



Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi di un processo di finitura
robotizzato per componenti metallici
realizzati tramite manifattura additiva**

**Analysis of a robotic finishing process
for metal parts made by
additive manufacturing**

Relatore:

Matteo Claudio Palpacelli

Tesi di laurea di:

Nicolò Cantello

Anno Accademico 2019/2020

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Italy

Alla mia Famiglia

Indice

1. Capitolo 1 – Introduzione	1
2. Capitolo 2 - Produzione additiva	3
3. Capitolo 3 - Lavorazioni post Stampa 3D	9
3.1. Rimozione della polvere, dei supporti e del substrato	9
3.2. Processi di finitura Termici	10
3.3. Processi di finitura Superficiale	11
3.3.1. Sabbiatura abrasiva (Grit & Ceramic) & Pallinatura	13
3.3.2. Lucidatura ottica (Finitura a mano)	14
3.3.3. CNC Finishing/machining	15
3.3.4. Processi Micro machining (MMP)	16
3.3.5. Trattamenti chimici post-processo	16
3.3.6. Electroplating	17
3.3.7. Laser Micro machining	17
4. Capitolo 4 - Utilizzo dei robot per processi di lucidatura	19
4.1. Controllo Passivo	20
4.1.1. Esempi di configurazioni di controllo passivo	21
4.2. Controllo Attivo	24
4.2.1. Esempi di configurazioni di controllo attivo	27
5. Capitolo 5 - Material Removal Rate (MRR)	31
6. Capitolo 6 - Robot Comau NJ-60-2.2	32

6.1. Lavorazione Ingranaggio Diretta	34
6.2. Lavorazione Ingranaggio Inversa	41
6.3. Comparazione	44
7. Capitolo 7 - Riflessioni conclusive	45
8. Riferimenti	47

Capitolo 1.

Introduzione

Alla base di questo studio vi è un'analisi delle tecnologie utilizzate come lavorazioni post-produzione additiva. Infatti è possibile suddividere queste tecniche in tre tipologie: rimozione della polvere, dei supporti e del substrato, processi di finitura termici e processi di finitura superficiali. In particolare, si pone l'attenzione in quest'ultima tipologia, dove è possibile scegliere svariate tecnologie al fine di arrivare alla qualità desiderata. Il fulcro della ricerca si concentra proprio nei processi di finitura che fanno uso di bracci robotici.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire tale tematica sono molteplici. Innanzitutto, ciò che ha suscitato in me interesse e curiosità, è stata la possibilità di concretizzare gli studi intrapresi in questi anni, approfittando dei macchinari messi a disposizione dall'ateneo. Inoltre, come tutti sappiamo, il mondo dell'ingegneria è proiettato verso l'automazione al fine di incrementare ricavi, raggiungere standard sempre più elevati ed avere efficienze migliori; quindi credo che questa ricerca sia stata un ottimo punto di partenza al fine di arricchire il mio bagaglio personale e soprattutto professionale.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è quello di mettere in evidenza, tramite approfondite ricerche, lo stato dell'arte dell'argomento e, inoltre, categorizzare le conoscenze in modo da avere la possibilità di fare scelte oculate in base ai propri bisogni. Infine, in base alle macchine presenti in laboratorio, ho provato a simulare la configurazione di una stazione lavorativa robotizzata, completamente automatizzata, compresa di magazzino utensili e banco di lavoro.

L'indagine è stata condotta telematicamente per via dell'emergenza Covid, gli studi sono stati trovati in rete e nella banca dati messa a disposizione dall'ateneo.

La tesi è articolata in sette capitoli: il tema principale dei primi è la produzione additiva. L'argomento viene approfondito e superato concentrando l'attenzione nei processi di finitura post stampaggio. Queste tematiche rappresentano il fulcro della ricerca, infatti si scende nel particolare dei processi, delle caratteristiche e dei vantaggi di ognuno di essi. In seguito viene fatto il punto della situazione per quanto riguarda la tecnologia di finitura robotizzata. Sono state esplorate e discusse diverse configurazioni, per poi infine arrivare a simulare, nel sesto capitolo, due configurazioni tipo nel tentativo di produrre e rifinire un ingranaggio ad alte prestazioni. Infine vengono confrontate le due stazioni e, come di consueto, sono presenti diverse considerazioni e riflessioni finali.

Capitolo 2.

Produzione additiva

La produzione additiva, o manifattura additiva, (in inglese: Additive Manufacturing, o AM) è un processo industriale impiegato per fabbricare oggetti con forme geometriche precise, utilizzando la progettazione assistita da computer (CAD) o scanner di oggetti 3D. I prodotti vengono creati aggiungendo uno strato di materiale sopra l'altro, il che è in contrasto con la produzione tradizionale, che spesso richiede lavorazioni meccaniche o altre tecniche per rimuovere il materiale in eccesso.

Sono state sviluppate diverse tecnologie per produrre oggetti tramite fusione o unione a stato solido. Per quanto riguarda i metalli, la materia prima utilizzata durante il processo deve essere consolidata e trasformata in un materiale denso. Infatti, non tutti i processi per la fabbricazione di oggetti 3D, sono in grado di compiere questa trasformazione con materiali metallici. Delle sette categorie standardizzate dal Comitato ASTM F42, le seguenti 4 incorporano anche la lavorazione dei metalli:

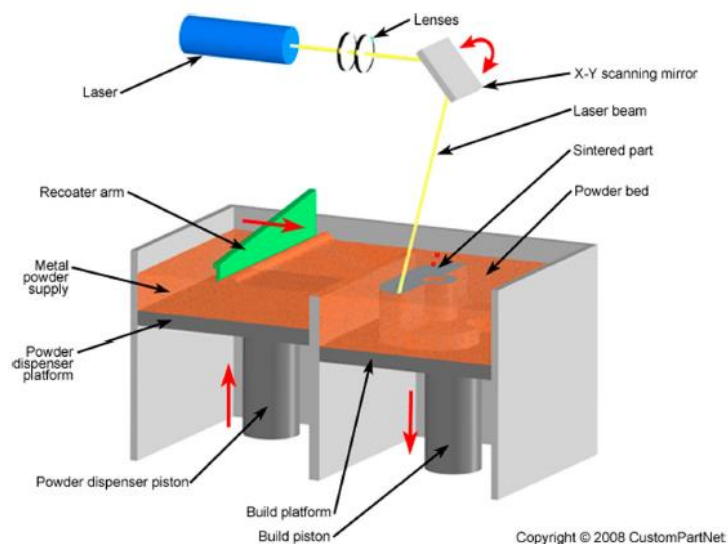
- Powder bed fusion (PBF)
- Direct energy deposition (DED)
- Binder jetting
- Sheet lamination

Powder-bed Fusion (PBF): include tutti i processi in cui l'energia termica focalizzata (raggio di elettroni o raggio laser) viene utilizzata per fondere o sinterizzare selettivamente uno strato superficiale di polvere. Per i metalli, in genere si utilizza la fusione anziché la sinterizzazione. Gli schemi delle macchine di fusione laser PBF di Selective Laser Melting (SLM)¹ e di Electron Beam Melting (EBM)² sono mostrati nelle Fig. 2 e 3. Sebbene entrambi i sistemi utilizzino lo stesso principio del letto di polvere per la fusione selettiva, ci sono differenze significative nella configurazione dell'hardware. Il sistema EBM è essenzialmente un microscopio elettronico a scansione ad alta potenza (SEM), che richiede un filamento, bobine magnetiche per collimare e deviare il fascio spazialmente e una colonna per la sorgente di elettroni. Il sistema SLM invece, ha in genere un serie di lenti e uno specchio di scansione o un galvanometro per manovrare la posizione del raggio. Anche la distribuzione della polvere viene gestita in modo diverso; i sistemi SLM utilizzano in genere una tramoggia per polvere, o un sistema di alimentazione, e lame a "ricopertura" a distribuzione morbida che trascinano la polvere sulla superficie di costruzione, mentre i sistemi EBM

¹Selective laser melting (SLM): fa impiego di polveri, termoplastiche, metalliche o silicee, e come dice il nome, fa uso di un laser per fondere i materiali impiegati per la costruzione del prototipo. Inizialmente viene steso un sottile strato di polvere da un apposito apparato e il laser provvede alla sinterizzazione, ove necessario. La tavola si abbassa della quantità voluta, si stende un altro strato di polvere e il tutto si ripete.

² Electron Beam Melting (EBM): ovvero fusione a fascio di elettroni, è una tecnologia di fabbricazione additiva mediante la quale una sorgente di elevata energia, composta da un fascio opportunamente concentrato e accelerato di elettroni, colpisce un materiale in forma "microgranulometrica" provocandone la fusione completa.

utilizzano tramogge per polvere e un rastrello metallico. Entrambi i processi EBM e SLM richiedono determinati passaggi: impostazione della macchina, lavorazione, recupero della polvere e rimozione del substrato. Una macchina PBF richiede un substrato di costruzione, o "piastra di partenza", per fornire supporto meccanico e termico al materiale di costruzione. Nei processi SLM il substrato viene avvitato o bloccato, mentre in quelli EBM viene stabilizzato direttamente dalla polvere che strato dopo strato viene sinterizzata. Quando vengono distribuiti strati successivi di polvere, gli strati esistenti della build non devono muoversi; il substrato aiuta a fornire supporto meccanico. Inoltre, quest'ultimo fornisce anche un percorso termico per dissipare il calore, che è particolarmente importante per la costruzione di sporgenze sulla parte superiore del pezzo (soggetto a gonfiore e altri difetti di processo causati da sbalzi di temperatura locali). Una volta completata la costruzione, la polvere in eccesso deve essere rimossa dalla camera di costruzione. A seconda del materiale utilizzato nel processo, il substrato di costruzione potrebbe aderire alle parti.



