materiale, tutto il sistema è controllato da un computer centrale con il quale si può ottimizzare e allo stesso tempo controllare il flusso delle parti all'interno del sistema stesso. Questi sistemi per quanto siano più flessibili dei DML richiedono investimenti economici non giustificabili dal punto di vista della richiesta del mercato che potrebbe richiedere capacità produttive inferiori a quelle nominali del sistema.

A partire dagli anni '70, al fine di superare i problemi riportati dai due modelli manifatturieri descritti pocanzi, sono stati avviati differenti progetti considerando la possibilità della riconfigurabilità dell'intero sistema. A titolo d'esempio si ricorda il primo progetto lanciato nel 1977 in Giappone dal MITI, con l'avvio del programma FMC terminato poi con la costruzione di una fabbrica sperimentale nel 1983 a Tsukuba. Nel 1999 i concetti di RMT e RMS furono formalizzati da Koren [2].

Essenzialmente le RMT sono caratterizzate da un approccio incentrato su:

- Rapida riorganizzazione della macchina e dei suoi componenti hardware e software;
- Capacità di produzione flessibile in modo da soddisfare la domanda di mercato, ottenendo modularità, integrabilità, scalabilità, convertibilità e diagnostica.

Fin da allora sono state proposte tre differenti tipologie o architetture di RMT:

- **Macchine utensili modulari RMT:** Esse si basano su una progettazione completamente modulare degli elementi contenuti all'interno della macchina utensile, in tal modo è possibile riorganizzare completamente la macchina tramite la modifica dei moduli. Nonostante la struttura completamente modulare, è necessario lavoro e tempo per aggiornare di volta in volta la configurazione.
- **Multi-tool RMT:** è possibile ottenere una "flessibilità su misura" per una determinata famiglia di pezzi tramite l'utilizzo di un multi-mandrino, che risulta concettualmente paragonabile a una trapanatrice multipla.
- **RMT ad arco:** quest'ultima tipologia di macchina utensile si concentra su lavorazioni di superfici inclinate approfittando della geometria dell'arco, è quindi possibile intagliare superfici perpendicolari tramite l'utilizzo di utensili comuni.

L'utilizzo di diverse RMT con sistemi di movimentazioni dei materiali, quali nastri trasportatori, moduli a portali e moduli per ispezione riconfigurabili, permette di configurare l'intero RMS; alcuni esempi di macchine utensili riconfigurabili sono riportati di seguito (Fig. 2.5, 2.6 e 2.7).

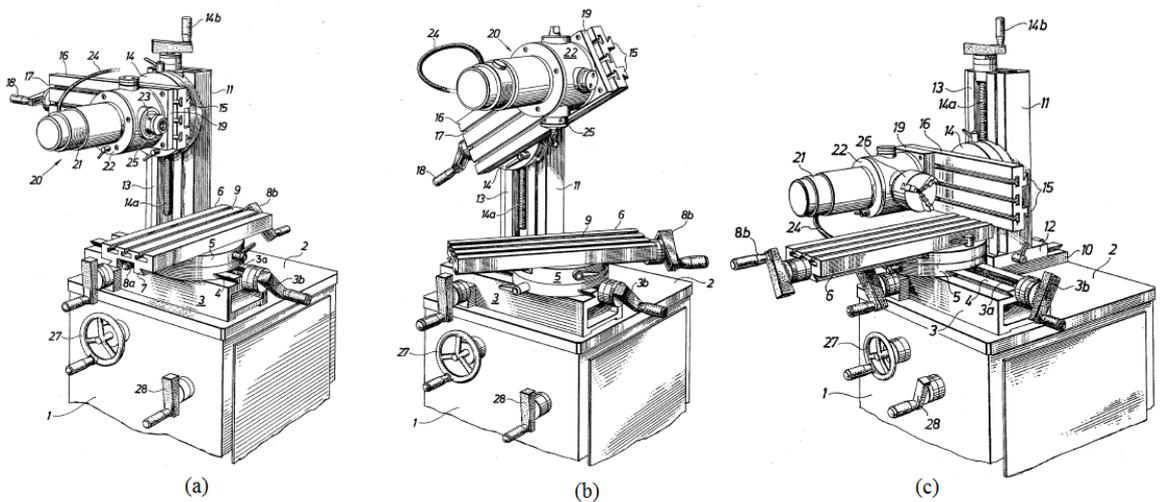


Fig. 2.5 - Macchina utensile proposta da P. O. Aldrin [9]

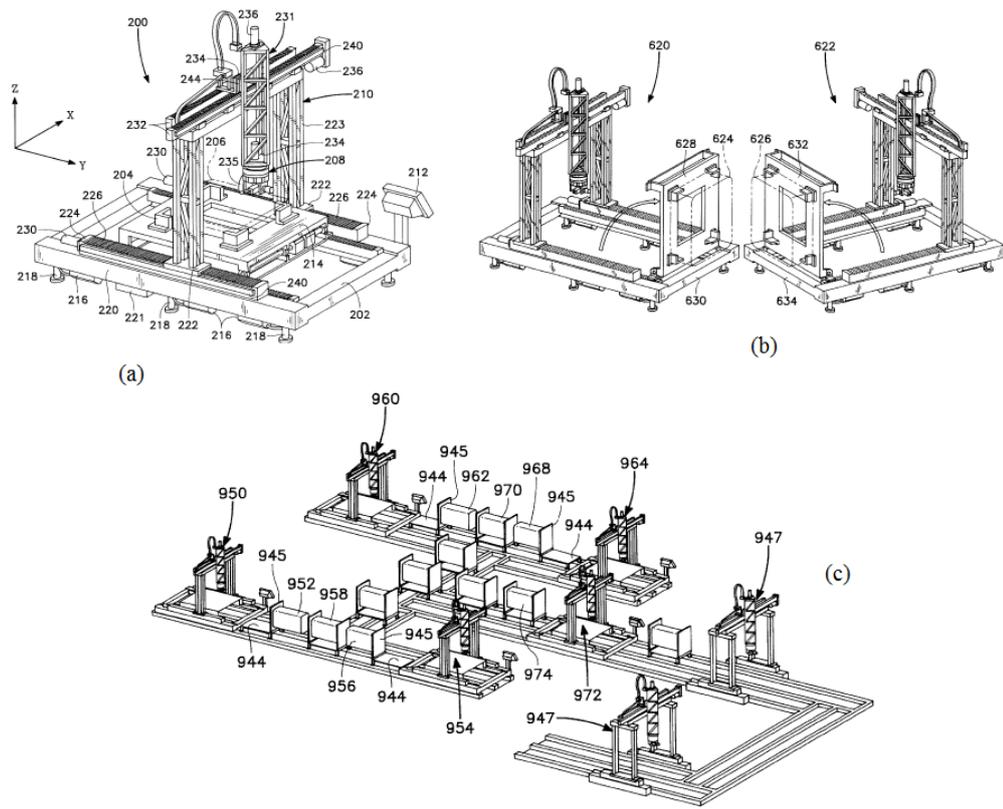


Fig. 2.6 - Macchina utensile a portale proposta da G. N. Bullen [10]

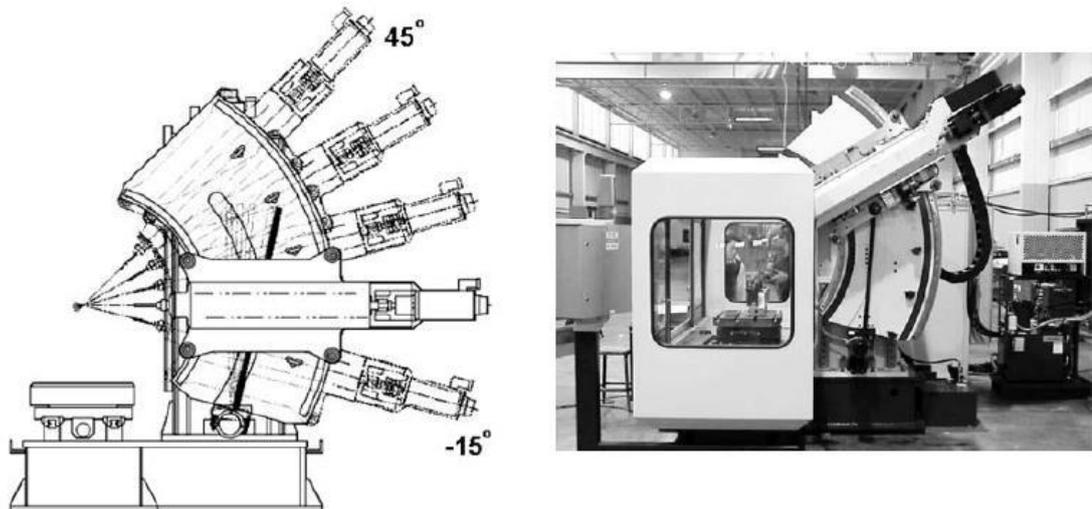


Fig.2.7 - Arch-Type RMT: modello schematico (a sinistra) e versione reale (a destra) [11]

## 3. Architettura RMT Profacere®

### 3.1 Principio di funzionamento

L'architettura innovativa della RMT Profacere® estende il paradigma caratterizzante le macchine utensili riconfigurabili e dei RMS. La riconfigurabilità nasce considerando gli elementi presenti in ogni macchina utensile convenzionale:

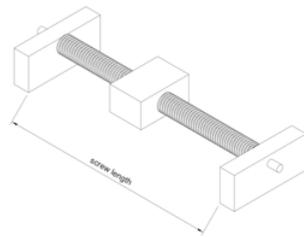
1. Un dispositivo per fornire la potenza richiesta,
2. Un dispositivo per l'ancoraggio e l'orientazione del pezzo,
3. Un dispositivo per il fissaggio e orientamento di un utensile,
4. Un dispositivo per il controllo simultaneo dei tre elementi menzionati sopra,
5. Un dispositivo per l'azionamento dell'utensile in base al processo di lavorazione richiesto.

Tali elementi permettono di ottenere un moto accoppiato relativo fra pezzo e utensile in funzione del processo utilizzato e della lavorazione richiesta dal ciclo di produzione. Le varie funzioni di fissaggio e orientamento dei pezzi diventano elementi comuni fra pezzo e utensile e vengono svolte attraverso una struttura portante denominata "basamento", il quale ospita tutti gli elementi della macchina utensile riconfigurabile.

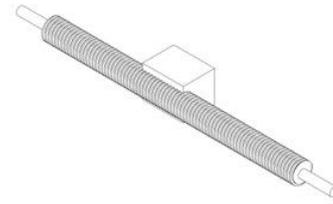
Le caratteristiche di quest'ultima, come il numero di assi utilizzati per il moto relativo fra utensile e pezzo, le dimensioni e la corsa di questi assi e la potenza, determinano la capacità produttiva della macchina utensile, la forma dei pezzi che essa può realizzare, le loro dimensioni e l'accuratezza geometrica dei prodotti.

La nuova architettura si basa sullo scambio di ruoli fra il meccanismo cinematico della madrevite e della vite che viene generalmente utilizzato per gli azionamenti lineari. Nelle macchine utensili convenzionali la rotazione della vite determina lo spostamento lineare della madrevite. Nel caso della RMT Profacere® la funzione di conversione in moto lineare del moto di rotazione della vite è assegnata alla stessa vite.

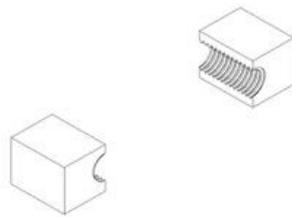
Il tipico limite sulla lunghezza della vite viene risolto trasformando la madrevite in una cremagliera con una lunghezza multipla del passo della vite. Tali componenti diventano quindi moduli in grado di realizzare assi lineari più lunghi dove le viti possono scorrere. Una visione di tale sistema di movimentazione è visibile nella Fig. 3.1.



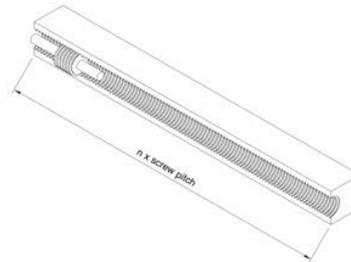
a)



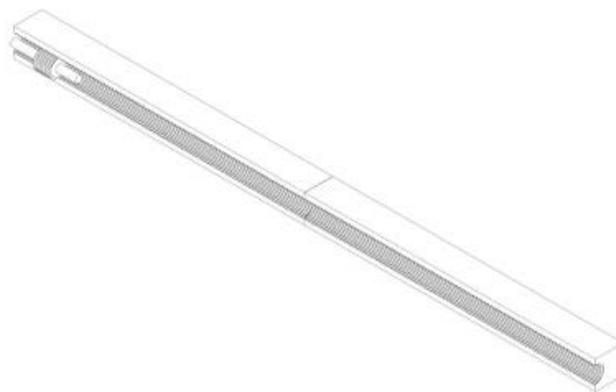
b)



c)



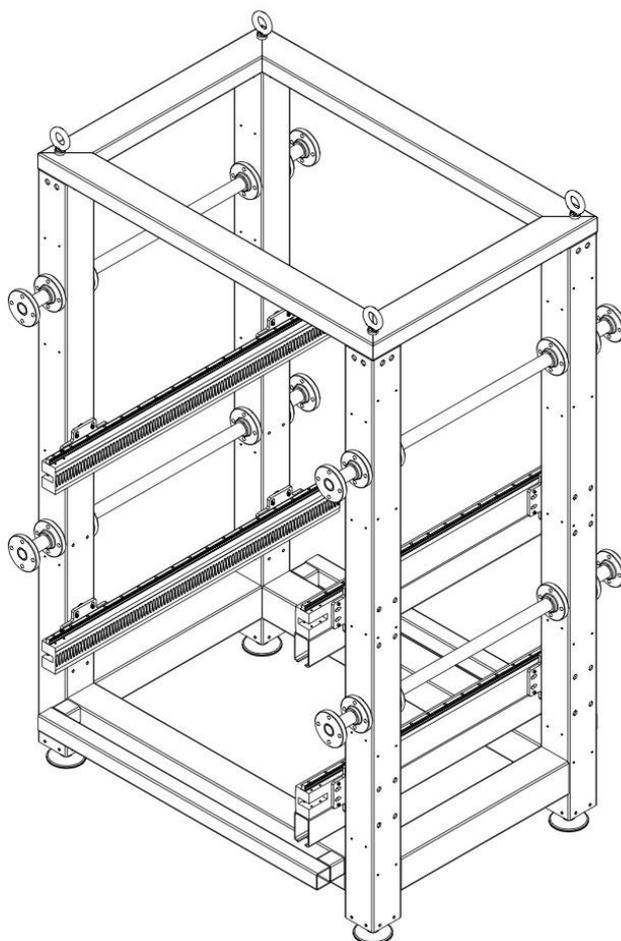
d)



*Fig. 3.1 –Evoluzione del sistema vite-madrevite nella RMT Profacere®*

### 3.2 Basamento e tavole

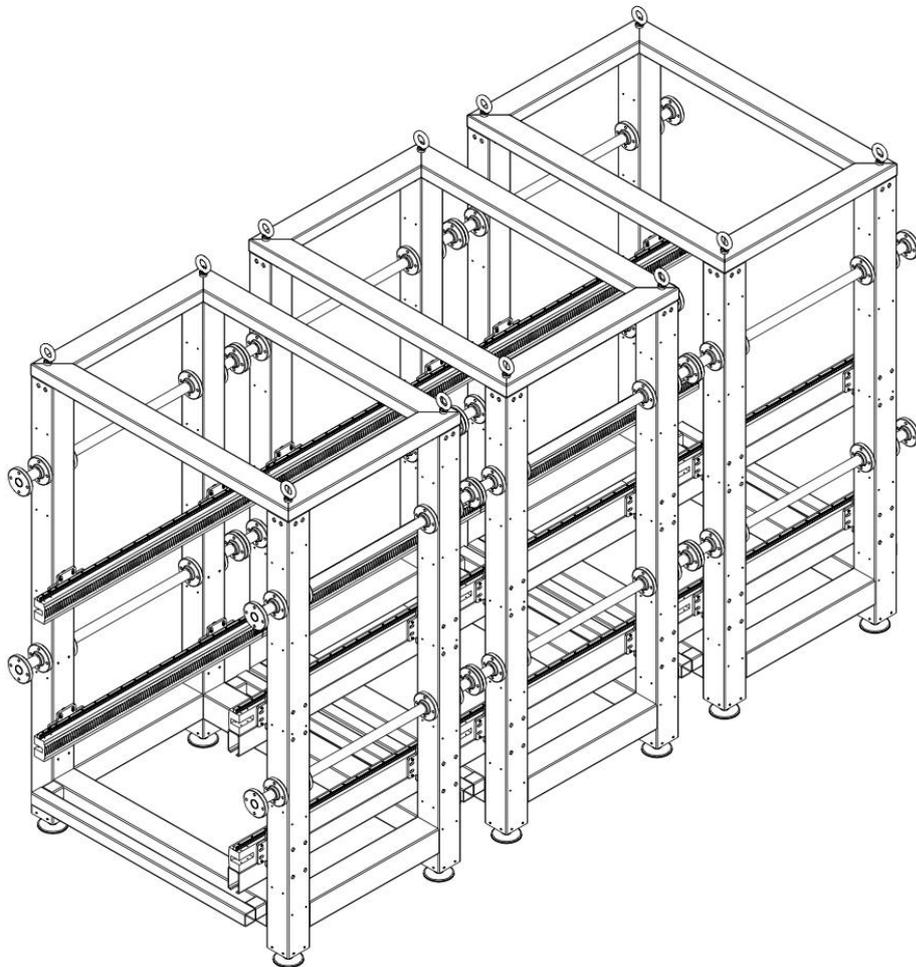
Nella figura sottostante è riportato il basamento (Fig. 3.2); sono visibili due coppie di cremagliere, rispettivamente una superiore e una inferiore per realizzare le linee di corsa delle tavole.



