

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea di II livello

# **BURATTATURA DI COMPONENTI PRODOTTI MEDIANTE FABBRICAZIONE ADDITIVA**

Relatore:  
Prof.ssa Flaviana Calignano

Co-relatore:  
Ing. Vincenza Mercurio

Candidato:  
Davide Di Pillo

Anno Accademico 2023-2024

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| INDICE .....   | 1  |
| CAPITOLO 1. ADDITIVE MANUFACTURING .....                   | 2  |
| 1.1 Introduzione .....                                     | 2  |
| 1.2 Principali applicazioni.....                           | 14 |
| CAPITOLO 2. LA RUGOSITÀ.....                               | 18 |
| 2.1 Introduzione .....                                     | 18 |
| 2.2 Processi di finitura.....                              | 22 |
| 2.2.1 Burattatura o vibrofinitura .....                    | 24 |
| 2.2.2 Elettrolucidatura .....                              | 26 |
| 2.2.3 Metodi abrasivi .....                                | 28 |
| 2.2.4 Lucidatura laser.....                                | 30 |
| 2.2.5 Altri metodi .....                                   | 32 |
| CAPITOLO 3. BURATTATURA .....                              | 36 |
| 3.1 Introduzione .....                                     | 36 |
| 3.2 Principali parametri.....                              | 43 |
| 3.3 Possibili abrasivi .....                               | 46 |
| 3.4 Possibili materiali lavorati .....                     | 52 |
| 3.5 Miglioramenti delle proprietà con la burattatura ..... | 53 |
| CAPITOLO 4. ANALISI SPERIMENTALE .....                     | 56 |
| 4.1 Analisi della letteratura .....                        | 56 |
| 4.2 Raccolta dei dati.....                                 | 57 |
| 4.3 Discussione e analisi dei risultati .....              | 60 |
| BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....                             | 67 |

# CAPITOLO 1. ADDITIVE MANUFACTURING

## 1.1 Introduzione

L'Additive Manufacturing AM (detta anche manifattura additiva o stampa in 3D) è una modalità produttiva che, utilizzando diverse tecnologie, permette di realizzare oggetti per addizione, ossia aggiungendo strato su strato, molti livelli di materiale. Si tratta di una tecnica che contrasta con quanto accade in molte tecnologie della produzione tradizionale in cui si procede per sottrazione dal pieno, ad esempio nella tornitura e nella fresatura il pezzo viene ricavato attraverso l'asportazione di materiale o trucioli dal blocco iniziale (Figura 1).

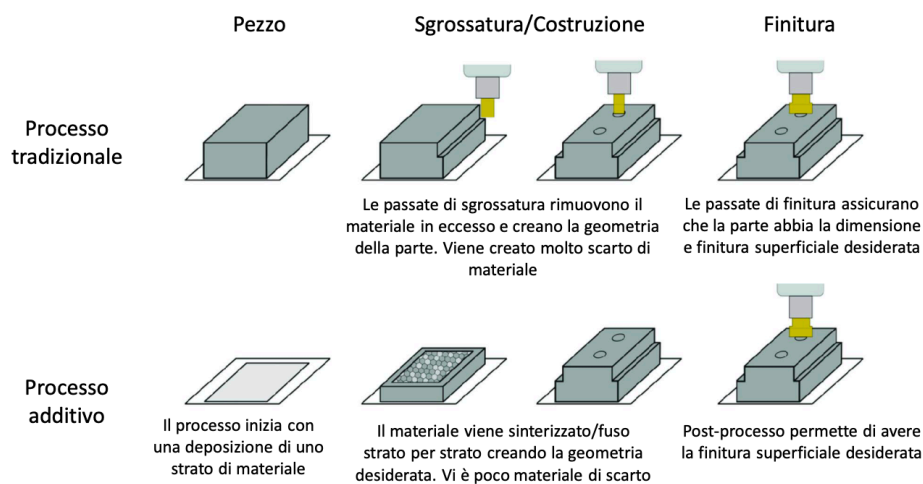


Figura 1. Confronto processo tradizionale e processo additivo [9].

Il Comitato ASTM-F42 [28] (American Society for Testing and Materials) ha definito la AM come un processo di unione dei materiali per creare oggetti dai dati del modello 3D, di solito strato su strato, opposto alle tecnologie manifatturiere convenzionali<sup>1</sup>. Viene anche detta Stampa 3D, perché produce oggetti a partire da un file di progettazione digitale CAD (Computer-Aided Design), che viene “stampato” in tre dimensioni [29].

Le prime tecnologie di stampa 3D sono comparse alla fine degli anni '80, e venivano inizialmente chiamate tecnologie di Prototipazione rapida (RP) in quanto perfetto per la creazione di prototipi essendo un metodo veloce, efficace ed economico. Il primo brevetto per la tecnologia di stampa 3D è stato depositato nel 1986 da Charles Hull, che inventò la macchina per la stereolitografia (SLA) nel 1983 e che diventò co-fondatore della 3D Systems Corporation, una delle organizzazioni più grandi e produttive che oggi operano nel settore

<sup>1</sup> “A process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies”.

della stampa 3D. Furono poi studiati processi alternativi alla SLA: nel 1987 Carl Deckard depositò un brevetto negli Stati Uniti per il processo di Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS), nel 1989 Scott Crump depositò un brevetto per il processo di modellazione a deposizione fusa (FDM) e lo stesso anno si è formata la EOS Systems, nota per il processo di sinterizzazione laser diretta di metalli (DMLS). Tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90 si sono sviluppate altre tecnologie minori di AM come la produzione di oggetti laminati (LOM), la Powder Bed and Inkjet Head 3D Printing (PBIH), il Polyjet e la Digital Light Processing (DLP). Nel 1995 i ricercatori del Fraunhofer Institute di Aquisgrana, in Germania, hanno poi brevettato la Selective Laser Melting Technology<sup>2</sup>.

Nel 2004 la AM ha iniziato a diventare accessibile a tutti, grazie al progetto RepRap di Adrian Bowyer<sup>3</sup>, e solo negli ultimi anni il costo delle macchine è sceso abbastanza da allargare alla massa la possibilità di potervi accedere. Inoltre grazie all'evoluzione delle macchine è ora possibile produrre oggetti più grandi in tempi minori e con una maggiore gamma di materiali/filamenti (plastica, metallo, ceramica, cera, gesso, materiali compositi, elastomeri, fotopolimeri). I vantaggi dell'utilizzo dell'AM nei metalli rispetto ai metodi di produzione tradizionali hanno portato ad un grande aumento del suo utilizzo, con una crescita negli ultimi anni di circa il 14% all'anno [30], insieme a un contemporaneo aumento del numero di studi sugli acciai prodotti in modo additivo.

L'AM è ormai considerata una tecnologia innovativa che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'uso di utensili, di oggetti di geometria complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD 3D. Le caratteristiche dell'AM che la hanno resa così importante nel mondo della produzione sono proprio la possibilità di produrre oggetti con geometrie complesse non altrimenti realizzabili in un pezzo unico con le tecnologie tradizionali e l'impatto quasi nullo dei costi per la realizzazione di varianti rispetto ad un modello base.

I vantaggi dell'AM sono legati sia al processo che al prodotto:

- processo: una sola macchina, forme realizzabili illimitate, assenza di attrezzature e di dispositivi di bloccaggio, possibilità di avere sottosquadri, produzione in un solo step, intervento dell'operatore minimo, tempi e costi legati alle dimensioni e non alla complessità geometrica, velocizzazione del processo (consente l'avanzamento non presidiato della produzione);

---

<sup>2</sup> Tecnologia che usa titanio, acciaio inossidabile e alluminio, ed è una delle tecnologie maggiormente impiegate nell'industria aerospaziale e in quella medica.

<sup>3</sup> Iniziativa che promuove lo sviluppo di una stampante 3D di piccole dimensioni.

- prodotto: libertà di progettazione, possibilità di creare strutture leggere (forme cave complesse) e di integrare altre parti, design ergonomico, personalizzazione.

Sono numerose anche le implicazioni economiche della stampa 3D, come la possibilità di produrre in base alla domanda, che consente di avere meno scorte di magazzino con conseguenti riduzioni di flussi di materie, di costi di mantenimento, di sovrapproduzione e di trasporto. Sono minimizzati l'impiego

di materia prima, gli sfridi e gli scarti di produzione [30], si possono utilizzare materiali più economici, e anche le lavorazioni con macchine utensili sono ridotte al minimo grazie a una riduzione del numero di componenti. La AM

consente inoltre il cosiddetto "Think additive", ossia vantaggi economici dovute alla possibilità di riprogettare senza compromettere le caratteristiche tecnologiche dell'oggetto prodotto (Figura 2). Vi sono anche maggiori opportunità nella Mass customization e nel Re-shoring<sup>4</sup>. La AM comporta però anche degli svantaggi, anch'essi legati al processo e al prodotto:

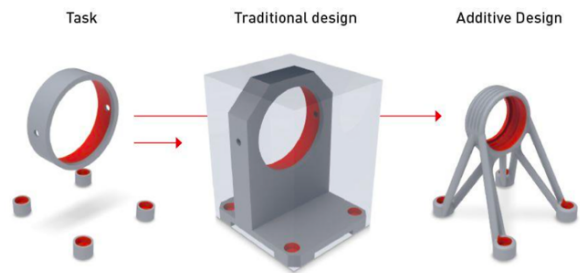


Figura 2. Esempio di vantaggi dovuti al Think Additive [9].

- processo: volumi di lavoro limitati, dimensioni dei pezzi limitate dalle dimensioni della macchina, velocità di costruzione limitate e limite di materiali per ogni macchina;
- prodotto: necessità di strutture di supporto, finitura superficiale scarsa, numero limitato di materiali commerciali e costo dei materiali.

La stampa può avvenire secondo diverse tecnologie additive, tutte con lo stesso iter di produzione (Figura 3).

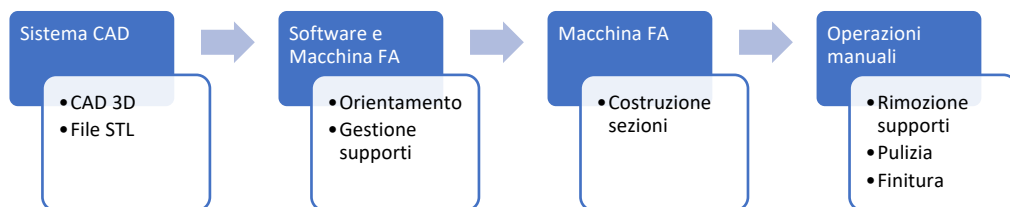


Figura 3. Flusso di lavoro della AM.

<sup>4</sup> Il reshoring è l'opposto dell'offshoring ed è un fenomeno economico che consiste nel rientro a casa delle aziende che in precedenza avevano delocalizzato in Paesi asiatici come Cina o Vietnam o in Paesi dell'Est Europa come Romania o Serbia.

Per realizzare un componente con la AM occorre anzitutto realizzare un disegno CAD 3D, che lavorando su volumi ricava il disegno componendo e intersecando diversi blocchi. Il file CAD di progettazione, viene poi inserito e/o inviato alla stampante 3D: il software all'interno della stampante decodifica il disegno e lo divide in livelli, quindi crea il percorso che la macchina dovrà seguire durante la realizzazione.

Lo standard universale nella AM per i modelli matematici è il formato STL (Standard Triangulation Language o Standard Tessellation Language): converte il modello CAD di tipo solido (3D) in un modello tipo "Shell" in cui la superficie esterna è approssimata attraverso triangoli di diverse dimensioni (a seconda della risoluzione richiesta) in modo da seguire il profilo del modello<sup>5</sup>. Ogni file STL è costituito da una serie di triangoli collegati che descrivono la geometria della superficie di un oggetto o di un modello 3D (più il design è complesso, più triangoli vengono utilizzati e più alta è la risoluzione). Gli STL non contengono colori e texture, quindi tendono ad essere file di basse dimensioni e a garantire tempi di elaborazione più veloci rispetto ad altri tipi di file: per questo, il formato STL è una scelta intelligente per stampare oggetti di un unico colore e materiale, ad esempio per la creazione di prototipi [25].

Talvolta è necessario prevedere il posizionamento di supporti per ancorare il modello in costruzione all'area di lavoro, permettendone comunque la successiva rimozione, proteggere le pareti laterali da azioni che ne possano compromettere la costruzione o supportare le parti sporgenti. Esempi di applicazione di supporti sono tasselli per la parte superiore di una parte a forma di "T" o supporti per parti rialzate o supporto di pareti superiori ad arco o piane (Figura 4).

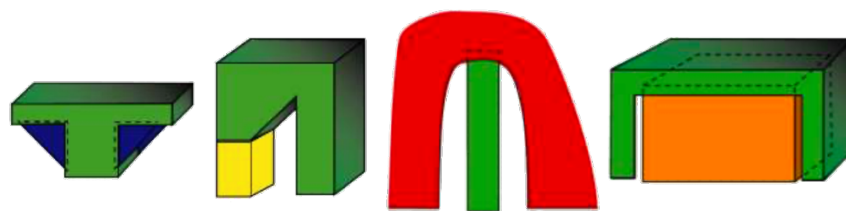


Figura 4. Esempi di supporti utilizzati nella AM [5].

Questi supporti vengono generalmente calcolati e aggiunti al pezzo dal software del sistema e possono essere formati dallo stesso materiale della parte o da un materiale diverso. Le

---

<sup>5</sup> A differenza di altri formati CAD, l'oggetto risulta essere formato solo dalla superficie esterna o "pelle".

strutture di supporto vengono rimosse meccanicamente al termine del processo o dissolte in operazioni secondarie prima che la parte possa essere utilizzata.

Dopo aver creato il file STL e generato i supporti, si ha la fase di Slicing<sup>6</sup> in cui il modello tridimensionale viene tradotto in una serie di “fette” piane orizzontali (in inglese “layer”, strato) che saranno poi realizzate una sopra l'altra, per deposizione di materiale fuso [8]. Il fatto che il prodotto finito sia realizzato strato dopo strato depositando il materiale, crea un effetto “a scalini” sulle superfici inclinate con una elevata influenza sulla rugosità superficiale a livello macro o micro, e rendendo pertanto necessario un processo di finitura superficiale là dove sia richiesta una bassa rugosità: lo spessore del layer, fissato dall'utente, influenza fortemente la qualità della stampa, la resistenza meccanica dell'oggetto e i tempi di stampa [7]. Alcuni software offrono la possibilità di variare l'altezza del layer alla base e alla sommità dell'oggetto, in base alle caratteristiche tecniche dell'oggetto da stampare: in caso di superfici oblique un'altezza costante porta peggiori risultati in termini di rugosità rispetto al sistema adattativo (Figura 5) [6].

E' anche molto importante scegliere con attenzione l'orientamento del pezzo in progetto: un orientamento errato potrebbe comportare eccessivi problemi di slicing o necessità di supporti evitabili (Figura 6).

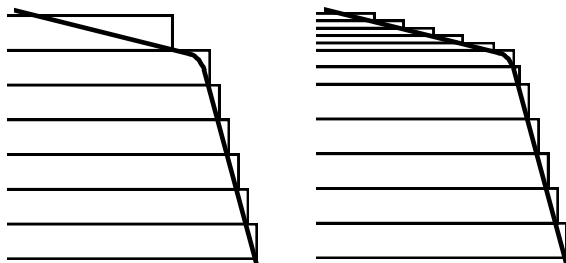


Figura 5. Miglioramento della superficie prodotta ottenibile passando da spessore costante (figura di sinistra) a spessore adattativo (figura di destra) [8].

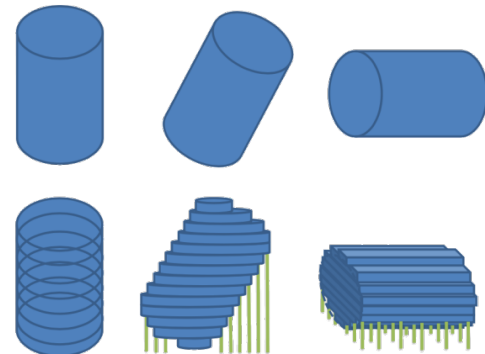


Figura 6. Dipendenza dall'orientamento dell'effetto di stair-stepping e della necessità di supporti [8].

La AM viene applicata attraverso numerose tecniche e con materiali polimerici o metallici. Secondo gli standard ISO/ASTM, L'AM suddivide le tecniche utilizzate per creare i layer in sette categorie, di cui le prime quattro sono adatte anche per i metalli [21]:

- 1) Powder Bed Fusion PBF (fusione a letto di polvere): utilizza quattro diverse fonti di energia (laser, fascio di elettroni, agente ed energia, termica) per fondere le particelle.

<sup>6</sup> Dall'inglese “affettare”.

- 2) Binder Jetting (getto di legante): non utilizza calore durante il processo di fusione dei materiali in quanto viene depositato selettivamente un legante che unisce il materiale in polvere per formare la parte 3D;
- 3) Directed Energy Deposition DED (deposizione di energia diretta): crea oggetti 3D fondendo e depositando materiali a base di polvere o fili da una fonte di energia termica focalizzata, tra cui laser, fascio di elettroni o arco al plasma. Viene spesso utilizzato per riparare o ricondizionare parti esistenti aggiungendo materiale dove necessario.
- 4) Sheet Lamination (laminazione fogli): costruisce oggetti 3D impilando e laminando sottili fogli di materiale mediante incollaggio, saldatura a ultrasuoni o brasatura.
- 5) Material Extrusion (estrusione di materiale): utilizza un filamento continuo che viene fatto passare attraverso un ugello di estrusione.
- 6) Material Jetting (getto di materiale): goccioline di materiali simili alla cera vengono depositate selettivamente su una piattaforma di costruzione.
- 7) Vat Photo Polymerization (polimerizzazione in vasca): polimerizzazione di una resina liquida fotopolimerica in una vasca strato dopo strato, trasformandola in parti di plastica dura utilizzando un laser ultravioletto (UV). I tre tipi più comuni di questa tecnologia includono la stereolitografia, l'elaborazione digitale della luce (DLP) e l'elaborazione continua della luce digitale (CDLP).

Di particolare interesse per questo lavoro, e quindi qui di seguito approfondite, sono le tecnologie che utilizzano **materiali metallici** che possono trovarsi nella forma di polvere, filo o lamina. Tra i metodi che utilizzano come materiale iniziale le polveri metalliche, è possibile distinguere tra processi “a letto di polveri” (Powder Bed Fusion), nei quali la polvere viene prima stesa in uno strato sottile e poi investita opportunamente da un fascio energetico (un fascio di elettroni o una radiazione laser), e processi “a polvere iniettata” (powder injected), nei quali la polvere viene inviata sul substrato tramite un ugello e contemporaneamente il fascio energetico agisce sulle particelle di polvere causandone la sinterizzazione o la fusione [14]. Tra queste tecnologie, quelle a Laser sono particolarmente importanti ai fini di questo lavoro, in quanto i provini utilizzati nella prova sperimentale (vedi Capitolo 4) sono stati creati con una tecnologia a Laser. Si possono avere polveri di un singolo componente, e dunque con un unico punto di fusione, polveri prelegate di una lega metallica o una miscela di polveri con punti di fusione differenti. Queste polveri sono sinterizzate o portate a parziale o totale fusione per mezzo di un fascio energetico



concentrato costituito da un fascio elettronico (PBF-EB) o un fascio Laser (ad esempio PBF-LB/M) [7]. Il fascio elettronico risulta più efficiente dal punto di vista energetico rispetto al laser, ma richiede un ambiente di lavoro sottovuoto. D'altro canto il laser è più preciso, grazie alla focalizzazione di una grande quantità di energia in una zona più ristretta. Metalli tipicamente utilizzati nelle lavorazioni in letto di polvere con sorgente laser sono: Lega di alluminio AlSi10Mg, Cobalto Cromo biomedicale, Cobalto Cromo motorsport e aerospazio, Acciaio per stampi, Acciaio inox, Lega di titanio Ti6Al4V, Inconel IN625, Inconel 718 e Leghe Au. Si utilizzano solitamente polveri con granulometria costante (ad esempio 15 - 45  $\mu\text{m}$  o 20 – 63  $\mu\text{m}$ ).

I materiali metallici prodotti con le tecnologie additive sono indicati nella norma ASTM F3122–14 “Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes”<sup>7</sup>. Inoltre, vista l'importanza delle caratteristiche della polvere sulle proprietà dei componenti finali è stata pubblicata una norma dedicata alla caratterizzazione delle polveri: l'ASTM F3049–14 “Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes”. La granulometria deve opportunamente scelta in base alla tecnologia usata, alla composizione chimica del metallo e al contenuto di gas, poiché questi possono essere responsabili di difetti all'interno della struttura [31]. Altre cause di difetti nella struttura possono derivare dal ciclo termico e dalle condizioni ambientali durante la lavorazione. Alcuni trattamenti post-produzione, come la pressatura isostatica a caldo (HIP), possono ridurre al minimo alcuni tipi di difetti, come la porosità. Altri trattamenti includono soluzioni ibride tra trattamenti in situ e post-produzione, come l'induzione di sollecitazioni residue di compressione nel materiale per ridurre l'influenza della topografia superficiale, dei difetti e delle sollecitazioni residue [11]. Un'analisi della microstruttura e delle proprietà meccaniche di pezzi prodotto con AM permette di individuare una microstruttura colonnare risultante da fenomeni di solidificazione per fusione strato per strato in quanto la solidificazione è direzionale (il che implica un fronte continuo di fusione/solidificazione) [33].

Nell'ambito del “letto di polveri” **PBF** per metalli le tecnologie principali sono:

---

<sup>7</sup> Solo nel caso delle tecnologie additive a letto di polvere di specifiche leghe di nichel e di titanio, sono al momento disponibili gli standard: ASTM F2924–14 “Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium- 6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion”, ASTM F3001–14 “Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion”, ASTM F3055–14a “Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion” ed ASTM F3056–14e1 “Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion”

- Powder Bed Fusion of Metal with Laser Beam **PBF-LB/M**, più comunemente conosciuto come L-PBF, quando le particelle di polvere vengono fuse grazie ad un fascio laser, le une accanto alle altre fino a creare un volume denso;
- Electron Beam Powder Bed Fusion **PBF-EB** o E-PBF, più comunemente conosciuto come Electron Beam Melting (EBM), quando le particelle di polvere vengono fuse, da un fascio di elettroni, le une accanto alle altre per creare un compatto denso.

Nella tecnologia **Powder Bed Fusion of Metal with Laser Beam PBF-LB/M**, il laser viene guidato nelle direzioni x e y (parallele al piano del letto di polveri) dal computer seguendo il modello CAD fornito, poi un pistone di acciaio, sul quale è attaccato il substrato sul quale lo strato di polvere viene steso, si abbassa di una lunghezza pari allo spessore di uno strato in direzione z per poi depositare un nuovo strato (Figura 7).

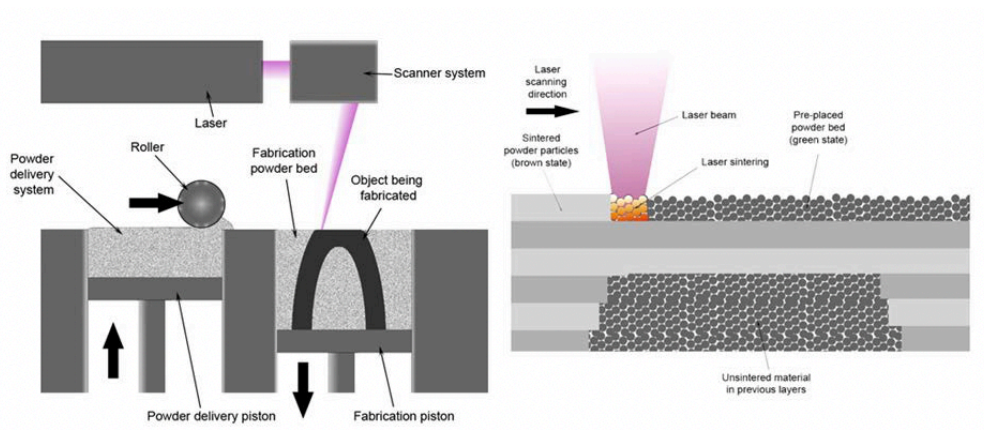


Figura 7. Schematizzazione del processo PBF-LB/M [14].