5

Figura 1: Schema del sistema PBF (SLM).

Direct Energy Deposition (DED): comprende tutti i processi in cui l'energia focalizzata genera una zona di fusione in cui si deposita la materia prima. In questo processo viene utilizzata come sorgente di calore il laser, l'arco voltaico o un fascio di elettroni. La materia prima utilizzata può essere in polvere o filo. Come nel PBF, devono essere riempite le tramogge per la polvere e posizionato un substrato di costruzione. Quest'ultimo può essere posto in una posizione fissa (sistemi a 3 assi) o su uno stadio rotante (sistemi a 5+ assi) per aumentare la capacità della macchina di elaborare geometrie più complesse. Nei sistemi alimentati a polvere, la velocità di avanzamento della stessa deve essere verificata regolarmente. Se il flusso è impedito, è possibile eseguire la pulizia degli ugelli o altre operazioni di manutenzione. La camera di costruzione è chiusa per garantire la sicurezza del laser, ma non è necessariamente riempita di gas inerte. Come nel PBF, il pezzo prodotto tramite DED in genere aderisce al substrato di costruzione. Le parti vengono quindi post elaborate sia termicamente (per ridurre le sollecitazioni residue e migliorare le proprietà), sia meccanicamente per ottenere la geometria finale desiderata.

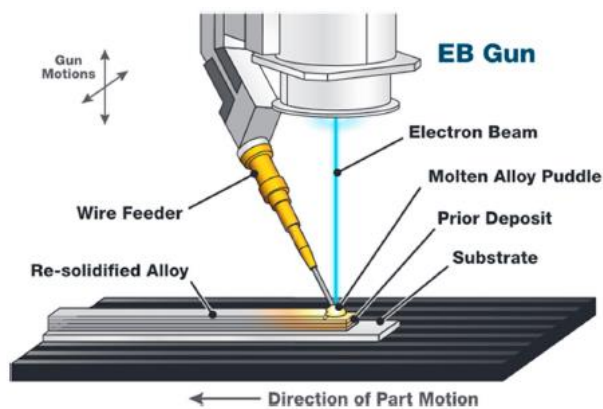


Figura 2: Sistema DED alimentato a filo.

Binder Jetting: questo processo consiste nel depositare del legante sulla polvere di metallo, che poi si indurisce e tiene insieme le particelle, sinterizzando o consolidando la polvere legata. Inoltre, è anche possibile procedere con l'infiltrazione di un secondo metallo. Lo schema del processo di deposizione del legante è mostrato in Fig. 6. Con l'infiltrazione finale si ottiene un materiale denso e viene utilizzata una lega con temperatura di fusione inferiore per infiltrarsi nella struttura stampata. Al contrario, il processo di consolidamento ottiene una composizione uniforme di una singola lega. La porosità è una delle principali preoccupazioni per le parti prodotte con questa tecnologia. Dopo l'indurimento, la parte viene trattata termicamente a $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ per 24–36 ore per sinterizzare la polvere sciolta e bruciare il legante, lasciando la parte metallica sinterizzata densa al 60%. Infine, tramite l'infiltrazione si può raggiungere una densità finale del 95%. Il prodotto finito poi viene raffreddato per aumentarne la duttilità. La finitura superficiale è in linea con molti processi PBF, cioè intorno ai $15\ \mu\text{m}$ [Ra]

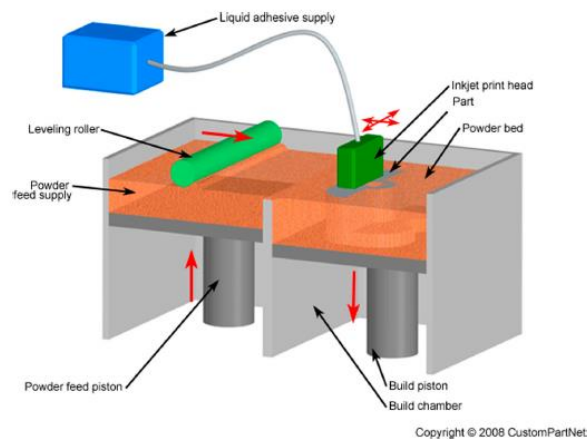


Figura 3: Illustrazione del processo Binder Jetting.

Sheet Lamination: si utilizza l'impilamento di lastre di metallo, ottenute tramite taglio di precisione, per produrre, da tanti pezzi 2D, un oggetto 3D. Dopo questo passaggio, i fogli vengono uniti e incollati mediante brasatura o saldatura di precisione. Una caratteristica chiave dell'hardware di laminazione è l'ordine in cui i fogli vengono applicati e tagliati/lavorati. Possono essere tagliati alla geometria specificata prima dell'adesione o post-adesione. Alcuni dei vantaggi di questo processo di laminazione delle lastre includono una bassa distorsione geometrica (le lastre metalliche originali mantengono le loro proprietà), la facilità di realizzazione di pezzi su larga scala, una superficie con finitura relativamente buona e bassi costi. Tuttavia si presentano anche delle limitazioni. Le parti unite adesivamente potrebbero non funzionare bene in condizioni di carico a taglio e trazione. L'accuratezza geometrica nella direzione Z è difficile da ottenere a causa degli effetti di rigonfiamento. Infine, le proprietà anisotrope sono prevalenti in queste strutture a causa del tipo di giunzione. Sebbene il processo introduca una temperatura elevata (la temperatura dell'interfaccia può aumentare fino a $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante il consolidamento) all'interno della regione localizzata dell'interfaccia, l'aumento della temperatura complessiva nell'intero prodotto è molto basso e la temperatura di lavorazione tipicamente rimane intorno alla temperatura ambiente. Di conseguenza, questo processo è stato utilizzato per la produzione additiva di diversi metalli, o anche per incorporare attuatori e sensori.

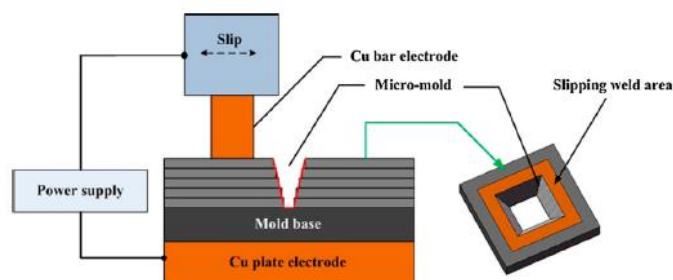


Figura 4: Metodo Sheet Lamination

Capitolo 3.

Lavorazioni post stampa 3D

Quando un semilavorato esce da un processo AM occorrono diversi step per passare da un pezzo in fase di lavorazione a un prodotto finito; infatti, all'uscita dalla stampante 3D non risultano ancora pronti per la maggior parte delle loro applicazioni. Gli elementi stampati, l'eccesso di polvere e le strutture di supporto devono essere rimossi e inoltre, potrebbero essere necessari trattamenti termici per migliorare le proprietà meccaniche. Infine, la superficie deve essere lavorata ulteriormente per ottenere la finitura superficiale e le tolleranze geometriche desiderate.

3.1 Rimozione della polvere, dei supporti e del substrato

Dopo la fabbricazione di un pezzo, la polvere in eccesso, le strutture e il materiale di supporto vanno rimossi. I processi Powder-bed Fusion richiedono che la polvere venga rimossa dal pezzo se sciolta (SLM), o fatta schizzare via usando la stessa, se sinterizzata (EBM). I processi a deposito diretto di energia (DED) possono richiedere la pulizia della macchina, ma le parti finite non sono racchiuse nella materia prima. Le strutture di supporto, meccanico e termico, sono spesso utilizzate in PBF e devono essere rimosse meccanicamente mediante applicazioni di forza o taglio. Il substrato di costruzione è tipicamente unito alla parte finita e deve essere tagliato usando

una sega o una lavorazione a scarica elettrica a filo. L'interfaccia del substrato in acciaio inossidabile e Ti-6Al-4V è un'eccezione, in quanto le parti possono essere fratturate dal substrato mediante l'applicazione di forza (tipica della produzione EBM di Ti-6Al-4V).



Figura 1: Rimozione della struttura di supporto.