*Fig. 3.2 – Modulo del basamento*

Le cremagliere sono inoltre dotate di guide lineari con cuscinetti a ricircolo di sfere per sostenere le tavole trasversali mobili; viene impiegata un encoder magnetico lineare per controllare della posizione delle tavole. Ciascun basamento inoltre dispone di quattro tubi flangiati nei quali possono essere convogliati i fluidi di processo come aria compressa o fluidi lubrificanti che possono essere richiesti durante le lavorazioni di asportazione del truciolo.

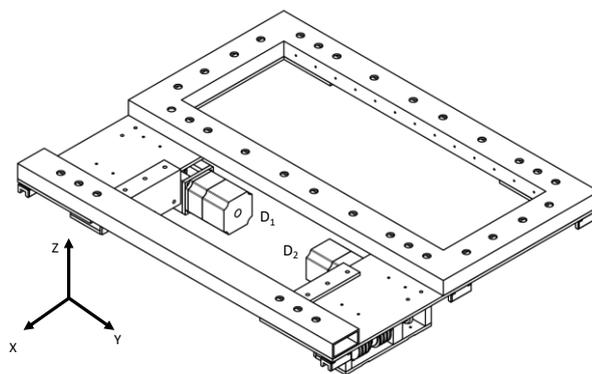
Ogni basamento costituisce un modulo che può essere unito a un altro per formare una linea unica e allungare quindi la corsa delle cremagliere, come mostrato nella Fig. 3.3



*Fig. 3.3–Basamenti posti in serie l'uno all'altro*

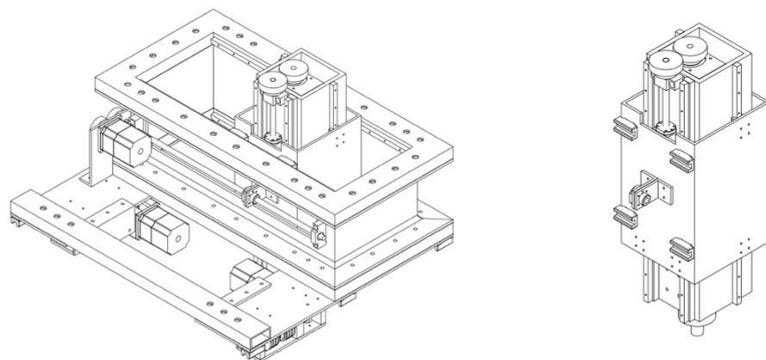
Come già accennato le coppie di cremagliere possono ospitare tavole trasversali (Fig. 3.4), esse possono essere disposte rispettivamente sulla linea di scorrimento superiore o inferiore a seconda del compito che esse devono svolgere. Ogni tavola contiene i dispositivi utili all'azionamento (motori elettrici) delle viti impegnate con le cremagliere, in modo tale da ottenere lo scorrimento lineare della tavola lungo la linea del basamento. L'adozione di un motore per ogni singola tavola e l'alimentazione mediante un sistema di conduttori su rotaia permette di alloggiare sulla stessa linea una o più tavole, ciascuna libera di spostarsi indipendentemente dalle altre.

A bordo delle tavole possono essere montati i vari componenti utili a una specifica attività di lavorazione o misura, come tornitura, saldatura, FDM, fresatura, ecc.

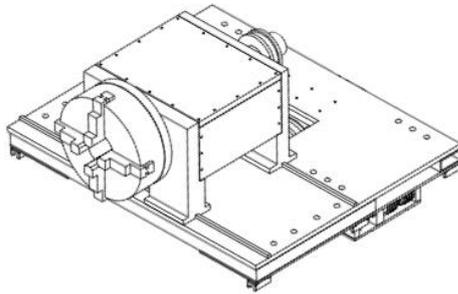


*Fig. 3.4 – Tavola base su cui vengono montati gli accessori utili alla lavorazione richiesta*

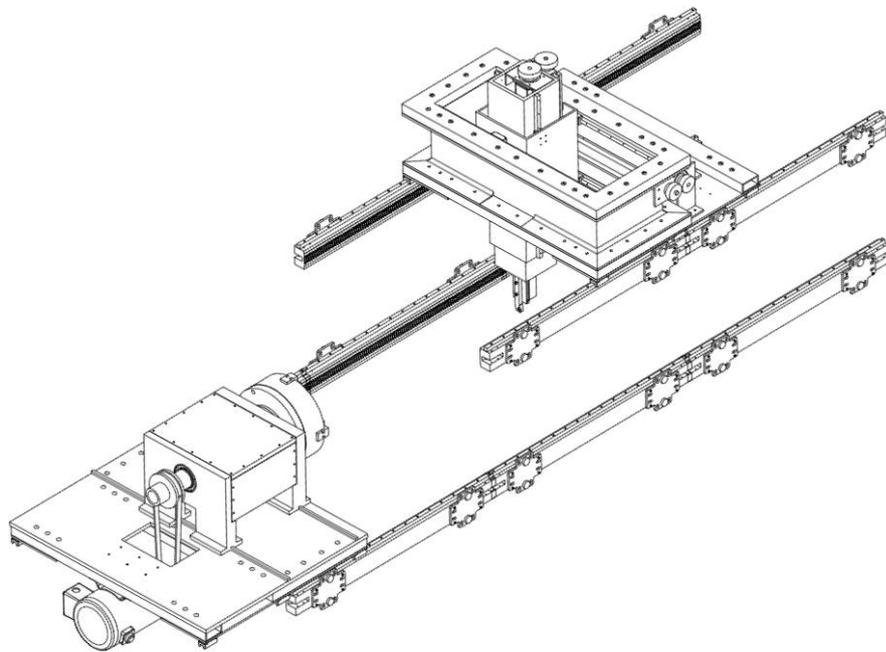
Sono state sviluppate finora le configurazioni di tavole per le tecnologie di produzione più utilizzate. Nelle figure 3.5, 3.6 e 3.7 sono mostrate le tavole per le lavorazioni di fresatura e tornitura, le attrezzature utili ai fissaggi del pezzo, e la disposizione delle tavole per la tornitura sulle cremagliere superiori e inferiori (Fig. 2.13).



*Fig. 3.5 – Tavola per lavorazione di fresatura*



*Fig. 3.6 – Tavola con mandrino per lavorazione di tornitura*



*Fig. 3.7 – Configurazione di tavola con mandrino e tavola porta utensile*

Le lavorazioni vengono quindi eseguite tramite la cooperazione di due o più tavole, alcune installate sulle cremagliere superiori e altre su quelle inferiori. Per esempio, la fresatura avviene tramite la cooperazione fra la tavola trasversale portautensile superiore, con l'elettromandrino, e la tavola trasversale inferiore su cui viene fissato il pezzo da lavorare. Normalmente i moti di taglio e avanzamento vengono conferiti a tavole distinte, inoltre poiché le tavole sono dotate di gradi di libertà propri oltre a quello che ne consente lo spostamento lungo l'asse principale dei basamenti, la cinematica delle tavole cooperanti diventa particolarmente complessa e deve essere opportunamente coordinata per adempire correttamente al lavoro richiesto.

È chiaro quindi come le macchine riconfigurabili siano sistemi con un numero elevato di gradi di libertà con potenzialità maggiori rispetto ai macchinari convenzionali. L'elevato numero di elementi e parti tecnologiche costituenti tali macchine rendono però complessa l'organizzazione del sistema manifatturiero che volge da un assetto statico a uno dinamico. Lo sviluppo di un modello semantico per la descrizione del ciclo di lavorazione eseguibile per mezzo di una RMT risulta quindi di fondamentale importanza al fine di poter poi essere integrato per l'ottimizzazione della configurazione di tale macchina utensile.

Come strumento per la definizione di tale modello si è dunque pensato di utilizzare l'Entity-Relationship Diagram.

## **4. Approccio con ER Model**

### **4.1 Cenni sulla progettazione di base dati**

Progettare una base dati significa definire in modo preciso il contenuto e come esso debba essere rappresentato secondo il modello di dati scelto. L'obiettivo finale è quello di ottenere uno schema che descriva in modo completo e rigoroso la realtà sotto esame e che inoltre risponda in modo efficiente all'esigenze di applicazioni e utenti con il quale si interfacciano. La progettazione di una base dati è uno dei compiti più importanti e delicati, poiché da essa dipende il buon funzionamento dell'intero sistema. Tale attività si è evoluta nel corso del tempo in modo da poter descrivere sistemi di dati sempre più ricchi di informazioni di varia qualità e tipologia. Oggi, la progettazione di basi dati avviene secondo approcci sistematici e rigorosi. L'elemento centrale di tale metodo è quindi una rigorosa metodologia di progettazione che consente di gestire l'elevata complessità del sistema in studio. Normalmente una progettazione si articola nelle seguenti fasi:

- Raccolta ed analisi dei requisiti,
- Progettazione concettuale,
- Progettazione logica,
- Progettazione fisica.

In questa tesi tuttavia ci si concentrerà sulla progettazione concettuale dove vengono definite e precisate le strutture delle informazioni trascurando la progettazione logica e fisica dei dati e le eventuali strutture ausiliari.

### **4.2 Modello Entity-Relationship**

Il modello Entity-Relationship, denotato d'ora in avanti con ER, è stato introdotto per la prima volta da Peter Chen nel 1976 ed è attualmente uno dei modelli più utilizzati nell'ambito della progettazione concettuale di basi dati per via della sua semplicità e ricchezza semantica. Può essere tuttavia esteso anche a trattazioni più generiche.

Il modello è dotato di una tipologia di rappresentazione basata sull'utilizzo combinato di elementi grafici. La rappresentazione grafica di uno schema concettuale si indica con il termine ERD (Entity-Relationship-Diagram).

#### **4.2.1 Elementi costitutivi ERD**

I principali elementi costitutivi del modello ER sono rispettivamente: Entità, Relazione e Attributi, visibili nella Fig.4.1

Con il termine Entità si intende una rappresentazione semantica di un oggetto fisico appartenente al mondo reale, tale oggetto viene rappresentato per via grafica tramite un rettangolo. Per relazione si intende un legame logico fra una o più entità, graficamente una relazione viene rappresentata tramite un rombo contenente il suo nome ed è connessa alle entità che partecipano all'associazione. L'attributo invece serve per descrivere una proprietà posseduta da un'entità e a volte anche da una relazione. Gli attributi sono inseriti

nel diagramma ER accanto al costrutto al quale sono legati, e sono denotati con un pallino (in gergo lollypop siccome richiamano la forma di un lecca-lecca).

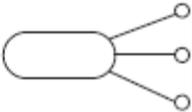
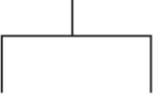
Costrutto	Simbolo
Entità	
Associazione	
Attributo	
Attributo composto	
Gerarchia di generalizzazione	
Relazione di sottoinsieme	
Identificatore	
Vincolo di cardinalità	(c_min ,c_max)

Fig. 4.1 – Principali elementi costitutivi dei diagrammi ER [12]

Un attributo può essere a sua volta formato da un certo numero di componenti (chiamati sotto-attributi), tale entità vengono quindi denominate attributi composti (Fig. 4.2)

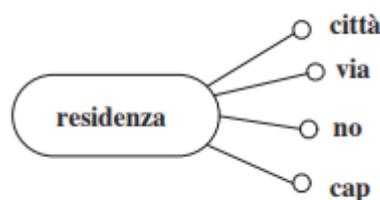


Fig. 4.2 – Esempio di attributo composto [12]

Oltre alle specifiche descritte fin qui è possibile definire anche altri costrutti, che aumentano il potere espressivo del modello ER. Tra questi vi sono i vincoli di cardinalità e specifiche di generalizzazione.

I vincoli di cardinalità sono associabili sia alle entità, che relazioni o attributi, sono costituiti da una tupla posizionata nei pressi dell'elemento che caratterizzano (Fig.4.3) Generalmente tali costrutti stabiliscono il numero minimo e massimo delle istanze di un'associazione a cui le istanze delle entità possono partecipare o prendere parte. Normalmente i vincoli di cardinalità sono indicati come una coppia delimitata fra parentesi vicino al collegamento con la relazione.

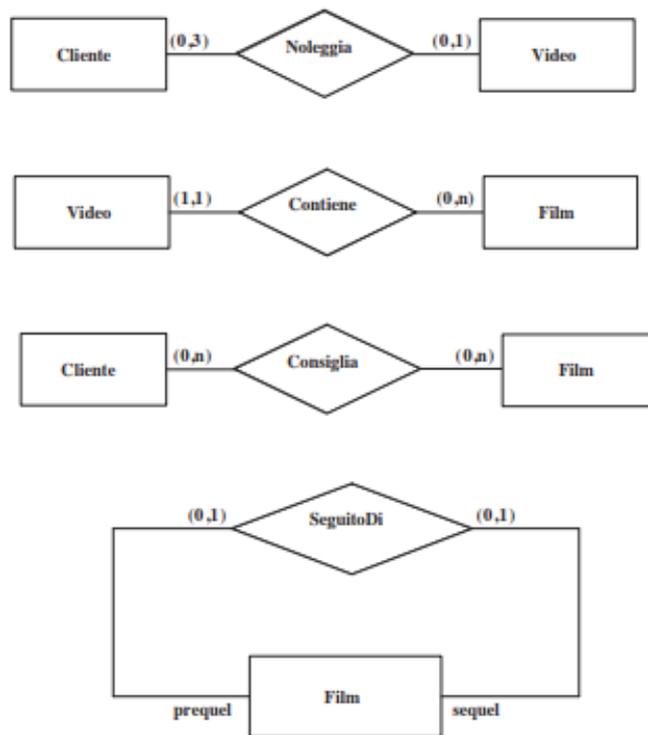
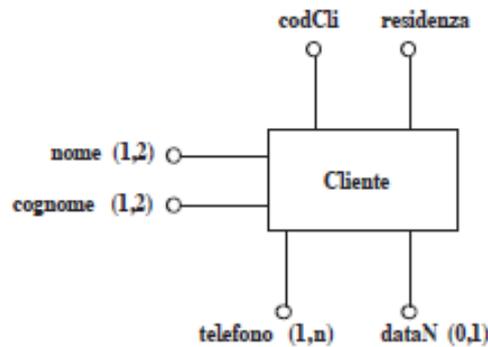


Fig. 4.3 – Esempio di vincoli di cardinalità per associazioni [12]

Come già accennato in precedenza è possibile identificare dei vincoli di cardinalità anche per gli attributi; essi permettono di specificare se l'attributo è mono-valore o multi-valore e se può assumere o meno un valore nullo. La cardinalità minima di un attributo rappresenta il numero minimo di valori che possono essere associati a un'istanza di un'associazione o di un'entità a cui l'attributo fa riferimento. L'attributo viene definito opzionale se ha cardinalità minima pari a zero, mentre in caso contrario viene definito obbligatorio. Per la cardinalità massima il ragionamento è analogo, se essa è pari a uno l'attributo può assumere uno e un solo valore soltanto, mentre per valore maggiore di uno può assumere un insieme di valori; perciò un attributo può definirsi multi-valore se la cardinalità massima è maggiore di uno, mono-valore nel caso contrario, un banale esempio è visibile in Fig. 4.4



*Fig. 4.4 – Esempio di entità con attributi mono e multi-valore [12]*

Nell'ambito dell'e-manufacturing, gli ERD possono essere utilizzati per effettuare una descrizione dettagliata fra le differenti entità del processo manifatturiero. Tale rappresentazione è utile alla costruzione di database in modo concettuale ma che ben si presta poi ad essere implementato a livello di software. Il modello concettuale può essere impiegato anche in ambiti più generali per via del suo potere descrittivo e della semplicità di interpretazione attraverso la rappresentazione grafica. Di seguito (Fig. 4.5) è mostrato la descrizione di un intero ciclo manifatturiero tramite diagramma Entities-Relationship.