I pezzi stampati con la tecnologia PBF-LB/M, hanno proprietà meccaniche simili a quelli dei prodotti stampati a iniezione ma con dei particolari vantaggi, quali accuratezza, geometrie complesse, precisione dimensionale, velocità, alta produttività, leggerezza, basso costo per pezzo, sostituzione di molteplici applicazioni in metallo, robustezza. Molto importante è anche il fatto che possa sostituire prodotti in metallo molto più pesanti. I materiali utilizzati sono adatti a molte operazioni di post lavorazione, tra cui burattatura a vibrazione, galvanica, rivestimento ceramico, verniciatura, verniciatura a polvere, tintura e rivestimento con polimeri liquidi [13]. La stampa in lotti è facile, veloce, e più parti possono essere stampate simultaneamente se disposte in modo compatto. Inoltre i prodotti non richiedono strutture di supporto e possono ospitare geometrie complesse, tra cui sottosquadri, interconnessioni, cerniere vive e pareti sottili. Per contro vi è ridotta

dimensione del pezzo stampato, elevato costo dei macchinari e delle polveri metalliche (derivante dalla complessità di produzione delle stesse) , necessità di gas inerti (azoto o argon) per prevenire fenomeni di ossidazione, alto livello di specializzazione richiesto agli operatori, ma soprattutto il fatto che la rugosità superficiale e le tolleranze ottenibili sono generalmente inferiori rispetto a quelle ottenibili con tecnologie tradizionali, rendendo necessarie lavorazioni successive [11].

Le fasi di produzione possono essere riassunte in:

- **Stampa:** all'interno della camera di stampa viene depositato su un pistone mobile, tramite un rullo, un sottile strato di polvere metallica, poi l'energia termica apportata dalla radiazione laser<sup>8</sup> induce un aumento della temperatura ed innesca i fenomeni di sinterizzazione delle particelle metalliche. Quando il laser termina la scansione di uno strato, il pistone su cui è depositato il letto di polveri si abbassa di una lunghezza pari allo spessore di uno strato e ricomincia il processo con un nuovo strato di polveri.
- **Raffreddamento:** al completamento della stampa, la camera di stampa deve raffreddarsi leggermente all'interno dell'alloggiamento di stampa e poi al di fuori, per garantire proprietà meccaniche ottimali, evitare la deformazione delle parti e minimizzare l'instaurarsi di tensioni residue (e conseguenti deformazioni)<sup>9</sup>.
- **Post-elaborazione:** le parti completate devono essere rimosse dalla camera di stampa, separate e pulite dalla polvere in eccesso<sup>10</sup>. La polvere può essere setacciata e riciclata<sup>11</sup> e le parti stampate possono essere sottoposte a post-elaborazione ulteriore mediante, ad esempio, sabbiatura o lucidatura.

Nel PBF-LB/M la velocità di raffreddamento è molto superiore a quella dei metodi di colata tradizionali, che hanno tassi di solidificazione inferiori [32]. Il rapido riscaldamento locale e, in particolare, le rapide velocità di raffreddamento, insieme ai cicli termici, inducono la formazione di microstrutture uniche con strutture a grano raffinate, celle di dislocazione e tensioni residue interne, che possono causare anche la formazione di difetti metallurgici, tra

---

<sup>8</sup> Il consolidamento è ottenuto, ad esempio, attraverso un fascio laser attivo CO<sub>2</sub> focalizzato o un cristallo d'ittrio e alluminio drogato (Nd-Yag) guidato da un sistema di specchi.

<sup>9</sup> I forti gradienti di temperatura e il ritiro durante il raffreddamento inducono nello strato solidificato dilatazioni termiche cicliche e contrazioni che superano la massima deformazione elastica del materiale, e le deformazioni plastiche accumulate nella parte possono generare tensioni interne.

<sup>10</sup> Questa fase è svolta solitamente in modo manuale utilizzando aria compressa o una granigliatrice.

<sup>11</sup> La polvere si degrada leggermente con l'esposizione ad alte temperature, quindi dovrebbe essere miscelata a materiale nuovo prima di essere utilizzata in lavori di stampa successivi.

cui microfratture di particelle di polvere non fuse, pori di gas intrappolati, fenomeno di Balling (formazione di piccole sfere dal diametro approssimativamente pari alla dimensione del fascio, che possono causare una traccia fusa discontinua con conseguente scarsa finitura superficiale) e superfici ruvide. La porosità può essere in parte ridotta ottimizzando le condizioni di stampa, inclusa l'energia laser, la velocità di scansione e la direzione di scansione: aumentando la potenza del laser o diminuendo adeguatamente la velocità di scansione è possibile ridurre la porosità di diversi metalli come le leghe a base di nichel o alluminio o alcuni tipi di acciaio inossidabile [11]. La camera in cui avviene il processo è riempita con un gas inerte, solitamente argon. La scelta dei parametri è fondamentale, soprattutto la potenza del raggio laser, la spaziatura (influisce sul tempo di lavorazione), velocità di scansione (minore è la velocità, più a lungo il punto irradiato viene mantenuto allo stato fuso, impiegando più tempo a solidificarsi e influenzando la microstruttura), lo spessore di ogni strato (grandi spessori introducono maggiori difetti e rugosità) [1] e il modello e la strategia di scansione [26]. Il monitoraggio della temperatura del bagno di fusione è particolarmente importante per il controllo della qualità del prodotto ma vi sono difficoltà nel monitoraggio della temperatura del bagno di fusione a causa delle velocità di riscaldamento e raffreddamento localizzate ed estremamente elevate, nonché l'emissività di radiazione sconosciuta durante il processo [34].

Il modello di scansione definisce il percorso del laser all'interno di uno strato (come meandro, unidirezionale e a scacchiera, Figura 8 a, b, c), mentre la strategia di scansione definisce la differenza nei modelli di scansione tra i livelli (Figura 8 d) [2].

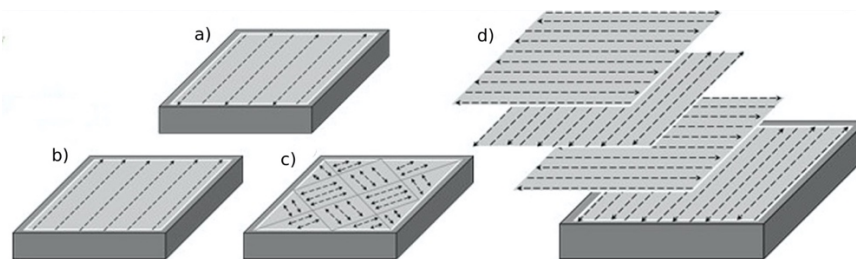


Figura 8. Esempi di modelli di scansione a) meandro, b) unidirezionale, c) a scacchiera. Nella figura a destra d) presentazione schematica per ruotare l'orientamento della scansione strato per strato [2].

Anche se le caratteristiche meccaniche del prodotto sono paragonabili a quelle ottenute con la lavorazione tradizionale, lo stesso non vale per tolleranze e rugosità, di conseguenza nelle zone di accoppiamento è necessario prevedere un sovrametallo di circa 1mm.

L'**Electron Beam Powder Bed Fusion PBF-EB** è una tecnologia di produzione che sfrutta elettroni emessi da un catodo (ad esempio un filamento di tungsteno riscaldato a temperature superiori a 2500°C) e accelerati verso l'anodo con un potenziale di 60kV. Il fascio

elettronico proviene da un cannone elettronico fisso, viene focalizzato e direzionato tramite lenti elettromagnetiche (una per focalizzare il fascio al diametro desiderato e un'altra per deviarlo fino al punto desiderato), e poi viene guidato da un programma sulla base del modello CAD fornito. All'inizio del processo si ha l'estrazione del vuoto per abbassare la pressione della camera a circa  $10^{-4}$  mbar, e successivamente una piccola quantità di elio viene pompata nella camera per formare una regione elettricamente conduttiva vicino all'area di costruzione, che a sua volta aumenta la pressione della camera a circa  $2 \times 10^{-3}$  mbar [35]. Uno strato sottile di polvere metallica viene steso su una piattaforma, per poi essere preriscaldato con una serie di passaggi del fascio non focalizzato a bassa potenza e elevata velocità con corrente controllata di circa  $30\text{mA}^{12}$ . La fase di preriscaldamento deve essere tale da portare il letto di polveri ad una temperatura pari all'80% della temperatura di fusione del metallo e quindi sinterizzare leggermente la polvere metallica in modo che mantenga la posizione corretta durante la lavorazione, e siano limitate le tensioni residue (e conseguenti deformazioni). Dopo il preriscaldamento, il letto di polveri viene scannerizzato dal fascio elettronico per portare a fusione determinate aree secondo il modello CAD: in questa fase quindi si aumenta la potenza e si diminuiscono la velocità di scansione e la corrente del fascio (ridotta a 5-10mA). Quando la scansione è completata, la piattaforma viene abbassata di una lunghezza pari allo spessore di uno strato affinché un nuovo strato di polvere metallica possa essere steso sul precedente e così per tutti gli strati di polvere successivi, fino alla completa realizzazione del prodotto sezione per sezione. Siccome il processo è condotto sotto vuoto non si formano porosità dovute all'insinuazione di gas, a differenza delle consuete tecnologie di fonderia. In generale tramite PBF-EB è possibile ottenere densità molto alte, pari anche al 99,4% della densità teorica. Con questa tecnologia si ottengono eccellenti proprietà dei materiali prodotti, con una buona precisione ed elevate velocità di processo, ma non si possono utilizzare polveri metalliche a basso punto di fusione nei componenti in alluminio, magnesio o nelle loro rispettive leghe, per la tendenza ad evaporare, in condizioni di vuoto, dei metalli più basso fondenti. Occorre considerare inoltre che si ottengono pezzi con una elevata rugosità superficiale e che per avere buoni prodotti è importante utilizzare polvere metallica di alta qualità [11].

Da un confronto tra i due processi si è notato come nel PBF-EB la velocità di raffreddamento del materiale è minore rispetto a PBF-LB/M, e anche se per molti dei materiali trattati con

---

<sup>12</sup> In generale il valore è compreso nell'intervallo 1-50mA.

queste tecnologie non si osservano significative differenze microstrutturali, il rischio di cricche nel materiale è minore in un processo PBF-EB [14].

La tecnologia **Binder Jetting** (getto di legante) utilizza la tecnica 3DP (3D Printing)<sup>13</sup> in cui un collante viene depositato in modo selettivo su un letto di polvere. La stampante stende un sottile strato di polvere di metallo sulla piattaforma di stampa (la lama del recoater garantisce la distribuzione di uno strato preciso di polvere sulla piattaforma di stampa), poi una testina a getto d'inchiostro si sposta sulla polvere e distribuisce un agente legante sulla polvere nella forma della sezione trasversale della parte per lo strato corrente. Il piano di stampa si sposta quindi verso il basso di un'altezza dello strato, la lama di ricopertura distribuisce un altro strato di polvere sopra quello precedente e il processo continua. Il pezzo metallico prodotto deve essere sinterizzato dopo la stampa per eliminare la porosità e migliorare la resistenza meccanica. In alternativa, al materiale principale può essere miscelata una polvere metallica a bassa temperatura di fusione come il bronzo in modo che, quando la parte stampata viene riscaldata, il bronzo si sciogla riempiendo gli spazi tra le particelle di polvere di lega metallica primaria [20].

La **Directed Energy Deposition** è spesso utilizzata per riparare parti metalliche esistenti grazie al fatto che può stampare su cinque assi di movimento, a differenza di altri processi di stampa che sono limitati a tre. Per questa ragione una stampante DED può manovrare attorno a parti esistenti con geometrie complesse dirigendo una polvere, o un filo metallico, verso l'ugello di stampa. Un raggio laser, o un fascio di elettroni o un arco al plasma, fonde quindi il materiale. Come per i processi di saldatura, per la stampa DED è necessario un gas di protezione (raggio laser) o un vuoto (raggio di elettroni). Il gas coprirà solo l'area che viene attivamente sciolta dal raggio. In alternativa, l'intero volume di costruzione può essere saturato con un gas inerte che richiede un volume di costruzione sigillato ermeticamente. Con questa tecnica è possibile costruire anche parti grandi ma con bassa risoluzione (maggiore rugosità) e senza la possibilità di utilizzare strutture di supporto [21].

La **Sheet Lamination**, o Laminated Object Manufacturing, è un processo di AM largamente impiegato nell'industria per fabbricare modelli e prototipi tramite una sequenza di operazioni di taglio, impilaggio e incollaggio di strati di carta o qualsiasi materiale che possa assumere la forma di un foglio (metalli, film polimerici, nastri ceramici e lamine di fibre preimpregnate). La laminazione dei fogli produce parti a bassa risoluzione, ma a un tasso di produzione molto più elevato e a un costo inferiore rispetto alle altre tecnologie di AM. Le

---

<sup>13</sup> Sviluppato e brevettato dal Prof. E. Sachs del MIT di Boston.

lamiere metalliche (alluminio, titanio, magnesio, rame, nichel o acciaio) vengono fuse utilizzando vibrazioni ultrasoniche, e un laser delinea il pezzo e taglia via la parte del foglio indesiderato [20].

## 1.2 Principali applicazioni

L'AM viene utilizzata soprattutto nella prototipazione rapida, dove consente di ridurre notevolmente i costi di progettazione grazie alle modifiche sul file digitale (come nel caso della componentistica in aeronautica), o nelle piccole serie altamente personalizzate, in quanto è meglio "immagazzinare file" anziché prodotti. Il fatto che la AM permetta la produzione di oggetti con geometrie complesse e che la produzione di varianti non comporti aggravii di costo, rende la AM particolarmente adatta ad alcuni casi:

- Produzioni in cui permette di ottenere caratteristiche tecnologiche uguali o superiori riducendo al contempo i costi (come palette per turbine e iniettori di carburante per motori aeronautici) o di ottenere standard qualitativi unici, non ottenibili con tecnologie tradizionali (come per protesi ortopediche e componentistica per competizioni di auto e moto);
- Produzioni in cui la tecnologia è competitiva sui costi solo a seguito di modifiche del disegno dell'oggetto da realizzare: le modifiche nel design sfruttano i vantaggi della AM senza compromettere le caratteristiche tecnologiche dell'oggetto prodotto (come nella componentistica in campo aeronautico);
- Produzioni in cui nonostante il maggiore costo della produzione del pezzo, si ha un vantaggio economico dovuto a riduzione del capitale immobilizzato (possibilità di immagazzinare file), possibilità di evitare costi connessi all'interruzione della produzione grazie alla flessibilità e la velocità, aumento della produttività degli impianti industriali grazie alla reingegnerizzazione costruttiva di pezzi intrinsecamente più efficienti.

Oggi i settori che vedono un maggiore utilizzo di questa tecnologia sono, oltre alla prototipazione in generale, l'aerospaziale, l'automotive, il biomedicale, la robotica, il packaging e la gioielleria, ma quasi in ogni campo se ne potrebbe diffondere l'utilizzo.

Il campo **biomedicale** è un ambito in cui la sperimentazione Hi Tech ha raggiunto vasti impieghi, destinati a continui sviluppi nel futuro prossimo visto il grande ruolo che la tecnologia può giocare in questo campo: dalla ricerca sui vaccini e la ricostruzione delle ossa e dei vasi sanguigni si sta arrivando, negli ultimi anni, alla creazione di veri e propri tessuti

e organi artificiali [19] (Figura 9). E' possibile realizzare i prototipi di organi con tessuti dalla consistenza molto simili all'originale, riuscendo a ricreare anche masse tumorali così da permettere ai medici di analizzare fino in fondo come penetrare nei tessuti per rimuovere il male. E' ora possibile, ad esempio, stampare la pelle direttamente sulle ustioni grazie ad un dispositivo dotato di un sistema di scansione che identifica l'estensione e la profondità della ferita e determina il numero di strati di cellule che dovranno essere depositate per ripristinare il tessuto danneggiato. Con le nuove tecnologie di scansione è possibile produrre dispositivi medici su misura, come tutori anatomici e protesi, che i pazienti possono personalizzare nell'estetica, nelle funzionalità e nelle prestazioni terapeutiche [19].

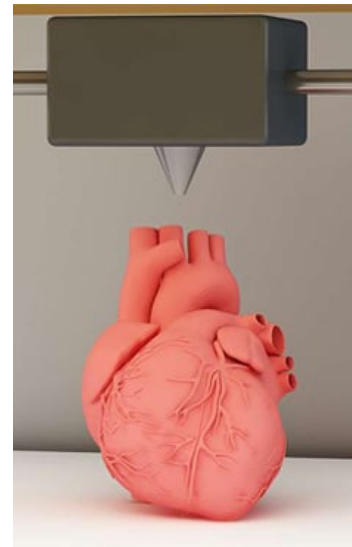


Figura 9. Esempio di stampa 3D per il settore medicale [16].

Nel settore dei **trasporti**, quindi aeronautico, aerospaziale, automobilistico o marittimo, si cerca sempre di risparmiare tempo e costi e la AM, grazie all'ottimizzazione topologica, è una soluzione ideale perché permette una maggiore leggerezza delle parti senza compromettere la resistenza o la qualità del pezzo: peso ed efficienza dei materiali ad alte prestazioni sono parametri di progettazione critici soprattutto nel settore aerospaziale. Vi sono anche progetti di veicoli o navi completamente stampati in 3D.

Nel campo dell'**Automotive** la Stampa 3D è utilizzata per la produzione di alcuni componenti (soprattutto in fase di prototipazione) o per la creazione di progetti dimostrativi difficilmente "stampabili in serie" a prezzi ancora troppo elevati per il mercato. Ferrari e Lamborghini, che sono meno vincolate al contenimento dei costi, collaborando con aziende del settore della stampa 3D, fanno grande uso di tecnologie all'avanguardia nel campo della AM per la stampa di parti in metallo. Lo stesso vale per le macchine nel mondo delle corse<sup>14</sup>. La AM può trovare applicazioni non solo nei nuovi modelli di automobili, ma anche nelle auto d'epoca<sup>15</sup> per cui è difficile trovare sostituti per alcuni pezzi, perché fuori produzione e difficili da replicare, oltre che molto costosi [17].

---

<sup>14</sup> Già nel 2012 il team Australian V8 Supercar di Nissan Motorsports utilizzò la stampa 3D per apportare delle rilevanti modifiche sia al sistema di raffreddamento che all'aerodinamica della parte posteriore della vettura.

<sup>15</sup> Il progetto finanziato dalla partnership tra Associazione Industriale Bresciana e 1000 Miglia S.r.l., chiamato "MUSP Garages", presentato Stefano Tirelli, Elio Chiappini e Serena Costa, si rivolge proprio a collezionisti, amatori e restauratori di auto e moto d'epoca e riguarda l'avvio di un'attività manifatturiera destinata alla produzione di ricambi per auto d'epoca.



Anche in **edilizia** ci sono possibili applicazioni: a partire dagli anni '80, architetti e ingegneri edili hanno iniziato a utilizzare CAD per costruire modelli di edifici. Nel 2017, la società russa Apis Cor ha presentato la sua prima casa stampata in 3D in sole 24 ore, grazie a un braccio rimovibile in grado di estrarre calcestruzzo. La AM permette la creazione anche di ponti di metallo, come è avvenuto ad Amsterdam, o di cemento, come in Spagna [12].

Nel settore **Oil&Gas** l'AM si sta rapidamente evolvendo per la prototipazione rapida di componenti al fine di produrre e sostituire parti operative.

Le compagnie petrolifere sono consapevoli dei possibili vantaggi che offre la stampa 3D per le caratteristiche peculiari del settore:

- struttura complessa del petrolio e del gas;
- costose conseguenze dei tempi di inattività;
- inefficienze nella produzione di parti a basso volume e ad alto valore, in particolare parti di ricambio in loco;
- massimizzazione della produttività e riduzione dei costi associati alla produzione e al mantenimento dell'inventario;
- importanza della rapidità nella prototipazione e sviluppo dei progetti per accelerare l'introduzione di nuovi prodotti e di conseguenza la risposta dell'azienda alle opportunità di mercato<sup>16</sup>.

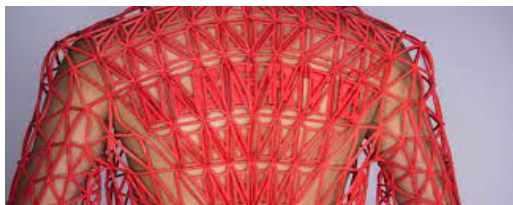
La stampa 3D accelera anche il ritmo dell'innovazione, poiché ora sono raggiungibili geometrie molto più complesse: più parti possono essere consolidate in un unico componente, semplificando l'assemblaggio e riducendo il numero e la complessità di ciascuna operazione<sup>17</sup>. Anche le aziende del settore a monte dell'industria, quelle coinvolte nell'esplorazione, nella foratura, nella ricostituzione e nella produzione di petrolio e gas, possono trarre vantaggio dall'AM: le aziende che operano in sedi remote devono mantenere i loro beni, riducendo i costi di acquisizione e immagazzinamento delle parti di cui hanno bisogno, nonché i costi logistici legati all'approvvigionamento (che costituiscono solitamente una percentuale rilevante dei costi delle parti di ricambio in operazioni remote). Nel campo dell'**Arte** e del **Design** le tecnologie di stampa 3D stanno abbattendo i confini dell'immaginazione e sono oggi utilizzate da molti artisti e designer di tutto il mondo nei loro lavori. Esempi concreti sono la collezione di vestiti stampati in 3D di Danit Peleg

---

<sup>16</sup> Nello sviluppo del bruciatore per la turbina a gas NovalT16, GE Oil and Gas è riuscita a ridurre il ciclo di sviluppo e validazione del 50 % utilizzando metodi di AM.

<sup>17</sup> La produzione 3D di ugelli a benzina di GE ha portato ad un rendimento più elevato e una riduzione del 15% del carburante necessario nei suoi motori LEAP.

(Figura 10), i gioielli di Diana Law (Figura 11) o i dolci dalle forme intricate di Dinara Kasko (Figura 12) [47]. Molte firme prestigiose usano abitualmente una stampante 3D per calzature, accessori moda, occhiali, borse, bottoni e altri articoli che vengono ideati, prototipati e verificati rapidamente per deciderne o meno la produzione.



*Figura 10. Particolare di abito realizzato in 3D [23].*



*Figura 11. Anello a serpente realizzato in 3D [24].*



*Figura 12. Dolce con decorazione realizzata in 3D [22].*

## CAPITOLO 2. LA RUGOSITÀ

### 2.1 Introduzione

Le tecniche di produzione additiva hanno numerosi vantaggi (vedi capitolo 1.1), ma comportano anche alcuni difetti, tra cui maggiore rugosità e scarsa resistenza a fatica [47][77]. Di questi particolarmente importante per questo lavoro è la rugosità superficiale, ossia la misura delle irregolarità superficiali di tipo microgeometrico o deviazione irregolare dalla planarità [45]. La rugosità superficiale può avere un orientamento e un passo (Figura 13).

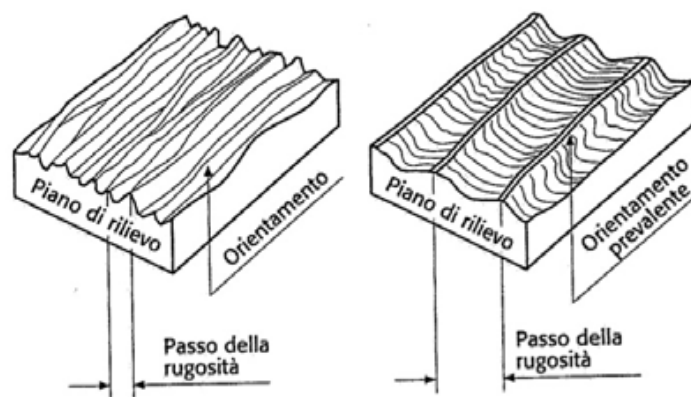


Figura 13. Passo ed orientamento della rugosità [45].

Si distinguono inoltre il Profilo primario (rugosità propriamente detta) e il Profilo secondario (ondulazioni), dove per tessitura si intendono le caratteristiche della superficie intese, oltre che rugosità, anche la presenza di cricche e fessure, la direzionalità e l'ondulamento. Per poter analizzare la rugosità superficiale si considera un campione di lunghezza  $L$  (lunghezza base del profilo) e si traccia una linea media che divide idealmente il profilo reale, in modo tale che la somma delle aree delle creste che emergono dalla linea media sia uguale alla somma delle aree delle valli sottostanti alla linea media (Figura 14).

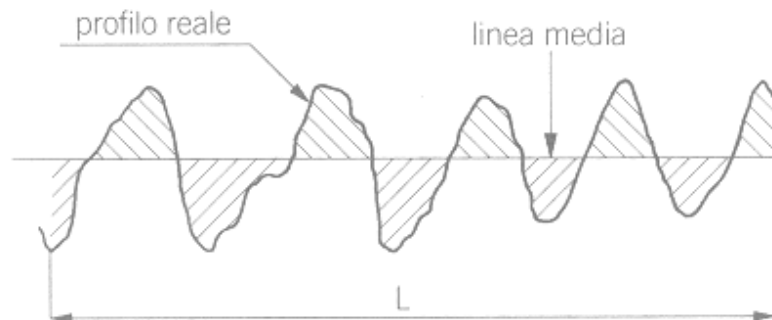


Figura 14. Profilo reale e linea media di una superficie [45].