3.2 Processi di finitura Termici

Dopo che le parti sono state rimosse dal substrato e dal materiale di supporto, è possibile effettuare dei trattamenti termici per alleviare lo stress residuo, chiudere i pori e/o migliorare le prestazioni meccaniche del materiale. I metalli così fabbricati, in genere, richiedono un trattamento termico per ottenere la microstruttura desiderata e le proprietà meccaniche

richieste per il servizio. Il materiale può essere trattato tramite HI³P per ridurre la porosità e le crepe interne, riscaldato nel forno per effettuare Solution Treat e/o aging. Le varie opzioni di trattamento possono determinare variazioni nella dimensione e nell'orientamento dei grani, nelle fasi dei precipitati, nella porosità e nelle proprietà meccaniche. Il riscaldamento del metallo AM in una fornace per effettuare cambiamenti nella microstruttura è l'obiettivo generale del trattamento termico. La post-lavorazione termica del metallo influenza i grani attraverso il recupero, la ricristallizzazione e la crescita.

3.3 Processi di finitura Superficiale

I pezzi AM sono in genere lavorati per ottenere una finitura superficiale liscia. Le parti così fabbricate hanno tipicamente un'elevata rugosità superficiale. Il modo più comune per lavorare le forme è quello di utilizzare le macchine CNC associate alla produzione sottrattiva. La semplice lucidatura o rettifica fatta con utensili rotanti con una levigatrice a nastro (superfici piane) può essere adeguata per alcune applicazioni, ma in genere non soddisfa gli standard richiesti per parti di alta qualità. La lucidatura

³ Hot isostatic pressing (HIP): è un processo manifatturiero usato per ridurre la porosità dei metalli e incrementare la densità di molti ceramici. Questo aumenta la resilienza e la lavorabilità. Il processo HIP consiste nel porre un oggetto in un ambiente gassoso ad elevata temperatura ed elevata pressione isostatica. Il gas maggiormente utilizzato è l'Argon, gas inerte che non reagisce chimicamente con il materiale. La camera viene riscaldata aumentando la pressione nell'autoclave. La pressione agisce uniformemente su tutte le superfici, da qui il termine "isostatico".

chimica è stata studiata su strutture “mesh” e viene raccomandata per questi tipi di superficie. I pezzi che poi vengono utilizzati sono generalmente sottoposti a trattamento termico post-stampaggio, che può ossidare la superficie del metallo. Se sono presenti pori aperti, l'ossidazione può estendersi all'interno della parte. Difetti come questo possono essere, e devono essere, evitati perché potrebbero non essere rimossi dalla lavorazione superficiale. Il processo tramite CNC delle superfici a forma libera è stato ampiamente rivisto in relazione alla selezione, all'orientamento e alla geometria dell'utensile. Lo studio delle tecnologie AM e CNC è stato approfondito per operazioni in tandem, che viene comunemente definito "produzione ibrida" o "AM ibrida". I sistemi ibridi in genere associano un processo DED al CNC, utilizzando la stessa posizione di montaggio per posizionare gli utensili CNC. Questo tipo di processo ibrido è attualmente in uso per la riparazione di parti di componenti aerospaziali, in grado di riparare pale del compressore e altre parti complesse.

I ricercatori hanno catalogato vari metodi utilizzati per migliorare la rugosità superficiale delle parti generate tramite Direct Melting Laser Sintering⁴. I pezzi fabbricati tramite DMLS danno una finitura grezza sulla

⁴ Direct Melting Laser Sintering (DMLS): è una tecnologia di produzione additiva (AM) per la fabbricazione di parti direttamente dai dati di progettazione assistita da computer (CAD), fondendo insieme diversi strati con l'aiuto di una sorgente laser. La macchina è composta da un sistema di gestione delle polveri, un laser a CO2 ad onda continua con relative ottiche ed un computer. Durante il processo, i modelli CAD 3D dei pezzi che si vogliono produrre e degli utensili utilizzati vengono convertiti in modelli di superfici triangolari nel formato STL standard. Il software suddivide il formato STL standard in strati

superficie del modello, rispetto a una superficie tornita media che ha una rugosità superficiale di circa Ra pari a 8,75 μm . Questa rugosità superficiale può essere migliorata fino a Ra 0,025 μm , qualificandosi come un'eccellente finitura a specchio. Possono essere utilizzati diversi processi per ottenere la rugosità superficiale e la finitura desiderata.

3.3.1. Sabbiatura abrasiva (Grit & Ceramic) & Pallinatura

La sabbiatura abrasiva è l'operazione di spinta forzata di un flusso di materiale abrasivo contro una superficie ad alta pressione per lisciare una superficie ruvida. La sabbiatura abrasiva, con questo tipo di processo, fornisce una finitura satinata e opaca. Questa finitura è in gran parte uniforme, ma non fornisce una finitura uniforme al 100%.

La pallinatura è un processo di lavorazione a freddo utilizzato per produrre uno strato di stress residuo di compressione, e modificare le proprietà meccaniche dei metalli. Questo processo consiste in tanti piccoli impatti su una superficie con pallini (particelle metalliche o ceramiche rotonde) con una forza sufficiente a creare piccole rientranze o fossette. È simile alla

orizzontali, rappresentando la parte in una pila di sezioni sottili. La fase di preparazione dei dati è seguita dal processo di sinterizzazione laser. Innanzitutto, una piastra di base in acciaio viene posizionata e livellata. Quindi, uno strato di polvere viene steso sulla piastra usando un rastrello mobile (ricopertura meccanica). Il computer esegue la scansione del raggio laser sulla superficie. L'energia del laser fa sì che le particelle di polvere si uniscano. Dopo la scansione, il substrato si abbassa ed un nuovo strato di polvere viene distribuito sopra quelli precedenti. Il processo viene ripetuto e, modificando la forma di ogni livello di scansione, è possibile produrre una parte di forma arbitraria.

sabbiatura, tranne per il fatto che opera tramite il meccanismo di deformazione plastica piuttosto che per abrasione. La pallinatura crea tante piccole deformazioni, causando cambiamenti nelle proprietà meccaniche della superficie. A seconda della geometria e del materiale del pezzo, dal materiale, dalla qualità, dall'intensità e dalla copertura della pallina, questo processo può aumentare la durata della vita di un pezzo a fatica da 0 a 1000%. Inoltre, viene anche rimosso meno materiale e viene creata meno polvere.



Figura 2: Pallinatura ingranaggio.

3.3.2. Lucidatura ottica (Finitura a mano)

Quando i progetti hanno geometrie semplici e non hanno criteri di tolleranza specifici, l'opzione di finitura migliore è la lucidatura ottica. Questa tecnologia è estremamente conveniente ed è il modo migliore per ottenere una finitura brillante. A causa della porosità superficiale dei metalli DMLS, viene rimosso da 0,0075 a 0,025 mm di materiale superficiale a seconda

della geometria. La lucidatura ottica non è l'ideale per grandi lotti, in quanto la ripetibilità del processo non è uno dei suoi punti di forza.

3.3.3. CNC Finishing/machining

La finitura CNC consente applicazioni di fresatura sagomata di alta qualità per ottenere tolleranze strette. La precisione orientata al dettaglio può essere ottenuta con torni CNC a 3 assi, 5 assi e 6 assi. Un corretto fissaggio può produrre tolleranze fino a 1 micron. Se si desidera questa opzione di post-elaborazione, è necessaria una pianificazione pre-costruzione per aggiungere materiale sufficiente alle caratteristiche e alle superfici da lavorare in modo da soddisfare le tolleranze.



Figura 3: Processo di finitura CNC.

3.3.4. Processi Micro machining (MMP)

Il Micro Machining Process (MMP) è un trattamento superficiale meccanico-fisico-chimico applicato ai pezzi posti all'interno di un ambiente per essere trattati, fornendo finiture superficiali selettive altamente accurate. La finitura superficiale desiderata si ottiene utilizzando la lavorazione solo nelle aree in cui è richiesta quella finitura particolare. Il processo inizia con un'analisi dettagliata dello stato superficiale del semilavorato da trattare, stabilendo i parametri di elaborazione richiesti per raggiungere gli obiettivi del cliente. Tramite questa opzione si è in grado di distinguere e applicare selettivamente diversi profili di rugosità primaria, rugosità secondaria e ondulazione delle superfici. Questo processo ha un'applicazione selettiva ed è ideale per i progetti che richiedono tolleranze precise su un gran numero di parti, anche su pezzi con passaggi interni che non possono essere raggiunti con un metodo alternativo.

3.3.5. Trattamenti chimici post-processo

La lucidatura elettrochimica, definita anche elettro-lucidatura, è un processo elettrochimico che rimuove il materiale dalle parti metalliche mediante lucidatura, passivazione e sbavatura. Il processo può essere utilizzato al posto della lucidatura fine abrasiva nella preparazione microstrutturale, ed è un'opzione economica per i progetti DMLS che non hanno tolleranze strette, creando una finitura brillante e uniforme. La misura in cui l'elettrolucidatura ha successo, dipende dal grado di preparazione delle superfici trattate.

3.3.6. Electroplating

Nella Galvanotecnica, sia un anodo che un catodo (la parte metallica da rivestire), sono immersi in un bagno elettrolitico composto da una soluzione di sali, incluso il metallo da placcare. La corrente continua (DC) viene fatta passare attraverso la soluzione, effettuando il trasferimento di ioni metallici sulla superficie catodica, placcando il metallo sull'elemento. Questo processo viene utilizzato principalmente per depositare uno strato di metallo per conferire una proprietà desiderata (ad es. Resistenza all'abrasione e all'usura, protezione dalla corrosione, lubrificazione, qualità estetiche, ecc.). Un'altra applicazione utilizza la galvanotecnica per aumentare lo spessore delle parti sottodimensionate. La placcatura è anche un metodo economico per migliorare la rugosità superficiale, con la riduzione della rugosità, che dipende dal grado di trattamento della superficie prima della placcatura. Le parti DMLS possono anche essere placcate allo stato grezzo e quindi rifinite in combinazione con un altro metodo.