Nel grafico ERD (Fig. 4.5) vengono descritte le relazioni fra le molteplici entità presenti e, per via grafica, la struttura logica del database. È possibile visualizzare inoltre il numero di attributi associati ad ogni entità e i tipi di collegamenti fra di esse. La cardinalità dei collegamenti è rappresentata da un 1 se il tipo è one-to-one mentre risulta indicato con la lettera "N" o "M" se è di tipo one-to-many o many-to-many.

## E-R diagram

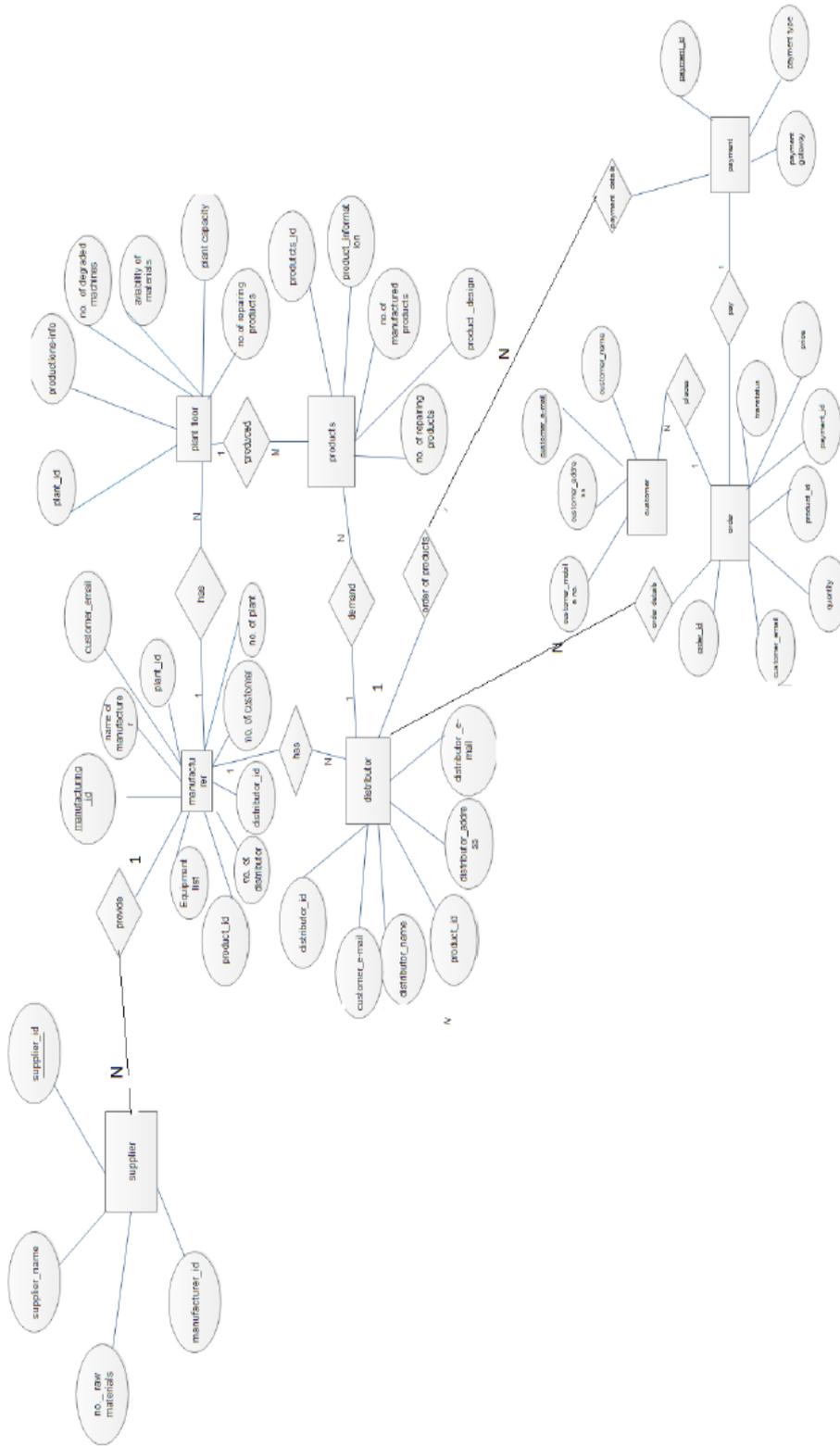


Fig. 4.5 – Descrizione ciclo manifatturiero tramite diagramma ER [13]

### 4.3 Modello Enhanced Entity-Relationship

Al giorno d'oggi la complessità dei dati da gestire è in aumento e spesso volentieri risulta sempre più difficile utilizzare un ERD classico per la modellazione di un database. Al fine di gestire tale complessità durante la modellazione sono stati introdotti gli Enhanced-ERD. Il modello Enhanced-ERD estende i concetti già validi per gli Entity-Relationship classici, permettendo una descrizione semantica più accurata dei dati. Con l'introduzione delle categorie di sottoclassi e super-classi, le entità vengono riorganizzate in sottogruppi specifici per l'applicazione studiata; vengono inoltre introdotti i concetti di ereditarietà (per una trattazione più formale delle sottoclassi e super-classi) e di specializzazione o generalizzazione che vengono sempre utilizzati per la caratterizzazione di alcuni insiemi di sottoclassi.

Tali sotto-entità sono indicate da relazioni in gergo denominate come "is a", in italiano "è un/a". Questa tipologia di descrizione formale è oggi in uso comune nella progettazione ingegneristica di tipo CAD/CAM e in altri campi scientifici.

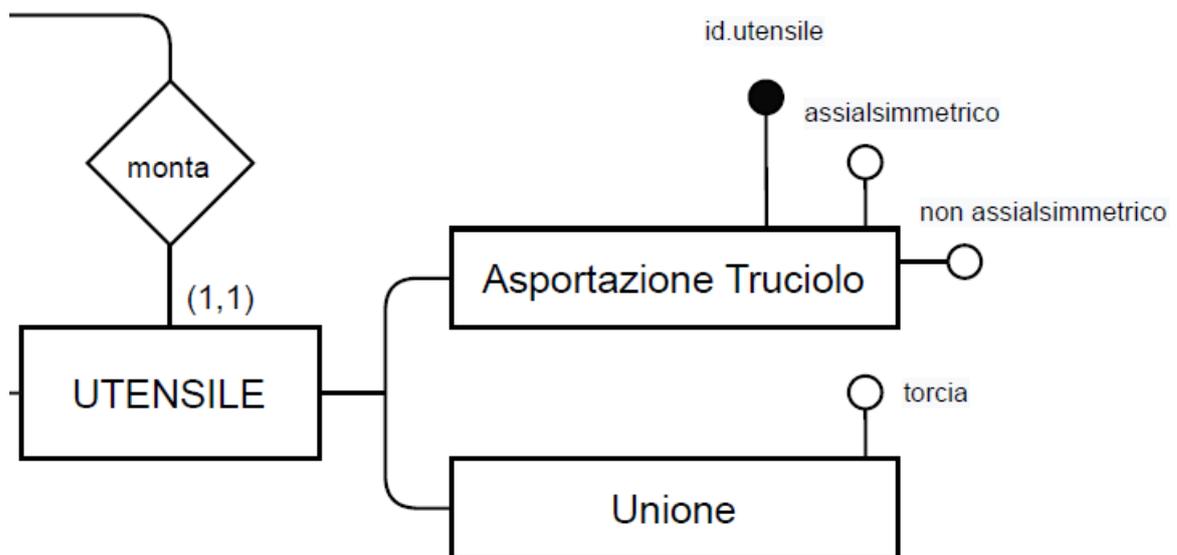


Fig. 4.6 – Esempio di gerarchia di generalizzazione di Entità con relativi attributi

## 5. Definizione dei casi di studio

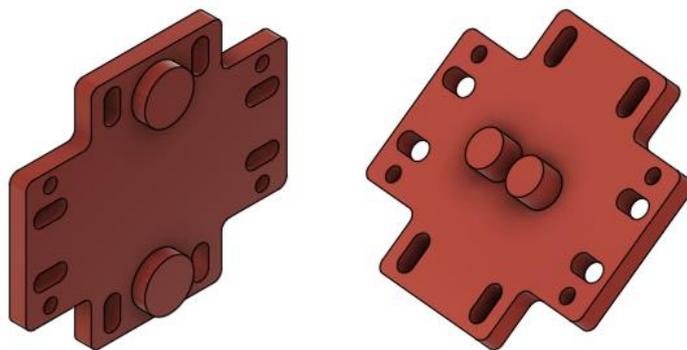
Per l'applicazione dei modelli ER ai cicli di lavorazione, si è deciso di valutare dei casi test utili alla trattazione. Si è pensato inoltre di selezionare dei componenti strutturali della RMS Profacere® in modo tale da non dover selezionare un generico prodotto industriale.

### 5.1 Casi Test

Come caso test per la definizione di un ciclo di lavorazione è stato scelto un componente strutturale della RMS Profacere®, più precisamente le “Piastre di Regolazione”. Tali componenti seppur piccoli sono estremamente importanti in quanto si tratta della soluzione proposta a uno dei più importanti punti critici della macchina, quello della connessione delle cremagliere ai moduli al basamento. Tale montaggio deve essere infatti eseguito con elevata accuratezza al fine di garantire il parallelismo, la complanarità e la distanza della coppia di cremagliere e delle guide in esse integrate sulle quali si muovono le tavole, e che costituiscono l'asse X della macchina. La regolazione deve quindi permettere il passaggio delle tavole fra i moduli senza problemi dovuti a giochi o imprecisioni nel posizionamento. Tali problematiche di regolazione durante il montaggio sono state risolte con l'adozione di fori asolati sia sulle colonne portanti sia sulle cremagliere

#### 5.1.1 Geometria delle piastre

Le piastre di regolazione non sono ricavate dal pieno ma sono costituite da un piatto piano sul quale sono realizzate delle asole adatte ad ospitare dei perni; questi ultimi interfacciano poi le cremagliere e le colonne portanti. La piastra verrà lavorata partendo da un piatto laminato di lunghezza tale da poter ottenere quattro piastre con un unico ciclo di lavorazione; le piastre presentano dei perni che verranno ottenuti tramite lavorazione al tornio da un pieno di opportune dimensioni, le geometrie finali e le dimensioni sono visibili rispettivamente nella Fig. 5.1 e 5.2.



*Fig. 5.1 – Piastre assemblate*

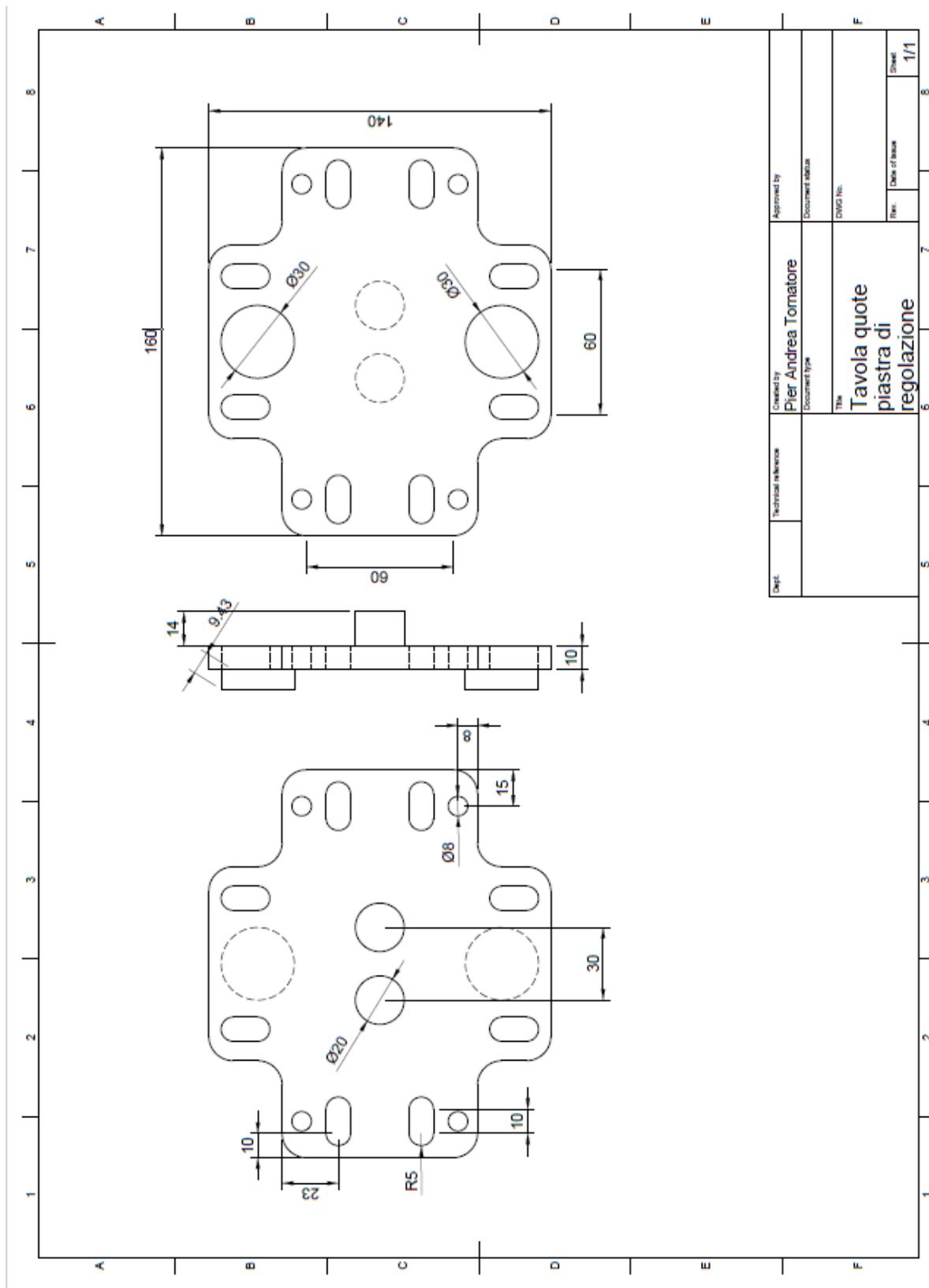
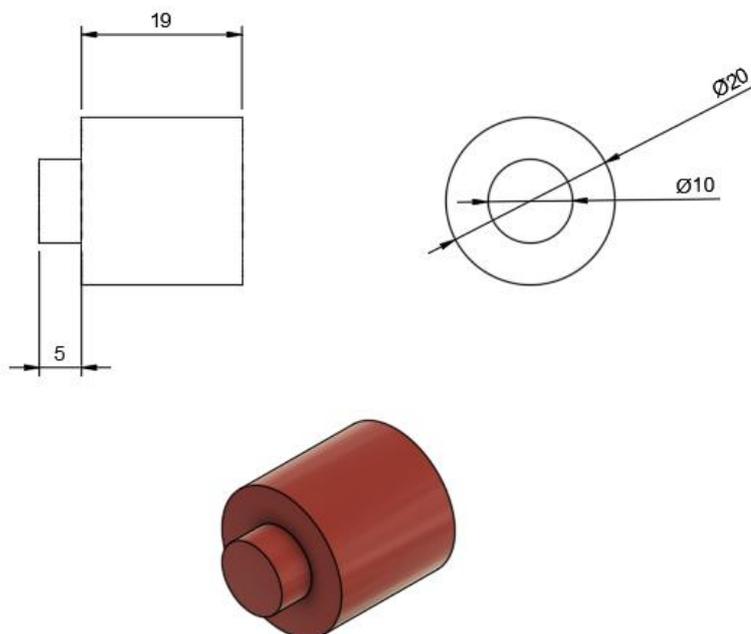
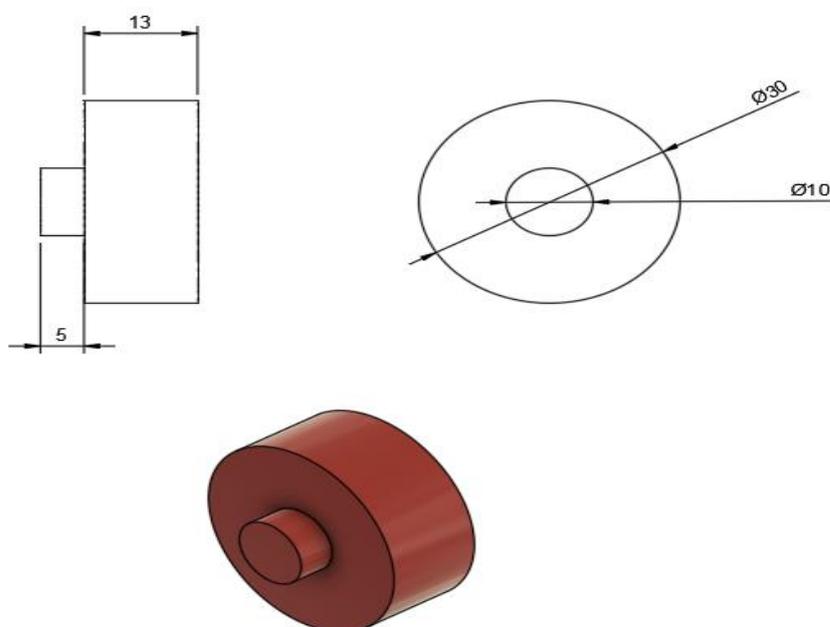


Fig. 5.2 – Tavola delle piastre di regolazione con relative quotature

Per il completamento strutturale delle piastre in totale sono richiesti 4 perni per piastra, rispettivamente a coppie a due a due con geometrie diverse, mostrati nelle figure 5.3 e 5.4



*Fig. 5.3 – Perno di 20 mm di diametro*



*Fig. 5.4 – Perno di 30 mm di diametro*

I perni verranno inseriti in fori calibrati di profondità pari a 5mm che andranno in battuta sulla superficie della piastra; i perni verranno poi saldati alla piastra in modo da creare un collegamento permanente.