Sempre a partire dal profilo è possibile calcolare:

- rugosità massima (Rt): distanza tra la cresta più elevata e la gola più profonda (Figura 15);

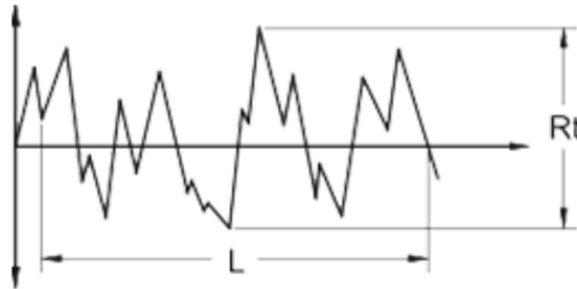


Figura 15. Rugosità massima Rt [46].

- altezza della irregolarità del profilo valutata in 10 punti distinti (Rz): media dei valori assoluti dei cinque picchi del profilo più alti e delle cinque valli più profonde (Figura 16), compresi all'interno della lunghezza di campionatura e misurati rispetto ad una linea parallela alla linea media ma più in basso in modo che non intersechi il profilo

$$R_z = \frac{(y_1 + y_3 + y_5 + y_7 + y_9) - (y_2 + y_4 + y_6 + y_8 + y_{10})}{5}$$

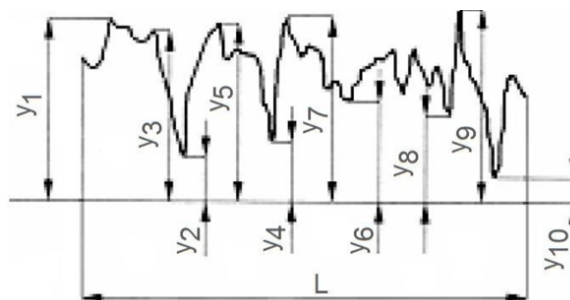


Figura 16. Schema per il calcolo di Rz [45].

- rugosità media (Ra): media aritmetica dei valori assoluti delle variazioni del profilo reale rispetto alla sua linea mediana (Figura 17).

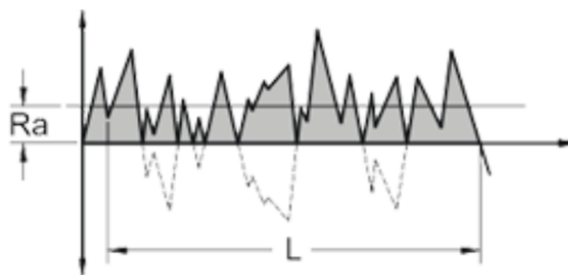


Figura 17. Esempificazione di Ra [46].

A partire dal valore della rugosità Rt (altezza dal punto minimo al punto massimo) è possibile

calcolare la minima quantità da asportare per rendere liscia la superficie. Normalmente per fare valutazioni sulla rugosità si preferisce utilizzare la rugosità media Ra per la sua semplicità. La maggior parte degli strumenti per il rilievo della finitura superficiale è in grado di fornire una lettura diretta dei valori di Ra e Rt, sia in micrometri ( $\mu\text{m}$ ) che in micropollici ( $\mu\text{in}$ ). Secondo le normative ISO la misura standard è in  $\mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m}=40 \mu\text{in}$  e  $1 \mu\text{in}=0.025 \mu\text{m}$ ). Per evitare errori nell'interpretazione dei diversi valori numerici, la norma ISO R1302 associa ai valori nominali Ra un grado equivalente di rugosità, utile per evitare interpretazioni errate delle diverse unità di misura.

Una determinata tolleranza dimensionale impone automaticamente dei limiti alla rugosità che quella superficie può avere, ma non è detto il contrario. Un componente meccanico, durante la sua vita utile, farà parte di accoppiamenti che possono essere statici o dinamici: se per gli accoppiamenti statici devono essere rispettati i vincoli di tolleranza e rugosità superficiale, per quelli dinamici, devono essere soddisfatte superfici di scorrimento perfette [63]. In questi contesti la rugosità è fondamentale, ed in generale è importante per molteplici ragioni. Anzitutto si possono fare considerazioni sull'attrito e sull'usura (il contatto tra due superfici avviene solo in alcune zone), e sulla fatica e sensibilità all'intaglio (meglio superfici lisce): padroneggiare l'influenza della rugosità superficiale intrinseca dal punto di vista della valutazione della tolleranza ai danni potrebbe essere la chiave per garantire l'affidabilità delle future applicazioni strutturali [47]. E' importante anche per la conducibilità termica ed elettrica per contatto (meglio superfici lisce, visto che vi è un aumento del coefficiente di scambio termico all'aumentare della rugosità [65]), per la resistenza alla corrosione (superfici rugose trattengono i composti corrosivi quindi la resistenza alla corrosione a umido è generalmente maggiore nei materiali che presentano bassi valori della rugosità superficiale) [45] e per i processi di verniciatura o rivestimenti (meglio elevata rugosità per facilitare l'adesione ai rivestimenti di finiture come la placcatura, la verniciatura a polvere o la verniciatura) [45] [116]. Per quanto riguarda le superfici di contatto che richiedono precisione elevata (come guarnizioni, sigilli, utensili e stampi) è importante che la rugosità sia bassissima in alcuni contesti (sfere cuscinetti, superfici interne stampi) o elevata in altri (superfici guarnizioni, freni a tamburo). Da considerare anche la questione estetica, molto influenzata dalla rugosità, ed il fatto che si hanno costi maggiori se si vuole ottenere una bassa rugosità. Occorre infatti fare attenzione ad indicare il grado di rugosità richiesto perché un grado di rugosità basso comporta quasi sempre un aumento dei costi di produzione ed è quindi importante indicarlo basso solo per

quelle superfici che effettivamente lo necessitano da un punto di vista funzionale [45] (Figura 18).

|                     | RUGOSITÀ ( $R_{a,r}$ $\mu\text{m}$ ) | APPLICAZIONE  |
|---------------------|--------------------------------------|---|
| Costi di produzione | 0.025                                | Piani di appoggio di micrometri, specchi e blocchi di riscontro   |
|                     | 0.05                                 | Facce di calibri d'officina e piani di appoggio comparatori   |
|                     | 0.1                                  | Facce di calibri a corsoio. Utensili di precisione. Perni di articolazione. Superfici a contatto per tenuta fluidi senza guarnizione. |
|                     | 0.2                                  | Camme, supporti di alberi a gomiti e a camme. Guide tavole macchine utensili. Cuscinetti reggispinta ad alte velocità.                |
|                     | 0.4                                  | Alberi scanalati. Superficie interna cilindri di motori. Bronzine. Valvole e saracinesche.  |
|                     | 0.8                                  | Tamburi, freni. Denti di ingranaggi. Superfici di parti scorrevoli a contatto (pattini e guide).                                      |
|                     | 1.6                                  | Superfici di tenuta con guarnizioni in gomma. Carter di riduttori e ingranaggi. Testate cilindri.                                     |
|                     | 3.2                                  | Perni per trasmissioni a mano. Superfici di accoppiamento per parti smontabili.   |

Figura 18. Esempi di rugosità richiesta in base alle diverse applicazioni [45].

Alcuni dei difetti superficiali più comunemente osservati come causa di elevata rugosità superficiale nelle parti AM a base di metallo sono:

- **Polveri parzialmente fuse:** può capitare che parte della polvere non subisca una corretta fusione dal laser o dal fascio di elettroni, e questo potrebbe causare un aumento della rugosità superficiale [37]. Inoltre il calore si diffonde dall'alta temperatura del bagno di fusione all'ambiente circostante durante il processo di fusione laser, e le polveri adiacenti vengono attratte dall'elevata energia termica al bordo fuso, con conseguente parziale fusione e solidificazione lungo i bordi [38].
- **Pori superficiali:** se il fronte del liquido procede con un tasso troppo basso e la velocità di scansione è troppo elevata, si potrebbe avere una bassa densificazione dei componenti, con conseguenti fori superficiali [39].
- **Scalini:** l'effetto stair-stepping (SSE) peggiora con l'aumento dello spessore dello strato [40].
- **Balling melts:** difetti legati a bassa potenza del laser, bassa temperatura di sottoraffreddamento del bagno di fusione (raffreddamento del liquido al di sotto della temperatura di solidificazione senza che avvenga effettivamente la solidificazione) e velocità di scansione troppo elevate, con conseguenti schizzi di metallo e balling melts sulla superficie [41].

- **Semi-saldature:** sono particelle fuse presenti sulla superficie, simili al fenomeno del balling, saldate solo parzialmente (50% delle loro dimensioni) [42].
- **Discontinuità (Ripple fronts):** le elevate variazioni di temperatura tra il raggio laser in movimento e il bagno fuso provocano la comparsa di increspature sulla superficie in quanto impediscono al metallo fuso di tornare alla sua condizione precedente prima della solidificazione, causando increspature e discontinuità [43].

Questi difetti si verificano soprattutto a causa della stampa a strati e per superare questo problema sono state proposte varie ricerche che includono la riduzione al minimo dello spessore degli strati, la stampa su diversi orientamenti e l'orientamento della parte [44]. I risultati ottenuti tramite queste soluzioni non erano sufficienti per ottenere una finitura superficiale liscia e pertanto, sono state introdotte tecniche di post-elaborazione.

## 2.2 Processi di finitura

Interessante analizzare la gamma di rugosità superficiale e precisione tipica per i comuni approcci di produzione dei metalli, sia sottrattivi e additivi (Figura 19): i processi net-shape, come la lavorazione meccanica in cui è possibile produrre superfici lisce e un'elevata precisione, sono rappresentate in basso a sinistra del grafico mentre i processi near-net-shape, come l'AM, si trovano in alto a destra in quanto producono una precisione relativamente bassa e con superfici più ruvide. I metodi in basso a sinistra permettono di soddisfare le specifiche di precisione del prodotto finale ma in modo relativamente lento, costoso e dispendioso (a causa del blocco solido di metallo più grande utilizzato per il taglio rispetto alla parte finale) e per questa ragione si tende a produrre con tecniche AM seguite da trattamenti di post produzione.

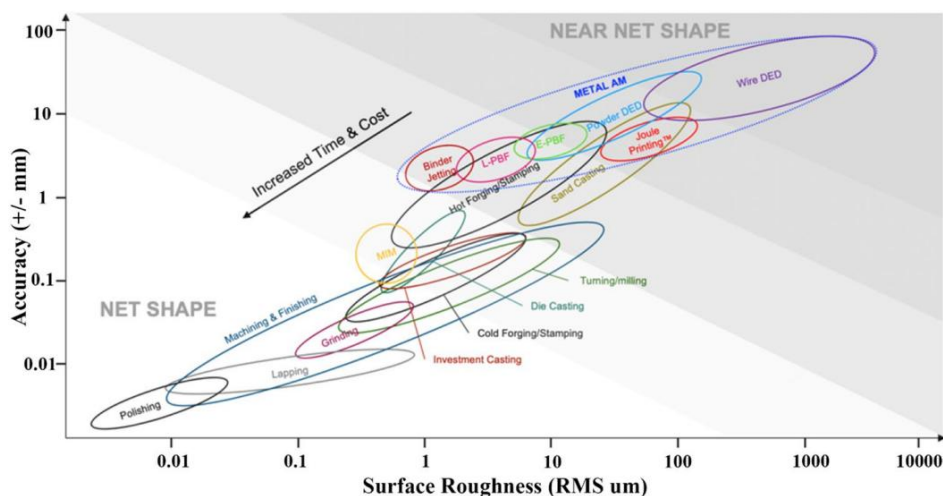


Figura 19. Precisione tipica dei processi di produzione dei metalli rispetto alla rugosità superficiale fornita [48].

La quantità di post-elaborazione necessaria per i trattamenti superficiali dipende dalla tecnica AM utilizzata per fabbricare la parte e la post-elaborazione può variare dalla semplice rimozione di strutture di supporto e polveri extra, all'esecuzione di trattamenti termici intensivi e modifiche superficiali. Una delle classificazioni delle metodologie di finitura superficiale più comunemente adottate per le parti metalliche AM suddivide le lavorazioni di post trattamento in base alla fonte di energia che conduce tali processi: meccanica (come burattatura, vibrofinitura e metodi abrasivi), chimica (come elettrolucidatura), termica (come lucidatura laser) o ibrida (Figura 20).

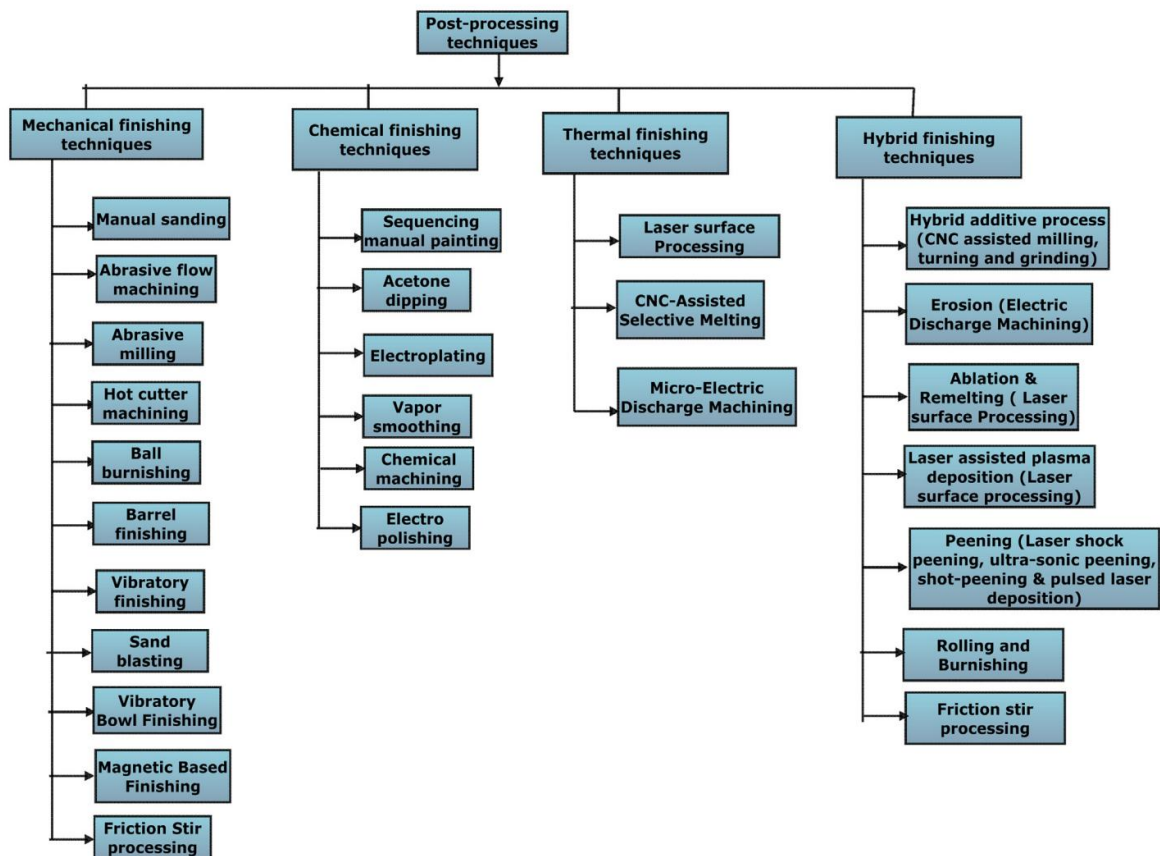


Figura 20. Classificazione degli approcci di finitura superficiale [4].

La scelta del metodo più idoneo deve tenere conto di numerosi fattori, tra cui il range di rugosità sul quale essi lavorano (Figura 21).

Il trattamento superficiale con metodi non chimici come lucidatura meccanica, lavorazione meccanica, lucidatura a flusso abrasivo e lucidatura laser potrebbe non essere realizzabile per i componenti prodotti in modo additivo con geometrie complesse e cavità interne. Ad esempio, la lavorazione meccanica e la lucidatura meccanica sarebbero quasi impossibili da applicare su elementi interni e in sottosquadro.



| Classification                           | Methods   | Typical roughness range ( $\mu\text{m}$ ) |
|--|---|---|
| Non-chemical<br>(mechanical and thermal) | Grinding, blasting  | 0.01–10.1                                 |
|  | Abrasive flow machining, magnetic abrasive finishing, cavitation abrasive finishing | 0.084–6                                   |
|  | Laser polishing/re-melting, laser shock peening                                     | 0.01–10.8                                 |
|  | Vibratory and tumble finishing  | 0.19–18.9                                 |
|  | Shot peening  | 0.75–7.35                                 |
|  | Ultrasonic nanocrystal surface modification   | 0.3–5.9                                   |
| Chemical-based                           | CNC machining (milling)   | 0.1–1.741                                 |
|  | Chemical finishing (Chempolishing)  | 0.4–5.22                                  |
|  | Electrochemical polishing   | 0.014–21                                  |
| Coating                                  | Electroplating/electroless plating; spraying  | 0.086–14                                  |

Figura 21. Diverse categorie di trattamenti di post elaborazione per la superficie AM in metallo [48].

La lucidatura a flusso abrasivo di solito funziona su superfici selettive a causa del flusso direzionale del fluido. Inoltre, è difficile applicare i metodi non chimici su materiali sensibili al calore, componenti su microscala, materiali multistrato, pareti sottili e componenti con porosità ingegnerizzate [49]. I metodi di finitura superficiale chimica a base liquida, al contrario, possono levigare sia la superficie esterna che quella interna delle parti AM, in particolare le sfaccettature difficili da raggiungere, poiché le soluzioni possono facilmente raggiungere le superfici interne [48].

### 2.2.1 Burattatura o vibrofinitura

Oltre alla lavorazione convenzionale, alla lavorazione con taglio a caldo e alla microlavorazione, altri processi di finitura meccanica studiati negli ultimi anni si basano sulla rimozione dei picchi di rugosità attraverso la deformazione plastica e l'abrasione dovuta al movimento relativo tra i componenti e il mezzo abrasivo [51]. Questi tipi di lavorazione permettono di ottimizzare i costi di lavorazione grazie alla flessibilità delle attrezzature richieste ed ai ridotti costi di manodopera. Essi combinano i tre seguenti sistemi (Figura 22):

- una vasca mantenuta in continua oscillazione tramite un opportuno motore elettrico
- un agente “abrasivo”, costituito da inserti di diverso grado di abrasione e forma
- la superficie da trattare

L'interazione simultanea di questi tre sistemi porta ad un'azione degli abrasivi continua e costante sul



Figura 22. Impianto per la vibrofinitura [54].

manufatto da trattare: ciò permette di modificarne l'aspetto superficiale in maniera graduale ed uniforme facendo passare il pezzo da trattare attraverso le fasi di sbavatura, levigatura, lucidatura e brillantatura [54].

La burattatura, o vibrofinitura, è un efficace processo di finitura superficiale in massa con vantaggi significativi quali elevata produttività, controllabilità del processo e basso costo. La finitura di massa si riferisce a procedure industriali abrasive che consentono di lavorare contemporaneamente ed economicamente una grande quantità di componenti metallici o di altro materiale per ottenere uno o più di una varietà di effetti superficiali, tra cui distensione, riduzione della rugosità superficiale, brillantatura, raggiatura dei bordi e sbavatura. Esistono tre tipi fondamentali di processi di finitura di massa in uso e questi includono il cilindro rotante, il disco centrifugo e la vasca vibrante [55]. In queste grandi vasche vibranti contenenti il mezzo abrasivo (fluido lubrificante e mezzo ceramico) le parti vengono posizionate e, successivamente, i mezzi abrasivi e le parti ruotano e sfregano l'una contro l'altra per abradere e lucidare la superficie del materiale [48]. Le principali variabili di processo sono: mezzo (forma, graniglia, dimensioni), soluzione composta (portata, composizione), materiale del pezzo (durezza, composizione) e caratteristiche della vasca (capacità, forma, accelerazione, frequenza). In una vasca vibrante, l'azione abrasiva tra i pezzi in lavorazione e i fluidi viene ottenuta tramite un sistema di masse vibranti in cui la traiettoria del flusso delle parti e dei fluidi è regolata da due serie opposte di pesi eccentrici montati alle estremità di un albero azionato da cinghia. Una serie di pesi controlla il movimento circonferenziale attorno alla vasca (movimento di avanzamento) mentre l'altra controlla la velocità di rotolamento radiale (movimento di rollio) [55]. La produttività del processo e la velocità di rimozione del materiale dipendono anzitutto dall'energia meccanica, seguita dalla selezione del mezzo abrasivo, ma si tratta di un processo mediamente lento. La qualità della finitura superficiale è determinata da fattori quali la durezza del mezzo granulare, il tipo di materiale, la grana abrasiva, la forma e altre proprietà reologiche<sup>18</sup>, nonché le dimensioni, la forma della vasca [50]. Questi processi sono adatti sia per la finitura in massa di piccole parti (dove non è necessaria alcuna azione di bloccaggio) che per grandi componenti [48].

---

<sup>18</sup> La reologia è la scienza (e la relativa tecnica applicata) che studia le caratteristiche di deformazione, sotto l'azione di forze esterne, dei corpi solidi, e in particolare dello scorrimento dei fluidi e semifluidi in riferimento alle loro proprietà e condizioni (densità, viscosità, concentrazione, temperatura, forze applicate, ecc.) e ai loro rapporti con l'ambiente circostante (pareti del contenitore, loro qualità e forma).

La selezione dei mezzi abrasivi ha un'importanza fondamentale per le parti irregolari comprendenti cavità e rientranze: la burattatura è infatti molto utilizzata per parti rotonde senza cavità, fori interni e difetti importanti. Questi processi non sono però realizzabili per i bordi taglienti di oggetti 3D poiché questi bordi verranno arrotondati durante l'operazione [51]. La forza d'urto tra il supporto e la superficie di lavoro durante la vibrofinitura influenza lo spessore dello strato che può essere rimosso. Fluidi più pesanti e una maggiore frequenza di vibrazione possono aumentare la forza e i tempi di impatto che a loro volta possono aumentare la rimozione del materiale e accorciare conseguentemente il ciclo. E' importante inoltre che la soluzione chimica sia in grado di reagire rapidamente con lo strato superficiale, in modo da generare uno strato di ossido sottile che possa essere facilmente rimosso dal contatto con il mezzo [52]. La velocità di penetrazione dell'incisione chimica deve essere bilanciata con la velocità di rimozione meccanica del materiale per ottenere un'elevata qualità dell'integrità della superficie [53].

### 2.2.2 Elettrolucidatura

L'elettrolucidatura, o lucidatura elettrochimica, è un processo di asportazione di materiale dalle superfici metalliche mediante procedure di lucidatura e sbavatura in cui la parte lavorante, come un anodo, viene lucidata applicando una tensione: il potenziale elettrico provoca il movimento delle particelle ionizzate dall'anodo alla superficie del catodo all'interno della soluzione elettrolitica (Figura 23). La procedura di elettrolucidatura funziona in base alla legge di Faraday<sup>19</sup>, che implica una severa lucidatura selettiva sulle caratteristiche estruse della superficie (picchi) levigando selettivamente la superficie, e portando ad una migliore finitura superficiale. Durante il processo si verificano due fenomeni superficiali, denominati brillantamento anodico (la rugosità superficiale diminuisce grazie al controllo della velocità di dissoluzione tra picchi e valli correlati alla microstruttura del metallo) e livellamento anodico (la rugosità superficiale diminuisce a causa dell'entità della

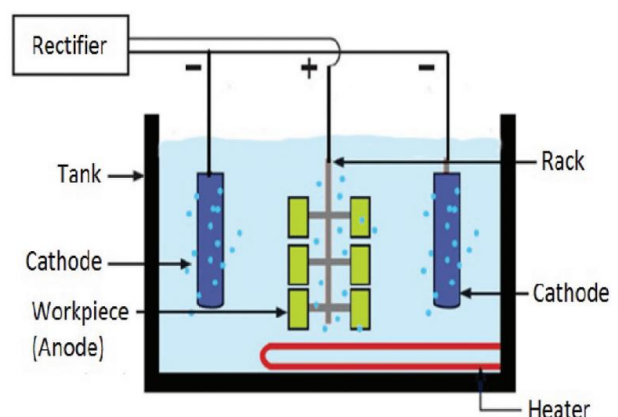


Figura 23. Processo di elettrolucidatura [36].

<sup>19</sup> Legge fisica che descrive il fenomeno dell'induzione elettromagnetica.

distribuzione di corrente iniziale, che ha un notevole impatto sul trasferimento di massa) [56]. L'elettrolucidatura è in grado di ridurre la rugosità superficiale ovunque la soluzione elettrolitica entri in contatto con la superficie ma l'efficienza del processo dipende fortemente da vari parametri del processo tra cui agitazione, temperatura (la temperatura ottimale del bagno è di 75°C), tempo (indicativamente 30 minuti), densità di corrente (indicativamente 70 A/dm<sup>2</sup>), rotazione del pezzo e composizione dell'elettrolita (è tipicamente composto per il 70% da acido fosforico e 30% di acido solforico) [58]. Inoltre, il miglioramento della superficie delle superfici interne nascoste e difficili da raggiungere è ostacolato dalla necessità di posizionare l'elettrodo ausiliario all'interno della parte cava dell'elettrodo di lavoro [57].