3.3.7. Laser Micro machining

Le qualità attribuite al LASER, combinate ad un alto grado di flessibilità, a lavorazioni senza contatto e alla possibilità di avere un'elevata automazione nonché una facile integrazione, ci consente di utilizzare questo strumento in un ampio campo di processi di lavorazione su molti materiali, tra cui i metalli. I ricercatori hanno utilizzato le lavorazioni laser per svariati processi che si differenziano in base alla geometria, alle caratteristiche e al modo in cui il materiale viene rimosso dalla superficie. Nella

microlavorazione laser un raggio viene utilizzato per tagliare il materiale dal substrato, lasciando dietro di sé uno strato di materiale che si estende completamente attraverso il lato opposto del substrato. In questo caso, il materiale rimosso da questo strato viene espulso prevalentemente dal lato opposto.

A intensità di fascio elevate, il laser può essere utilizzato per l'ablazione superficiale dei materiali e, a causa della breve lunghezza d'onda e della breve durata dell'impulso, il laser produce in genere caratteristiche pulite e nitide nei metalli e molti altri materiali, il che rende questa tecnologia adattabile a numerose applicazioni di micromachining.

Capitolo 4.

4. Utilizzo dei robot per processi di lucidatura

Attualmente, a seconda di come viene movimentato e lavorato il pezzo, i sistemi di lucidatura robotizzati si dividono in due tipi. Nel primo il braccio del robot tiene l'utensile e il pezzo è fissato al piano di lavoro (Fig.1a). Questo tipo di operazione è adatta per lucidare con un volume e peso maggiore. Nel secondo il pezzo è fissato e movimentato dal braccio del robot vicino ad un utensile lucidante (Fig.1b). Così, invece, vengono lucidati pezzi più piccoli e leggeri.



(a) Hand-holding polishing tool



(b) Hand-holding workpiece

Figura 1

Indipendentemente dal metodo che venga utilizzato, la lucidatura è un tipico processo per contatto. Quindi la costante pressione esercitata tra pezzo ed

utensile deve essere tenuta sotto controllo. Esistono due metodi: controllo passivo o attivo.

4.1. Controllo Passivo

Durante il processo di lucidatura robotizzata, il controllo passivo della pressione di contatto viene realizzata solo attraverso vari meccanismi passivi, come le molle. Pertanto, viene mantenuta la sollecitazione nominale di contatto tra l'utensile di lucidatura e la superficie del pezzo.

Marcelo H. ha sviluppato una struttura in grado di manipolare la rigidità della molla durante la lucidatura delle pale di una turbina. Furukawa T. [1] ha creato un dispositivo per il controllo passivo della pressione che consiste in un giunto prismatico caricato a molla. Huang H. [2] ha sviluppato un sistema di smorzamento delle molle in modo tale da mantenere costante la sollecitazione e la conformità di contatto tra utensile e pala. Tsai M.J. [3] ha sfruttato un nuovo utensile abrasivo in grado di applicare la pressione desiderata alla base della molla. Han D.Q. [4] ha proposto un attuatore finale anch'esso utilizzante una molla.

Dunque, la maggior parte delle tecnologie menzionate fanno uso di materiali elastici simili a molle, come mostrato in Fig.4. Quindi questo tipo di lavorazione è relativamente semplice ed economica, ma, d'altro canto, non avendo attuatori che regolano la sollecitazione in tempo reale, è difficile ottenere lavorazioni estremamente accurate quando le geometrie sono complesse.

4.1.1. Esempi di configurazioni di controllo passivo

[1] Il dispositivo è messo in funzione da un robot ASB IRB 1000, controllato da un computer tramite una linea di comunicazione RS-232. Mentre il dispositivo di estremità misura e traccia una superficie tridimensionale sconosciuta, il PC acquisisce la configurazione ottimale per il polso del robot nell'area di lavoro considerata.

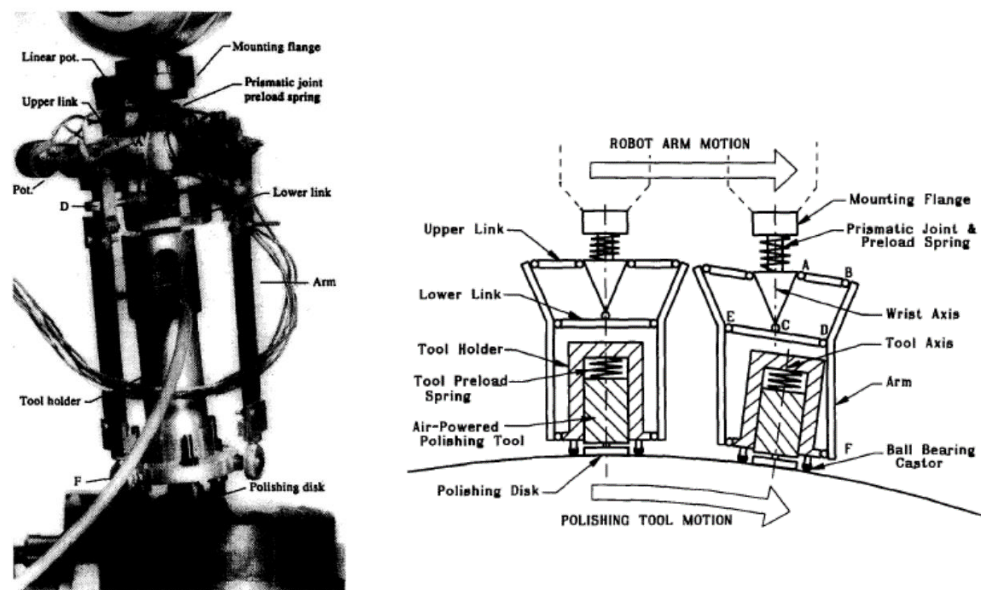


Figura 2 e 3 Visione schematica end-effector.

[2] Questo sistema di levigatura e lucidatura robotizzata a nastro è costituito da un robot a 6 assi, un controller, un computer, una stazione di misurazione in situ (ISMS) e 4 stazioni di lavoro. Il diagramma del flusso di un tipico ciclo di lavoro è mostrato in Fig.1. Durante un ciclo, un robot raccoglie una pala e lo muove nella stazione ISMS per la misurazione del profilo. I dati raccolti vengono migrati nel computer per la pianificazione del percorso

dell'utensile e a loro volta scaricati nel controller per essere eseguiti. A questo punto i pezzi vengono movimentati dal robot alle stazioni di lavoro. Queste lavorano a 2 a 2 così, mentre le prime lavorano, negli utensili a riposo vengono sostituiti i nastri usurati. Non vi è quindi alcun tempo morto.

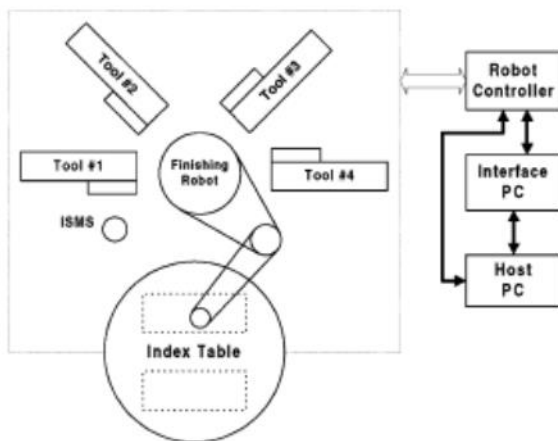


Figura 4: Layout sistema di lucidatura.

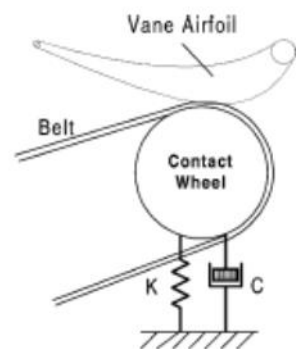


Figura 5: Illustrazione della stazione lavorativa.

[3] In questa applicazione il sistema è costituito da un robot e un meccanismo di controllo della pressione. Il robot a cinque assi (ReapeR), è azionato da servomotori AC con una scheda di controllo configurata in un computer PIII-450. Si hanno 3 assi prismatici e 2 rotanti. Durante il processo di lucidatura, la forza di contatto desiderata viene prodotta dalla molla, il cui spostamento viene generato dalla combinazione motore-vite. La deflessione della molla viene rilevata dall'LVDT per modificarne la tensione di uscita.

Così il segnale viene riconvertito in un altro output e modifica nuovamente la pressione di lucidatura.