## 5.2 Cenni sui cicli di lavorazione

Per ciclo di lavorazione si intende l'insieme delle operazioni utili a trasformare un materiale o più materiali dallo stato non lavorato in un bene economico attraverso un numero finito di processi tecnologici (fusione, stampaggio, asportazione di truciolo, saldatura, etc.). È ovvio che la pianificazione accurata del ciclo di lavorazione rappresenti un fattore di estrema importanza per la competitività e produttività nell'odierna industria meccanica. La scelta razionale e appropriata di tutti i mezzi necessari (ovvero macchinari, utensili e attrezzature) delle procedure tecnologiche per la lavorazione dell'elemento influenzano infatti fortemente la qualità e i costi del prodotto finale. Risulta evidente come l'identificazione di un efficiente ciclo di lavorazione sia un problema che può fornire più soluzioni.

Normalmente nella stesura di un ciclo di lavorazione si inizia da un'analisi critica del disegno di progetto, che inizialmente darà indicazione sulla tipologia di macchine, attrezzature e tipologie di lavorazioni da svolgere. Si passa poi a delineare le fasi e sottofasi, che rappresentano le vere e proprie operazioni di lavorazione (Fig.5.5).

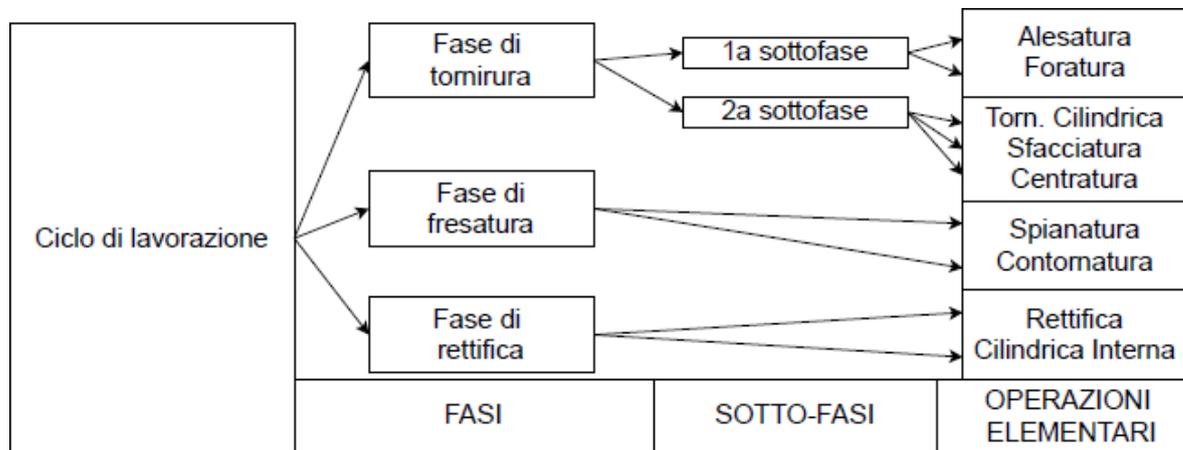


Fig. 5.5 – Scomposizioni di fasi e sottofasi [14]

Per fase si intende l'insieme ordinato di operazioni realizzate con il medesimo posto di lavoro (normalmente la macchina) con o senza lo smontaggio del pezzo. Per sottofase invece si intende l'insieme ordinato di operazioni effettuato senza lo smontaggio del pezzo e quindi con il medesimo posizionamento, le operazioni sono costituite poi da lavorazioni elementari quali tornitura, sfacciatura, alesatura, fresatura, spianatura, etc.

Successivamente si scelgono gli utensili più adatti, i parametri di taglio, le attrezzature e le procedure di controllo. Si conclude infine con il calcolo dei tempi e dei costi di fabbricazione. Il tutto viene poi riportato sul foglio di lavorazione.

### **5.3 Designazione ciclo di lavoro su Fusion360**

Al giorno d'oggi l'utilizzo dei software CAD semplifica notevolmente il lavoro, tali operazioni sono state infatti programmate sul software Autodesk® Fusion360 partendo dalla geometria CAD finale. Il programma è dotato di una sezione dedicata alla produzione in cui è possibile creare uno sbizzato di dimensioni arbitrarie attorno alla geometria del pezzo lavorato. Una volta determinate le dimensioni che lo sbizzato possiede nella realtà, fissato il sistema di coordinate coincidente con quello della macchina utensile, si è in grado seguendo uno schema logico ben preciso, di definire le lavorazioni richieste. È possibile inoltre inserire a titolo puramente indicativo (per evidenziare eventuali problemi di collisione ad esempio) tutti gli accessori utili a bloccare lo sbizzato sulla macchina utensile e simulare gli utensili mentre operano la lavorazione.

#### **5.3.1 Ciclo di lavorazione delle piastre di regolazione**

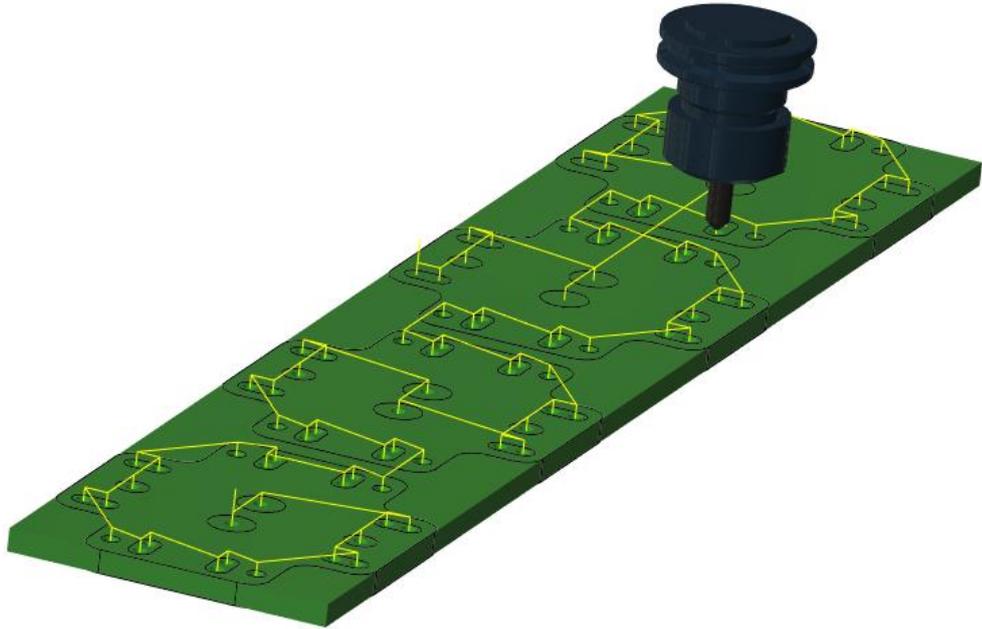
Le piastre vengono realizzate partendo da uno sbizzato ottenuto da un laminato con sezione 140x10 mm, lungo circa 6 m che viene tagliato in pezzi di 675mm di lunghezza. Da ogni sbizzato vengono poi ottenute quattro piastre con una singola lavorazione. Per la lavorazione degli sbizzati si distingue un'unica fase di fresatura e due diverse sottofasi, in cui vengono eseguite tutte le operazioni elementari utili alla realizzazione delle geometrie richieste.

Nella prima sottofase si esegue la lavorazione di una delle facce principali delle piastre; lo sbizzato viene vincolato alla tavola della fresa tramite le classiche attrezzature normalmente utilizzate nelle fresatrici, precisamente con due morse.

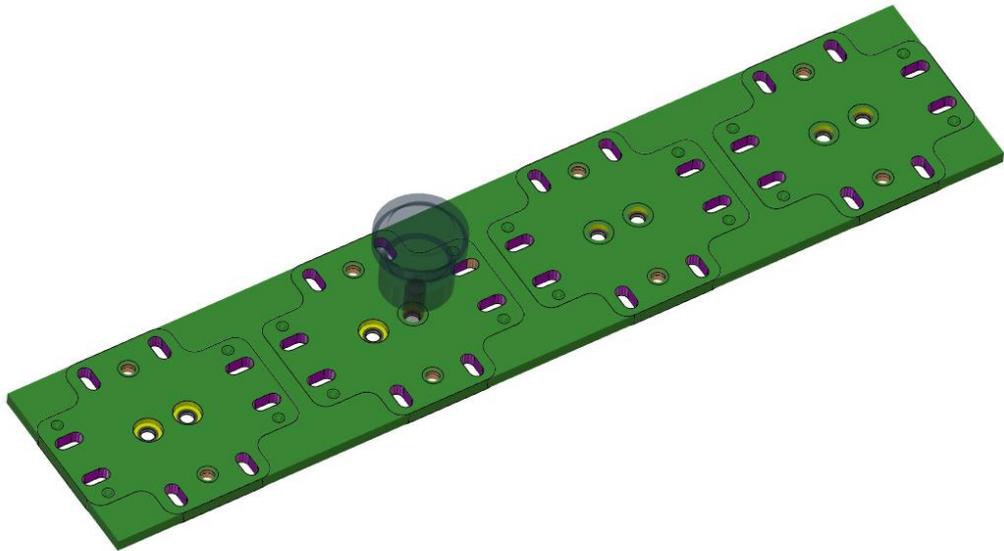
Le operazioni elementari richieste sulla prima faccia sono:

- Contornatura degli estremi dello sbizzato per portare a tolleranza,
- Centraggio dei fori,
- Esecuzione di pre-fori,
- Foratura diametro finale,
- Foro e preparazione alesatura per le battute dei perni.
- Alesatura finale delle battute dei perni e delle asole per centraggio,
- Fori per la preparazione della maschiatura,
- Maschiatura,
- Esecuzione cianfrino per la saldatura.

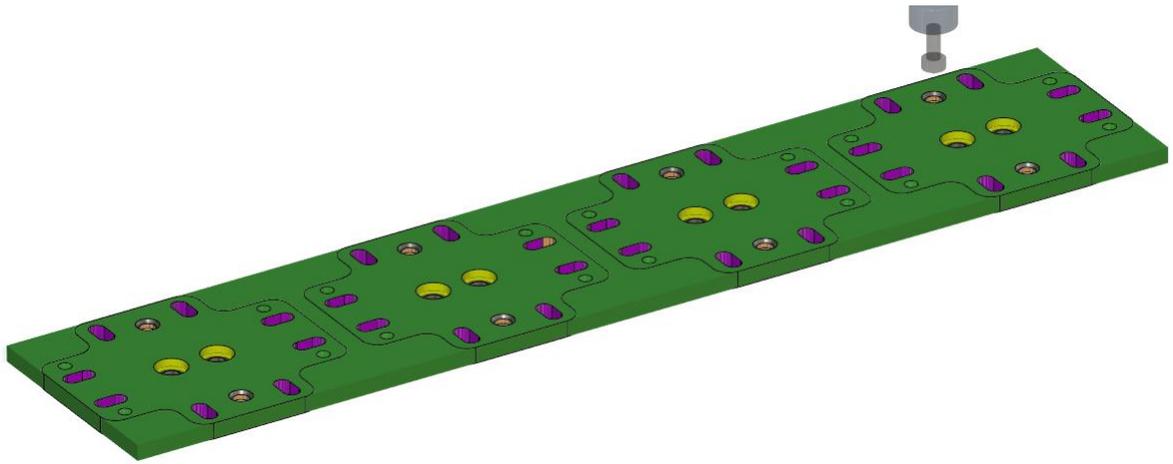
Vengono mostrate nelle Figure 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 in successione alcune delle operazioni elementari costituenti la prima sottofase di lavorazione:



*Fig. 5.6 - Operazione centraggio fori con relativa traiettoria*



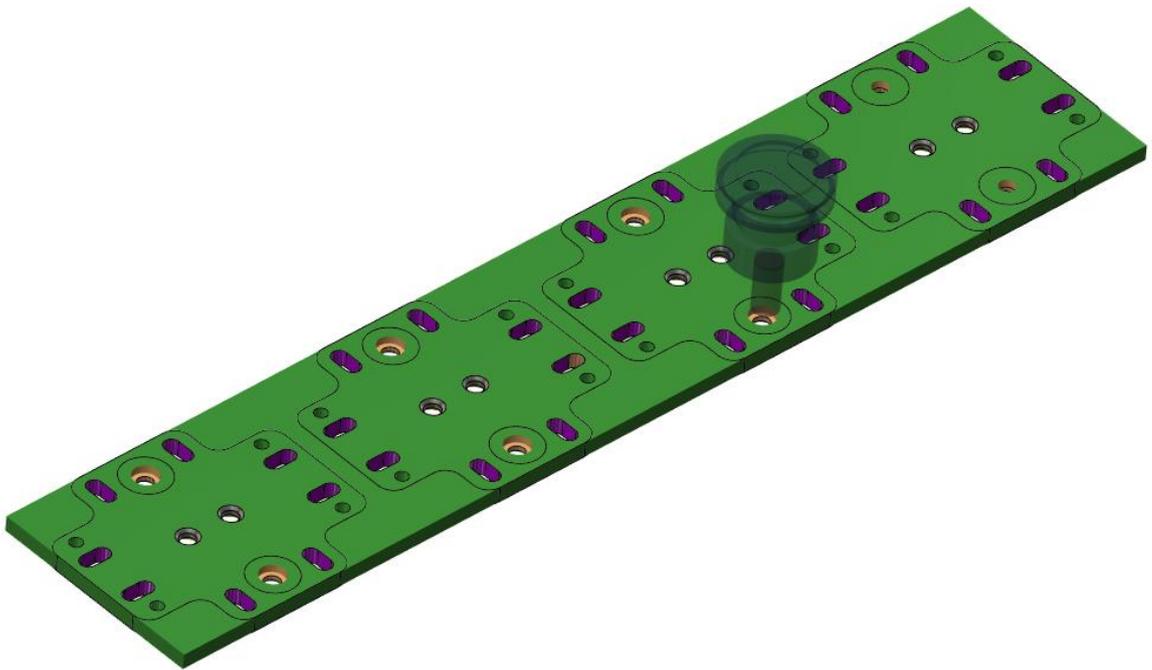
*Fig. 5.7 – Prosecuzione lavorazione, lavorazione di alesatura*