Alcuni parametri che hanno impatto sulla rugosità finale sono tensione, spaziatura dell'elettrolita, temperatura e velocità del flusso dell'elettrolita. Si può ottenere una sostanziale riduzione della rugosità superficiale anche in parti AM con forme complesse [36], ma alcuni campioni elettrolucidati hanno mostrato una superficie interna più ruvida rispetto alle superfici non lucidate, il che suggerisce che l'elettrolucidatura non è un modo efficace per modificare le superfici interne dove i canali sono troppo piccoli [48].

Tra i metodi chimici si ha anche la finitura chimica, chiamata anche chempolishing, che è un metodo a base liquida che consiste nell'immergere il campione in soluzioni alcaline o acide<sup>20</sup> e, a differenza dell'elettrolucidatura, non necessita di elettricità e di contro elettrodi da posizionare all'interno delle superfici. Inoltre la chempolishing è più efficace del metodo di elettrolucidatura per rendere lisci i piccoli canali interni in quanto non dipende dalla posizione del contro elettrodo e dalla forma dei componenti AM. Alcuni test hanno mostrato che non solo l'unione di questi due metodi porta risultati migliori al fine della riduzione della rugosità, ma che quest'ultima è influenzata anche dall'ordine con cui le due (chempolishing e elettrolucidatura) sono applicate: la sequenza post-processo della chempolishing seguita dall'elettrolucidatura ha ridotto la rugosità della superficie interna fino a 12 µm, mentre l'elettrolucidatura seguita dalla chempolishing ha ridotto la rugosità della superficie esterna fino a 15 µm [48].

---

<sup>20</sup> Il bagno chimico utilizzato per la chempolishing comprende il 10-30% di acido fosforico, 1- 10% cloridrico acido, 1-10% nitrico acido, E 1-10% proprietario tensioattivi, ed è mantenuto ad una temperatura costante di circa 75°C.

### 2.2.3 Metodi abrasivi

La rugosità delle superfici può essere limitata attraverso levigatura con carta vetrata o levigatrice orbitale di varie granulometrie a seconda dell'aspetto estetico preferito. Sebbene la levigatura manuale diventi una routine di finitura per la stampa 3D in stile hobbista, la mancanza di ripetibilità ne limita l'utilizzo manuale per applicazioni di alta qualità. Un ulteriore inconveniente di questo metodo abrasivo è rappresentato dai problemi di inaccessibilità su elementi piccoli, ad esempio sottosquadri, piccoli fori e forme intricate che potrebbero non essere raggiunti dalla levigatura [48].

La lavorazione a flusso abrasivo è un metodo di finitura che utilizza un “carico abrasivo viscoelastico” per espellere, mediante microtaglio [36], i materiali dalle superfici da rifinire. Questo metodo viene utilizzato per la lucidatura, la sbavatura e la raggatura di materiali difficili da rifinire. E' un metodo semplice ma ha dei limiti dovuti, ad esempio, alla qualità ottenibile, al rischio di danneggiare le sezioni sottili, al costo delle attrezzature e alle durate relativamente lunghe della post-lavorazione [51].

La lavorazione a getto d'acqua abrasivo è una tecnica di finitura ampiamente utilizzata nelle industrie per il taglio, la cui procedura non prevede il contatto diretto dell'utensile con la superficie del pezzo e altri vantaggi quali la riduzione delle forze di taglio, l'assenza di produzione di calore nel processo e la possibilità di rifinire i materiali isolanti e riflettenti [36]. La rimozione del materiale avviene attraverso due approcci principali mediante microtaglio, come deformazione/aratura e taglio per meccanismo erosivo [70]. Il processo è suddiviso in due metodi denominati “Abrasive Suspension Jet”, che prevede tre fasi: acqua, aria e abrasivo (gli abrasivi e l'acqua vengono preventivamente miscelati e poi introdotti direttamente nell'ugello), e “Abrasive Water Injection Jet”, che prevede solo due fasi: acqua e abrasivo (iniezione di abrasivi in un getto d'acqua ad alta velocità attraverso la camera di associazione) [71].

Nella lavorazione a letto fluido la superficie da rifinire è immersa nel letto fluido: il sistema si compone di due fasi in cui le particelle abrasive vengono mantenute in movimento con l'ausilio del gas, comportandosi quindi come un fluido, con conseguente enorme numero di impatti sulla superficie [36]. E' stato sviluppato un metodo ibrido a letto fluido e a getto abrasivo noto come “lavorazione a getto abrasivo a letto fluido” che prevede la miscelazione omogenea delle particelle abrasive con un gas di trasporto per rifinire le superfici danneggiate e libere con un'elevata qualità, poiché il gas di trasporto funge da lubrificante [72].

I metodi di finitura superficiale meccanica includono anche una varietà di tecniche come molatura, sabbiatura, finitura abrasiva, e pallinatura. Il metodo della microsabbiatura si basa sul processo di erosione, che prevede l'utilizzo di particelle abrasive, a secco o in umido, che vengono accelerate dal flusso d'aria in pressione che passa attraverso il microugello rivolto verso il campione. La sabbiatura, o granigliatura, utilizza materiale abrasivo come sabbia e perline ad alta pressione sulla superficie mirata [36]. In modo analogo la pallinatura è un processo di lavorazione a freddo in cui piccoli granelli di durezza adeguata vengono accelerati in vari tipi di attrezzature per colpire la superficie del pezzo, che deve però essere di geometria semplice. Per ovviare a questo limite è stata studiata la pallinatura ultrasonica, una variante che utilizza frequenze ultrasoniche per accelerare il mezzo [48].

Sebbene la maggior parte di questi metodi sia ampiamente utilizzata per la finitura superficiale esterna di metallo AM, solo pochi di essi sono fattibili per canali interni e geometrie complesse. La lavorazione a flusso abrasivo, nota anche come levigatura per estrusione, è un processo di finitura per la levigatura della superficie e la produzione di raggio controllato, in particolare per canali interni, bordi e curve difficili da raggiungere, con un mezzo viscoelastico carico di abrasivo [48]. Per pompare il fluido all'interno dei canali è necessaria una pressione molto elevata, fino a 220 bar [66]. La natura di questo processo consente di applicarlo a superfici interne di difficile accesso che potrebbero essere difficili da lucidare con altri metodi, ma resta l'inaccessibilità del flusso ad alcune sezioni, il che rappresenta il principale difetto di questo metodo. Inoltre la velocità di rimozione del materiale è molto bassa, la polvere abrasiva non può essere riutilizzata (poiché la sua capacità abrasiva diminuisce) e le eccessive pressioni di pompaggio (>220 bar) potrebbero danneggiare i canali interni dalle pareti sottili [66].

E' stata sviluppata anche la lucidatura abrasiva ad ultrasuoni per migliorare ulteriormente la finitura superficiale di campioni metallici prodotti in modo additivo con geometrie interne. Questa tecnica si basa sul concetto di lavorazione ad ultrasuoni e offre vari vantaggi rispetto alla finitura a vibrazione come basso costo, efficacia, facilità d'uso e mancato danneggiamento dei prodotti termici e chimici. In queste procedure, l'effetto di cavitazione<sup>21</sup> (formazione, crescita o collasso di bulbi di cavità inerziali) è efficace nell'eliminare le particelle parzialmente fuse sulle parti metalliche AM e le particelle abrasive possono

---

<sup>21</sup> 21 La cavitazione è un processo di conversione di fase tra liquido e vapore, che dà origine a bolle di cavitazione risultanti dalla minore pressione interna del liquido rispetto alla pressione di vapore saturo.

raggiungere qualsiasi superficie [48]. Per migliorare l'efficienza della lavorazione e la qualità della superficie, è stato proposto anche un metodo di "flusso abrasivo morbido basato sulla cavitazione", che permette di ottenere una superficie di migliore qualità con un maggiore tasso di rimozione del materiale [67].

L'estrusione del materiale seguita dalla sabbiatura del mezzo, cioè l'impatto ad alta velocità del mezzo utilizzato, fornisce una soluzione economica per il trattamento superficiale. La post-finitura può essere applicata manualmente con un movimento ampio di una pistola a spruzzo, ma le applicazioni professionali richiedono una camera chiusa. Nella post-elaborazione le regioni indesiderate potrebbero essere preservate attraverso il mascheramento. Si parla di pallinatura quando le caratteristiche del materiale sono alterate e sabbiatura con soda o granigliatura se il mezzo di sparo è rispettivamente bicarbonato di sodio o perline di plastica. Questo processo contribuisce alla sostenibilità economica in quanto il mezzo utilizzato può essere a basso costo ed essere utilizzato più di una volta. Rispetto ai metodi che impiegano un mezzo abrasivo, questo metodo garantisce un effetto minimo sulla precisione dimensionale complessiva a causa della rimozione trascurabile del materiale. Se non maneggiata con cura, tuttavia, la pallinatura rivela una debolezza nella correttezza geometrica, ad esempio, le alte pressioni possono piegare/deviare gravemente le parti lunghe e sottili [51].

#### 2.2.4 Lucidatura laser

La finitura termica della superficie, come i trattamenti basati su laser e l'irradiazione con fascio di elettroni, utilizza principalmente una fonte di calore per adattare la microstruttura, migliorare le proprietà meccaniche e alleviare lo stress dei pezzi. I trattamenti superficiali basati su laser, come la lucidatura laser e la rifusione laser, utilizzano raggi laser ad alta intensità come fonte di energia per ridefinire le caratteristiche superficiali dei materiali metallici AM. Tuttavia, questa tecnica è limitata alla lavorazione di superfici esterne e geometrie più semplici [48].

La lucidatura laser è un trattamento superficiale a base termica basato sulla fusione e risolidificazione di uno strato sottile di metallo sulla superficie utilizzando un raggio laser ad alta intensità senza rimozione di materiale, crepe o difetti superficiali (Figura 24). Il metodo di lucidatura laser dei metalli prevede l'irradiazione della superficie con un raggio laser che produce uno strato fuso che viene ridistribuito e quindi solidificato, determinando una superficie con rugosità ridotta [36]. Questi cambiamenti microstrutturali a loro volta

modificano alcune proprietà meccaniche [59] come ad esempio una migliore resistenza alla fatica [61]. E' una tecnologia emergente di post-processing adatta alla finitura superficiale, non a contatto e facilmente automatizzabile e si sta diffondendo sempre più nel campo della manifattura come valida

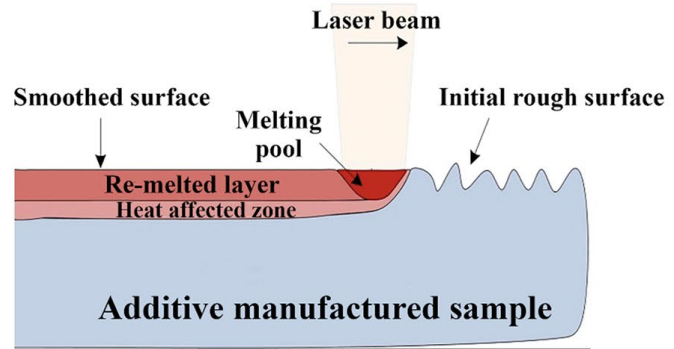


Figura 24. Schema di Lucidatura Laser [48].

alternativa alle tradizionali tecnologie per la finitura superficiale di componenti metallici ottenuti mediante processi additivi [63].

L'ostacolo principale nel processo di lucidatura laser è rappresentato dalla difficoltà di selezionare correttamente i vari parametri di finitura in ingresso al fine di ottenere buone risposte in uscita, come una bassa rugosità superficiale [63]. Parametri importanti nel processo sono la potenza del laser (la rugosità della superficie diminuisce con l'aumento della potenza del laser [60]), la velocità di scansione (una bassa velocità di scansione ha la maggiore influenza sulla riduzione della rugosità [62]) e la velocità di avanzamento assiale (minore velocità di avanzamento assiale diminuisce la rugosità della superficie [60]).

Questa tecnologia costituisce un nuovo approccio alla lucidatura delle superfici metalliche e presenta vantaggi rispetto, ad esempio, alla sabbiatura, burattatura, smerigliatura e lucidatura con mezzi elettrochimici, in quanto non si ha formazione di sottoprodotti. Inoltre, la lavorazione non prevede utensili che richiederebbero una continua sostituzione, che potrebbe anche causare la formazione di tracce o graffi sul materiale. La lavorazione avviene senza un effettivo contatto tra sorgente e prodotto e può contare su un buon livello di automazione, caratteristica che la rende ancora più appetibile per le applicazioni industriali [63]. I processi di lucidatura possono essere classificati come segue: macro-lucidatura e micro-lucidatura [64]. Nel processo di macro-lucidatura (Figura 25a) viene utilizzata una sorgente laser che eroga la potenza creando una massa di materiale fuso che, risolidificandosi, si distribuisce in maniera più omogenea, riducendo l'irregolarità della superficie iniziale. Nella superficie lavorata si possono distinguere due aree diverse: lo "strato rifuso", cioè la porzione di materiale che viene effettivamente fusa a causa dell'interazione con il fascio, e una zona termicamente alterata sottostante lo strato fuso, che è di fondamentale importanza poiché, a seconda del materiale sottoposto a lucidatura laser,



può subire trasformazioni di fase. Nel processo di micro-lucidatura (Figura 25b), invece, vengono utilizzate fonti di energia pulsata ed ogni singolo impulso laser colpisce la superficie del componente creando una piccola pozza di materiale fuso. Gli impulsi laser sono brevi e durano microsecondi o nanosecondi in modo da ottenere la fusione di una piccola porzione di materiale per volta.

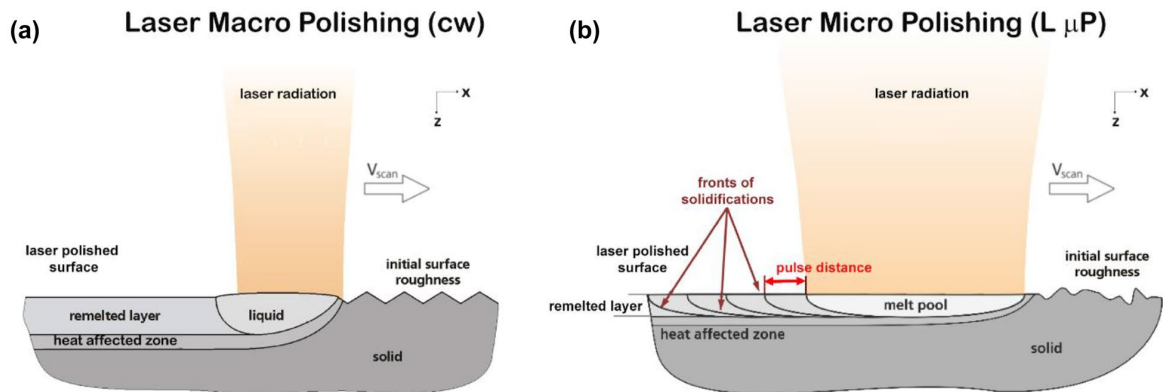


Figura 25. Confronto tra macro-lucidatura laser (a) e micro-lucidatura laser (b) [63].

La lucidatura laser è ampiamente utilizzata su componenti reali (non solo su parte di essi) e negli ultimi tempi si sta diffondendo in misura maggiore nei settori industriale e biomedico. In campo industriale il processo viene utilizzato sia con sorgenti continue che pulsate. Nella fabbricazione di utensili e stampi, le tecnologie di lucidatura laser possono essere utilizzate come dispositivo per il miglioramento di aree selezionate soggette a maggiore usura. Nel campo dell'ingegneria biomedica<sup>22</sup>, il laser viene utilizzato per la post-elaborazione di dispositivi biomedicali e strumenti chirurgici per ridurre difetti, creste superficiali e persino spigoli vivi che favorirebbero la contaminazione da batteri [63].

### 2.2.5 Altri metodi

Altri metodi di post elaborazione di tipo chimico per migliorare la qualità della superficie senza alcuna perdita dimensionale, sono la verniciatura, l'immersione chimica in una soluzione acquosa, ad esempio di acetone<sup>23</sup> per alcuni materiali, il rivestimento, e in modo particolare la galvanotecnica (processi realizzati per via elettrochimica), e la levigatura a vapore, che utilizza solventi chimici a vapore (ad esempio di acetone). Vari parametri influiscono sulla qualità della superficie, come la presenza di un'intercapedine d'aria, la larghezza del contorno, l'angolo e la larghezza del raster, lo spessore dello strato e la

<sup>22</sup> Il materiale più utilizzato in campo biomedico è il titanium, che, pur essendo molto difficile da tagliare, presenta un'elevata biocompatibilità.

<sup>23</sup> Propriamente detto dimetilchetone.

temperatura del modello [4]. La finitura chimica offre il vantaggio di agire sull'intera superficie, comprese le parti interne di superfici complesse, senza la necessità di utensili, e riduce efficacemente la rugosità delle superfici sia esterne che interne [36].

Applicando un rivestimento sulla superficie possono essere migliorate le caratteristiche superficiali delle strutture stampate in 3D ed è disponibile un'ampia varietà di tecniche di rivestimento (di tipo fisico, elettrochimico o di spruzzatura) a seconda delle applicazioni del prodotto finale, della fattibilità del processo di rivestimento sul substrato e/o sul materiale di rivestimento e sul costo del rivestimento. I rivestimenti con deposizione fisica possono essere depositi anche in fase di vapore, mentre esempi di rivestimento elettrochimico di metalli sono la placcatura elettrolitica e chimica e l'ossidazione elettrolitica al plasma (identificabili più specificamente come processi di coating) [48]. La tecnica di elettrodeposizione riduce lo strato metallico richiesto in soluzione chimica sul substrato e fornisce uno strato omogeneo di rivestimento che protegge da ossidazione, usura e corrosione [73]. La spruzzatura al plasma è il processo di spruzzo termico, che viene utilizzato per depositare i rivestimenti sui metalli in cui il plasma è generato da un flusso di gas che scorre ad alta velocità e i flussi di rivestimenti e substrati vengono miscelati per il rivestimento sulle superfici [74]. La lucidatura assistita al plasma, invece, è un metodo di rimozione del materiale che coinvolge le reazioni chimiche tra i campioni e i radicali presenti nel plasma [75]: la "Plasma Electrolytic Polishing" è un trattamento di finitura avanzato delle superfici che porta a una migliore rugosità superficiale per ottenere superfici lisce e lucide insieme a una migliore resistenza alla corrosione. Esso prevede l'applicazione di un'elevata tensione tra l'elettrolita acquoso e le parti, seguita dalla formazione di una struttura al plasma, con conseguenti reazioni al plasma ed elettrochimiche. [36].

La finitura superficiale mediante l'utilizzo di un metodo di fresatura CNC consente una lavorazione ad alta precisione su estremità con tolleranze ristrette; viene facilmente utilizzata per la finitura superficiale di geometrie più semplici [48] ma con la fresatura a 5 assi è possibile lavorare anche superfici complesse. L'uso della finitura CNC rappresenta vari vantaggi, come l'economicità del processo e la buona conoscenza dell'applicazione di questo metodo a pezzi con bassa complessità, ma l'applicazione di questo processo su sezioni complesse o con parti molto taglienti è ancora limitata a causa della mancanza di disponibilità e accessibilità di frese specifiche [48]. Inoltre, non è sempre semplice determinare i parametri di lavorazione corretti per acquisire sia la qualità che l'integrità della superficie [67]. L'accoppiamento della produzione AM con la lavorazione CNC mostra una

capacità di produzione più rapida perché la fase additiva della fabbricazione potrebbe essere gestita impiegando strati di materiale più spessi. Inoltre, l'accuratezza dimensionale delle parti diventa indipendente dalle imperfezioni originate dalla tecnologia additiva (ad es. distorsioni, ritiro) poiché è controllabile dopo la lavorazione. Ma nonostante il previsto aumento della velocità e della qualità complessiva della produzione, ulteriori lavorazioni CNC possono contribuire a un notevole aumento del costo dei macchinari di produzione e questo può essere tollerabile per le applicazioni di livello industriale, ma potrebbe non esserlo per i lavori in cui le normali stampanti 3D diventano sufficienti. Inoltre, il retrofitting di una macchina utensile sottrattiva esistente può fornire una facile via d'uscita per l'ibridazione della tecnologia di estrusione dei materiali [51].

Per alcune tipologie di materiale è stato sviluppato il concetto lucidatura a getto di aria calda, ovvero applicare un getto di aria calda durante la lavorazione. Il metodo basato sul principio della fusione locale comporta un fenomeno di sinterizzazione: le particelle di polimero fuso si uniscono e poi si addensano nel tempo, chiudendo la regione del vuoto mediante la ridistribuzione dei picchi sulle valli vicine (in modo analogo a quanto accade per la lucidatura laser). Questo permette un ripristino accelerato della superficie grazie a forze di flusso extra, costi inferiori, efficienza energetica e maggiore sicurezza (è meno rischioso avere a che fare con un getto di aria calda che con una sorgente laser). Per prevenire eventuali difetti di ondulazione e vaiolatura, tuttavia, diventa critica la regolazione ottimale della velocità del getto d'aria, della temperatura dell'aria, della velocità di traslazione dell'ugello e della sua distanza relativa dallo strato lavorato [51].

Nella lucidatura a rullo il principio fondamentale è sfruttare le sollecitazioni di contatto generate da strumenti più duri premeuti contro l'oggetto 3D, ovvero la deformazione plastica dei picchi superficiali. Essa presenta una sfida significativa sulla stabilità delle parti a causa della propagazione di potenziali micro-cricche nei pezzi fragili [51].

I metodi hanno competenze integrate per ottenere una diminuzione della rugosità superficiale fino a pochi nanometri: particelle abrasive di dimensioni e forme variabili vengono mescolate con particelle di ferro e questa miscela viene utilizzata come mezzo di lucidatura. Per ottenere maggiore efficienza e precisione nella lavorazione di materiali metallici duri, è stato proposto un metodo ibrido di finitura a base magnetica di tipo elettrochimico [68]. Una delle tecniche più importanti per creare un metodo di produzione efficace e scalabile è l'ibridazione, che combina due strumenti o fonti di energia diverse per creare un unico sistema [4], come ad esempio la lucidatura a flusso abrasivo chimico in cui

le particelle non saldate sulle superfici interne del pezzo potrebbero essere completamente rimosse permettendo di ottenere una rugosità della superficie significativamente migliorata [36]. Altri esempi sono la pressatura isostatica a caldo, un metodo di post-trattamento ibrido di uso frequente che sottopone le strutture a temperature elevate e simultaneamente alla pressione del gas isostatico [36], o un metodo ibrido costituito da attacco chimico e rivestimento al plasma [76].

## CAPITOLO 3. BURATTATURA

### 3.1 Introduzione

La burattatura è la più antica delle lavorazioni di finitura di massa<sup>24</sup>: ritrovamenti storici dimostrano che le prime forme di burattatura erano già in uso presso gli antichi cinesi e romani, così come ai tempi delle popolazioni europee medievali [93].

La burattatura, o vibrofinitura, è una lavorazione meccanica di finitura superficiale per lavorare un metallo affinché assuma un aspetto diverso grazie alla rimozione dei residui di substrato creatisi durante la produzione (ad esempio un processo di fusione o di stampaggio). Nei metalli, in particolare, viene utilizzata per brunire, sbavare, pulire (rimuovere grasso e sporcizia dai componenti dopo la lavorazione), opacizzare, disincrostare, rimuovere la ruggine, lucidare, brillantare, indurire la superficie, preparare i pezzi per un'ulteriore rifinitura [80] o talvolta per ridurre leggermente le dimensioni o il raggio [95]. Inoltre l'ossido che si crea nello spessore di taglio viene asportato rendendo così le successive fasi di lavorazione meccanica, di saldatura e di verniciatura molto più semplici da eseguire [81].

La burattatura esegue la lavorazione attraverso il buratto<sup>25</sup> (Figura 26), costituito da un basamento e da un motore elettrico che pone in movimento una vasca che viene fatta ruotare su un asse. I pezzi da lavorare una volta caricati nella vasca, durante la rotazione di quest'ultima rotolano, scivolano, si urtano, rimuovendo mutuamente le nervature e producendo così ottime finiture superficiali.

Normalmente, ai pezzi da lavorare si aggiungono altri materiali, che fungono da abrasivi e lubrificanti.

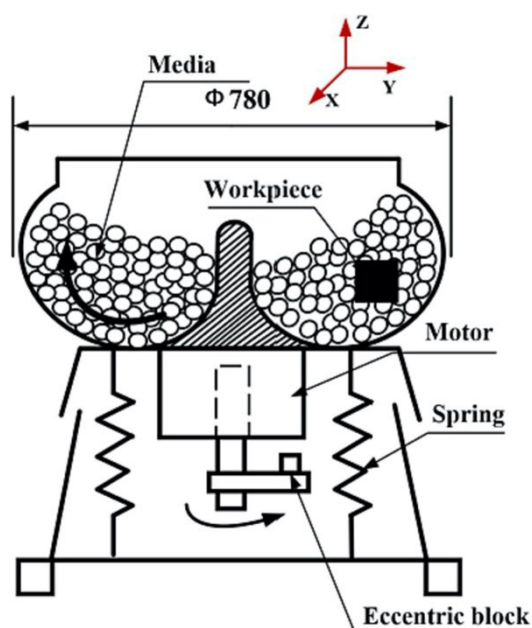


Figura 26. Schema di buratto [100].