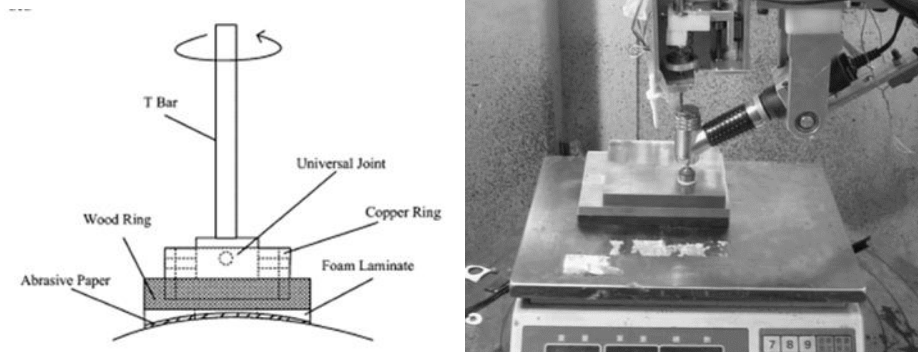


Figura 6: La nuova testa utensile

[4] In questo esperimento è stato utilizzato un UR5 come robot principale, dotato di due sensori di pressione SRI sul dispositivo di estremità. L'uscita analogica del sensore viene acquisita e campionata tramite un microcontrollore. Il micro-controller e il controller del manipolatore sono collegati tramite una linea seriale. Il controller è programmato con linguaggio C ++ e comunica con il manipolatore ogni 8 ms, i valori della tensione vengono acquisiti ogni 5 ms.

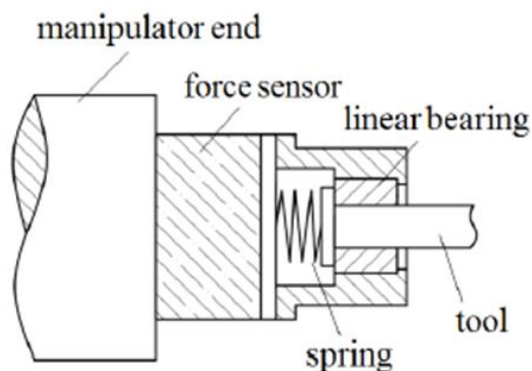


Figura 7: End-effector equipaggiato con sensori di pressione.

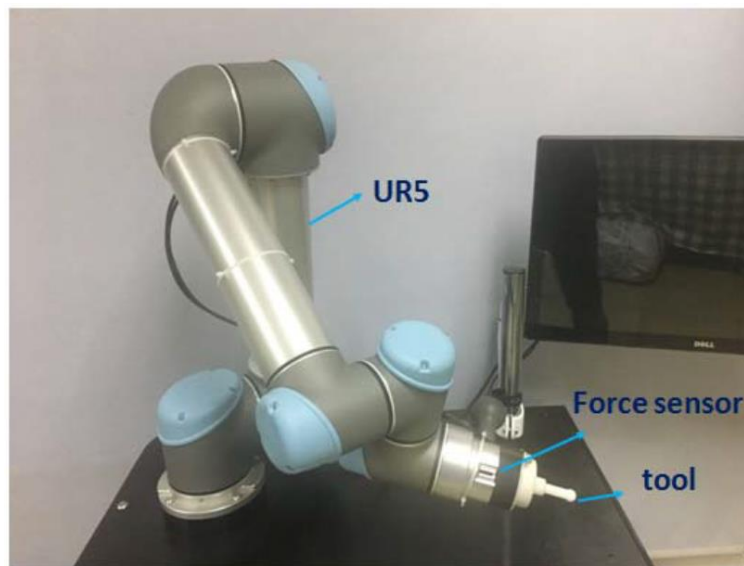


Figura 8: Setup sistema robotico.

4.2. Controllo Attivo

La qualità di una parte lucidata è determinata dalla sollecitazione a cui viene sottoposta. Se esagerata porterà ad una lucidatura eccessiva, se insufficiente si avrà l'effetto contrario. Pertanto, si stanno ponendo più attenzioni nella ricerca in questa tecnologia di controllo attivo, poiché è possibile raggiungere qualità di lucidatura più elevate. Al momento, vengono utilizzati due metodi che differiscono per il tipo di hardware utilizzato: sistema through-the-arm e sistema around-the-arm. Il primo si basa sul movimento vincolato di ciascuna articolazione al robot, però il sistema diventa instabile a frequenze elevate. Questo perché il processo di lucidatura richiede regolazioni continue in tempo reale ad alte frequenze per adattarsi ai cambiamenti di geometria del pezzo. Dunque, la seconda tecnica “around-the-arm”, che impiega un secondo dispositivo intelligente all'estremità del braccio robotico per controllare lo stress a cui è sottoposto

il pezzo in fase di lavorazione, è quella più utilizzata quando si applica la metodologia del controllo attivo. Il braccio del robot industriale è chiamato macro-robot e movimentata il sistema in base alla geometria degli spazi e del pezzo, mentre la regolazione della forza viene eseguita dall'effettore finale, chiamato micro-robot. Così è possibile lavorare a frequenze più elevate e avere più precisione nelle operazioni. Numerosi studi sono stati pubblicati sul controllo attivo della forza utilizzando un sistema robotizzato come quello sopraccitato.

Bone [5] ha proposto un mini-robot, che consiste in servomotori DC con viti lineari. Questo sistema assicura, sia un'elevata precisione, che eccellenti proprietà meccaniche. Lew ha proposto una diversa strategia di controllo del robot, che ha ridotto le vibrazioni meccaniche e migliorato il posizionamento finale del manipolatore. Tol U.A. ha proposto un sistema macro-mini, che integra un meccanismo cinematico parallelo (PKM) e un mini-manipolatore a 2 gradi di libertà in un sistema automatizzato di sbavatura e finitura. Inoltre, Liao [6] ha proposto una testa utensile con tre attuatori pneumatici, che possono avanzare ed arretrare, per rispettare le condizioni di pressione. Utilizzando questo utensile, le forze da applicare per la lucidatura sono pre-pianificate utilizzando la forma geometrica data del pezzo e il rilevamento in tempo reale della pressione viene effettuato utilizzando un controller PID. Arifin [7] ha proposto un quadro di controllo generale utilizzando il controllo analitico della frequenza di movimento (RMRC) per regolare la movimentazione del macro-robot, che ha migliorato il controllo del movimento dei manipolatori. Hong J. [8] ha utilizzato un attuatore ausiliario per costruire un nuovo mini-robot, che riduce l'inerzia

mobile del sistema del robot di lucidatura. Abd El Khalick Mohammad ha presentato un design innovativo per un dispositivo controllato a forza, che ha ridotto le vibrazioni indesiderate per i processi di lucidatura automatizzati limitando gli effetti inerziali. In questo studio, si sottolinea che il sistema macro-mini-robot è quello che assicura la migliore qualità ed efficacia sulle superfici, infatti la maggior parte delle ricerche in questo campo si sono concentrate sulla progettazione di configurazioni ottimali per i mini-robot e sui metodi di controllo in modo tale da migliorare la risposta ad alte frequenze di lavoro. Nella maggior parte dei casi, l'attuatore attivo in un mini-robot utilizza un motore lineare, come mostrato nella rappresentazione.

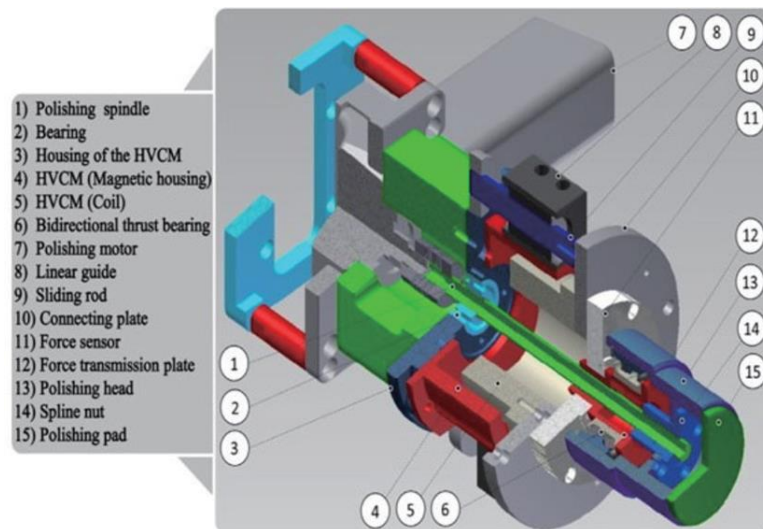


Figura 9: Motore lineare mini-robot.

4.2.1 Esempi di configurazioni di controllo attivo

[5] In figura viene mostrato il setup del dispositivo. L'utensile da taglio è una piastrina rotante in metallo duro azionata dalla smerigliatrice pneumatica. La forza è stata filtrata passa-basso a 10 Hz prima del campionamento a 50 Hz del microcomputer. Il software di controllo è in linguaggio C. Una analisi della combinazione tra robot, dispositivo di estremità e dinamica del processo ha concluso che proprio l'implementazione del dispositivo a controllo attivo ha avuto l'effetto più benefico nel sistema. Oltre a migliorare la qualità della superficie finale, l'intero robot è in grado di lavorare a frequenze più alte e il mini-robot è rigido e smorza meglio le vibrazioni. Sono stati utilizzati controller PID basati sul modello ARMAX.