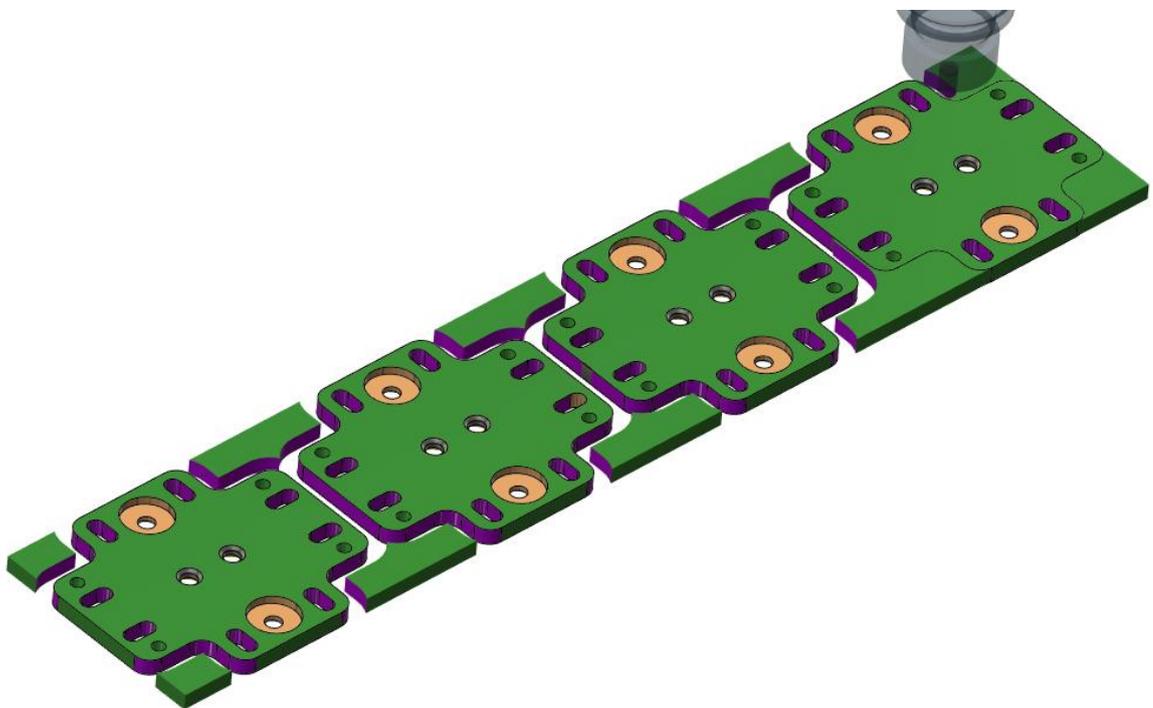
*Fig. 5.8 – Completamento prima sottofase con esecuzione dei cianfrini*

Nella seconda sottofase viene modificato il piazzamento, il pezzo viene quindi svincolato, ruotato di 180 gradi rispetto all'asse longitudinale e piazzato su un'attrezzatura adatta ad evitare la collisione fra fresa e i dispositivi di fissaggio alla tavola della fresatrice durante l'operazione finale di contornatura. Tale accessorio sarà una dima progettata opportunamente che oltre a mantenere rialzato lo sbozzato evitando i già citati problemi di collisione, mantiene ferme le piastre evitandone spostamenti causati dalle forze generate durante la lavorazione di contornatura. Tale compito può essere assegnato a particolari perni calibrati con estremità filettate che andranno in battuta su una delle due facce del semilavorato (approfittando dei fori asolati nella prima sottofase). Le operazioni richieste nella seconda sottofase sono le seguenti:

- Foro preparazione alesatura battute dei perni,
- Alesatura finale delle battute dei perni,
- Esecuzione cianfrino per saldatura,
- Contornatura per la separazione delle piastre.



*Fig. 5.9 – Prima operazione seconda sottofase, preparazione foro per alesature*



*Fig. 5.10 – Operazione finale di contornatura per l'ottenimento delle 4 piastre*

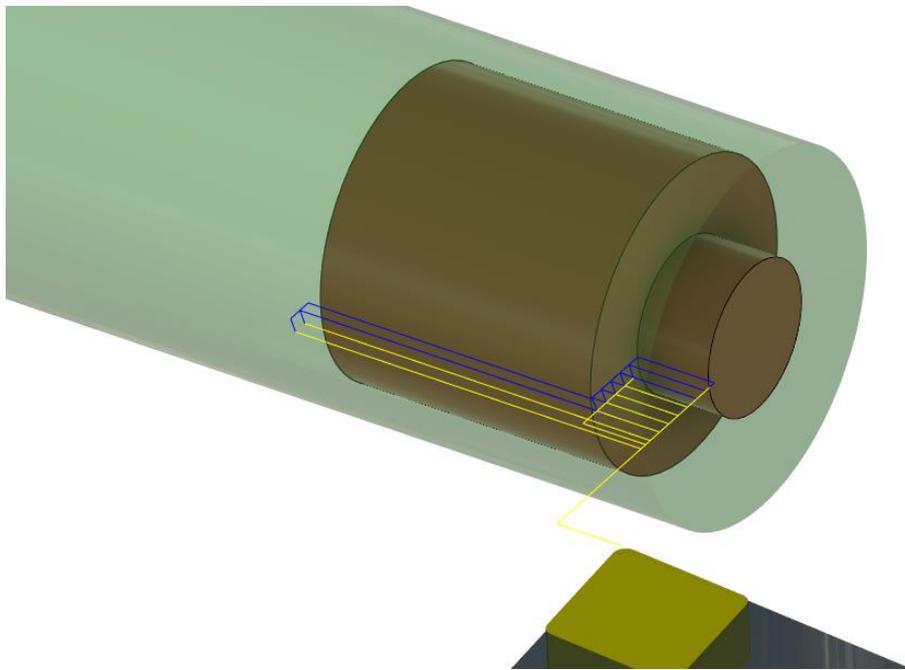
### 5.3.2 Ciclo di lavorazione per perni di centraggio

I perni vengono ottenuti da un pieno di forma cilindrica; la lavorazione viene eseguita con un singolo piazzamento sfruttando il foro di passaggio della barra presente nel mandrino. Il ciclo di lavorazione è realizzato quindi con una singola fase e una sola sottofase.

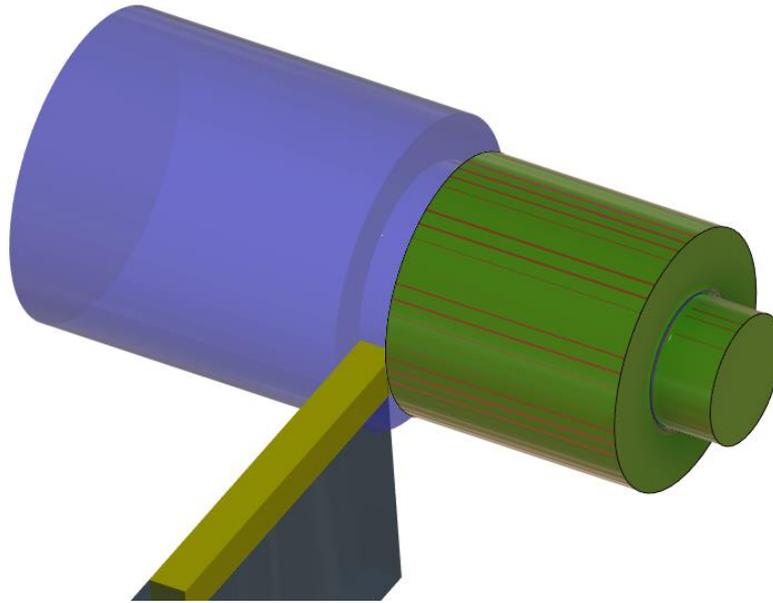
Le lavorazioni necessarie per ottenere i perni sono rispettivamente:

- Rimozione sovra-metallo
- Sgrossatura per ottenimento geometria richiesta
- Finitura per portare la superficie a tolleranza
- Troncatura

Di seguito nelle Figure 5.11 e 5.12 sono riportati alcuni istanti del ciclo di lavorazione:



*Fig. 5.11 – Particolare della traiettoria dell'utensile durante la sgrossatura*



*Fig. 5.12 – Operazione finale di troncatura del perno*

### **5.3.3 Ciclo di lavorazione per ottenimento geometrie finali**

Una volta eseguita la lavorazione delle piastre e della serie di perni necessari all'ottenimento della geometria finali, si eseguirà l'unione permanente dei componenti tramite saldatura. La lavorazione può essere eseguita tramite l'utilizzo delle classiche tecnologie di saldatura; può essere prevista ad esempio una saldatura standard tramite apporto di materiale a filo.

I pezzi semilavorati possono essere disposti su una attrezzatura realizzata a tal proposito; i cianfrini eseguiti in fase di fresatura facilitano l'operazione di saldatura. L'attrezzatura può essere una dima su cui può avvenire il montaggio delle piastre e la collocazione dei perni può avvenire in maniera automatizzata o in via manuale. Il cianfrino viene eseguito sulla superficie in cui non è presente l'asola in modo tale da poter spianare con fresa l'eventuale residuo della lavorazione di saldatura e raggiungere le tolleranze superficiali richieste.

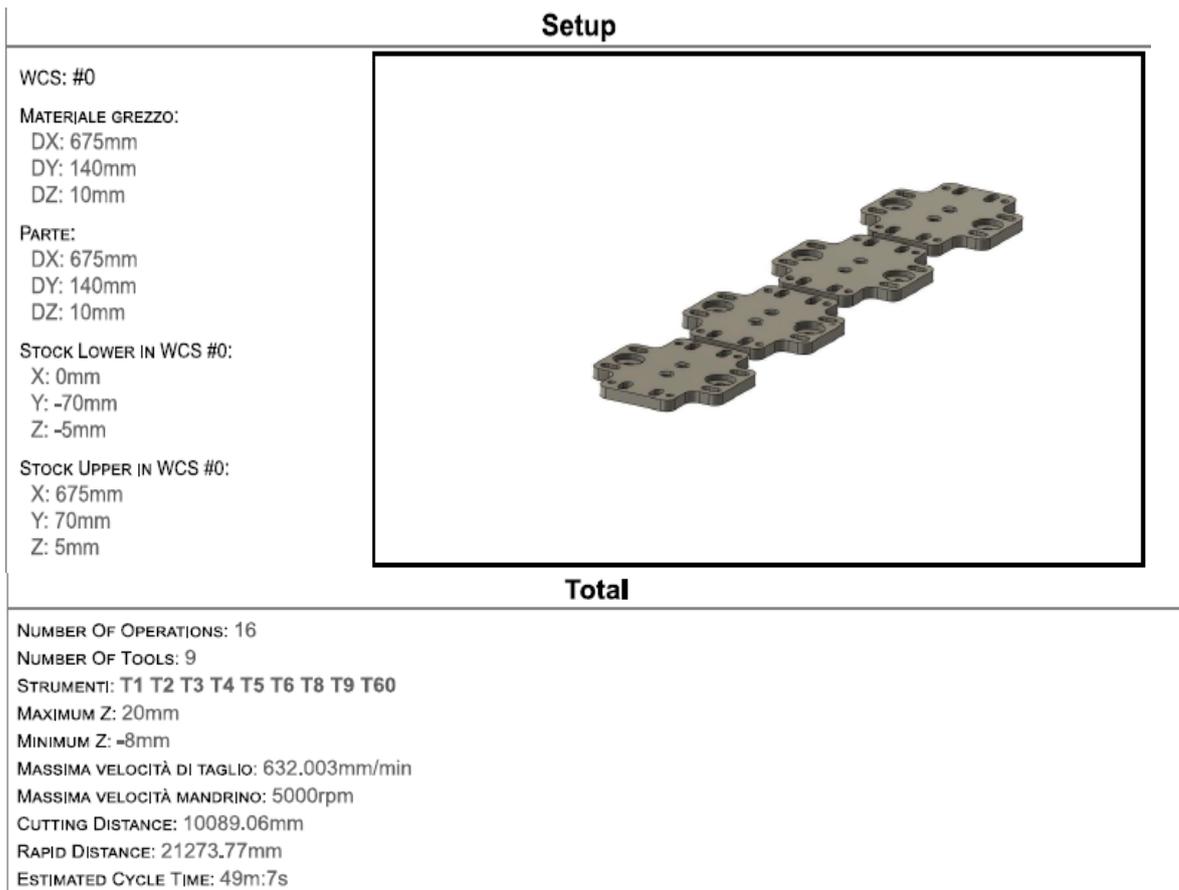
## **5.4 Stesura del foglio di lavorazione**

Prima dell'avvento dei programmi CAD la stesura del foglio di lavorazione che è la parte finale del processo fino ad ora descritto, veniva compilato a mano con relativi schizzi. Il foglio di lavorazione riportava tutte le informazioni necessarie a un corretto svolgimento del ciclo di lavorazione. I tempi di lavoro, suddivisi in tempi passivi, attivi e di preparazione venivano calcolati a mano o tramite l'utilizzo di tabelle apposite. A titolo d'esempio si mostra una compilazione parziale di un foglio di lavoro (Fig. 5.13):

UNIVERSITA' DI GENOVA DIPARTIMENTO INGEGNERIA MECCANICA	Ciclo di Lavorazione Elemento : PIASTRA DI REGOLAZIONE		RIFERIMENTI		Compilato: Pier Andrea Tornatore		Data	Foglio 1 di 1	
					Controllato..... Visto.....				
DESIGNAZIONE SUPERFICI	N.	FASI	Reparto	Tipo di macchina	SCHIZZO DI LAVORAZIONE	Attrezzature	COMP. TEMPI Tempo prep. per lotto Tempo Passivo Tempo Attivo	Superfici di Riferimento	NOTE
	1	<b>FRESATURA</b> a      CONTORNATURA b      CENTRAGGIO FORATURA FORATURA FORATURA ALESATURA FORATURA MASCHIATURA CIANFRINATURA c      FORATURA ALESATURA CIANFRINATURA CONTORNATURA		Fresa 3 assi CNC				SR1 SR 2 SR 3 SR4	

Fig. 5.13 – Esempio di vecchio foglio di lavorazione

Il principale punto di forza dei software CAD è dato dalla possibilità di estrapolare sia il foglio di lavorazione del pezzo sotto esame sia il part program (o G-code) che traduce le posizioni di utensile e pezzo in linguaggio specifico utilizzabile dal controllo numerico della macchina utensile. Fusion360 fornisce in output il foglio di lavoro del ciclo di lavorazione con i tempi di lavoro già calcolati, rendendo possibile un iniziale calcolo sui tempi totali necessari alla produzione (Figure 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17).



*Fig. 5.14 – Setup e caratteristiche generali della lavorazione*

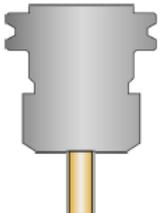
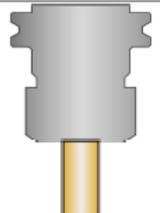
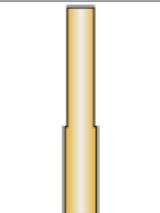
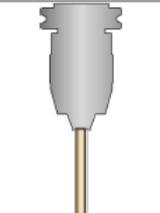
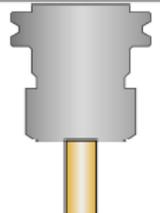
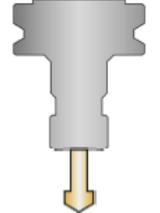
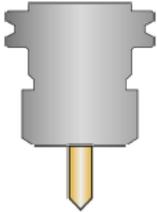
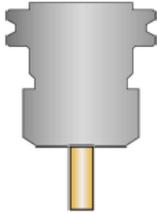
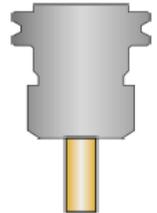
Strumenti			
<b>T4 D4 L4</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 10mm LUNGHEZZA: 27,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 10mm Flat Endmill	MINIMUM Z: -6mm MAXIMUM FEED: 632,003mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 4851rpm CUTTING DISTANCE: 3240,78mm RAPID DISTANCE: 2331,22mm ESTIMATED CYCLE TIME: 7m:23s (15%)	PINZA: Maritool CAT40-ER32-2.35 FORNITORE: Maritool PRODUCT: CAT40-ER32-2.35	
<b>T5 D5 L5</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 16mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 16mm Flat Endmill	MINIMUM Z: 0mm MAXIMUM FEED: 631,302mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3032rpm CUTTING DISTANCE: 1673,29mm RAPID DISTANCE: 2189,38mm ESTIMATED CYCLE TIME: 3m:28s (7%)	PINZA: Maritool CAT40-ER32-2.35 FORNITORE: Maritool PRODUCT: CAT40-ER32-2.35	
<b>T6 D6 L6</b> TIPO: right hand tap DIAMETRO: 8mm LUNGHEZZA: 52mm FLUTES: 2 DESCRIZIONE: M8	MINIMUM Z: -6mm MAXIMUM FEED: 625mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 500rpm CUTTING DISTANCE: 512mm RAPID DISTANCE: 1235mm ESTIMATED CYCLE TIME: 1m:4s (2.2%)		
<b>T8 D8 L8</b> TIPO: foratura DIAMETRO: 6,8mm ANGOLO PUNTA: 118° LUNGHEZZA: 70,54mm FLUTES: 1	MINIMUM Z: -8mm MAXIMUM FEED: 130,978mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 1284rpm CUTTING DISTANCE: 288mm RAPID DISTANCE: 1523mm ESTIMATED CYCLE TIME: 2m:30s (5.1%)	PINZA: Maritool CAT40-APU13 Drill Chuck FORNITORE: Maritool PRODUCT: CAT40-APU13	
<b>T9 D9 L9</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 14mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 14mm Flat Endmill	MINIMUM Z: -6mm MAXIMUM FEED: 631,469mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3465rpm CUTTING DISTANCE: 648,81mm RAPID DISTANCE: 1361,95mm ESTIMATED CYCLE TIME: 1m:52s (3.8%)	PINZA: Maritool CAT40-ER32-2.35 FORNITORE: Maritool PRODUCT: CAT40-ER32-2.35	
<b>T60 D60 L60</b> TIPO: svasatura DIAMETRO: 14mm ANGOLO PUNTA: 120° LUNGHEZZA: 30mm FLUTES: 3	MINIMUM Z: 0,11mm MAXIMUM FEED: 500mm/min MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm CUTTING DISTANCE: 158,19mm RAPID DISTANCE: 1658,19mm ESTIMATED CYCLE TIME: 39s (1.3%)	PINZA: BT40 - B4C4-0016	