<sup>24</sup> Il termine finitura di massa indica un insieme di processi industriali di natura abrasiva, il cui scopo consiste nel migliorare la finitura superficiale di quei pezzi che, per le loro ridotte dimensioni e per il loro grande numero, sarebbe difficile e non economico rettificare.

<sup>25</sup> Anticamente, con il termine buratto si indicava il macchinario utilizzato per separare la farina dalla crusca: un setaccio di forma cilindrica, inserito all'interno di un contenitore più grande, che veniva ruotato ed agitato per filtrare la farina. I buratti che si utilizzano oggi non prevedono il setaccio, ma si basano comunque sugli effetti di rotazione, vibrazione e frizione tra un oggetto e dei materiali abrasivi.

Gli abrasivi, detti media (Figura 27), possono essere di origine naturale (segatura, pietra, ...) o artificiale (sfere di acciaio, smeriglio, cunei, di materie plastiche), mentre i lubrificanti sono solitamente acqua ed opportuni prodotti chimici (compound o composto).



Figura 27. Esempi di media di granulometrie differenti in forma e dimensioni [93].

Per la burattatura occorre quindi un buratto, con un motore, un sistema di vibrazione, un sistema di fluidi e una camera chiusa (isolata dal resto della macchina e lasciata libera di vibrare mediante molle), e altri componenti quali abrasivi, acqua e additivi [97]. L'abrasivo è il materiale che viene caricato nella camera ed esegue il lavoro sulle parti inserite ed è disponibile in diverse forme, dimensioni e materiali.

Il composto viene fatto circolare nella camera attraverso il sistema fluido a sua volta costituito da una pompa, un serbatoio, tubazioni e un sistema di erogazione. Il composto può essere nebulizzato sul media e sulle parti o fatto gocciolare (ogni sistema ha una diversa forma di erogazione del fluido). Il sistema di vibrazione di queste macchine ha tipicamente un motore collegato ad un albero con masse eccentriche (Figura 28). Questo albero con pesi eccentrici è fissato fisicamente alla camera isolata mediante cuscinetti e provoca la vibrazione dei sistemi [101].

La burattatura è particolarmente indicata nei casi in cui vi sia da lavorare un numero elevato di pezzi di piccole dimensioni e siccome tutti i pezzi subiscono lo stesso trattamento, permette anche di rintracciare eventuali difetti o imprecisioni di produzione. Per le sue peculiarità si può considerare un processo sostenibile ed economico: possono essere lavorati una grande quantità di pezzi con poco o nessun controllo da parte dell'operatore e il tempo è anche relativamente breve (un ciclo completo medio va da 6 a 24 ore, con il buratto che gira a 20-38 RPM) [80]. Pur essendo una tecnica di finitura solitamente utilizzata su parti relativamente piccole, alcuni dei buratti più grandi sono in grado di rifinire parti di dimensioni maggiori (ad esempio 400x120x120 mm o 200x200x200 mm) [78].



Figura 28. Gruppo albero completo con cuscinetti e masse eccentriche [101].

In alcuni casi i pezzi vengono anche immersi in un liquido protettivo per prevenire eventuali futuri attacchi dell'atmosfera al materiale [80]. Un vibratore fa ruotare la vasca, e il materiale

al suo interno si solleva fino a quando la gravità fa sì che il livello più frani verso l'altro lato: in questo modo comincia il processo della burattatura e l'elemento rifinitore (ad esempio dei sassi) erode le parti e le leviga progressivamente.

Analizzando il movimento della carica all'interno della vasca rotante occorre considerare che è difficile prevedere il comportamento di un fluido granulare in quanto dipende fortemente dalle caratteristiche geometriche e fisiche del fluido granulare stesso.

In particolare i principali parametri che ne influenzano il comportamento sono:

- forma e dimensione degli elementi solidi;
- intensità delle forze di attrito tra gli elementi;
- quantità e tipo di fluido eventualmente presente nella massa granulare;

L'ampio range entro cui possono variare tali parametri determina notevoli differenze nei comportamenti da un fluido granulare all'altro: si possono avere situazioni con moti simili a quelli di corpi solidi o moti caratteristici di fluidi più o meno viscosi.

Facendo ruotare a basse velocità una vasca riempita per metà di materiale granulare si nota come il materiale tenda a rimanere compatto e solidale alla parete interna, salendo fino ad una certa quota per poi scivolare verso il basso su di un piano inclinato rispetto all'orizzontale di un angolo detto angolo di movimento: in corrispondenza di tale angolo le forze di attrito e di inerzia non sono più in grado di prevalere sulla componente nella direzione del moto della forza peso. Quando si ferma bruscamente la vasca in rotazione la carica al suo interno si dispone secondo una configurazione in cui la sua superficie libera risulta essere inclinata dell'angolo di riposo<sup>26</sup> [93].

I possibili moti all'interno dei barili rotanti sono (Figura 29):

- Slipping: le particelle si dispongono in una configurazione stabile con piccolo angolo di riposo determinabile con sufficiente precisione. Date le velocità relative tra gli elementi molto basse, questo moto non è adatto ad essere utilizzato in lavorazioni di finitura in quanto richiederebbe cicli di lavorazione estremamente lunghi.
- Slumping: il moto è caratterizzato dal susseguirsi di configurazioni con angolo di movimento e angolo di riposo. La superficie libera ha quindi delle oscillazioni di ampiezza pari all'angolo di rilassamento. Anche in questo moto i gradienti di

---

<sup>26</sup> La differenza tra l'angolo di movimento e l'angolo di riposo è indicato con  $\delta$  e prende il nome di angolo di rilassamento.

velocità sono troppo bassi perché si possa avere sufficiente azione abrasiva in tempi contenuti.

- **Rolling:** è il moto più efficace, ed è caratterizzato da una disposizione più o meno stabile con movimentazione continua dello strato strisciante superiormente (anche detto strato attivo in quanto è stato dimostrato essere responsabile dell'intera azione abrasiva).
- **Cascading:** ha caratteristiche simili al precedente con la differenza che lo strato attivo si dispone secondo una superficie curva (ad S) anziché secondo un piano.
- **Cataracting:** la coesione tra le particelle non è più in grado di dominare le forze centrifughe, di conseguenza le particelle vengono proiettate in moto libero parabolico e la presenza di numerosi urti tra i pezzi ed i media preclude la possibilità di ottenere buoni livelli di finitura superficiale, e di conseguenza è da evitare nella burattatura.
- **Centrifuging:** i corpi del fluido granulare costituente la carica sono costantemente solidali alla vasca ed aderenti alle sue pareti interne. Si hanno velocità relative quasi nulle, quindi pochissimo strisciamento tra media e pezzi, da cui deriva che l'asportazione di materiale è quasi inesistente [94].

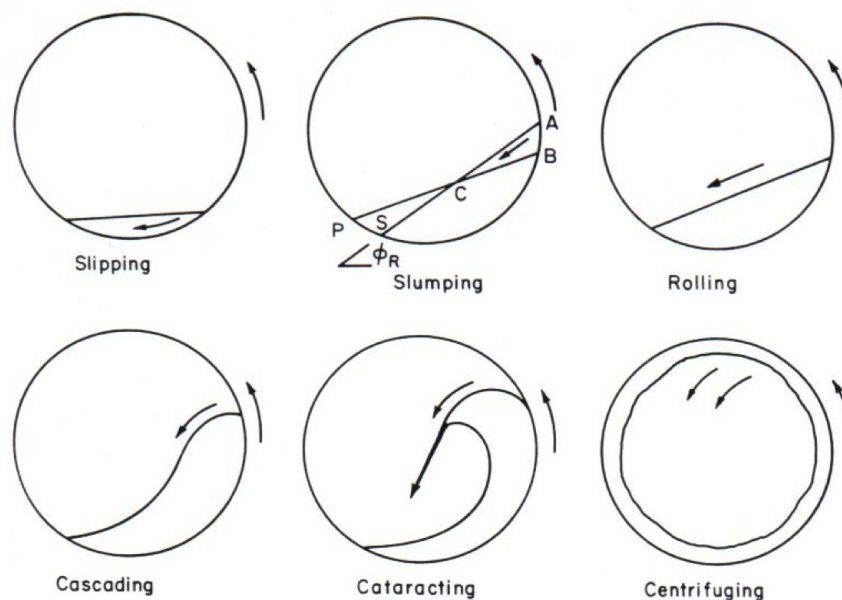


Figura 29. Moti possibili all'interno della vasca.

Il moto di rolling è quello che ha le caratteristiche che meglio si prestano alla lavorazione di burattatura, in quanto è contenuto tra il limite inferiore legato al tempo di lavorazione e



quello superiore imposto dalla presenza di urti (o al più può essere utilizzato il moto di cascading, in quanto non presenta eccessivi urti) [93].

Il buratto può essere semplice, oppure provvisto di pale che corrono lungo l'interno e che, girando, catturano le parti in caduta. Alcuni sono provvisti anche di un sistema di filtrazione per consentire la separazione delle parti o altro materiale nel cilindro [78].

Il rivestimento interno del tamburo è solitamente realizzato in gomma antiusura ed è rivestito da pannelli fonoassorbenti in modo da abbattere il rumore che si genera durante il ciclo di pulizia (soprattutto l'operazione di finitura a secco può generare rumore significativo [95]). Sempre in ambito di sicurezza sul luogo di lavoro, il buratto oltre che abbattere naturalmente l'inquinamento ambientale che la molatura manuale crea nell'ambiente di lavoro, possiede a bordo macchina un impianto di abbattimento polveri che ha spesso anche la caratteristica di poter essere impiegato come aspiratore mobile [81].

Il processo può essere più o meno modificato a seconda dell'eventuale presenza di detergenti, lubrificanti, acqua o altri strumenti: possono infatti essere sfruttati anche dei processi a umido, che comportano l'aggiunta di un composto chimico (un sapone o un lubrificante per burattatura) che serve a facilitare il processo di finitura, a pulire le parti e a prevenire la comparsa della ruggine [81]. Quindi la burattatura può essere:

- a umido: la vibrofinitura è l'azione prodotta dal movimento relativo fra differenti elementi di una massa (pezzi alla rinfusa da trattare) e da una soluzione liquida di un prodotto chimico che permette di attutire i colpi e ottenere una finitura migliore. L'energia per il movimento relativo viene fornita da un impianto o una macchina. A differenza della burattatura a secco, che viene utilizzata per ogni fase, quella a umido viene utilizzata soprattutto per la rimozione del materiale in eccesso ed è mediamente più costosa;
- a secco: utilizzata su particolari talvolta in sostituzione della pulitura manuale. Il processo avviene per rotolamento dei pezzi in un buratto con materiale abrasivo ed è particolarmente adatto per dare una finitura superficiale ad un numero elevato di pezzi, di svariate dimensioni. L'abrasivo secco però può essere inglobare sporcizia, oli e ossidi metallici dopo diversi cicli, il che riduce le prestazioni del processo di finitura e contamina la parte: siccome i media asciutti si usano dopo diversi lotti di finitura, è necessario installare un collettore di polvere o particelle;
- chimica: la vibrolucidatura dei metalli è un particolare processo di finitura con risultato paragonabile alla "lucidatura a specchio", particolarmente adatta a

minuteria, o materiale di varie dimensioni. L'effetto è ottenuto attraverso una vibrazione lieve a contatto con materiale abrasivo morbido e di diverse dimensioni, congiuntamente all'utilizzo di alcuni additivi chimici specifici [79].

Nella burattatura a umido le vasche sono solitamente orizzontali o oblique e di forma ottagonale o esagonale. Sebbene quella obliqua sia più facile da caricare e scaricare, quella orizzontale è preferita per la sua maggiore capacità e la migliore azione di rotolamento. In entrambi i casi sono realizzati in acciaio, spesso con rivestimenti in legno, gomma, neoprene, uretano, PVC o vinile. Il rivestimento attutisce l'impatto delle parti rullanti contro il buratto stesso, prolungandone così la vita. Le velocità del buratto orizzontale varia da 20 a 38 giri/min, a seconda delle dimensioni dello strumento e degli oggetti da lavorare. Dopo che la vasca è stata riempita fino a circa metà della sua capacità con parti e abrasivo, viene aggiunta l'acqua in modo che resti al di sotto del livello del carico di 8-12 cm: minore è il livello dell'acqua, più veloce è il taglio ma maggiore è l'acqua utilizzata e più fine sarà la finitura. Per la lucidatura invece l'acqua dovrebbe essere all'incirca a livello del carico [83]. Dopo la lavorazione, le parti e la vasca devono essere risciacquate accuratamente con acqua dolce, poi le parti vengono rimosse e asciugate (con rotolamento in graniglia di pannocchia di mais, o tramite lampade riscaldanti o con centrifugare a secco). Il risciacquo degli abrasivi dopo l'utilizzo può prevenire la contaminazione o risultati indesiderati in caso di riutilizzo [83]. Esistono in commercio buratti altamente automatizzati per fornire un migliore controllo del processo di finitura e anche dotati di una funzione di asciugatura [95].

I processi ad umido utilizzano elementi abrasivi in poliestere, ureico, ceramici e porcellana con paste o detersivi specifici da mettere nell'acqua: migliore è la preparazione dei componenti più alta è la qualità finale dei prodotti e più semplici sono le successive fasi di rifinitura. In questi processi macchine e materiali sono più costosi, e occorre considerare anche che l'acqua va depurata ed è bene utilizzare sistemi di depurazione per il recupero dell'acqua e lo smaltimento dei fanghi (la vibrofinitura a umido genera rifiuti dalle sostanze chimiche speciali esauste che devono essere opportunamente trattate).

La maggior parte dei metodi di finitura utilizza acqua per lubrificare e portare via i residui di taglio, in quanto senza acqua, i pezzi potrebbero graffiarsi e annerirsi, ma vi sono casi in cui l'acqua può essere un ostacolo, come durante la lavorazione di parti sottili e piatte (a causa della tensione superficiale dell'acqua) o quando si cerca di lucidare o levigare una parte in plastica (che può assorbire l'acqua e diventare troppo morbido per resistere a graffi o deformazioni): anche per queste ragioni si utilizza la burattatura a secco. In quest'ultima

viene utilizzato quasi esclusivamente la vasca ottagonale orizzontale (in media 30" di diametro per 36" o 42" di lunghezza), talvolta con un rivestimento in legno duro che può essere sostituito quando necessario. Per comodità queste vasche possono essere divise in due scomparti in modo che una sia sopra l'altra, sebbene entrambe posizionate nello stesso telaio, in modo da risparmiare spazio. La velocità del buratto nella burattatura a secco è generalmente mantenuta tra 28 e 32 giri/min [83].

Piccole parti in alluminio a volte vengono lavorate con pomice e pioli di legno duro, segatura di legno duro o gusci di noce frantumati, per rimuovere le sbavature e migliorare la finitura, ma questo metodo è relativamente inefficiente rispetto al processo a umido, che è più ampiamente utilizzato [87]. Le leghe di alluminio possono essere rifinite con la burattatura a umido con le stesse limitazioni imposte dalle dimensioni e dalla forma del pezzo di acciaio e altri metalli, ma la finitura a umido delle parti in alluminio potrebbe essere più critica rispetto alla lavorazione di parti simili in acciaio in quanto esiste il pericolo di contaminazione della superficie da parte di metalli ferrosi, causata dall'uso di un cilindro o di un mezzo in acciaio, il pH dei composti è più critico durante la lavorazione dell'alluminio, poiché il metallo è suscettibile all'incisione sia da parte di acidi che di alcali, e il gas generato durante l'attacco chimico può aumentare la pressione e causare incidenti. Per questa ragione è importante la ventilazione durante la lavorazione dell'alluminio e conviene utilizzare composti quasi neutri, con un pH di circa 8 (anche se alcune leghe possano essere lavorate in modo sicuro anche con composti con un pH fino a 9). I barili utilizzati per l'alluminio sono sostanzialmente gli stessi utilizzati per la lavorazione dell'acciaio ma i fusti in acciaio o ghisa devono essere rivestiti con gomma o materiale simile (per evitare la contaminazione). Una buona pratica è quella di utilizzare barili specifici esclusivamente per la lavorazione dell'alluminio [87].

Si possono individuare tre tipologie di macchine per la burattatura [82]:

- buratto a rotazione: funziona tramite rotazione del cilindro e prevede l'utilizzo di abrasivi come pezzetti di legno o di ceramica, oppure paste o polveri abrasive. E' una macchina dai bassi costi, semplice da usare, che non richiede supervisione durante il lavoro, non crea molto rumore, ma impiega molto tempo per un ciclo e una maggiore quantità di abrasivo. Questo tipo di buratto è adatto a tutti i materiali, ma avendo un'azione più incisiva sulla materia prima, tende a smussare e arrotondare le forme.

- buratto a vibrazione: prevede l'inserimento di acqua insieme ai materiali abrasivi e il movimento meccanico è di vibrazione. E' più veloce, utilizza meno materiali abrasivi, funziona meglio su materie prime più delicate perché tende a mantenere la forma originale dell'oggetto ma richiede maggiore esperienza e supervisione durante le operazioni ed è anche più costoso.
- buratto magnetico: funziona comunque a rotazione, ma un magnete attiva la rotazione di piccoli aghi in metallo che vengono inseriti nella vasca di burattatura, senza l'aggiunta di ulteriori materiali abrasivi. E' veloce, ha una buona capacità di rifinire ottimamente oggetti dalle superfici complesse, con fessure, solchi e trame intricate (i gioielli, ad esempio) ma non è adatto per superfici piate.

Tipicamente, la vasca poggia su robuste molle per sostenerla durante il movimento [95], e ha il motore sul lato inferiore (Figura 30). Il processo di vibrofinitura coinvolge la cinematica



*Figura 30. Buratto modello Rollwasch SMD-25-R con molle ben visibili.*

di base: movimento degli oggetti e dei componenti del sistema. La vasca ha una dimensione variabile da pochi decimetri a oltre 1 metro, a seconda dell'applicazione. Esistono ormai sistemi di vibrofinitura con capacità oltre 5m<sup>3</sup>, in grado di movimentare componenti molto grandi e pesanti e quindi utilizzati in vari settori per la finitura superficiale di grandi parti [97].

La quantità e l'impostazione dei pesi di sbilanciamento sul motovibratore controllano il moto vibratorio caratteristico, e premendo un apposito pulsante è possibile modificare la direzione di rotazione del motore consentendo la miscelazione degli abrasivi.

La burattatura è comunemente usata in molti settori come quello aerospaziale, impianti ortopedici, armi da fuoco, industria petrolifera e trasporti, e in generale per la componentistica metallica derivata da taglio laser, fototranciatura, tranciatura, fresatura oppure per le parti iniettate a caldo, i prodotti in nylon, fibra di carbonio e per tutti quei materiali che hanno una durezza maggiore rispetto all'acetato.

### **3.2 Principali parametri**

La burattatura è caratterizzata da parametri di processo di natura empirica che sono stati acquisiti negli anni grazie all'esperienza. In alcuni casi la scarsa conoscenza che si ha del

processo e la necessità di procedere per via empirica nella determinazione dei parametri di lavorazione ne sconsigliano l'utilizzo: spesso infatti la scelta delle opportune condizioni operative che consentano di ottenere nella maniera migliore e più conveniente le specifiche desiderate, richiede lo svolgimento di numerose prove preliminari e ciò implica perdite di tempo e di denaro, e quindi un ostacolo alla diffusione del processo di burattatura [93].

La burattatura ha una **durata** variabile, che cambia a seconda della qualità delle imperfezioni e del tipo di materiale. Più è veloce l'azione del buratto, più è rapida la lavorazione, ma la dinamica del processo dipende dalla quantità di pezzi, dalla dimensione della macchina e dalla dimensione dei pezzi stessi [78]. In base alle necessità tecniche ed economiche è possibile scegliere un buratto con pareti dritte o curve, con o senza separatore e con o senza insonorizzazione [85].

Durante la fase di progettazione occorre considerare che questa lavorazione provoca lievissime variazioni dimensionali, agendo sulla superficie del pezzo: generalmente tra i 2 e i 20  $\mu\text{m}$  [80]. L'**altezza del carico** (parti e abrasivo) all'interno del buratto non deve essere inferiore al 45% o superiore al 60% della sua capacità: altezze di carico comprese tra il 40% e il 45% producono più azione ma una finitura peggiore e l'altezza di carico ottimale risulta essere del 50%. L'aumento dell'altezza del carico può essere utilizzato per ammorbidire l'azione abrasiva e abbassando l'altezza si può velocizzare il taglio ma ottenere una finitura più ruvida. Tuttavia, a volte è possibile far rotolare parti molto grandi se la canna è sovraccaricata fino all'80% con materiale aggiuntivo e viene fatto funzionare a una velocità inferiore [83].

Il **numero di giri** è molto importante: velocità troppo basse potrebbero non creare sufficiente attrito tra le parti, ma sono più sicure per parti grandi o delicate, mentre velocità troppo alte diminuiscono i tempi di lavorazione ma a scapito della qualità della finitura. La velocità del motore è controllabile: buoni risultati si ottengono solitamente a 28-30 rpm, ma tale valore può cambiare a seconda del lavoro da eseguire e delle dimensioni dei pezzi e del tamburo [95]. La velocità ottimale dipende anche dalla fase e dal tipo di lavorazione: quando si sbavano parti, sarebbe meglio iniziare con un basso numero di giri per tagliare la bava e solo successivamente il numero di giri può essere aumentato. Per la lucidatura è invece possibile utilizzare già da subito un numero di giri più elevato. Se i barili sono più piccoli occorre utilizzare velocità più elevate per eguagliare la stessa superficie di contatto al minuto dei barili più grandi. Velocità più elevate potrebbero superare la forza di gravità e interrompere la zona di scorrimento uniforme all'interno del cilindro, causando urti, vaiolature o danni

alle parti in lavorazione: invece di rotolare, le parti potrebbero sollevarsi e venire colpite subendo danni da impatto. Se la finitura superficiale del pezzo non è fondamentale ed è più importante avere tempi di ciclo più brevi, questo può essere un processo accettabile, ma non è comunque un buon uso dell'attrezzatura in quanto l'uso continuativo a un numero di giri elevato riduce la durata dell'abrasivo rompendolo più rapidamente, o potrebbe danneggiare le pareti interne o il rivestimento della camera di lavoro. L'efficienza del sistema dipende anche dalla capacità delle parti di scivolare su se stesse: se la velocità è troppo elevata, le parti potrebbero sollevarsi in aria causando danni alle parti o l'inefficienza della burattatura. Quando è importante lavorare a velocità elevate, si dovrebbe utilizzare una maggiore quantità di acqua e composto chimico per dare più coesione alla massa: questo ammorbidirà o attutirà anche l'impatto o l'effetto martellante dell'abrasivo sulle parti [83]. Un maggiore **tempo** di rifinitura diminuisce la rugosità superficiale Ra; il tempo di lavorazione delle parti metalliche in buratto può essere di una notte, come di meno di un'ora se si utilizza una macchina ad alta potenza.

Le parti in plastica, come i bottoni e le montature degli occhiali in plastica, sono solitamente gestite con pioli di legno o talvolta graniglia di pannocchia di mais extra grande. Se si concede tempo e un'attenta manipolazione, le parti in plastica possono essere lucidate fino a ottenere una finitura che si avvicina alla lucidatura a mano ma poiché il supporto è relativamente leggero, sono necessarie dalle 10 alle 15 ore per ottenere risultati soddisfacenti. Nonostante una montatura per occhiali in plastica debba passare attraverso tre o quattro passaggi (progressivamente più fini) e potrebbe essere necessario un giorno per ogni passaggio, rispetto alla lucidatura a mano, la finitura di massa è comunque più economica [83].

L'**ampiezza**, entità massima della vibrazione, varia tra 0 a 8 mm [95].

Anche il **numero di parti lavorate** in contemporanea è un parametro importante, che dipende a sua volta dalla dimensione della vasca, dalle dimensioni, dalla fragilità, dalla forma e dal peso dei pezzi, e dal risultato finale desiderato. La quantità di parti che possono essere inserite nel buratto in relazione alla quantità di abrasivo è un compromesso tra economia e finitura: per ottenere buone superfici devono esserci poche parti, ma in questo caso l'asportazione sarà più lenta. Quindi meno parti sono lavorate, migliore è la finitura ma più parti si lavorano in contemporanea più la burattatura è economica [83].