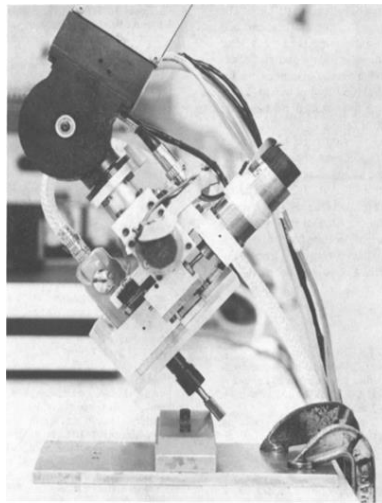


Figura 10: Setup dispositivo

[6] Questo dispositivo è composto da tre cilindri pneumatici distribuiti uniformemente e costretti a muoversi solo nella direzione assiale

dell'utensile. Questo design consente al mandrino pneumatico di muoversi solo al centro della piattaforma mobile del robot. Sono disponibili diversi strumenti di lucidatura/sbavatura con geometrie diverse. Il cambio dell'utensile può essere effettuato aprendo e chiudendo lo scompartimento dell'utensile. Integrando un sensore di pressione e un encoder lineare, questa testa utensile può essere utilizzata per la lucidatura e la sbavatura. Per il controllo della lucidatura, la pressione dell'utensile è pre-pianificata in base alla geometria del pezzo e viene applicato un controller PID per il monitoraggio della pressione tramite il rilevamento della forza. Per il controllo della sbavatura, viene applicato un altro controller PID per regolare la lunghezza dell'utensile attraverso il rilevamento dell'estensione dell'utensile. I due metodi di controllo sono stati testati e implementati su un robot di lucidatura / sbavatura e i risultati dell'esperimento dimostrano l'efficacia dei metodi presentati.

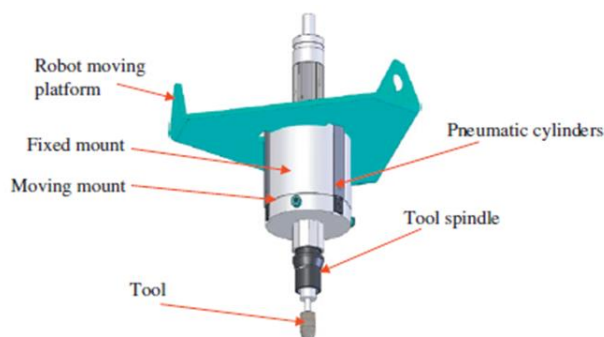


Figura 11: Design innovativo end-effector.

[7] In questo studio viene utilizzato un 7 DOF Mitsubishi P A-IO come robot principale, mentre viene applicata una bobina a 1 DOF come dispositivo di estremità. In figura si può vedere la configurazione descritta.

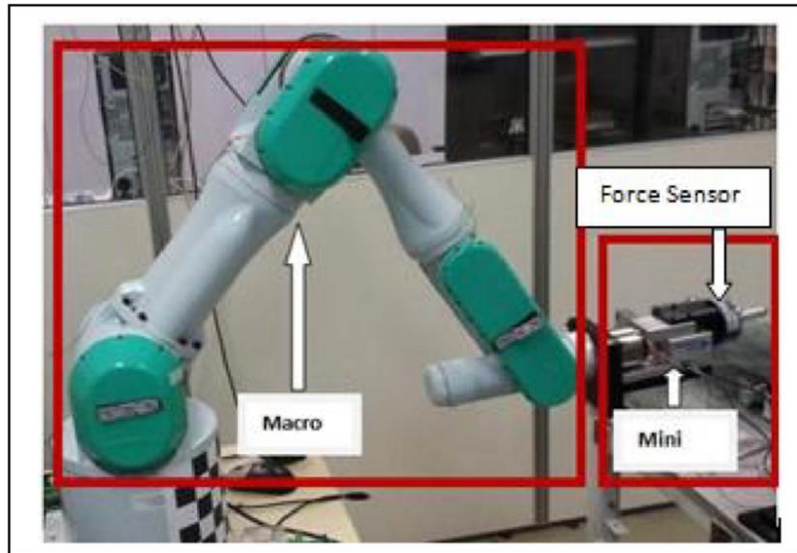


Figura 12: Sistema macro-mini robot.

Il dispositivo di estremità ha due algoritmi di controllo. Il primo algoritmo regola la posizione tramite un controller PID con compensazione della gravità e si utilizza quando le parti non sono in contatto. Il secondo algoritmo è un controllo di forza che utilizza il controllo proporzionale integrale (PI) e viene utilizzato quando le parti sono a contatto.

[8] Il sistema hardware è costituito da un robot industriale ABB IRB2600 a 6 assi e un dispositivo di prossimità (smerigliatrice angolare) dove è montato un motore rotazionale BOSCH GWS8-100CE. L'HVCM lineare (HVCM-095-038-051-01) è prodotto da MOTICONT con una corsa di 12,7

mm e una potenza massima costante di 45 W. Per il tradizionale controllo della forza (ovvero approccio "attraverso il braccio"), il robot è programmato per funzionare in modalità "position/force control". In questa modalità, il motore lineare non funziona e il suo spostamento L è impostata su 0. Il robot ABB è integrato con un sensore di forza / coppia SRI a sei gradi di libertà (3HAC046093-001) con una capacità di 165 N nella direzione di lucidatura dell'utensile e un software per il controllo della pressione.

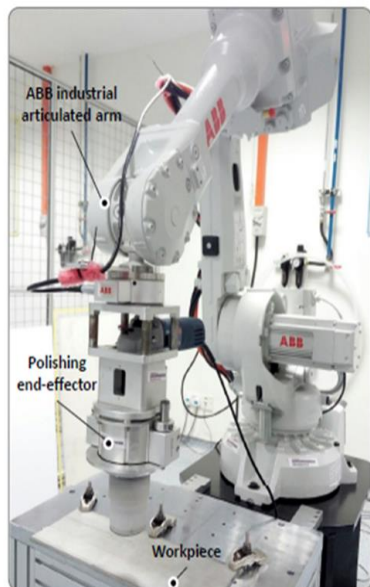


Figura 13: Stazione lavorativa.

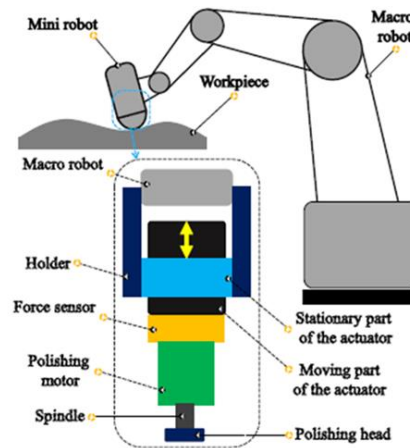


Figura 14: Schematizzazione setup.

Capitolo 5.

Material Removal Rate (MRR)

La misurazione/quantificazione dell'abrasione è data dal “MRR”, vale a dire dallo spessore di materiale rimosso per unità di tempo. Ci sono due diversi approcci per individuare il MRR, i modelli analitici e i modelli sperimentali. I modelli analitici si basano nello studio dell'interazione tra l'utensile e il pezzo a livello microscopico. Questi vengono utilizzati nell'industria elettronica, in particolare per il “wafer polishing”. I modelli proposti forniscono una stima del tasso di rimozione analizzando tutte le caratteristiche del materiale (modulo di Young, durezza, coefficiente di Poisson), forma della superficie (tipo, dimensione, distribuzione di asperità e particelle) e condizioni operative (pressione, velocità relativa, l'effetto di un prodotto chimico o fluido). Invece non esiste un modello comparabile per la realizzazione di parti meccaniche, di conseguenza si applica una metodologia sperimentale. Questi derivano dall'analisi di numerosi processi di lucidatura. Il modello di Preston, sviluppato nell'ambito della lucidatura del vetro, è probabilmente quello che rimane oggi il più utilizzato, dove si indica che il tasso di rimozione del materiale è proporzionale alla pressione media di contatto, P, e la velocità relativa tra utensile e pezzo, V:

$$MRR = \frac{dz}{dt} = k \cdot P \cdot V$$

Numero di assi	6
Capacità di carico massima al polso (kg)	60
Carico aggiuntivo sull'avambraccio (kg)	20
Sbraccio orizzontale massimo (mm)	2258
Coppia sull'asse n. 4 (Nm)	221
Coppia sull'asse n. 5 (Nm)	221
Coppia sull'asse n. 6 (Nm)	118
Corsa sull'asse n. 1	+/- 180° (170°/s)
Corsa sull'asse n. 2	-60° / +125° (150°/s)
Corsa sull'asse n. 3	0° / -165° (165°/s)
Corsa sull'asse n. 4	+/- 2700° (265°/s)
Corsa sull'asse n. 5	+/- 123° (250°/s)
Corsa sull'asse n. 6	+/- 2700° (340°/s)
Ripetibilità (mm)	0.06
Flangia di accoppiamento all'attrezzo	ISO 9409 - 1 - A100
Peso del robot (kg)	645
Grado di protezione	IP65 / IP67
Posizione di fissaggio	Floor / Ceiling / Sloping (max 45°)
Aree operative: A (mm)	2408
Aree operative: B (mm)	2258
Aree operative: C (mm)	1918
Aree operative: D (mm)	686
Aree operative: E (mm)	941