Fig. 5.15 – Utensili utilizzati nella lavorazione del piatto da cui vengono ricavate le piastre

## Operazioni

<p>Operazione 1/16 DESCRIZIONE: Pre-foratura centrante STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 2mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 873rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 130.978mm/min CUTTING DISTANCE: 768mm RAPID DISTANCE: 3299.69mm ESTIMATED CYCLE TIME: 6m:31s (13.3%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T1 D1 L1</b> TIPO: Centrinatura DIAMETRO: 10mm ANGOLO PUNTA: 90° LUNGHEZZA: 27.5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 10mm Spot Drill</p>	
<p>Operazione 2/16 DESCRIZIONE: Fori avanzamento 6mm STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0,01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -7mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 1455rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 130.978mm/min CUTTING DISTANCE: 1360mm RAPID DISTANCE: 3797.67mm ESTIMATED CYCLE TIME: 11m:9s (22.7%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T2 D2 L2</b> TIPO: foratura DIAMETRO: 6mm ANGOLO PUNTA: 118° LUNGHEZZA: 62,54mm FLUTES: 1</p>	
<p>Operazione 3/16 DESCRIZIONE: Fori 10mm STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -8mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 873rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 130.978mm/min CUTTING DISTANCE: 1440mm RAPID DISTANCE: 3877.67mm ESTIMATED CYCLE TIME: 11m:46s (24%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T3 D3 L3</b> TIPO: foratura DIAMETRO: 10mm ANGOLO PUNTA: 118° LUNGHEZZA: 102.54mm FLUTES: 1</p>	
<p>Operazione 4/16 DESCRIZIONE: Alesatura Asole STRATEGIA: Asole WCS: #0 TOLLERANZA: 0,01mm PASSO LATERALE MASSIMO: 5mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -6mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 4851rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 632.003mm/min CUTTING DISTANCE: 832mm RAPID DISTANCE: 2195.22mm ESTIMATED CYCLE TIME: 3m:23s (6.9%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T4 D4 L4</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 10mm LUNGHEZZA: 27.5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 10mm Flat Endmill</p>	
<p>Operazione 5/16 DESCRIZIONE: Pre-foro Alesatura STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -6mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3465rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 210.49mm/min CUTTING DISTANCE: 128mm RAPID DISTANCE: 693mm ESTIMATED CYCLE TIME: 45s (1,5%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T9 D9 L9</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 14mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 14mm Flat Endmill</p>	

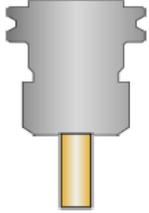
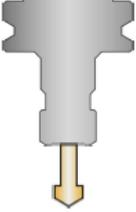
<p>Operazione 6/16 DESCRIZIONE: Alesatura battute STRATEGIA: Adaptive 2D WCS: #0 TOLLERANZA: 0,1mm ECCEDEZZA DA LASCIARE: 0,5mm CARICO OTTIMALE: 2.2mm CARICA DEVIAZIONE: 0,22mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 0,5mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3465rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 631,469mm/min CUTTING DISTANCE: 520,81mm RAPID DISTANCE: 668,95mm ESTIMATED CYCLE TIME: 1m:7s (2,3%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T9 D9 L9</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 14mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 14mm Flat Endmill</p>	
<p>Operazione 7/16 DESCRIZIONE: Pre-fori per Maschiatura STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0,01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -8mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 1284rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 130,978mm/min CUTTING DISTANCE: 288mm RAPID DISTANCE: 1523mm ESTIMATED CYCLE TIME: 2m:30s (5,1%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T8 D8 L8</b> TIPO: foratura DIAMETRO: 6,8mm ANGOLO PUNTA: 118° LUNGHEZZA: 70,54mm FLUTES: 1</p>	
<p>Operazione 8/16 DESCRIZIONE: Maschiatura M8 STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0,01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -6mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 500rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 625mm/min CUTTING DISTANCE: 512mm RAPID DISTANCE: 1235mm ESTIMATED CYCLE TIME: 1m:4s (2,2%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T6 D6 L6</b> TIPO: right hand tap DIAMETRO: 8mm LUNGHEZZA: 52mm FLUTES: 2 DESCRIZIONE: M8</p>	
<p>Operazione 9/16 DESCRIZIONE: Cianfrinatura STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0,01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 0,11mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 500mm/min CUTTING DISTANCE: 79,09mm RAPID DISTANCE: 1014,09mm ESTIMATED CYCLE TIME: 22s (0,7%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T60 D60 L60</b> TIPO: svasatura DIAMETRO: 14mm ANGOLO PUNTA: 120° LUNGHEZZA: 30mm FLUTES: 3</p>	

Fig. 5.16 – Lista operazioni svolte sulla prima faccia del piatto

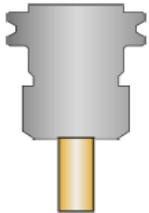
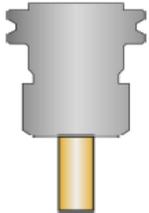
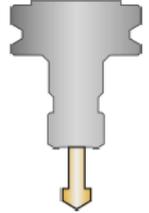
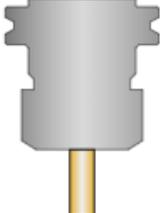
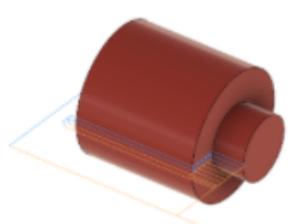
Operazioni			
<p>Operazione 10/16 DESCRIZIONE: Pre-Foro Alesatura STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 0mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3032rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 164.75mm/min CUTTING DISTANCE: 40mm RAPID DISTANCE: 1082mm ESTIMATED CYCLE TIME: 28s (0.9%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T5 D5 L5</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 16mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 16mm Flat Endmill</p>	
<p>Operazione 11/16 DESCRIZIONE: Alesatura 16mm STRATEGIA: Adaptive 2D WCS: #0 TOLLERANZA: 0,1mm ECCEDENZA DA LASCIARE: 0mm CARICO OTTIMALE: 2.7mm CARICA DEVIATIONE: 0,27mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 0mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 3032rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 631,302mm/min CUTTING DISTANCE: 1633,29mm RAPID DISTANCE: 1107,38mm ESTIMATED CYCLE TIME: 3m:0s (6.1%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T5 D5 L5</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 16mm LUNGHEZZA: 34,5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 16mm Flat Endmill</p>	
<p>Operazione 12/16 DESCRIZIONE: Cianfrinatura STRATEGIA: Foratura WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: 0,11mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 500mm/min CUTTING DISTANCE: 79,09mm RAPID DISTANCE: 644,09mm ESTIMATED CYCLE TIME: 17s (0,6%) REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T60 D60 L60</b> TIPO: svasatura DIAMETRO: 14mm ANGOLO PUNTA: 120° LUNGHEZZA: 30mm FLUTES: 3</p>	
<p>Operazione 1/1 DESCRIZIONE: Contornatura1 STRATEGIA: Contour 2D WCS: #0 TOLLERANZA: 0.01mm ECCEDENZA DA LASCIARE: 0mm PASSO LATERALE MASSIMO: 9.5mm</p>	<p>MAXIMUM Z: 20mm MINIMUM Z: -5mm MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 4851rpm MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 632.003mm/min CUTTING DISTANCE: 2408.78mm RAPID DISTANCE: 684.84mm ESTIMATED CYCLE TIME: 4m:8s REFRIGERANTE: Getto d'acqua</p>	<p><b>T4 D4 L4</b> TIPO: fresa a candela DIAMETRO: 10mm LUNGHEZZA: 27.5mm FLUTES: 3 DESCRIZIONE: 10mm Flat Endmill</p>	

Fig. 5.17 – Lista operazioni svolte su seconda faccia del piatto

Per la lavorazione dei perni in Fig. 5.18 si riporta il foglio di lavoro relativo alla produzione del perno di 20mm di diametro. Le procedure per la produzione del perno di 30 mm di diametro seguono quelle qui sotto descritte, con la differenza di un tempo di lavorazione leggermente inferiore per via della minore quantità di sovrametallo da asportare.

Le Fig. 5.19 e 5.20 mostrano invece gli strumenti utilizzati in tali lavorazioni e le operazioni svolte con le rispettive velocità di taglio.

<b>Setup</b>	
<p>WCS: #0</p> <p>MATERIALE GREZZO: DX: 24mm DY: 24mm DZ: 54mm</p> <p>PARTE: DX: 20mm DY: 20mm DZ: 24mm</p> <p>STOCK LOWER IN WCS #0: X: -12mm Y: -12mm Z: -54mm</p> <p>STOCK UPPER IN WCS #0: X: 12mm Y: 12mm Z: 0mm</p>	
<b>Total</b>	
<p>NUMBER OF OPERATIONS: 3</p> <p>NUMBER OF TOOLS: 2</p> <p>STRUMENTI: T1 T2</p> <p>MAXIMUM Z: 5mm</p> <p>MINIMUM Z: -27mm</p> <p>MASSIMA VELOCITÀ DI TAGLIO: 635mm/min</p> <p>MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm</p> <p>CUTTING DISTANCE: 172.1mm</p> <p>RAPID DISTANCE: 246.67mm</p> <p>ESTIMATED CYCLE TIME: 1m:27s</p>	

*Fig. 5.18 – Setup e caratteristiche riassuntive della lavorazione*

Strumenti			
<b>T1 D0</b>			
TIPO: general turning	MINIMUM Z: -24.8mm	PINZA: ISO L Destra	
INSERISCI: ISO C 80deg	MAXIMUM FEED: 369.649mm/min		
EDGE LENGTH: 9.82mm	MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm		
NOSE RADIUS: 0.8mm	CUTTING DISTANCE: 127.9mm		
SEZIONE TRASVERSALE: T	RAPID DISTANCE: 182.67mm		
TOLLERANZA: M	ESTIMATED CYCLE TIME: 40s (48.3%)		
RELIEF: N 0deg			
COMPENSAZIONE: Tangente punta			
DESCRIZIONE: CNMT Right Hand			
<b>T2 D0</b>			
TIPO: groove turning	MINIMUM Z: -27mm	PINZA: Esterno Destra	
INSERISCI: Quadrato	MAXIMUM FEED: 635mm/min		
LARGHEZZA: 3mm	MASSIMA VELOCITÀ MANDRINO: 5000rpm		
NOSE RADIUS: 0.1mm	CUTTING DISTANCE: 44.2mm		
COMPENSAZIONE: Punta	RAPID DISTANCE: 64mm		
DESCRIZIONE: OD Grooving	ESTIMATED CYCLE TIME: 17s (19.2%)		

Fig. 5.19 – Strumenti utilizzati per la lavorazione

Operazioni			
<b>Operazione 1/3</b>			
DESCRIZIONE: Sgrossatura del profilo1	MAXIMUM Z: 5mm	<b>T1 D0</b>	
WCS: #0	MINIMUM Z: -24.8mm	TIPO: general turning	
TOLLERANZA: 0.01mm	VELOCITÀ SUPERFICIE: 91m/min	INSERISCI: ISO C 80deg	
PASSO LATERALE MASSIMO: 1.2mm	FEEDRATE PER REV: 0.127mm	EDGE LENGTH: 9.82mm	
	CUTTING DISTANCE: 94.9mm	NOSE RADIUS: 0.8mm	
	RAPID DISTANCE: 122.9mm	SEZIONE TRASVERSALE: T	
	ESTIMATED CYCLE TIME: 30s (34.6%)	TOLLERANZA: M	
	REFRIGERANTE: Getto d'acqua	RELIEF: N 0deg	
		COMPENSAZIONE: Tangente punta	
		DESCRIZIONE: CNMT Right Hand	
<b>Operazione 2/3</b>			
DESCRIZIONE: Finitura profilo2	MAXIMUM Z: 5mm	<b>T1 D0</b>	
WCS: #0	MINIMUM Z: -24.8mm	TIPO: general turning	
TOLLERANZA: 0.01mm	VELOCITÀ SUPERFICIE: 91m/min	INSERISCI: ISO C 80deg	
PASSO LATERALE MASSIMO: 1.2mm	FEEDRATE PER REV: 0.127mm	EDGE LENGTH: 9.82mm	
	CUTTING DISTANCE: 33mm	NOSE RADIUS: 0.8mm	
	RAPID DISTANCE: 59.77mm	SEZIONE TRASVERSALE: T	
	ESTIMATED CYCLE TIME: 10s (11.7%)	TOLLERANZA: M	
	REFRIGERANTE: Getto d'acqua	RELIEF: N 0deg	
		COMPENSAZIONE: Tangente punta	
		DESCRIZIONE: CNMT Right Hand	
<b>Operazione 3/3</b>			
DESCRIZIONE: Parte1	MAXIMUM Z: 5mm	<b>T2 D0</b>	
STRATEGIA: Parte tornitura	MINIMUM Z: -27mm	TIPO: groove turning	
WCS: #0	VELOCITÀ SUPERFICIE: 91m/min	INSERISCI: Quadrato	
TOLLERANZA: 0.01mm	FEEDRATE PER REV: 0.127mm	LARGHEZZA: 3mm	
	CUTTING DISTANCE: 44.2mm	NOSE RADIUS: 0.1mm	
	RAPID DISTANCE: 64mm	COMPENSAZIONE: Punta	
	ESTIMATED CYCLE TIME: 17s (19.2%)	DESCRIZIONE: OD Grooving	
	REFRIGERANTE: Getto d'acqua		

Fig. 5.20 – Descrizione completa delle operazioni e dei parametri di taglio

Per quanto riguarda la stesura del foglio di lavoro dell'operazione di saldatura fra le parti lavorati in precedenza, Fusion360 non fornisce la simulazione di tale lavorazione; pertanto è stato compilato il classico foglio di lavoro manualmente. Non sono riportati i tempi di lavorazione in quanto le tempistiche variano con i parametri di saldatura utilizzati.

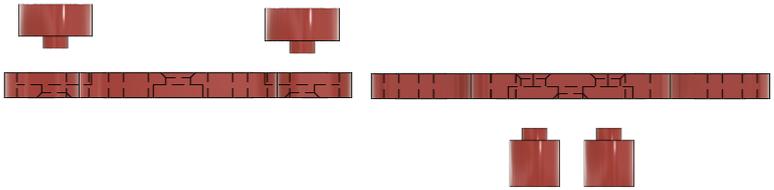
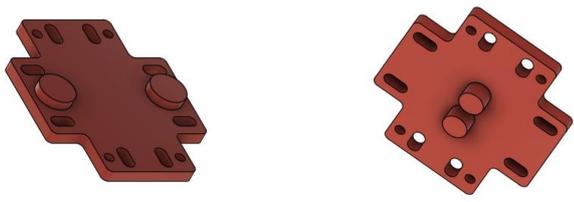
UNIVERSITA' DI GENOVA DIPARTIMENTO INGEGNERIA MECCANICA	Ciclo di Lavorazione Elemento : Piastra di regolazione	RIFERIMENTI	COMP. TEMPI		NOTE
			Tempo prep. per lotto	Totale tempo unitario lavorativo	
Compilato: Pier Andrea Tornatore Controllato..... Visto.....			Superfici di Riferimento		SR1 SR 2 SR3 SR4  SR1 SR 2 SR3 SR4
Tempo Passivo Tempo Attivo			DIMA		
SCHIZZO DI LAVORAZIONE 			SALDATRICE		
Tipo di macchina			Reparto		
FASI SALDATURA			Unione permanente		
N.			1		
DESIGNAZIONE SUPERFICI 					

Fig. 5.21 – Foglio di lavoro operazione di saldatura

È importante notare come il foglio di lavoro fornito da Fusion360 riporti le velocità di taglio e avanzamento utilizzate dal software durante l'utilizzo della macchina utensile virtuale; è possibile modificare tali dati in modo da adattare la simulazione alle effettive esigenze. Nulla vieta inoltre di importare da librerie esterne utensili customizzati con cui poter effettuare le simulazioni; nello specifico è altrimenti possibile modificare direttamente gli utensili all'interno della libreria del software a proprio piacimento.