Alcuni esperimenti hanno mostrato che si hanno forze di contatto più elevate con pezzi sferici (superficie convessa) indipendentemente dal tipo di abrasivo mentre con pezzi a

forma di parallelepipedo le forze di contatto sul bordo sono maggiori che sulla superficie. La dimensione del mezzo abrasivo, seguita dalla velocità di rotazione del motore, ha mostrato la massima influenza sulla rimozione del materiale. Per la rugosità non si è determinata una chiara dipendenza dei parametri di input della macchina, e quindi vanno presi in considerazione altri fattori di influenza, come la specifica del **mezzo abrasivo** per quanto riguarda la loro forma e composizione (tipo di legante, materiale della grana e dimensione della grana) [96].

Un'altra prova ha mostrato, ad esempio che il numero di impatti effettivi sulla superficie anteriore del pezzo nel caso di abrasivo in resina a forma di piramide triangolare è significativamente più piccolo rispetto a un abrasivo sferico di corindone o quadrangolare di SiC, mentre la forza di contatto media della piramide triangolare in resina è maggiore, seguita dal mezzo sferico di corindone e dal mezzo quadrangolare di SiC [100].

In altri casi è stato esaminato l'impatto di dimensione del supporto, grado di lubrificazione e durata della vibrofinitura concludendo che i cambiamenti di durezza e rugosità dipendono principalmente dalle **condizioni di lubrificazione**, dalla **rugosità e dimensioni dell'abrasivo**, poiché questi influenzano l'interazione tra il mezzo e il pezzo e quindi l'entità della deformazione plastica della superficie per impatto [98].

La **profondità d'immersione** nel mezzo di sgrossatura (valore impostabile) influenza il risultato in quanto più pesante è l'abrasivo, maggiore è la pressione statica e quindi più forte è la smussatura degli spigoli o l'azione di lisciatura. Vengono raggiunti risultati differenti anche in base al fatto che l'utensile ruoti in senso orario o antiorario [92].

La burattatura è un sistema economico ma trova dei limiti naturali nella sua lentezza operativa e nell'essere un processo non ispezionabile e non automatizzabile [93].

### 3.3 Possibili abrasivi

L'abrasivo per burattatura è in genere preformato e viene utilizzato per rimuovere materiale indesiderato da una superficie o creare una finitura con valori Ra molto bassi e uniformi. Gli oggetti devono entrare in contatto e in frizione con del materiale abrasivo che possa portare via le impurità, senza danneggiare l'oggetto. Nella burattatura si utilizzano abrasivi come legnetti, ceramiche, sfere metalliche, schegge di granito, acciaio, sabbia, sassi, e diverse tipologie di paste o polveri abrasive che vanno aggiunte nel cilindro per agevolare ulteriormente il processo [81, 82]. Questi possono avere diverse forme in base al materiale di cui sono composti e il risultato che si vuole ottenere (Figura 31).

La scelta dei materiali abrasivi non dipende solo dal tipo di materiale da lavorare, ma anche dalla fase del processo di burattatura: solitamente si parte con un ciclo di sgrossatura, per eliminare i difetti più marcati, per poi passare alla levigatura e infine alla lucidatura. Per questo si trovano paste e abrasivi più adatti per la sgrossatura e altri ideali per dare maggiore brillantezza.



Figura 31. Tre esempi di media utilizzati: SiC a forma quadrangolare di lunghezza 6 mm (a), resina triangolare di 12 mm di lunghezza (b), corindone sferico di 12 mm di diametro (c).

Normalmente si utilizza abrasivo in un rapporto di tre a uno di volume rispetto ai pezzi da lavorare, ma una proporzione più elevata di abrasivo può proteggere parti grandi o fragili (normalmente si usa 3:1 per acciaio e 5:1 per magnesio o alluminio) [95] (Tabella 1).

| <b>Rapporto abrasivo/parti</b> | <b>Tipica applicazione e note</b>                                 |
|--------------------------------|---|
| 0:1                            | Nessun abrasivo. Utilizzato per eliminare le sbavature            |
| 1:1                            | Si ottiene superficie ancora ruvida e rischio di danni            |
| 2:1                            | Migliore separazione ma ancora rischio di danneggiare i pezzi     |
| 3:1                            | Minimo rapporto per parti non ferrose, discreto per parti ferrose |
| 4:1                            | Valore medio per parti non ferrose, buono per parti ferrose       |
| 5:1                            | Valore buono per parti non ferrose, contatto minimo tra le parti  |
| 8:1                            | Per finiture di qualità superiore                                 |
| 10:1                           | Alta qualità anche con parti molto irregolari, sagomate e fragili |

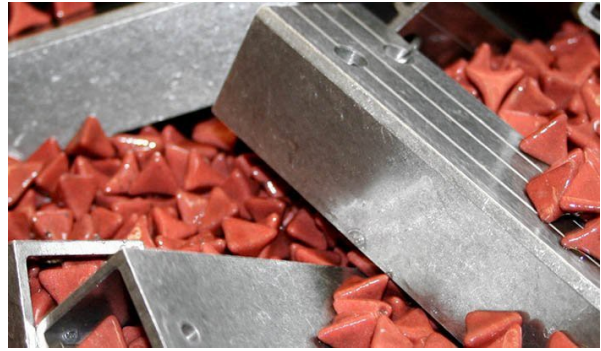
Tabella 1. Tabella che mostra il rapporto abrasivo/parti consigliato in base all'applicazione [85].

Le dimensioni e il tipo di abrasivo dipendono dal materiale, dalle dimensioni e dalla complessità della parte: dovrebbe essere abbastanza piccolo da passare liberamente attraverso fori e rientranze (Figura 32), ma abbastanza grande da non bloccarsi. Inoltre con un abrasivo più grande si ha un taglio più veloce, ma con uno più piccolo il taglio sarà più



fine [83]. Solitamente le dimensioni dei supporti sono notevolmente inferiori rispetto ai pezzi per facilitare la separazione.

La forma dell'abrasivo, la dimensione e la composizione svolgono tutte un ruolo importante nella scelta della soluzione più adatta. Per quanto riguarda la forma, coni, piramidi e abrasivi spigolosi sono i migliori



*Figura 32. Il media è sufficientemente piccolo da passare attraverso i fori senza rischiare di bloccarsi [85].*

per raggiungere le aree “nascoste”, ma l'uso di media che non siano della dimensione/composizione corretta potrebbe portare a rotture e alloggiamenti in quelle aree. I media cilindrici sono adatti per il passaggio attraverso i fori ma una dimensione errata può portare nuovamente all'alloggiamento nei fori o all'eccessiva usura precoce dell'abrasivo. Quelli rotondi e di forma ovale hanno come vantaggio quello di non depositarsi, ma non sono in grado di raggiungere aree più strette.

Per quanto riguarda la dimensione, occorre considerare che normalmente le parti più grandi richiedono abrasivi più grandi, che forniscono un taglio rapido e una superficie più liscia alle parti più grandi, ma possono danneggiare le parti più piccole e fragili [86].

Inizialmente si utilizzava sabbia con pietre lisce: la sabbia aiuta il taglio, e aiuta nel trasporto dei residui in modo da evitare di avere il residuo incorporato nella superficie delle parti. Un materiale organico come la **graniglia di pannocchia di mais** o la **graniglia di guscio di noce** (Figura 33) è più assorbente della sabbia, quindi trasporta più sporco e oli. Sono comuni gli abrasivi misti di sassi, **pietre** di fiume e pezzi di piastrelle. Le materie plastiche richiedono un supporto morbido, come i **pioli di legno** (Figura 34) per evitare danni, che però tagliano meno.



*Figura 34. Graniglia di guscio di noce [85].*



*Figura 33. Media in legno [83].*

L'aggiunta di graniglia di pannocchia di mais trattata con **pomice** (silice, prodotto di cenere vulcanica) velocizza notevolmente il taglio: essendo un cristallo friabile e molto tagliente, si frantuma in cristalli taglienti più piccoli anche sotto il leggero carico di media in legno. I pioli di legno vengono solitamente utilizzati nella burattatura a secco, ma se la finitura non è importante è possibile utilizzare abrasivi più grossolani (come guscio di noce o graniglia di pannocchia di mais) per un'azione di taglio più rapida.

Finiture particolarmente buone possono essere ottenute utilizzando pioli di legno o gusci di noce trattati con una cera<sup>27</sup> e un abrasivo (della dimensione massima di 1  $\mu\text{m}$ ).

L'**ossido di alluminio**, economico e di lunga durata, viene utilizzato per la sbavatura e la levigatura, dove la forma e le dimensioni irregolari non sono importanti.

La **plastica** preformata (Figura 35), che ha un impatto quasi nullo sulle parti, è leggera e resistente, eccellente per lucidare, sbavare, brunire e pulire metalli più morbidi come alluminio, zinco e ottone. Sono comunemente realizzati con polimeri a base di poliestere, urea e formaldeide. Essendo meno densi rispetto ai fluidi in ceramica e acciaio, possono eseguire la vibrofinitura in modo sicuro su parti filettate e fragili. Ne esistono diverse formulazioni in base al risultato desiderato e il materiale trattato:



Figura 35. Media in plastica preformata [85].

- in plastica a bassa densità: per la sbavatura, la brunitura e la preparazione della superficie pre-rivestimento. Sono utilizzati nella finitura di parti più morbide poiché ne limitano urti e distorsioni;
- in plastica ad alta densità: per rifinire ferrosi e parti metalliche non ferrose o parti più dure. Le applicazioni spaziano dalla sbavatura di metalli duri alla finitura fine di parti complesse. Sono utilizzati in applicazioni di taglio rapido;
- in plastica ad alte prestazioni: per la finitura di parti in metalli ferrosi. [95].

La **ceramica** preformata (Figura 36) è un abrasivo utilizzato dove la regolarità delle dimensioni e della forma è importante: taglia più velocemente dell'ossido di alluminio, ma si usura anche più velocemente. E' molto utilizzato nella burattatura e ha generalmente una densità maggiore rispetto alla plastica riuscendo a levigare e lucidare materiali più duri, come le leghe resistenti alle alte temperature, acciaio e titanio.

---

<sup>27</sup> Esistono creme lucidanti già pronte per questo tipo di lavoro.

I media in ceramica possono scheggiarsi a causa dell'usura e dell'esposizione a forze eccessive e le particelle di ceramica sciolte rischiano di entrare nei piccoli fori del pezzo. Sono tipicamente realizzati in porcellana, ossido di alluminio, carburo di silicio e silice (ossido di alluminio e carburo di silicio sono utilizzati in metalli duri, mentre la silice lavora più su metalli morbidi) [95]. Sono anche utilizzati per la lucidatura generica e con parti in plastica, acciaio, acciaio inossidabile e alluminio [84].

I media in **acciaio** (Figura 37) sono utilizzati nella brunitura e nella lucidatura perché non rimuovono il metallo (neanche su componenti in alluminio o ottone), ma attenuano le sbavature leggere, quindi se si desiderano finiture di maggiore intensità occorre aggiungere un apposito composto di brunitura. Possono essere utilizzati con pezzi in alluminio, ottone, acciaio, acciaio inossidabile e plastica.



Figura 36. Media in ceramica [85].



Figura 37. Media in acciaio [83].

Il risultato del processo di finitura con supporti in acciaio è una superficie lucida, priva di sbavature e liscia [95]. Gli abrasivi in acciaio durano a lungo in caso di corretta manutenzione ma richiedono attrezzature specifiche per la lavorazione a causa della elevata densità apparente [84]. Nell'auto-burattatura (burattatura delle parti senza media), le parti stesse fungono da media: questo è possibile solo se le parti non hanno una forma troppo delicata o complessa e le sbavature sono completamente esposte. La dimensione e la forma delle parti quindi determinano se l'auto-burattatura è o meno applicabile: le superfici interne ricevono infatti poca o nessuna azione durante l'auto-rotolamento. È un sistema economico, perché possono essere caricate più parti e non ci sono problemi di separazione. L'auto-burattatura è un mezzo efficace per pulire, sbavare o brunire anche piccole parti in alluminio

ma occorre mantenere un pH quasi neutro, e gli ossidi dovrebbero essere rimossi dalle parti in alluminio prima della burattatura.

Nella burattatura a secco si utilizza talvolta, oltre agli abrasivi, un agente veicolante che funge da cuscinetto tra le parti, impedendo che si danneggino a vicenda, produce superfici più lisce e trasporta l'abrasivo in punti che altrimenti non sarebbero raggiunti. Esempi di questi agenti veicolanti sono la graniglia di pannocchia di mais, la graniglia di guscio di noce e pioli di legno: sono disponibili in diverse dimensioni perché devono essere tali da rendere facile la separazione delle parti e da non depositarsi in buchi o fessure. La maggior parte delle operazioni abrasive viene eseguita con pioli di legno, poiché la graniglia di pannocchia di mais e la graniglia di guscio di noce sono troppo leggere per creare sufficiente attrito. Questi media organici sono ecologici, biodegradabili, durevoli, e adatti per sbavature leggere o medie. Sono molto utilizzati per l'asciugatura delle parti dopo il trattamento vibratorio e per lucidare leghe morbide e gioielli. La pannocchia di mais schiacciata ha un eccellente assorbimento d'acqua per prevenire la corrosione e pulire i residui di materiale dalle parti [95]. Sebbene il ciclo di finitura in buratto sia sufficiente nella maggior parte dei casi, alcune semplici operazioni di sbavatura (come i pezzi stampati a compressione in plastica) possono essere eseguite semplicemente facendo rotolare le parti l'una contro l'altra: questo tipo di operazione di solito non richiede abrasivi in quanto l'azione di "parte contro parte" rimuoverà la bava. Le parti stampate in vinile non possono essere sbavate in questo modo perché la bava si piegherebbe anziché rompersi, ma il suo preventivo congelamento potrebbe superare questo problema [83].

Per la sbavatura dell'alluminio vengono preferiti detergenti sintetici miscelati con graniti fini o scaglie di calcare; l'ossido di alluminio e il carburo di silicio sono da evitare in quanto potrebbero lasciare una sbavatura difficile da rimuovere. Alti livelli d'acqua, che ricoprono completamente la massa, sono utilizzati durante la smerigliatura per aiutare a mantenere la fluidità della massa e per evitare che l'abrasivo perda l'azione di taglio. Per la brunitura dell'alluminio, talvolta si ricorre a pretrattamenti, ad esempio getti per 20 s in una soluzione alcalina a 80 °C e quindi l'immersione per 2-3 s in una soluzione composta da 3 parti in volume di acido nitrico (36° Bt) e 1 parte di acido fluoridrico a 20-25 °C. Durante la brunitura dell'alluminio, in cui si utilizzano spesso sfere e forme in acciaio, il pH deve essere strettamente controllato mediante frequenti titolazioni del composto seguite dall'aggiunta di piccole quantità di borace o acido borico in base alle necessità [87].

### 3.4 Possibili materiali lavorati

La burattatura trova molteplici impieghi nell'indotto automobilistico, nelle applicazioni della ingegneria medica e in generale nella meccanica, con ottimi risultati, che sono riproducibili in modo sicuro. Un eccellente esempio di applicazione di questo metodo è l'industria della gioielleria (lucidatura dei metalli) [88], di materie plastiche, ossa naturali e pietre preziose. Questa tecnica viene utilizzata anche per la lavorazione di piccoli oggetti come accessori per l'edilizia e per mobili, fibbie, chiavi, accessori per abbigliamento e calzature, attrezzatura da pesca, componenti elettronici, cerchioni... di tutti i tipi di acciaio, ghisa, metalli non ferrosi e preziosi, plastica, pietre, legno [89].

I materiali più comunemente sottoposti a burattatura sono [82]:

- materiali plastici (acetato di cellulosa, poliammidi, poliesteri);
- metalli preziosi e leghe di metallo;
- materiali naturali come legno, corno, madreperla;
- pietre.

La burattatura viene utilizzata in particolare per la rifinitura e la lucidatura di gioielli e piccoli accessori, come spille, bottoni, bigiotteria e anche la maggior parte delle montature per occhiali, in filo metallico e non, vengono lucidate con questo processo. La burattatura dei metalli può essere applicata a varie tipologie di metallo, per esempio ai particolari che sono derivati dal taglio al plasma, ma anche all'ossitaglio delle lamiere di acciaio industriali [81]. E' utilizzata anche per oggetti decorativi, piccoli soprammobili o simili, come il rock tumbling, che permette di ottenere delle pietre levigate e lucide come quelle che si trovano in riva al mare [82]. In caso di grossi quantitativi di materiale si può utilizzare la vibratura in ceramica, ovvero una burattatura con l'utilizzo di inserti in ceramica che permette di trattare pezzi particolari in ottone, acciaio inox o ferro.

Con parti in alluminio la sbavatura con la burattatura talvolta è la parte finale del processo, altre volte è seguita dalla brunitura per ottenere una finitura più liscia o più adatta all'anodizzazione o alla placcatura. Le parti che sono state solo sbavate sono poi spesso verniciate mentre quelle brunite sono spesso anodizzate per protezione.

La burattatura di materiali in acetato, come alcune aste degli occhiali, avviene in più fasi (sgrossatura, levigatura, lucidatura e brillantatura) e dura complessivamente anche 60/70 ore (il buratto può lavorare anche di notte). Tra una fase e l'altra il buratto va svuotato, vengono cambiati i legnetti (man mano più piccoli) e il tipo di pasta: la funzione abrasiva con le ore tende a diminuire e quindi il processo va periodicamente alimentato. Se le aste degli occhiali

sono in metallo si usa comunque la burattatura ma sono sufficienti una o due fasi per un totale di massimo 20 ore, e si utilizzano telai in metallo e granulati di noce, di cocco o di mais, preparati con additivi specifici.

### **3.5 Miglioramenti delle proprietà con la burattatura**

Tra i vantaggi della burattatura dei metalli, oltre il fatto di essere una lavorazione di finitura superficiale di tipo meccanico adatta a pezzi di qualsiasi dimensione, merita di essere messo in evidenza l'aspetto economico: lavorando un gran numero di pezzi senza che vi sia la necessità di un controllo continuo da parte degli operatori la burattatura è fonte di un notevole risparmio [81]. In base alla macchina, è possibile pulire fino a 600-700 kg di materiale in soli 15/20 minuti, senza impiegare alcun operatore (se non per il carico/scarico) raggiungendo una omogeneità dei particolari trattati non raggiungibile con una pulizia manuale. Dopo la burattatura le parti sono più dure e resistenti, con un minore livello di stress. Infatti uno degli scopi principali del trattamento superficiale è aumentare la durata delle parti della macchina e degli utensili. Ciò è correlato alla riduzione delle perdite di materiale, energia e qualità del prodotto.

Anche altri metodi creano l'azione di finitura direttamente mediante movimento meccanico forzato, ma la vibrofinitura è il metodo più utilizzato per le operazioni di finitura superficiale nell'industria perché la finitura superficiale è coerente con l'uniformità visiva, è un sistema flessibile, con basso utilizzo di utensili e un basso fabbisogno di personale. Ma soprattutto ha la capacità di creare strutture superficiali isotropiche con un'asimmetria negativa e un piccolo angolo di inclinazione dell'apice, il che migliora le prestazioni del prodotto in termini di durata a fatica, coppia, usura e attrito [99].

Il trattamento superficiale assicura che il prodotto abbia prestazioni migliori in termini di proprietà meccaniche, resistenza all'abrasione, resistenza alle alte temperature e corrosione-erosione. È così possibile sostituire gli acciai altolegati o altri materiali difficili da ottenere (come acciai medio e bassolegati) con uno strato superficiale adeguato che modifichi in modo significativo le proprietà del pezzo e possieda proprietà prefissate che garantiscano un reale aumento della vita utile. La causa della modifica delle proprietà dello strato superficiale può essere costituita da forze singole o combinate di tipo meccanico, elettrico, termico o chimico [90].

La burattatura a umido inoltre, oltre a facilitare il processo meccanico di finitura, aiuta a prevenire la comparsa della ruggine [95], e questo potrebbe essere utile anche in ambiti

particolari, quali quello odontotecnico, dove oltre ad apparecchi dentali ortodontici, si levigano, lucidano e puliscono anche bite ortodontici, allineatori e protesi (si può ottenere una pulizia accurata e delicata con effetto levigante e lucidante, anche in punti difficili da raggiungere, senza modificare la forma, e eliminando ogni tipo di residuo, come ad esempio tartaro) [91].

Interessante il risultato del confronto tra tre specifici casi: il primo caso lucidatura dei supporti ceramici sciolti, il secondo lucidatura ad impatto con sfere in acciaio e il terzo campioni prima sbavati con ceramica e poi lucidati con sfere in acciaio. I risultati indicano che è meglio condurre il processo di lavorazione vibro-abrasivo in due fasi: una prima fase utilizzando il mezzo abrasivo-lucidante per il trattamento di sbavatura, levigatura, arrotondamento degli spigoli e successivamente utilizzo di un processo di lucidatura utilizzando un abrasivo metallico per rafforzare la superficie [90]. Lo stesso esperimento ha dimostrato che l'uso della burattatura ha un effetto positivo sulla levigatura e sulla brillantezza della superficie, la quale dopo la lavorazione è caratterizzata da una struttura anisotropica e non vi sono segni dei precedenti processi di fabbricazione. Diverso è l'impatto sulla rugosità in dipendenza del materiale lavorato; i maggiori cambiamenti nella rugosità superficiale e nella perdita di massa sono normalmente osservati nei primi minuti di trattamento mentre periodi di trattamento più lunghi potrebbero anche causare difetti nella massa del pezzo. Ad esempio l'acciaio inossidabile presenta una rugosità superficiale sensibilmente minore dopo una finitura superficiale di 30min, ma dopo una finitura di 150min la sua rugosità superficiale è sostanzialmente stabile. La rugosità superficiale della lega di alluminio AA-6061 e dell'acciaio A3<sup>28</sup> diminuisce invece con il tempo di finitura superficiale durante l'intera lavorazione. E la rugosità superficiale della lega di alluminio AA-7075<sup>29</sup> è addirittura leggermente aumentata dopo una finitura superficiale di 270 minuti. Inoltre se nella fase iniziale del trattamento la rugosità è diversa sulle diverse superfici del pezzo, con l'aumento del tempo di finitura, la sua efficacia nelle posizioni laterali e le superfici posteriori del pezzo tende ad essere la stessa. Anche la durezza superficiale (durezza Rockwell) della lega di alluminio AA-6061 e dell'acciaio A3 è aumentata nell'intero periodo di funzionamento mentre la durezza superficiale della lega di alluminio AA-7075 e dell'acciaio inossidabile sono aumentate con per un tempo minore [100]. Nel

---

<sup>28</sup> L'acciaio A3 è un acciaio austenitico stabilizzato al titanio.

<sup>29</sup> La lega 7075 è la più utilizzata nella costruzione di aerei ed è composta da alluminio, zinco, magnesio e rame.

particolare caso di vibrazione di campioni in lega di alluminio PA6<sup>30</sup>, dopo la ricristallizzazione si è verificato un aumento della resistenza alla trazione e della durezza [90]. Questo dimostra che per ottenere la migliore qualità della superficie del pezzo in lavorazione nella finitura superficiale vibratoria, il tipo di abrasivo, la sua forma e dimensione, il periodo di finitura, la posizione iniziale del pezzo e altre condizioni operative devono essere studiate e ottimizzate in base alle caratteristiche del pezzo da lavorare [100]. Per queste ragioni le scelte dell'operatore sono fondamentali al fine un corretto comportamento del buratto ed egli deve essere opportunamente formato in modo che sia in grado di scegliere la macchina più adatta e, a seconda della macchina che sta utilizzando, decidere il tipo di abrasivo e il suo volume, il tipo di composto e la sua portata volumetrica, se utilizzare un processo a umido o a secco, il volume delle parti, il numero di giri del motore, la frequenza della macchina e il tempo di lavorazione [102]. Il tutto mettendo sempre al centro le specifiche del cliente circa il prodotto finito, il rumore, la potenza oraria consumata e il costo di produzione [101].

---

<sup>30</sup> La lega di alluminio PA6 è composta da silicio, ferro, rame, manganese, magnesio, cromo, zinco e titanio e appartiene al gruppo delle leghe ad alta resistenza trattate termicamente. E' molto utilizzata nell'industria aerospaziale e della difesa.



## CAPITOLO 4. ANALISI SPERIMENTALE

### 4.1 Analisi della letteratura

Numerosi studi in passato hanno cercato di comprendere come i parametri di processo della burattatura influenzassero la rugosità superficiale di un componente.

Wang, Timsit e Spelt con burattatura di provini in alluminio hanno constatato che la rugosità diminuiva con l'aumentare del tempo di lavorazione, e che ad elevate rugosità iniziali corrispondeva una maggiore diminuzione percentuale della rugosità. Hanno anche rilevato che l'entità della dipendenza della diminuzione della rugosità all'aumentare del tempo e della rugosità iniziale, diminuiva all'aumentare della lubrificazione [103]. All'aumentare del tempo di lavorazione l'andamento della rugosità è risultato sempre decrescente, ma in modo diverso in base all'abrasivo utilizzato, e in alcuni casi presentava un limite di tempo oltre il quale la diminuzione della rugosità diveniva trascurabile (mediamente 20 ore).