Questi sono i tipi di lavorazioni che è possibile effettuare con il robot, tra cui anche “lucidatura e spazzolatura”:

- Saldatura ad arco
- Lucidatura e spazzolatura
- Press Brake-bending
- Presse
- Processi di lavorazione
- Lavorazione di legno/vetro
- Assemblaggio
- Sigillatura cosmetica
- Erogazione
- Imballaggio/confezionamento
- Saldatura e taglio laser
- Asservimento macchine

- Misurazione/collaudo
- Taglio al plasma/water jet

Infine, vorrei ricordare che i pezzi che vengono rifiniti con questa tecnologia, possono essere prodotti con le due stampanti presenti nell'ateneo:

- Print Sharp 250 (Powder Bed Fusion)
- Laserdyne 430 (Laser Metal Deposition)

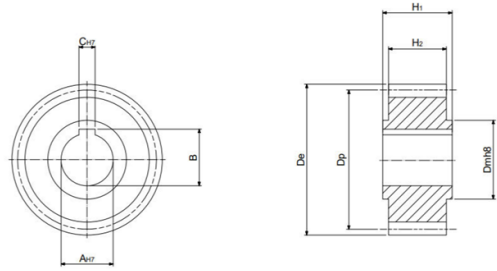
6.1. Lavorazione Ingranaggio Diretta



Figura 1: Ingranaggi stampati 3D

Quello in figura è un esempio di come può essere stampato un ingranaggio a denti elicoidali indifferentemente con la tecnologia “Powder Bed Fusion” (Print Sharp 250) o con la tecnologia “Laser Metal Deposition” (Laserdyne 430).

Il pezzo che si vuole replicare nel particolare è un ingranaggio elicoidale ad alte prestazioni, alleggerito nella struttura, 25 denti, dal valore di circa 200 €.



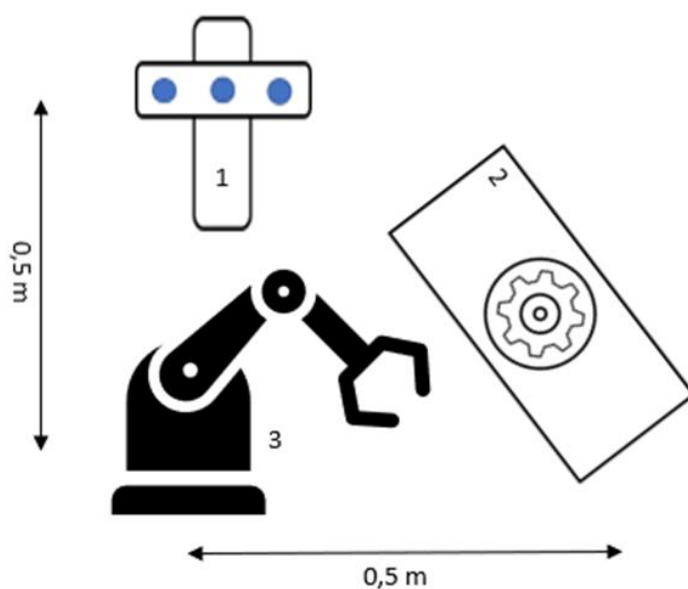
M	Z	De	Dp	CH7	B	AH7
4	25	114,10	106,10	10	38,3	35

Il valore della rugosità iniziale con entrambe le stampanti è intorno ai 40 μm . L'obiettivo è arrivare ad una rugosità minore di 5 μm sui denti.

Lo stampaggio di simili ingranaggi è consigliato quando si vogliono produrre pezzi di qualità eccellente, elevata finitura superficiale e minimo rapporto peso/volume a patto che la rigidità rimanga simile (se non migliore) a quella che si avrebbe dopo una tradizionale lavorazione sottrattiva.

Questi tipi di lavorazioni sono indicati anche per quei pezzi difficilmente trovabili sul mercato. Infatti è molto semplice disegnare su programmi CAD modelli del genere, caricando nel programma le dimensioni volute. Così si evitano lunghissime ricerche che spesso e volentieri non soddisfano appieno i propri bisogni.

Stazione di lavoro

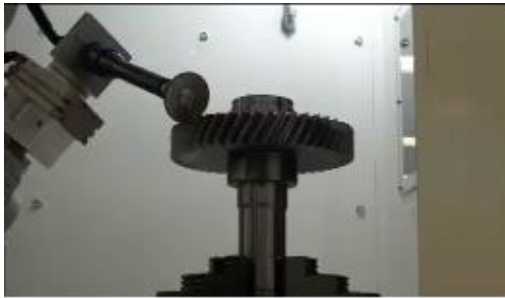


1. Tool holder ATI (3 punte)



ATI Tool Stand Small, o TSS, è compatibile con una vasta gamma di utensili. La struttura è progettata per avere la massima flessibilità per adattarsi alla maggior parte delle applicazioni dei clienti. Il sistema modulare consente essenzialmente di "costruire il proprio" sistema di stoccaggio degli utensili in base al numero di questi ultimi, al posizionamento e alle disposizioni di montaggio desiderate.

2. Piano di lavorazione con piattaforma rotante.



Questo piano di lavoro è in grado di dare la velocità angolare desiderata al pezzo in fase di lavorazione, il quale viene fissato opportunamente da un addetto ai lavori tramite un accoppiamento forzato foro/albero.

3. Robot Comau.



Procedura di lavorazione

1. Fissaggio del pezzo nella piattaforma da parte dell'operatore accoppiando il foro con l'asse rotante. Questo accoppiamento conferirà un moto rotatorio al semilavorato. [30 s]
2. Montaggio "end-effector" n.1. [3 s] Il disco in figura entra a contatto con la parte superiore [20 s] e inferiore [20 s] dei denti per smussarli e levigarli (fig. 1). Mentre l'ingranaggio ruota intorno all'asse in cui è fissato il braccio robotico segue le traiettorie dei denti rifinandone le estremità. Il robot, dunque, varia la propria angolazione tra la lavorazione della parte superiore dei denti e di quella inferiore. [5 s]
3. Montaggio punta n.2. [3 s] Sgrossatura degli strati visibili di fusione creatisi durante la stampa 3D sui fianchi dei denti (fig. 2). Il braccio robotico effettua la lavorazione su 5 denti, poi si ferma, aspetta che la piattaforma ruoti e rieffettua la lavorazione. Così, fin quando non viene effettuato il giro completo dei denti dell'ingranaggio (25 denti). $[(16\text{ s} + 6\text{ s}) * 4 = 128\text{ s}]$
4. Utilizzando la stessa punta, il braccio robotico realizza la sbavatura delle estremità dei denti. Il moto è lungo la testa del dente (fig. 3). In questa fase la piattaforma è ferma e il robot viene movimentato al fine di lavorare ogni dente. [45 s]
5. Montaggio punta n.3. [3 s] Passata abrasiva finale per rifinire la superficie piana superiore. In questo caso l'end effector deve essere inclinato di $10/15^\circ$ rispetto alla normale alla superficie per far sì che il foglio abrasivo non si distacchi. Se si vuole rifinire anche la superficie inferiore si deve girare il pezzo (questa lavorazione è superflua dal punto di vista

meccanico ma può essere significativo da un punto di vista estetico). La piattaforma viene fatta ruotare e l'utensile lavora la superficie dall'interno verso l'esterno (fig.4). [5 s]

6. Lavorazione analoga al punto 4, ma utilizzando la punta 3. [45 s]

7. Recupero del pezzo finito dalla piattaforma rotante da parte dell'operatore. [10 s]

Durata del ciclo: 317 s

Il range di pressione applicato sul pezzo in questione varia da 10 N a 40 N. Durante le prime fasi di rimozione del materiale la forza applicata è minima (10/15 N), mentre nelle fasi finali di rifinitura viene applicata una pressione più alta (35/40 N). Se si esagerasse nell'applicazione di pressione con gli strumenti utilizzati nelle prime fasi, si rischierebbe di rimuovere una quantità di materiale eccessivo, che comporterebbe lo scarto del pezzo.

Punte utilizzate:



N°1



N°2



N°3

Rappresentazione verso lavorazioni:



Figura 1



Figura 2



Figura 3

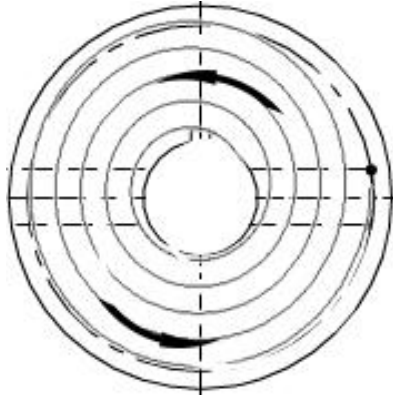
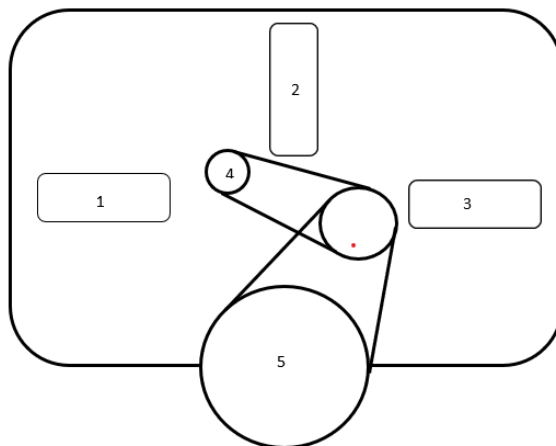


Figura 4

6.2. Lavorazione Ingranaggio Inversa

Infine, ho provato ad immaginare una configurazione lavorativa che funzioni in modo opposto. In particolare, in questo secondo esempio, l'ingranaggio è fissato al braccio robotico e viene movimentato di volta in volta su una delle tre postazioni di lavoro installate intorno al robot. Ovviamente ogni postazione è equipaggiata con un utensile diverso.