## **5.5 Approccio cicli di lavorazione convenzionali tramite EERD**

Per garantire un approccio corretto al problema è stata innanzitutto necessaria una rigorosa progettazione concettuale, nella quale sono state identificate le Entità utili a una corretta descrizione grafica del sistema. Infatti, l'utilizzo di un ERD per la descrizione concettuale e semantica può tranquillamente essere esteso a ogni costrutto reale del mondo fisico; è tuttavia necessario procedere rigorosamente nella sua descrizione in modo che sia poi ottimizzabile ed utilizzabile una volta che il modello debba essere implementato. Per quanto riguarda i cicli di lavorazione con macchine utensili convenzionali, inizialmente si era pensato di introdurre un numero di Entità contenuto e di suddividere la lavorazione come se fosse effettivamente eseguita in un'officina, ovvero suddividendo l'intero ciclo di produzione in 3 ERD, in modo che ognuno trattasse separatamente le 3 differenti lavorazioni necessarie per ottenere la geometria finale della piastra. Si è iniziato con la stesura dell'ERD della lavorazione attuata con la fresa, che è caratterizzata da molte più operazioni rispetto alle altre. Seguendo lo stesso schema concettuale sono poi stati generati gli altri due ERD, rispettivamente per le lavorazioni di tornitura dei perni e per la saldatura dei semilavorati. A livello informativo, ogni ERD andrebbe corredato del rispettivo "Dominio" dove all'interno vengono spiegate tutte le precisazioni non esplicabili a livello grafico, tali precisazioni sono utili ad evitare problemi riguardanti la terminologia con cui vengono chiamate le entità oppure per spiegare particolari operazioni che non parrebbero chiare a una prima analisi del grafico da parte del programmatore. Il primo ERD creato per approcciare il ciclo di lavoro di fresatura è riportato nella Fig. 5.22.

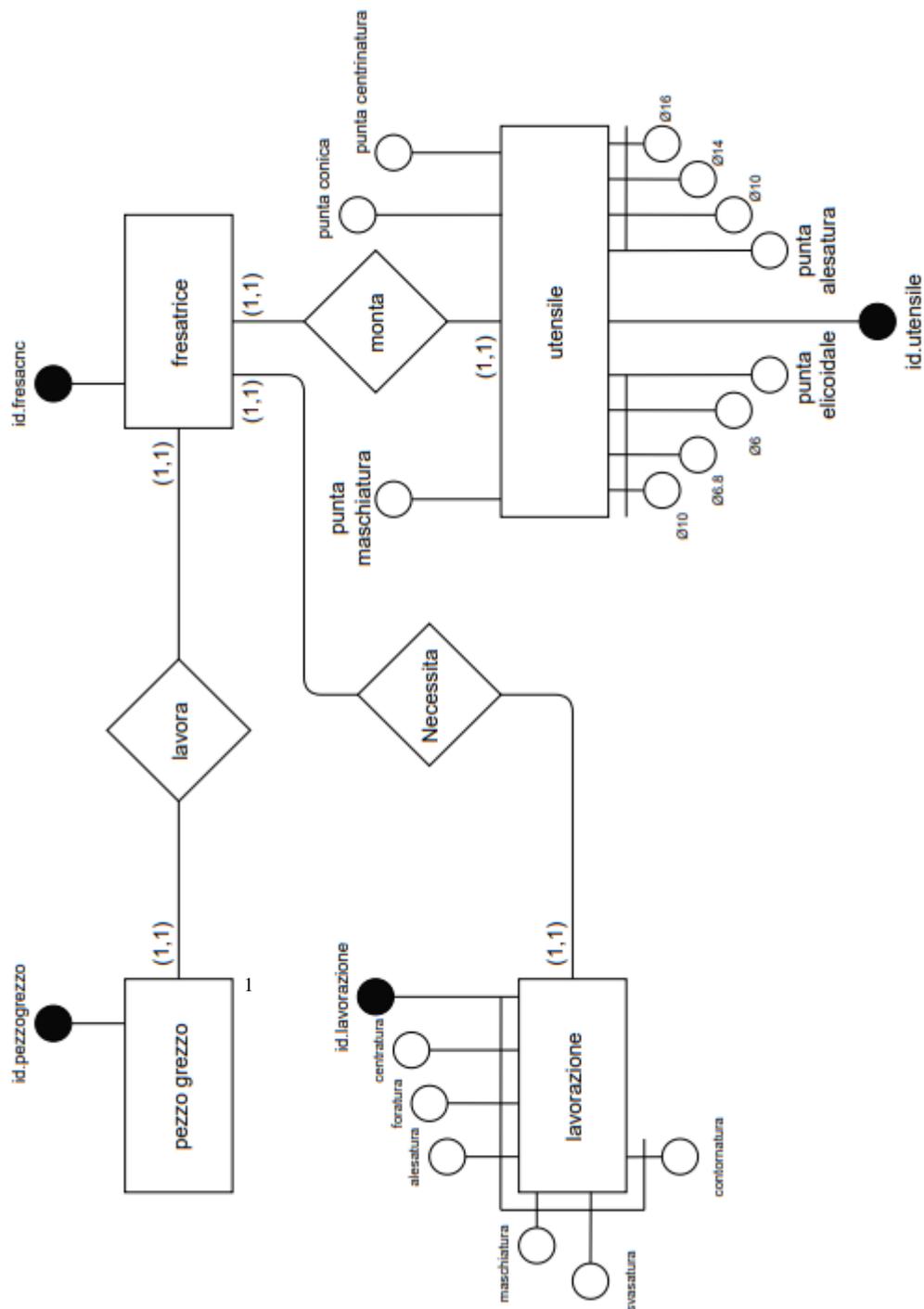


Fig. 5.22 – Bozza del primo approccio con ERD al ciclo di lavorazione

<sup>1</sup> Per “pezzo grezzo” viene inteso il materiale da lavorare, spesso reperibile sul mercato già in forma di semilavorato, non è da confondere con materia prima grezza da lavorare.

Per quanto possa sembrare corretto a livello grafico, una tale rappresentazione risulta poco ottimizzata in quanto nel codice di calcolo l'interpretazione dell'entità "utensile" richiederebbe un dispendioso lavoro di computazione. Si è deciso così di utilizzare la gerarchia di specializzazione dell'entità, tipica degli EERD, per una più chiara e snella descrizione. Il grafico rielaborato a cui si è giunti è quindi quello mostrato nella Fig. 5.23.

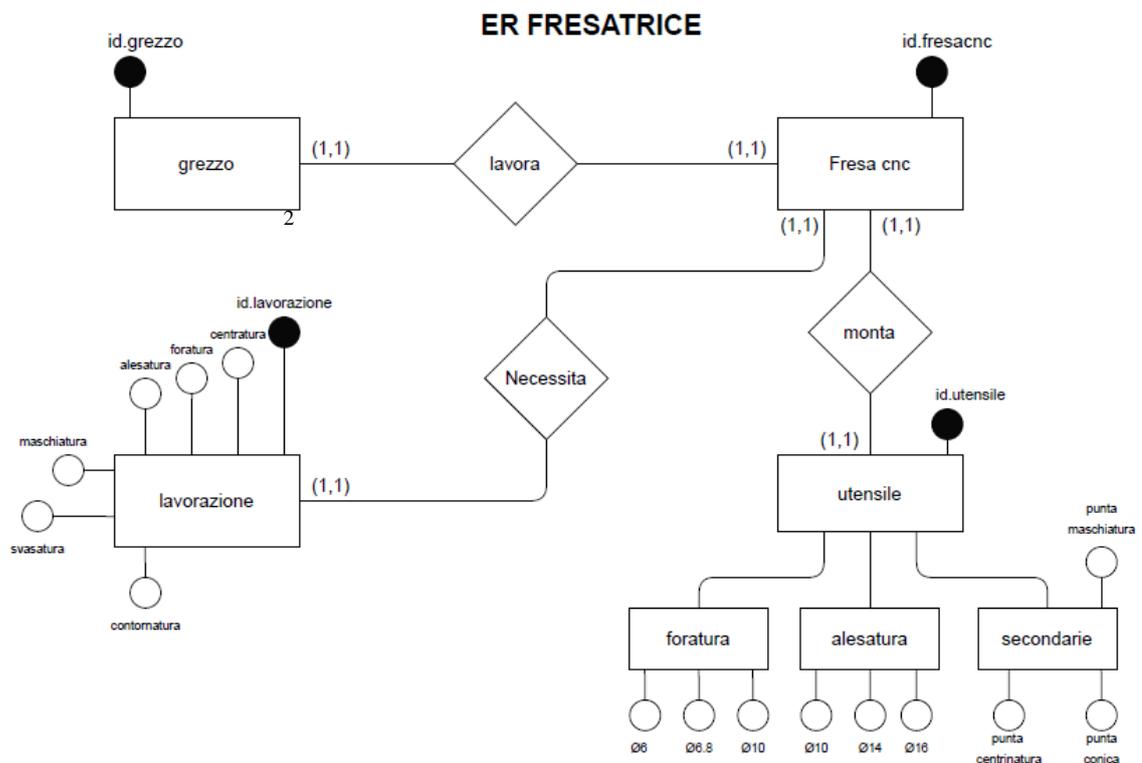


Fig. 5.23 – Bozza del primo approccio con ERD al ciclo di lavorazione di fresatura

Di seguito vengono riportati gli altri due diagrammi (Figure 5.24 2 5.25) rispettivamente per le singole operazioni di tornitura e saldatura:

<sup>2</sup> Vedi specifiche nota a piè di pagina 1, pag.42

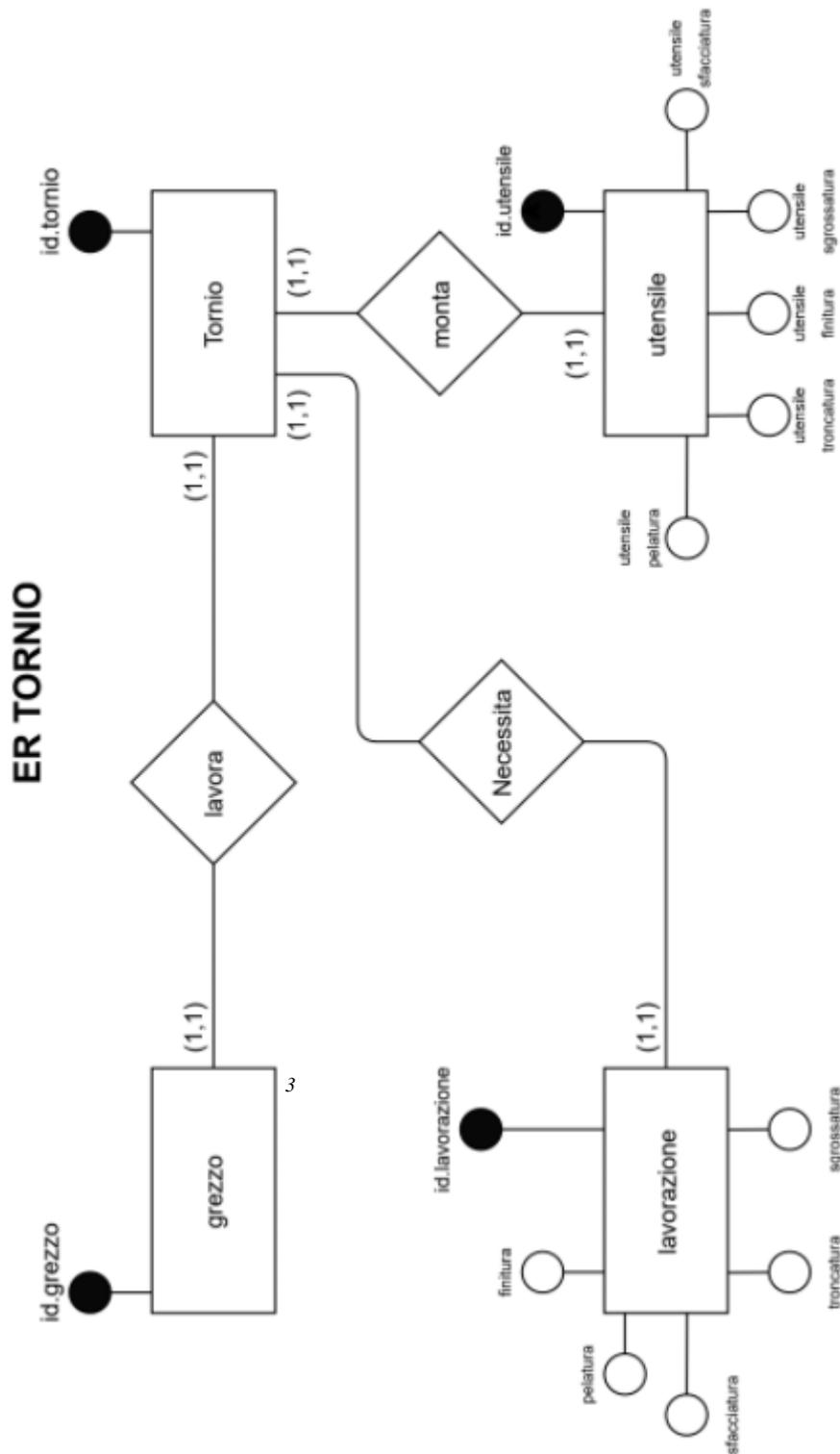


Fig. 5.24 – Bozza del primo approccio con ERD al ciclo di lavorazione di tornitura

<sup>3</sup> Vedi specifiche nota a piè di pagina 1, pag.42

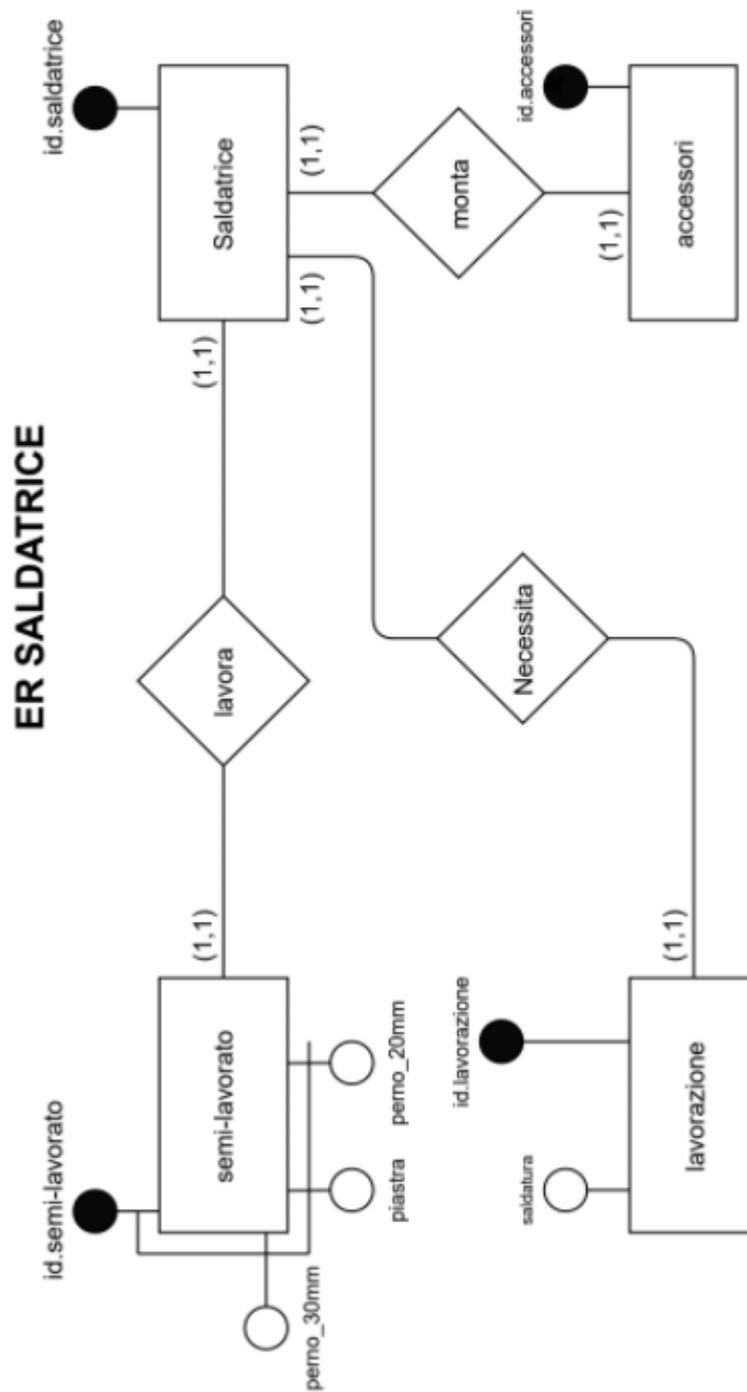


Fig. 5.25 – Bozza del primo approccio con ERD al ciclo di lavorazione di saldatura

È necessario far notare però che anche le macchine utensili convenzionali sono dotate di un certo grado di flessibilità e riconfigurazione, infatti tramite il montaggio di utensili e/o altri dispositivi se ne possono variare le funzioni. A titolo d'esempio una testa a dividere introduce un nuovo asse su una fresatrice convenzionale, mentre l'adozione di dispositivi di misura, come un tastatore montato al posto dell'utensile, trasforma una qualunque macchina utensile a controllo numerico (normalmente un tornio o una fresatrice) in una macchina di misura a coordinate. Queste possibilità non appaiono nei grafici EERD soprastanti e quindi tale rappresentazione non è totalmente veritiera della realtà. Tenendo conto di queste considerazioni si è pensato di partire dalle caratteristiche che definiscono una macchina utensile nel carattere più generale, ovvero il moto di taglio, il moto di avanzamento e i rispettivi cinematismi, visibili in Tab.1, per la designazione di un nuovo ERD che illustrasse in maniera più coincisa tali proprietà.