Boschetto e Bottini, seppur su materiali plastici, hanno ottenuto una diminuzione della rugosità maggiore all'aumentare del tempo di lavorazione; in modo particolare hanno analizzato alcuni modelli teorici che hanno poi validato tramite analisi sperimentali da cui sono stati ottenuti alcuni modelli di regressione, sia di tipo lineare che non lineare. In questo modo hanno studiato un modello matematico in grado di stimare l'effetto sulla rugosità media non solo del tempo di lavorazione, ma anche dello spessore dello strato depositato e dell'angolo di deposizione [104]. In questo caso i tempi di lavorazione analizzati sono stati di almeno 16 ore. Gli stessi autori hanno eseguito una analisi simile con provini in lega di Titanio, notando nuovamente che la rugosità media diminuiva all'aumentare del tempo e della velocità [113]. Hanno poi ripetuto l'esperienza con provini in lega di Titanio e Nichel-Cromo e anche in questo caso hanno notato una diminuzione della rugosità all'aumentare del tempo di lavorazione [111]. In questo caso hanno anche appurato la non linearità di tale relazione approssimabile piuttosto ad una funzione esponenziale negativa del primo ordine. Tutte queste indagini hanno esaminato tempi relativamente lunghi di lavorazione (non meno di 10 ore), ma occorre considerare che nell'uso industriale i tempi vengono ottimizzati utilizzando macchine di grandi dimensioni che permettono di lavorare contemporaneamente anche più pezzi insieme [111].

Uhlmann ha sviluppato un modello in grado di stimare la rugosità superficiale dopo la lavorazione di burattatura, in base al tempo di lavorazione e al profilo di rugosità iniziale del pezzo [106], e sottolinea anche che le caratteristiche topografiche del pezzo non possono

essere trascurate in tale analisi [105]. Anche l'esperienza di Pereira conferma che a minore spessore dello strato di polvere depositato corrispondono valori di rugosità più piccoli [65]. Hashimoto e DeBra nei loro studi hanno dimostrato che dopo un certo tempo di lavorazione viene raggiunto il valore minimo di rugosità superficiale, che dipende principalmente dal mezzo utilizzato [107]. Sostengono inoltre che la velocità di variazione della rugosità è proporzionale alla differenza tra la rugosità in un dato momento e il valore minimo di rugosità raggiungibile.

Anche da un'altra esperienza più recente è emerso che la rugosità superficiale diminuisce con l'aumento del tempo di lavorazione, ma esiste un valore di rugosità al di sotto del quale difficilmente si può scendere, anche aumentando ulteriormente il tempo di lavorazione [112].

Altri esperimenti sono arrivati ad un risultato analogo, per cui prolungare il tempo ciclo e la velocità oltre un punto limite porta ad una piccola differenza nel valore della rugosità superficiale [110]. Secondo un'altra recente analisi esistono per ogni situazione un tempo e una velocità ottimali oltre i quali non si hanno miglioramenti significativi [114]. Tale analisi non evidenzia infatti andamenti univoci dell'andamento della rugosità media in funzione di tempo e velocità di lavorazione.

Un'altra esperienza ha evidenziato invece come non è detto che vi sia una diminuzione della rugosità all'aumentare del tempo di lavorazione, ma come questa dipenda dall'interazione tra tempo e velocità [108]. Diverso è il risultato di una esperienza condotta su materiali ceramici secondo cui aumentando la velocità del tamburo diminuisce la rugosità superficiale del pezzo in burattatura, ma se si aumenta il tempo di lavorazione allora la diminuzione della rugosità è meno dipendente dalla velocità di rotazione. La stessa analisi ha mostrato come l'umidità aumenti l'efficacia della burattatura [115].

Un risultato simile è stato ottenuto con un'altra indagine che ha cercato di comprendere se la rugosità media dipendesse dal tempo di lavorazione e dalla velocità di rotazione, ma, a parte dimostrare un'azione positiva del lubrificante e una leggera influenza della forma dell'abrasivo, non è riuscita a trovare una significativa relazione tra rugosità e tempo e velocità di lavorazione [109].

## **4.2 Raccolta dei dati**

L'obiettivo dell'esperimento condotto è stato quello di comprendere l'influenza del tempo, della velocità di rotazione del buratto e della percentuale di acqua nella riduzione della rugosità superficiale. Essendo tre i parametri coinvolti (Tabella 2), sono state condotte 3<sup>3</sup>

prove, quindi in totale sono state esaminate 27 combinazioni di questi fattori su altrettanti provini.

| Tempo di lavorazione [min] | Velocità di lavorazione [rpm] | Percentuale di acqua [%] |
|----------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 10                         | 150                           | 30                       |
| 20                         | 200                           | 40                       |
| 30                         | 250                           | 50                       |

Tabella 2. Valori considerati per le tre variabili in analisi.

Per far sì che i risultati non fossero influenzati dalla variabilità dell'operatore, la sequenza delle prove è stata generata in maniera randomica attraverso l'utilizzo del software Minitab. I provini utilizzati sono di dimensioni 15×15×12 mm (Figura 38) e sono realizzati in lega di alluminio AlSi10Mg mediante fusione selettiva laser.

I primi nove campioni sono stati costruiti mediante una macchina di fusione selettiva laser a letto di polvere metallica, PrintSharp 250 di Prima Additive (Figura 39), con uno spessore di strato di polvere depositato di 30 µm. Il campione n°10 è stato costruito attraverso una macchina di sinterizzazione laser a letto di polvere metallica, EOS M270 Dual Mode di EOS GmbH (Figura 40), con uno spessore di strato depositato di 30 µm.



Figura 38. Provino utilizzato.



Figura 39. PrintSharp 250 di Prima Additive.



Figura 40. EOS M270 di EOS GmbH.

I restanti campioni da 11 a 27 sono stati realizzati con lo stesso sistema di fabbricazione additiva dei primi 9 provini, (PrintSharp 250) ma con uno spessore di strato depositato di 90 µm. Ogni singolo campione è stato sottoposto a burattatura e insieme all'acqua è stato

utilizzato un abrasivo ceramico di forma cilindrica di dimensioni 3×10 mm mm fornito dall'azienda Silco s.r.l. (Figura 41).



Figura 41. Abrasivo ceramico utilizzato.

E' stato utilizzato un buratto prodotto da Vibrochimica (azienda leader nella produzione di macchine ed impianti di vibrofinitura che opera dal 1972) e commercializzato da Silco s.r.l., i cui principali componenti sono mostrati in figura 42 (display LCD per interagire con il macchinario, buratto, serbatoio dell'acqua e vasca di raccolta granuli).

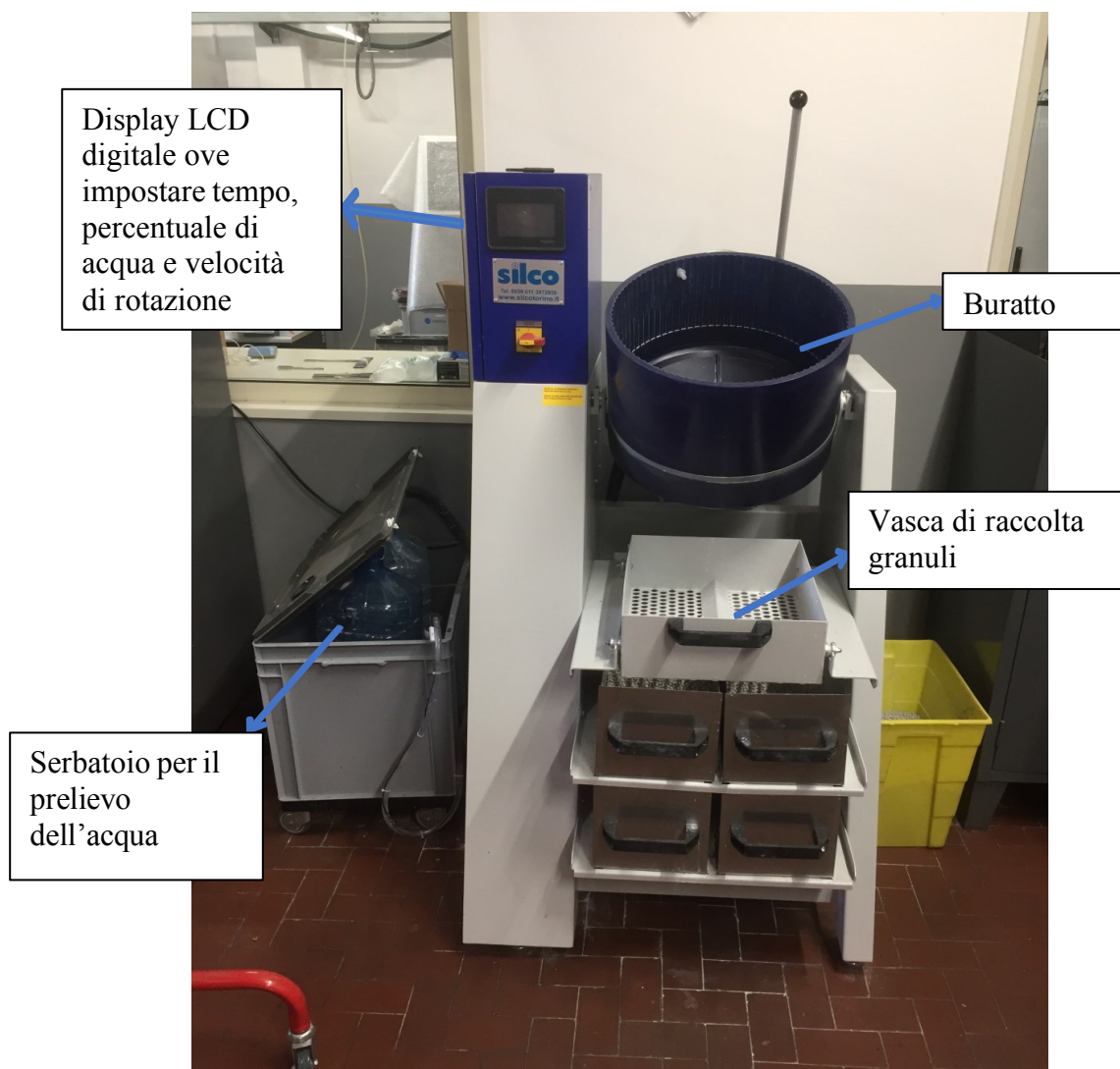


Figura 42. Buratto utilizzato per la finitura.

Dopo la fase di burattatura sono state misurate per ogni campione la rugosità media  $R_a$  e quella massima  $R_z$ , per mezzo del rugosimetro Mahr Modello MarSurf M300C (Figura 43). Solo per il campione 10 è stato utilizzato il rugosimetro SM Metrology Systems - RTP80 (Figura 44) perché il rugosimetro Mahr non era in grado di rilevarne il valore in quanto fuori dal suo range di misura. Per ogni provino sono state effettuate 3 misurazioni, in modo da poter disporre di un dato statisticamente valido, e per ogni provino è stata calcolata la media aritmetica dei valori di rugosità media e massima.



Figura 43. Rugosimetro Mahr Modello MarSurf M300C.



Figura 44. Rugosimetro SM Metrology Systems - RTP80.

### 4.3 Discussione e analisi dei risultati

Per ogni campione sono state effettuate 3 misurazioni delle due rugosità e ne è stata calcolata la media: l'analisi è quindi stata basata su un totale di 27 dati per la rugosità media e altrettanti per la rugosità massima (Tabella 3). Al fine di condurre un'analisi statistica più accurata ci si è avvalsi dell'utilizzo del software *Minitab*.

Il software *Minitab* mette a disposizione diversi strumenti in grado di analizzare la distribuzione dei dati, e questi hanno effettivamente confermato che le misurazioni sul campione numero 10 fossero distanti dalle altre (*outlier*): il Graphical Summary di  $R_a$  (Figura 45) mostra chiaramente come nel caso di velocità 250 rpm (grafico più in basso), il valore del campione 10 sia sensibilmente diverso dagli altri (come si può notare nel grafico in basso a sinistra) e sia quindi identificato come valore anomalo. Tale campione era già in partenza diverso dagli altri in quanto realizzato con un diverso macchinario e, poiché

mostrava una rugosità superficiale molto più alta degli altri, per la misurazione della sua rugosità superficiale si è optato per un diverso strumento di misura.

Si è deciso quindi di escludere questo dato dalle analisi successive affinché i risultati non venissero influenzati dalla sua presenza.

| CAMPIONE | Acqua [%] | Tempo [min] | Velocità [rpm] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] | Rz [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------|-----------|-------------|----------------|----------------------|----------------------|
| 1        | 50        | 10          | 250            | 7,62                 | 37,60                |
| 2        | 50        | 10          | 200            | 4,35                 | 20,22                |
| 3        | 40        | 20          | 200            | 7,38                 | 34,72                |
| 4        | 50        | 30          | 150            | 5,39                 | 26,33                |
| 5        | 50        | 20          | 200            | 8,52                 | 39,68                |
| 6        | 30        | 20          | 150            | 5,52                 | 24,74                |
| 7        | 40        | 10          | 150            | 4,83                 | 23,70                |
| 8        | 30        | 30          | 150            | 4,63                 | 22,19                |
| 9        | 40        | 10          | 250            | 3,72                 | 17,93                |
| 10       | 30        | 20          | 250            | 20,88                | 88,31                |
| 11       | 50        | 10          | 150            | 5,48                 | 26,10                |
| 12       | 50        | 30          | 250            | 4,73                 | 21,13                |
| 13       | 30        | 10          | 200            | 3,17                 | 12,67                |
| 14       | 40        | 30          | 250            | 4,99                 | 20,01                |
| 15       | 50        | 20          | 150            | 3,79                 | 14,93                |
| 16       | 50        | 30          | 200            | 2,51                 | 10,41                |
| 17       | 40        | 30          | 150            | 4,72                 | 25,16                |
| 18       | 30        | 30          | 200            | 3,05                 | 14,79                |
| 19       | 30        | 10          | 150            | 3,80                 | 16,89                |
| 20       | 40        | 30          | 200            | 3,01                 | 11,90                |

Tabella 3. Valori di rugosità media Ra e massima Rz per i 27 campioni misurati.

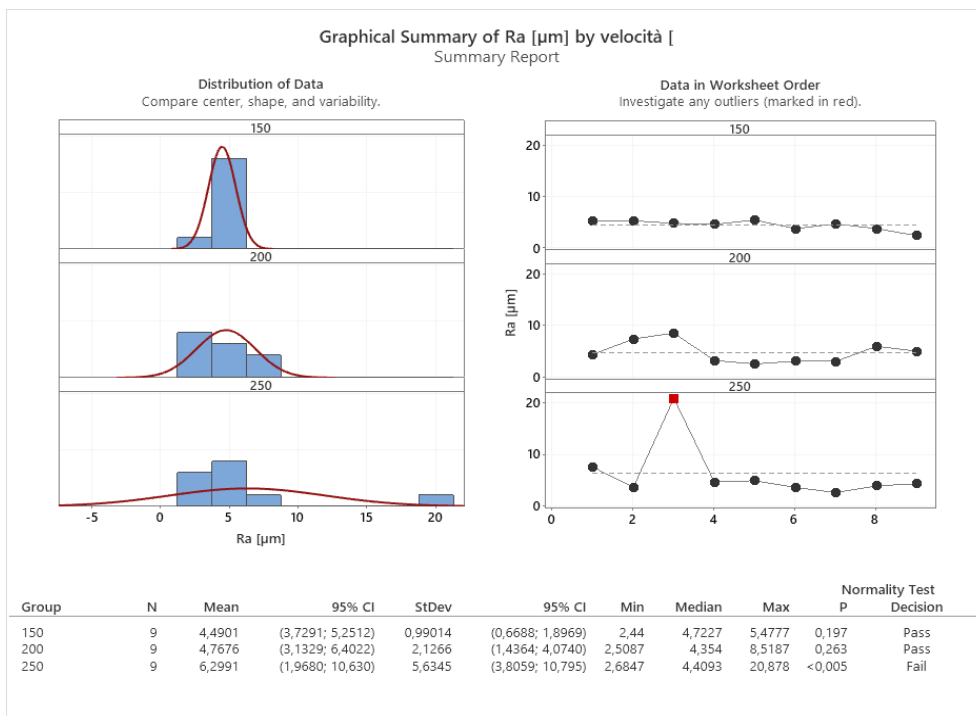


Figura 45. Graphical Summary di Ra per i 27 campioni misurati.

Una volta individuati i dati da utilizzare nell'analisi, si è proceduto ad un ordinamento in base a rugosità media Ra crescente per iniziare ad individuare quali fattori parevano ridurre la rugosità.

Il grafico Dotplot della rugosità media Ra ha mostrato in prima analisi come la distribuzione dell'andamento non presenti picchi e possa quindi considerarsi pressoché amodale. I dati sembrano concentrarsi però in un range che va da 2,4 a 5,6  $\mu\text{m}$ , con pochi dati superiori a 7,2  $\mu\text{m}$  (Figura 46).

Da questo Dotplot è interessante notare come vi siano alcune osservazioni con una rugosità

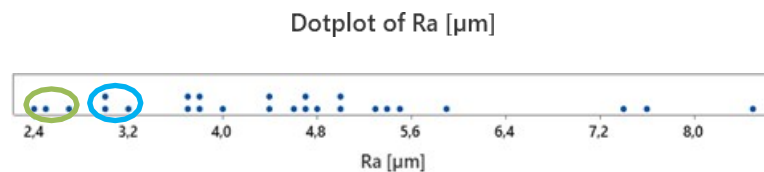


Figura 46. Dotplot dei valori della rugosità media Ra.

media sensibilmente più bassa.

Analizzando i valori dei parametri per questi dati si potrebbero trarre alcune prime conclusioni sui valori maggiormente ricorrenti nei campioni con bassa rugosità.

Osservando i valori evidenziati in tabella 4, si nota come per ogni parametro alcuni valori siano maggiormente presenti:

- 40% o 50% di acqua;
- 20 o 30 minuti di lavorazione;
- 200 rpm di velocità.

Tali valori sono quindi buoni candidati per l'ottenimento di una rugosità media finale minore.

| CAMPIONE | Acqua [%] | Tempo [min] | Velocità [rpm] | Ra [ $\mu\text{m}$ ] |
|----------|-----------|-------------|----------------|----------------------|
| 24       | 40        | 20          | 150            | 2,44                 |
| 16       | 50        | 30          | 200            | 2,51                 |
| 22       | 40        | 20          | 250            | 2,68                 |
| 20       | 40        | 30          | 200            | 3,01                 |
| 18       | 30        | 30          | 200            | 3,05                 |
| 13       | 30        | 10          | 200            | 3,17                 |
| 21       | 50        | 20          | 250            | 3,68                 |
| 9        | 40        | 10          | 250            | 3,72                 |
| 15       | 50        | 20          | 150            | 3,79                 |
| 19       | 30        | 10          | 150            | 3,80                 |
| 25       | 30        | 10          | 250            | 3,99                 |
| 2        | 50        | 10          | 200            | 4,35                 |
| 27       | 30        | 30          | 250            | 4,41                 |
| 8        | 30        | 30          | 150            | 4,63                 |
| 17       | 40        | 30          | 150            | 4,72                 |
| 12       | 50        | 30          | 250            | 4,73                 |
| 7        | 40        | 10          | 150            | 4,83                 |
| 26       | 40        | 10          | 200            | 4,98                 |
| 14       | 40        | 30          | 250            | 4,99                 |
| 4        | 50        | 30          | 150            | 5,39                 |
| 11       | 50        | 10          | 150            | 5,48                 |
| 6        | 30        | 20          | 150            | 5,52                 |
| 23       | 30        | 20          | 200            | 5,93                 |
| 3        | 40        | 20          | 200            | 7,38                 |
| 1        | 50        | 10          | 250            | 7,62                 |
| 5        | 50        | 20          | 200            | 8,52                 |

Tabella 4. Valori di rugosità media Ra in ordine crescente per i 26 campioni analizzati in cui sono evidenziate le 6 osservazioni con rugosità media minore.

È stato poi generato lo Scatterplot in figura 47 ponendo come ascissa la rugosità media e come ordinata il numero del campione. Come già descritto in precedenza, è però possibile raggruppare i campioni in due insiemi diversi sia per macchinario di produzione che spessore di strato di polvere depositato: i primi 9 campioni presentavano uno strato di polvere depositato di 30  $\mu\text{m}$ , mentre i restanti presentavano uno strato di polvere depositato di 90  $\mu\text{m}$ . È possibile osservare come i campioni con strato di 30  $\mu\text{m}$  abbiano un andamento di rugosità diverso da quello dei campioni con strato di 90  $\mu\text{m}$ : i valori di Ra dei campioni di 30  $\mu\text{m}$  sono compresi in un range di valori più ampio rispetto ai valori di Ra dei campioni a 90  $\mu\text{m}$ , che sono invece più concentrati in una zona del grafico compresa tra Ra pari a 2 e 6  $\mu\text{m}$ . Questa differenza, bene evidenziata dai rettangoli arancione e viola del grafico,



conferma che i due gruppi di campioni possedevano una rugosità iniziale diversa in quanto i campioni con strato di 30  $\mu\text{m}$  possedevano in partenza una rugosità maggiore.

Questa è una informazione importante ai fini della presente ricerca, in quanto i risultati successivi devono tenere in considerazione il fatto che le variabili osservate con questa analisi sperimentale non sono solo % di acqua, tempo di lavorazione e velocità, ma anche rugosità di partenza.

Sullo stesso grafico è stata anche individuata una zona di intersezione tra i due gruppi (tratteggiata in nero), in cui i campioni hanno valori di rugosità simili tra loro.

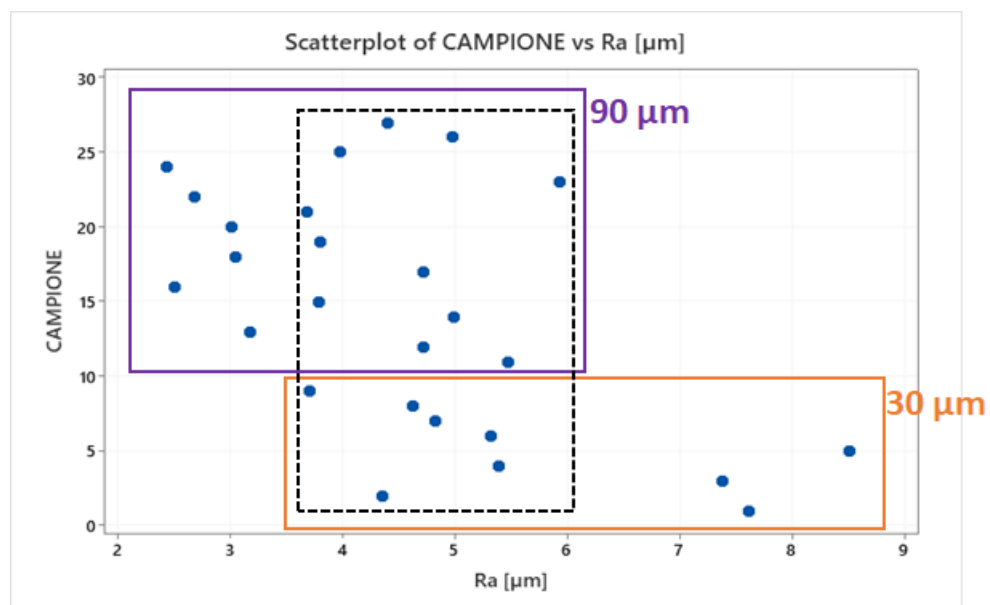


Figura 47. Scatterplot che mette in evidenza la relazione tra numero del campione e rugosità media finale.

Nonostante i dati siano fortemente influenzati anche dal tipo di campione, analizzando separatamente i 3 parametri si può cercare di comprendere come ognuno influenzi la rugosità.

Nel grafico in figura 48 il fatto che i segmenti non siano orizzontali, ma con particolare andamento delle spezzate, indica che è presente per tutte e tre le variabili un effetto su Ra. Analizzando il riquadro a sinistra si può notare come via sia un effetto sulla rugosità minore con acqua a 30% o 40%, mentre nel passaggio da 40% a 50% di acqua la rugosità aumenta sensibilmente. Per il tempo si ha un andamento quasi speculare: con tempi bassi di lavorazione (10 o 20 minuti) si ha una rugosità mediamente elevata mentre nel passaggio da 20 a 30 minuti si ha un importante abbassamento di Ra. Minori differenze si possono notare analizzando il riquadro di destra, che quindi porta a supporre che la velocità influenzi minimamente la rugosità media.