Stazione di lavoro



1. Postazione lavorativa con punta metallica.



2. Postazione lavorativa con punta abrasiva.



3. Postazione lavorativa con ruota lucidante.



4. Gripper magnetico Schunk



5. Robot Comau NJ-60-2.2

Procedura di lavorazione

1. Fissaggio dell'ingranaggio semilavorato al gripper magnetico. Manovrazione del pezzo sulla stazione n.1 in modo tale che vengano lavorati i fianchi dei denti. In particolare, il braccio robotico avanza per far sì che venga lavorato un fianco del dente, ruota di pochi gradi e mentre retrocede viene lavorato il fianco adiacente. Il processo continua fin quando non viene compiuto un giro completo. Mentre i fianchi dei denti vengono lavorati il braccio robotico segue la traiettoria elicoidale dell'ingranaggio.
2. Successivamente vengono lavorate le teste dei denti. L'ingranaggio, dunque, avanza, subisce la lavorazione di sbavatura lungo la testa, ruota per poi tornare indietro nella posizione di partenza e subire la lavorazione nel dente successivo.
3. In seguito il robot cambia posizione andando nella stazione n.2 e viene effettuata la lavorazione n.1 con punta abrasiva. Così si abbassa ulteriormente il valore della rugosità sui fianchi.
4. Nella stessa stazione viene rifinita anche la superficie superiore piana dell'ingranaggio.
5. Infine il robot si sposta nella stazione n.3. Vengono lucidati prima i denti e poi le superfici piane.

Il range di pressioni è uguale a quello visto in precedenza nella lavorazione diretta dell'ingranaggio (10/40 N). In questo tipo di applicazioni si consiglia

il montaggio di uno strumento a controllo passivo della forza. Questo perché è più difficile mantenere la pressione di contatto costante rispetto alla lavorazione diretta e, di conseguenza, si deve intervenire con questi strumenti per evitare di incorrere in difetti dimensionali e/o rugosità e tolleranze non rispettati.

6.3. Comparazione

Dopo aver visto le principali caratteristiche di entrambi i processi, è arrivato il momento di farne un confronto ed esplicitarne i vantaggi e gli svantaggi di una o l'altra lavorazione. È anche importante sottolineare che lo studio di queste configurazioni è in una fase embrionale, dove non si tiene conto di molti aspetti e viene meno anche quello economico. Infatti l'obiettivo è arrivare a livelli di qualità altissima, in modo tale da avere prestazioni massime.

Entrando nel particolare, la prima tipologia di processo è la migliore sotto quasi ogni punto di vista. Grazie alla manovrazione diretta degli utensili nello spazio di lavoro è possibile raggiungere spazi più angusti, difficilmente lavorabili con configurazione inversa. La qualità raggiunta è più elevata grazie alle prestazioni migliori della sensoristica, infatti è più facile mantenere la pressione costante. A livello di complessità, le configurazioni sono più o meno simili, mentre dal punto di vista economico è più conveniente la seconda tipologia. Questo perché le lavorazioni sono più semplici e veloci, quindi nello stesso ciclo è possibile lavorare più pezzi, seppur con qualità inferiore.

C'è da tener conto però che il pezzo da noi scelto si presta molto di più a ricevere una lavorazione diretta grazie alle geometrie complesse e intricate dei denti, i livelli di finitura elevati e la propria compattezza. Se invece avessimo avuto dei modelli allungati e con geometrie più semplici (maniglie, eliche, ecc.), la lavorazione inversa sarebbe stata di gran lunga più conveniente, poiché la qualità raggiunta sarebbe stata simile, ma il processo sarebbe stato molto più veloce e semplice per via della presenza di postazioni a nastro o cinghie.

Capitolo 7.

Riflessioni conclusive

L'obiettivo della tesi è quello di approfondire e categorizzare le conoscenze in merito a tali tecnologie. In particolare, un percorso esplorativo nell'ambito di queste tecniche innovative, mi ha permesso di scendere sempre di più nel concreto, arrivando alla simulazione di due possibili configurazioni robotiche. Infatti, i primi capitoli mettono in luce i vantaggi e le diverse caratteristiche della produzione additiva; nei capitoli seguenti invece, si scende nel concreto delle lavorazioni di finitura post stampa 3D. Tra i tre tipi elencati l'attenzione è posta nelle lavorazioni di finitura

superficiale. Questo perché grazie all'implementazione di bracci robotici è possibile raggiungere livelli di qualità e ripetibilità mai visti in precedenza; in rete è relativamente semplice trovare ricerche condotte da studiosi di tutto il mondo che, tramite l'utilizzo di diverse combinazioni di robot, tecniche ed utensili, vanno ad approfondire ed arricchire lo stato dell'arte di questa tecnologia, ancora in fase di sviluppo. La fase di ricerca è stata fondamentale per organizzare le idee e provare, come già detto in precedenza, a simulare due stazioni lavorative.

Lo studio affrontato durante questa tesi è rivolto a chiunque voglia ampliare la propria panoramica sulle nuove tecnologie sviluppate nell'arco di questi anni nell'ambito dell'elaborazione robotica post produzione additiva. Infatti, essendo una tecnica ancora in fase di sviluppo, è difficile trovare in rete studi dettagliati che ne raggruppino e ne categorizzino le caratteristiche, quindi è possibile fare riferimento allo scritto ivi presente e prenderne informazioni laddove si presenti la necessità. In più ogni sezione presenta vantaggi e svantaggi del determinato argomento e, grazie a ciò, il lettore è guidato nella scelta in base alle proprie esigenze.

Riferimenti

- [1] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff & S. S. Babu (2016): The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International Materials Reviews*
- [2] Kumbhar, N.N., Mulay, A.V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. *J. Inst. Eng. India Ser. C* **99**, 481–487 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0340-z>
- [3] B. Duleba, F. Greskovic, J.W. Sikora, Materials and finishing method of DMLS manufactured parts. <http://www.sif.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/143-148.pdf>
- [4] Li, Jian, Zhang, Tao, Liu, Xineng, Guan, Yisheng, Wang, Danwei, 2018/12/01. A Survey of Robotic Polishing 10.1109/ROBIO.2018.8664890
- [5] T. Furukawa, D. C. Rye, M. W. M. G. Dissanayake, and A. J. Barratt, “Automated polishing of an unknown three-dimensional surface,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 12, no. 3, pp. 261–270, 1996.
- [6] H. Huang, Z. M. Gong, X. Q. Chen, and L. Zhou, “Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul,” *Journal of Materials Processing Tech*, vol. 127, no. 2, pp. 140–145, 2002.
- [7] M. J. Tsai and J. F. Huang, “Efficient automatic polishing process with a new compliant abrasive tool,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, no. 9-10, pp. 817–827, 2006.
- [8] D. Han, X. Duan, M. Li, T. Cui, A. Ma, X. Ma, D. Han, X. Duan, M. Li, and T. Cui, “Interaction control for manipulator with compliant end-effector based on hybrid position-force control,” in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 863–868, 2017.

- [9] G. M. Bone and M. A. Elbestawi, "Active end effector control of a low precision robot in deburring," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 8, no. 2, pp. 87–96, 1991.
- [10] L. Liao, F. Xi, and K. Liu, "Modeling and control of automated polishing/deburring process using a dual-purpose compliant toolhead," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, no. 12, pp. 1454–1463, 2008.
- [11] A. S. Arifin, M. H. Ang, C. Y. Lai, and C. W. Lim, "General framework of the force and compliant motion control for macro mini manipulator," in *Ieee/asme International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 949–954, 2013.
- [12] J. Hong, A. E. K. Mohammad, and D. Wang, "Improved design of the end-effector for macro-mini robotic polishing systems," in *International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*, pp. 36–41, 2017.
- [13] Anthony Guiot, Stéphane Pattofatto, Christophe Tournier, Luc Mathieu. Modeling of a Polishing Tool to Simulate Material Removal. 13th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, May 2011, Sintra, Portugal. pp.754-763, 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.754. hal-01223976
- [14] Anthony Guiot, Christophe Tournier, Luc Mathieu. Simulation of the material removal rate and tool wear to improve 5-axis automatic polishing operations. IDMME – Virtual Concept 2010 ,Oct2010, Bordeaux,France. hal-01097684