*Tab. 1 – Classificazione macchina utensili secondo i moti di taglio e avanzamento*

<b>Moto di Taglio</b>	<b>Rotatorio</b>	<b>Conferito al pezzo:</b> Torni <b>Conferito all'utensile:</b> Fresatrici, Trapani, Alesatrici
	<b>Rettilineo alternativo</b>	<b>Conferito al pezzo:</b> Piallatrici <b>Conferito all'utensile:</b> Limatrici, Stozzatrici, Brocciatrici
<b>Moto di Avanzamento</b>	<b>Continuo</b>	<b>Conferito al pezzo:</b> Fresatrici, Rettificatrici <b>Conferito all'utensile:</b> Torni, Trapani, Alesatrici
	<b>Intermittente</b>	<b>Conferito al pezzo:</b> Limastrici, Stozzatrici <b>Conferito all'utensile:</b> Piallatrici

Oltre alle principali entità già definite all'interno del grafico precedente, si è quindi scelto di aggiungere quelle derivanti dalla tabella soprastante, rispettivamente in entità e sotto-entità, tramite l'utilizzo della specializzazione di gerarchia. Si è quindi giunti al diagramma EERD mostrato in Fig. 4.26.



Il EERD nella Fig. 4.26 rappresenta quindi lo schema concettuale del ciclo di lavorazione delle piastre di regolazione mediante l'utilizzo di macchine utensili convenzionali. La specificazione dei moti di taglio, moti di avanzamento e dei rispettivi cinematismi tramite la specializzazione della gerarchia "Moti" relazionata nelle sue sottocategorie con le entità "pezzo e utensile" evidenzia come essi influenzino la configurabilità della macchina utensile stessa. A seconda di come tali moti vengono conferiti a pezzo e/o utensile, con il supplementare intervento dei cinematismi, viene determinato il tipo di configurazione e quindi la macchina utensile convenzionale necessaria a portare a termine la lavorazione richiesta.

## 5.6 Approccio cicli di lavorazione con RMS tramite ERD

Una volta definito il diagramma EER riferito alle macchine utensili convenzionali la descrizione del ciclo di lavorazione tramite un sistema RMT (Reconfigurable Machine Tools) ne è una estensione. Concettualmente l'unica differenza riguarda come il sistema riconfigurabile si relaziona alle entità rappresentanti i moduli che lo costituiscono e come le entità rappresentanti i moduli a loro volta si relazionano con le entità "materiale da lavorare", "Utensile" e "Cinematismi" L'EERD relativo a tale descrizione è riportato in Fig. 5.27.

Si osservano le seguenti entità:

- Materiale da lavorare,
- Lavorazione
- Materiale lavorato
- Cinematismo, a sua volta con le sottoclassi Locale e Comune
- Tavola
- Basamento
- Linea
- RMT
- Utensile con le sottoclassi Asportazione truciolo e Unione

Ciascuna entità rappresenta componenti o attività realizzate con la macchina utensile riconfigurabile.

Si osserva che le entità Materiale da lavorare, Lavorazione e Materiale lavorato sono identiche a quelle presenti nel ERD delle lavorazioni effettuate con le macchine convenzionali.

La riconfigurabilità deriva dalla combinazione/relazione tra le entità Basamento, Linea e Tavole.

Le entità Cinematismo e Utensili, stante le caratteristiche di tutte le macchine utensili sono presenti anch'esse nel ERD delle macchine utensili convenzionali.

L'entità "Linea" corrisponde all'unione dei basamenti, montati uno in serie all'altro; sulla linea vengono montate le tavole porta-utensile e porta-pezzo. Proprio per questo motivo l'entità "Linea" si relaziona con quella riferita al "Basamento"; la doppia relazione fra l'entità Linea con le entità Tavola e Basamento, dà vita alla configurazione della Reconfigurable Machine Tools. I cinematismi divisi rispettivamente in comune (quello di avanzamento lungo l'asse principale della linea X) e locali (presenti sulle tavole) creano i movimenti relativi di avanzamento e taglio necessari alle lavorazioni richieste.

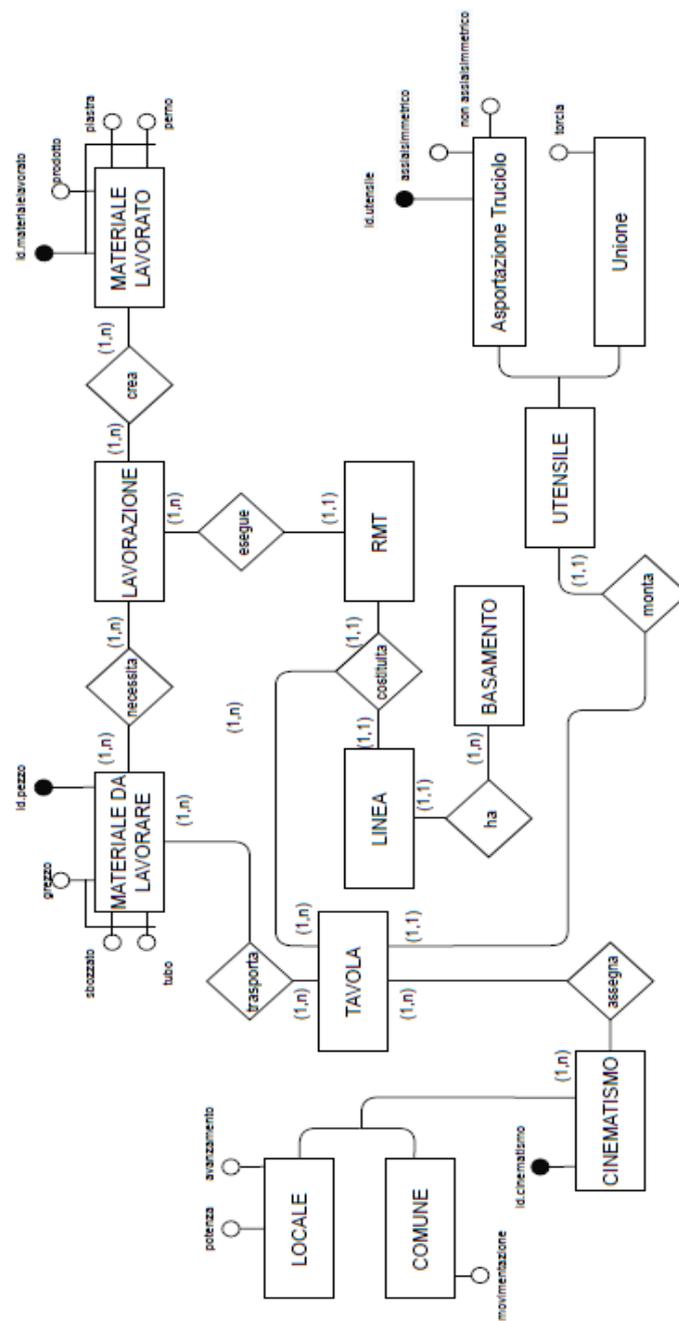


Fig. 5.27 – EERD per descrizione semantica di un ciclo di lavorazione tramite un RMT

## 6 Analisi dei risultati

La stesura dei grafici EER ha consentito una descrizione formale delle macchine utensili convenzionali e riconfigurabili.

Si osserva che avendo per oggetto le lavorazioni, l'analisi tramite EER deve evidenziare entità e relazioni che rispecchiano il processo tecnologico. Precisamente, il processo tecnologico si realizza fisicamente facendo interagire tramite una macchina, convenzionale o riconfigurabile, il materiale da lavorare con un dispositivo che opera la trasformazione. Questa caratteristica deve essere quindi presente nella descrizione indipendentemente dalla metodologia di analisi impiegata.

Per questo motivo i diagrammi EER delle macchine utensili convenzionali presentano relazioni simili a quelle della macchina riconfigurabile. Infatti, ipoteticamente è possibile considerare la configurazione presente sulle macchine utensili convenzionali come derivate dalla combinazione di due o più tavole della RMT che si relazionano fra loro al fine di realizzare una cinematica propria della macchina utensile convenzionale considerata. È grazie a tale cinematica che la macchina convenzionale o riconfigurabile può portare a termine la lavorazione richiesta.

Le macchine utensili convenzionali avendo una struttura cinematica rigidamente prestabilita in fase di progettazione hanno un grado di flessibilità che si limita solo a quegli elementi, dispositivi o attrezzature, che possono trovare una sistemazione nelle catene cinematiche predefinite: ad esempio, il divisore per una fresatrice consente di aggiungere un asse alla macchina.

Tale vincolo non è presente nelle macchine utensili riconfigurabili, in quanto le "tavole" e la "linea" realizzata tramite i basamenti, nonché la possibilità di estendere il volume di lavoro e variare il numero di "tavole" presenti sulla linea permettono di introdurre o variare le cinematiche e quindi lavorazioni anche in fase di operazione del sistema.

Nello specifico si nota come l'entità "Macchinario" presente nel EERD di Fig.5.26 delle macchine utensili convenzionali viene sostituita da un'entità "RMT" rappresentate il sistema di lavorazione. Quest'ultima entità si relaziona ai moduli (in questo caso quelli caratteristici dell'architettura Profacere) caratterizzanti la funzionalità della macchina utensile riconfigurabile, precisamente "Linea", "Basamento" e "Tavola".

Il legame con i cinematismi non è più diretto con la macchina convenzionale ma viene relazionato con l'entità "Tavola"; in questo modo si introduce un ulteriore livello dal quale deriva una caratteristica di riconfigurabilità più estesa rispetto a quella limitata delle macchine utensili convenzionali.

Anche le entità "Utensile" e "Materiale da lavorare" si relazionano con la "Tavola", poiché proprio sulle tavole verranno montati gli elementi per estendere la cinematica: ad esempio, gli accessori per il fissaggio del pezzo, l'elettromandrino per azionare l'utensile, la contropunta per sorreggere lo sbizzato etc.

## 7 Conclusioni e sviluppi futuri

L'utilizzo di una macchina utensile riconfigurabile RMT al fine della progettazione e organizzazione di un sistema manifatturiero che segua il paradigma dei RMS ha evidenziato i problemi legati alla necessità di definire un modello concettuale per la descrizione dei cicli di lavorazione e l'ottimizzazione della configurazione.

Al giorno d'oggi i cicli di lavorazione sono infatti pensati esclusivamente in funzione di lavorazioni con macchine utensili convenzionali e non esistono post-processor dedicati alle RMT.

È stato innanzitutto necessario definire un test case per un ciclo di lavorazione. La scelta è ricaduta sulla produzione di un componente caratterizzanti la RMT Profacere®.

Il lavoro è stato svolto utilizzando il software di CAD Autodesk Fusion360® che ha permesso di simulare le lavorazioni per ottenere le geometrie finali e valutare i tempi necessari alla produzione del componente.

Una volta determinato tale ciclo di lavorazione, si è utilizzato il modello ER e l'estensione EER per la descrizione concettuale delle lavorazioni eseguibili. In particolare, è stata impiegata tale metodologia per descrivere prima il ciclo di fabbricazione effettuato con macchine convenzionali e poi con quelle riconfigurabili. La stesura dei cicli ha consentito di individuare le principali similitudini fra le macchine utensili convenzionali e quelle riconfigurabili focalizzando lo studio sulla flessibilità, riconfigurabilità e modularità.

L'utilizzo del EER-Model si è quindi rivelata una strategia ottimale per individuare similitudini con le quali effettuare una mappatura delle funzioni delle macchine utensili convenzionali nelle funzioni offerte dalle macchine utensili riconfigurabili. Detta mappatura consente di passare da una tipologia all'altra e facilita pertanto la configurazione delle RMT.

In generale i programmi CAD utilizzano database con i quali è descritta la struttura concettuale e fisica degli oggetti rappresentati: si passa ad esempio da entità quali body a componente e all'assemblaggio dei componenti. Le funzioni CAM di questi software richiedono inoltre informazioni quali il tipo di lavorazione e di macchina utensile impiegata, in modo da fornire in output il part program necessario per la lavorazione richiesta. Tramite l'utilizzo dei modelli EER sarà ora disponibile una descrizione concettuale delle nuove macchine riconfigurabili che può essere agevolmente messa in relazione con le macchine utensili convenzionali tramite le quali l'utente concepisce le lavorazioni. Questa caratteristica è un passo importante affinché il bagaglio di competenze tecnologiche caratteristico degli attuali responsabili della produzione possa essere sfruttato con le nuove macchine riconfigurabili e, in definitiva, possa essere attuata una transizione agevole da un sistema di produzione convenzionale ad un sistema di produzione riconfigurabile che è uno dei fattori chiave abilitanti la cosiddetta Industria 4.0. In tal modo si aprono nuove possibilità per l'introduzione della riconfigurabilità e per l'ottimizzazione dell'impegno delle RMT Profacere®.

## Bibliografia

- [1] Patrick de Vos, Group technology: operational excellence in the industry 4.0 era, (2018).
- [2] Bruzzone, Dispense di Tecnologia Meccanica.
- [3] Mehrabi et al., 2000; Koren et al., (1999); Mehrabi e Ulsoy, (1997).
  
- [4] Koren Y., Galip Ulsoy A., 2002, Reconfigurable manufacturing system having a production capacity method for designing same and method for changing it production capacity, United States Patent, US 6349237 B1
- [5] Bruzzone, A.A., Monti, M., Godani A., Reconfigurable Machining Center, WIPO patent WO2017137938, (2017).
- [6] Bruzzone, A.A., Monti, M., Rosciano I., Modular Frame Structure for Machining Center, WIPO patent WO2019106104, (2019).
- [7] Bruzzone, A.A., Monti, M., Rosciano I., Device and Method for Positioning a Module of Modular Bed for Machine Tools, WIPO patent WO2021013837, (2021).
- [8] D'Addona, D.M., Bruzzone, A.A., LEGO<sup>®</sup>-like reconfigurable machining system: New perspectives to optimize production capacity, IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), pp. 212-217, (2017).
- [9] Aldrin P. O., 1980, Universal type machine tool, United States Patent, US 4187601.
- [10] Bullen G. N., 1998, Reconfigurable gantry tool, United States Patent, US 5848458
- [11] Katz R., 2007, Design principles of reconfigurable machines, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 34, pag. 430-439
- [12] Barbara Catania, Giovanna Guerrini, Elena Ferrari. Sistemi di Gestione Dati - Concetti e Architetture. CittaStudi Edizioni, Utet Libreria, De Agostini Scuola, 2006.
- [13] Sandip Maurya, Vivek Yadav, Empirical analysis on E-manufacturing system in database management system, (2019).
- [14] M. Santochi, et. al., Tecnologia Meccanica e Studi di Fabbricazione-CEA, (2000)

## **Abbreviazioni e acronimi**

RMS	Reconfigurable Manufacturing System
RMT	Reconfigurable Manufacturing Tools
GT	Group Technology
CNC	Computer Numerical Control
DML	Dedicated Manufacturing Line
FMS	Flexible Manufacturing System
FMC	Flexible Manufacturing system Complex
ERD	Entity Relationship Diagram
EERD	Enhanced Entity Relationship Diagram