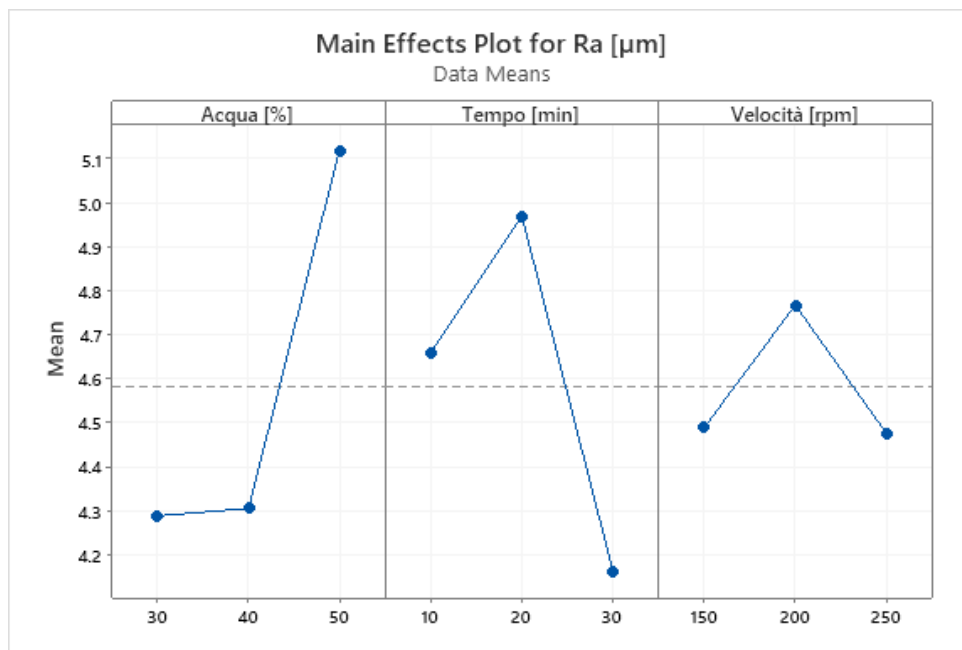


Figura 48. Effetto delle 3 variabili in analisi sulla rugosità media.

A questo punto è importante comprendere se via sia una interazione tra i parametri, e per comprenderlo è utile il grafico “Interaction Plot” (Figura 49). Questo grafico mostra come le 3 variabili considerate interagiscano tra loro e influenzino la risposta, ovvero la rugosità. Osservando l’interazione tra Acqua e Tempo (1° quadrante in alto a sinistra), si nota come 40% e 50% abbiano un andamento simile, mentre nel caso di 30% l’andamento è diverso: in particolare è possibile vedere come a 10 minuti il 30% dia il valore più basso di rugosità, a 20 minuti il 40% di acqua dia il valore più basso di rugosità, mentre a 30 minuti i valori di rugosità siano paragonabili per le 3 condizioni.

Nel quadrante Acqua-Velocità (in alto a destra) si può vedere come il 40% di acqua permetta di ottenere sia a 150 rpm che a 250 rpm i valori più bassi di velocità, mentre a 200 rpm i valori più bassi si ottengono con il 30% di acqua.

Infine, nel quadrante Tempo-Velocità si vede come nel caso di 30 minuti il valore più basso si ottenga con una velocità di 200 rpm, mentre a 150 rpm e a 250 rpm i valori più bassi si ottengono con 20 minuti.

Interessante confrontare quanto appena scritto con i valori individuati nei 6 campioni con Ra minore. In modo particolare erano stati identificati come valori possibili per una minore Ra, 40% o 50% di acqua e 20 o 30 minuti di lavorazione: nel grafico in Figura 49 si nota che 40% e 50% di acqua hanno un andamento simile e con Ra decrescente all’aumentare del tempo di lavorazione, a conferma di quanto ipotizzato ad inizio analisi.

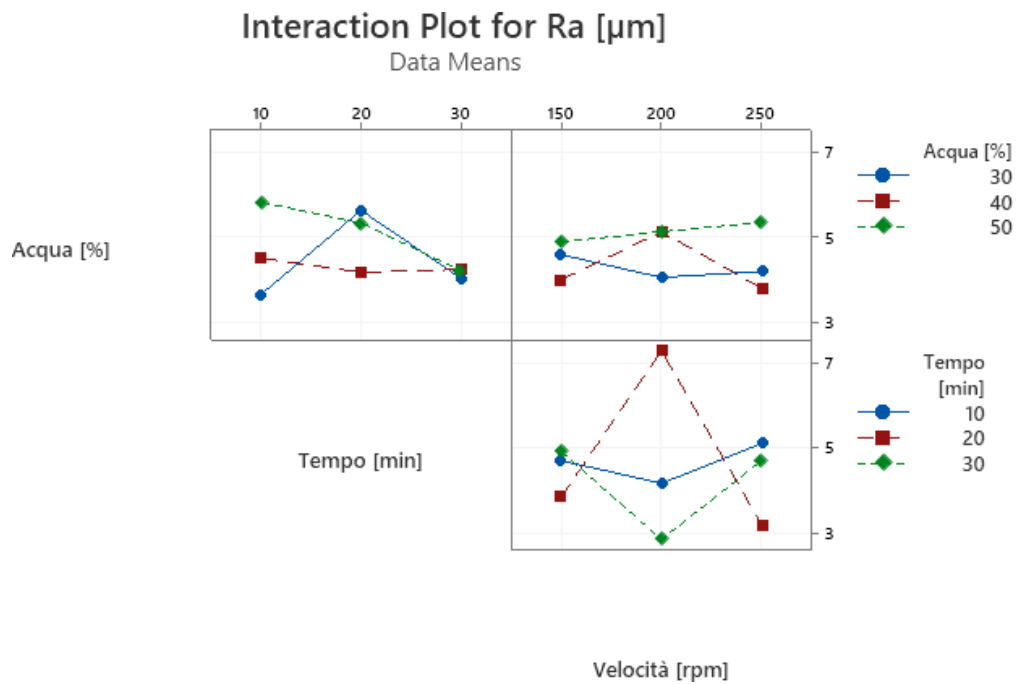


Figura 49. Interaction Plot per le 3 variabili in analisi.

Tali risultati possono essere di partenza per future eventuali analisi di approfondimento, in cui i provini potrebbero provenire dalla stessa lavorazione e avere lo stesso spessore dello strato di polvere depositato in modo da eliminare l'influenza del fattore campione.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Aboulkhair N.T., Maskery I., Tuck C., Ashcroft I., Everitt N.M., *On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: microstructure and nano- mechanical properties*, J Mater Process Technol 2016.
- [2] Aboulkhair N.T., Simonelli M., Parry L., Ashcroft I., Tuck C., Hague R., *3D printing of Aluminium alloys: Additive Manufacturing of Aluminium alloys using selective laser melting*, Progress in Materials Science Volume 106, 2019.
- [3] Buchbinder D., Schleifenbaum H., Heidrich S., Meiners W., Bültmann J., *High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts*, Phys Proc 2011; 12(Part A).
- [4] Hashmi A.W., Mali H.S., Meena A., *Improving the surface characteristics of additively manufactured parts: A review*, Advanced Manufacturing and Mechatronics Lab, Department of Mechanical Engineering, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, India.
- [5] Jacobs P.F., *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers, 1992
- [6] Pereira S., Vaz A., Vicente L., *On the optimal object orientation in additive manufacturing*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 98, 2018.
- [7] Dispensa: *Additive Manufacturing. Professore Antonio Del Prete*; Università del Salento
- [8] Dispensa: *Introduzione all' Additive Manufacturing*. Professore Luca Iuliano; Politecnico di Torino.
- [9] Dispensa: *Fabbricazione additiva: introduzione*. Professoressa Flaviana Calignano; Politecnico di Torino.
- [10] Dispensa: *Tecniche di Additive Manufacturing per metalli*. Professore Luca Iuliano; Politecnico di Torino.
- [11] <https://encyclopedia.pub/entry/42019>
- [12] <https://www.3dnatives.com/it/applicazioni-additive-manufacturing/#!>
- [13] <https://www.3ds.com/it/make/solutions/blog/sls-3d-printing-metal>.
- [14] [http://www.innovafvg.it/fileadmin/user\\_innovafvg/progetti/stampa\\_3D.pdf](http://www.innovafvg.it/fileadmin/user_innovafvg/progetti/stampa_3D.pdf)
- [15] <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [16] <https://www.medicalive.it/batte-il-primo-cuore-artificiale-morbido-stampato-in-3d/>
- [17] [http://www.repubblica.it/motori/auto/sezioni/attualita/2013/06/13/news/1\\_auto\\_d\\_epoc\\_a\\_la\\_stampo\\_in\\_3d-60873175/](http://www.repubblica.it/motori/auto/sezioni/attualita/2013/06/13/news/1_auto_d_epoc_a_la_stampo_in_3d-60873175/)
- [18] [https://it.wikipedia.org/wiki/Fusione\\_laser\\_selettiva\\_di\\_metalli](https://it.wikipedia.org/wiki/Fusione_laser_selettiva_di_metalli)

- [19] <https://www.wired.it/lifestyle/salute/2015/03/17/stampa-3d-medicina-salute/>
- [20] <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/types-of-additive-manufacturing/>
- [21] <https://www.firetrace.com/fire-protection-blog/additive-manufacturing>
- [22] <https://stamparein3d.it/i-dolci-geometrici-di-dinara-kasko-stampati-in-3d-18072-2/>
- [23] <https://www.designboom.com/technology/danit-peleg-3d-prints-fashion-collection07-27-2015/>
- [24] <https://www.dianalaw.com/shop/rings/serpentring/>
- [25] <https://www.adobe.com/it/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>
- [26] Buchbinder D., Meiners W., Pirch N., Wissenbach K., Schrage J., *Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting*, J Laser Appl 2014.
- [27] Su X., Yang Y., *Research on track overlapping during Selective Laser Melting of powders*, J Mater Process Technol, 2012.
- [28] ISO/ASTM 52900:2015; *Additive Manufacturing-General Principles-Terminology*. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015. [www.iso.org](http://www.iso.org)[www.astm.org](http://www.astm.org)
- [29] Kumar S.A., Prasad R., *Basic principles of additive manufacturing: Different additive manufacturing technologies*. Capitolo 2 di Additive Manufacturing. A Tool for Industrial Revolution 4.0, Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2021.
- [30] Frazier, W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. J. Mater. Eng. Perform, 2014.
- [31] Dawes, J., Bowerman, R., Trepleton, R, *Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain*, Johns. Matthey Technol. Rev. 2015.
- [32] Kong D., Dong C., Ni X., Li X, *Corrosion of metallic materials fabricated by selective laser melting*. Mater. Degrad, 2019.
- [33] Murr L., *Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting*. Addit. Manuf., 2015.
- [34] Wudy K., *Process Monitoring in PBF-LB/M*, TUM School of Engineering and Design Technical University of Munich <https://www.mec.ed.tum.de/en/lbam/research/process-monitoring-in-pbf-lb-m/>
- [35] Sneha P.N., *Electron Beam Powder Bed Fusion*, Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, 2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/electron-beam-powder-bed-fusion>
- [36] Hashmi A.W., Mali H.S., Meena A., Valerga Puerta A.P., Kunkel M.E., *Surface characteristics improvement methods for metal additively manufactured parts: a review*, Advances in Materials and Processing Technologies, 10 maggio 2022.

- [37] Hunter L.W., Brackett D., Brierley N., *Assessment of trapped powder removal and inspection strategies for powder bed fusion techniques*, Int J Adv Manuf Technol, 2020.
- [38] Mumtaz K., Hopkinson N., *Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting*, Rapid Prototyping J. 2009.
- [39] Gu D., Dai D., Chen W., *Selective laser melting additive manufacturing of hard-to-process tungsten-based alloy parts with novel crystalline growth morphology and enhanced performance*, J Manuf Sci Eng, 2016.
- [40] Charles A., Elkaseer A., Thijs L., *Effect of process parameters on the generated surface roughness of down-facing surfaces in selective laser melting*, Appl Sci, 2019.
- [41] Tolochko N.K., Mozzharov S.E., Yadroitsev I.A., *Balling processes during selective laser treatment of powders*, Rapid Prototyping J, 2004.
- [42] Nagalingam A.P., Yeo S., *Controlled hydrodynamic cavitation erosion with abrasive particles for internal surface modification of additive manufactured components*, Wear, 2018.
- [43] Dai D., Gu D., *Tailoring surface quality through mass and momentum transfer modeling using a volume of fluid method in selective laser melting of TiC/AlSi10Mg powder*, Int J Mach Tools Manuf, 2015.
- [44] Cabanettes F., Joubert A., Chardon G., *Topography of as built surfaces generated in metal additive manufacturing: a multi scale analysis from form to roughness*, Precis Eng, 2018.
- [45] Dispensa: *Rugosità superficiale e dipendenza dalle lavorazioni*, Corso di tecnologia meccanica, Politecnico di Torino.
- [46] Serri S., *Rugosità superficiale*, Comunicato Tecnico di Astonseals, 13 ottobre 2009.
- [47] Greitemeier D., Dalle Donne C., Syassen F., Eufinger J., Melz T., *Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured*, Materials Science and Technology, 21 giugno 2016.
- [48] Fayazfar H., Sharifi J., Keshavarz M.K., Ansari M., *An overview of surface roughness enhancement of additively manufactured metal parts: a path towards removing the post-print bottleneck for complex geometries*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 14 ottobre 2022.
- [49] Mingareev I., Bonhoff T., El-Sherif A.F., *Femtosecond laser post-processing of metal parts produced by laser additive manufacturing*, J Laser Appl 25, 2013.
- [50] Domblesky J., Cariapa V., Evans R., *Investigation of vibratory bowl finishing*, Int J Prod Res 41, 2003.
- [51] Dilberoglu U.M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M., *Current trends and research opportunities in hybrid additive manufacturing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20 gennaio 2021.

- [52] Song X., Chaudhari R., Hashimoto F., *Experimental investigation of vibratory finishing process*, Proceedings of the ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference, giugno 2014.
- [53] Atzenia E., Balestruccia A., Catalano A.R., Iuliano L., Priarone P.C., Salmi A., Settineri L., *Performance assessment of a vibro-finishing technology for additively manufactured components*, 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2019.
- [54] [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/1048/catalogo-macchine.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/1048/catalogo-macchine.pdf)
- [55] Domblesky J., Evans R., Cariapa V., *Material removal model for vibratory finishing*, International Journal of Production Research, 21 febbraio 2007.
- [56] Alrbaey K., Wimpenny D.I., Al-Barzinjy A.A., Moroz A., *Electropolishing of re-melted SLM stainless steel 316L parts using deep eutectic solvents: 3 × 3 full factorial design*, J Mater Eng Perform 25, 2016.
- [57] Brent D., Saunders T.A., Garcia Moreno F., Tyagi P., *Taguchi design of experiment for the optimization of electrochemical polishing of metal additive manufacturing components*, 2016. <https://doi.org/10.1115/imece2016-67492>.
- [58] Demisse W., Mutunga E., Klein K., Rice L., Tyagi P., *Surface finishing and electroless nickel plating of additively manufactured (AM) metal components*, International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2021, 2021.
- [59] Solheid J.S., Mohanty S., Bayat M., *Laser polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V: microstructure evolution and material properties*, J Laser Appl., 2020.
- [60] Solheid J., Elkaseer A., Wunsch T., *Effect of process parameters on surface texture generated by laser polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V*, Laser-based micro- and nanoprocessing XIV. Vol. 11268. International Society for Optics and Photonics; 2020.
- [61] Lee S., Ahmadi Z., Pegues J.W., *Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts*, Opt Laser Technol. 2021.
- [62] Chen C., Tsai H.L., *Fundamental study of the bulge structure generated in laser polishing process*, Opt Lasers Eng, 2018.
- [63] Gisario A., Barletta M., Veniali F., *Laser polishing: a review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022.
- [64] Temmler A., Liu D., Preußner J., Oeser S., Luo J., Poprawe R., Schleifenbaum J.H., *Influence of laser polishing on surface roughness and microstructural properties of the remelted surface boundary layer of tool steel H11*, Mater Des 192, 2020.

- [65] Pereira L., Letcher T., Michna G.J., *The effects of 3d printing parameters and surface roughness on convective heat transfer performance*, Proceedings of the ASME 2019 Heat Transfer Summer Conference HT2019, 2019.
- [66] Rhoades L., *Abrasive flow machining: a case study*, J Mater Process Technol 28, 1991.
- [67] Boschetto A., Bottini L., Veniali F., *Finishing of fused deposition modeling parts by CNC machining*, Robot Comput Integr Manuf 41, 2016.
- [68] Lee J.Y., Nagalingam A.P., Yeo S., *A review on the state-of-the-art of surface finishing processes and related ISO/ASTM standards for metal additive manufactured components*, Virtual Phys Prototyping, 2021.
- [69] Pan Y., Ji S., Tan D., *Cavitation-based soft abrasive flow processing method*, Int J Adv Manuf Technol 109, 2020.
- [70] Natarajan Y., Murugesan P.K., Mohan M., *Abrasive water jet machining process: a state of art of review*, J Manuf Processes 49, 2020.
- [71] Putz M., Dix M., Morczinek F., *Suspension technology for abrasive waterjet cutting of ceramics*, Procedia Cirp. 77, 2018.
- [72] Nanda B., Mishra A., Dhupal D., *Fluidized bed abrasive jet machining of K-99 alumina ceramic using SiC abrasives*, Int J Adv Manuf Technol. 90, 2017.
- [73] Güler O., Alver Ü., Varol T., *Fabrication and characterization of novel layered materials produced by electroless plating and hot pressing*, J Alloys Compd., 2020.
- [74] Ruys A.J., *Metal-reinforced ceramics*, Woodhead Publishing, 2020.
- [75] Deng H., Endo K., Yamamura K., *Damage-free finishing of CVD-SiC by a combination of dry plasma etching and plasma-assisted polishing*, Int J Mach Tools Manuf., 2017.
- [76] Kopp A., Derra T., Müther M., *Influence of design and postprocessing parameters on the degradation behavior and mechanical properties of additively manufactured magnesium scaffolds*, Acta Biomater, 2019.
- [77] Dentia L., Bassolia E., Gatto A., Santecchia E., Mengucci P., *Fatigue life and microstructure of additive manufactured Ti6Al4V after T different finishing processes*, Materials Science & Engineering A n.755, 2019.
- [78] <https://xometry.eu/it/come-ottenere-superfici-lisce-con-la-stampa-3d/>
- [79] <https://eurogalvano.it/galvanica-e-trattamenti-galvanici/preparazione-al-trattamento/>
- [80] <https://www.italpres.it/news-pressofusione-alluminio/cose-la-burattatura>
- [81] <http://gasparisrl.it>
- [82] <https://crea.hobbyland.eu/guida-alla-burattatura/>
- [83] <https://www.kramerindustriesonline.com>



- [84] <https://surfaceprep.com/product-category/abrasives/vibratory-media/>
- [85] <https://www.inovatecmachinery.com/blog/vibratory-finishing/>
- [86] <https://latem.com/blog/deburring-choosing-the-right-tumbling-media.htm>
- [87] Cotell C.M., Sprague J.A., Smidt F.A., *Surface Engineering of Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering, 1994.
- [88] Gillespie L.K., *Deburring and Edge Finishing Handbook*, Society of Manufacturing Engineers, 1999.
- [89] Hashimura M., Hassamontr J., Dornfeld D.A., *Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation transactions of the ASME*, Journal of Manufacturing Science and Engineering 121(1), 1999.
- [90] Bańkowski D., Spadło S., *Vibratory Machining Effect on the Properties of the Aluminum Alloys Surface*, Archives of Foundry Engineering DOI: 10.1515/afe-2017- 0124, 2017.
- [91] [https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Downloads/Prospekte/Brochure\\_Dental\\_IT.pdf](https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Downloads/Prospekte/Brochure_Dental_IT.pdf)
- [92] [https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Aktuelles/Presseberichte/it\\_PR\\_Gewindebohrer\\_Italienisch\\_2007.pdf](https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Aktuelles/Presseberichte/it_PR_Gewindebohrer_Italienisch_2007.pdf)
- [93] [http://dma.ing.uniroma1.it/users/m\\_tecspec\\_c1/Testo\\_buratto.pdf](http://dma.ing.uniroma1.it/users/m_tecspec_c1/Testo_buratto.pdf)
- [94] Brimacombe J.K., Watkinson A.P., *Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns*, Metallurgical Transaction B, vol. 14B, 1983
- [95] Vibratory Tumbler, Editorial by Industrial Quick Search. <https://www.iqsdirectory.com/articles/deburring-equipment/vibratory-tumbler.html>
- [96] Lachenmaier M., Dehmer A., Trauth D., Mattfeld P., Klocke F., *Influence of different input parameters on the contact conditions determining the surface integrity of workpieces in an unguided vibratory finishing process*, ScienceDirect CIRP 71, 2018.
- [97] Davidson D.A., *Vibratory Finishing: Versatile, Effective, and Reliable*, Technically speaking, 2008.
- [98] Yabuki A., Baghbanan M.R., Spelt J.K., *Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher*, Science Direct, Wear Volume 252 Issue 7-8, Aprile 2002.
- [99] Hashimoto F., Johnson S.P., *Modeling of vibratory finishing machines*, Science Direct, CIRp Annals, Volume 64, Issue 1, 2015.
- [100] Wang S., Chen J., Liu Z, Morgan M. Liu X., *Novel contact force measurement in vibratory finishing*, Science Direct, Powder Technology, Volume 415, 2023.

- [101] Shein A., Nash J., Duclos L., *Vibratory Tumbling Machine*, Mechanical Engineering CI Poly e C&M Topline, 2020.
- [102] Sofronas A., Taraman S., *Model Development and Optimization of Vibratory Finishing Process*, International Journal of Production Research, vol. 17, no. 1, 1979.
- [103] Wang S., Timsit R.S., Spelt J.K., *Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum*, Wear n. 243, Elsevier, 2000.
- [104] Boschetto A., Bottini L., *Roughness prediction in coupled operations of fused deposition modeling and barrel finishing*, Journal of Materials Processing Technology n. 219, Elsevier, 2015.
- [105] Eifler M., Garretson I.C., Linke B.S., Das J., Torner F., Seewig J., *Effects of vibratory finishing of 304 stainless steel samples on areal  $T$  roughness parameters: A correlational analysis for anisotropy parameters*, Journal of Materials Processing Technology n. 273, Elsevier, 2019.
- [106] Uhlmann E., Dethlefs, A., Eulitz, A., *Investigation into a geometry-based model for surface roughness prediction in vibratory finishing processes*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology n. 75, 2014.
- [107] Hashimoto F., DeBra D.B., *Modelling and Optimization of Vibratory Finishing Process*, CIRP Annals Volume 45, Issue 1, Elsevier, 1996.
- [108] Kacaras A., Gibmeier J., Zanger F., Schulze V., *Influence of rotational speed on surface states after stream finishing*, Procedia CIRP, ScienceDirect n. 71, Elsevier, 2018.
- [109] Khan U., Patidar M., Petare A.C., Chouhan R., Chouhan B., Vishwakarma B., Sharma U., Kaushal S., Dhepte D., Madhukar Y.K., *Development of Barrel Finishing Machine to Improve Surface Finish of the Wire Arc Additive Manufactured Parts*, Procedia CIRP, ScienceDirect n. 91, Elsevier, 2020.
- [110] Nanda I.S., Hassim M.H., Idris M.H., Jahare M.H., Arafat A., *Effect of Mechanical Tumbling Parameters on Surface Roughness and Edge Radius of Medical Grade Cobalt Chromium Alloy*, Internal Journal on Advanced Science Engineering Information Technology Vol 9, 2019.
- [111] Boschetto A., Bottini B., Macera L., Veniali F., *Post-Processing of Complex SLM Parts by Barrel Finishing*, Applied Sciences, MDPI, 2020.
- [112] Tian Y.B, Zhong Z.W., Tan S.J., *Kinematic analysis and experimental investigation on vibratory finishing*, Internal Journal on Advanced Science Engineering Information Technology n. 86, 2016.
- [113] Boschetto A., Bottini L., Veniali F., *Surface roughness and radiusing of Ti6Al4V selective laser melting-manufactured parts conditioned by barrel finishing*, Internal Journal on Advanced Science Engineering Information

Technology n. 94, 2018.

[114] Khorasani M., Ghasemi A.H., Farabi E., Leary M., Gibson I., Rolfe B., *A comprehensive investigation of abrasive barrel finishing on hardness and manufacturability of laser-based powder bed fusion hollow components*, Internal Journal on Advanced Science Engineering Information Technology n. 120, 2022.

[115] Tarasovskii V.P., Rybal'chenko V.V., Kuznetsova V.A., Omarova A.Y., A. Smirnova V., Vasina A.A., Korniyushina M.V., Tomshin V.O., Krasnovskii A.N., Yurasov S.Y., *Surface Machining of Corundum-Ceramic Components by Free Abrasive*, Russian Engineering Research, 2020, Vol. 40, No. 9, 2020.

[116] <https://leadrp.net/it/blog/a-complete-guide-to-understand-surface-roughness-in-manufacturing/>