

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi sulla finitura del processo EDM di componenti
In AlSi10Mg prodotti mediante tecnologia additiva**



**Politecnico
di Torino**

Relatori:

Prof. Flaviana Calignano

Prof. Luca Iuliano

Candidato:

Francesco Terazzi

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1 - L'elettroerosione	2
1.1 Introduzione.....	2
1.2 Cenni storici	2
1.3 Principio di funzionamento	4
1.4 Elettroerosione a tuffo	6
1.5 Elettroerosione a filo	12
1.6 Indicatori prestazionali elettroerosione	16
1.7 Parametri di processo e loro influenza	17
1.8 Evoluzioni del processo.....	19
Capitolo 2 - LPBF (Laser Powder Bed Fusion)	23
2.1 introduzione.....	23
2.2 Cenni storici	23
2.3 Descrizione processo	25
2.4 Materiali – AlSi10Mg	26
Capitolo 3 – Analisi bibliografica	30
Capitolo 4 – Lavoro sperimentale	46
4.1 Realizzazione dei provini	46
4.2 Taglio dei provini	48
4.3 Rilevazione della rugosità superficiale.....	50
4.4 Primo piano sperimentale.....	52
4.5 Secondo piano sperimentale.....	58
Conclusioni	74
Bibliografia	77

Introduzione

In questa opera, a seguito di una trattazione teorica in cui vengono illustrati il principio di funzionamento e lo stato dell'arte dell'elettroerosione, viene investigata l'applicazione di tale tecnica per la finitura di componenti in AlSi10Mg prodotti mediante la tecnologia additiva LPBF (Laser Powder Bed Fusion).

Si cercano infatti di stabilire i parametri di processo ottimali, relativamente al taglio tramite WEDM (Wire Electrical Discharge Machining), che permettono di ottimizzare la rugosità superficiale dei provini.

A questo scopo, in seguito ad un'attenta analisi bibliografica, è stato eseguito un primo esperimento per stabilire la migliore combinazione dei seguenti parametri:

- Ton (pulse on).
- Toff (pulse off).
- I (intensità di corrente).

Ottenuti ed analizzati dettagliatamente i risultati, si è proceduto con un secondo piano sperimentale volto invece a determinare l'influenza sulla finitura delle seguenti variabili geometriche:

- Lunghezza a sbalzo del provino rispetto alla linea di taglio.
- Peso del componente.
- Posizione sulla piattaforma.

L'analisi dei valori ottenuti è stata in questo caso effettuata in maniera molto più completa e scrupolosa, dal momento che la comprensione dell'effetto dei parametri descritti sulla finitura è l'obiettivo finale di tutto il lavoro svolto; essendo ingegneristicamente richiesta una rugosità superficiale molto bassa per dei componenti, così lavorati, oggetto di studio da parte dei relatori della presente tesi.

Capitolo 1 - L'elettroerosione

1.1 Introduzione

L'elettroerosione o EDM (Electrical Discharge Machining), è una tecnologia di lavorazione non convenzionale che permette di eseguire lavorazioni su componenti metallici, senza asportazione meccanica di truciolo.

Tale tecnologia permette infatti l'erosione progressiva di materiali aventi conducibilità elettrica, grazie all'azione termica effettuata sul componente in lavorazione da una serie di scariche elettriche.

La diffusione di questo tipo di lavorazione si deve al fatto che permette di risolvere numerosi problemi presentati dalle convenzionali tecniche ad asportazione di truciolo, come ad esempio la lavorazione di materiali particolarmente duri, la realizzazione di geometrie molto complesse o la creazione di cavità profonde, senza incorrere in problemi dovuti a forze di taglio troppo elevate; il tutto può essere ottenuto garantendo una precisione dimensionale ed una finitura superiori a quelle ottenibili coi processi convenzionali.

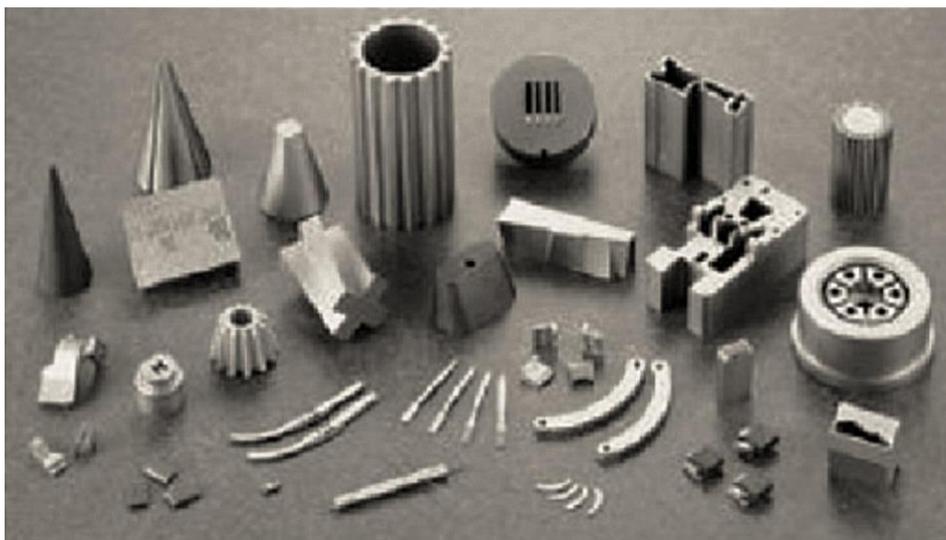


Fig. 1.1.1: Componenti prodotti tramite elettroerosione. [1]

1.2 Cenni storici

Già nel XVIII secolo lo scienziato inglese F. Priestley scoprì l'effetto erosivo delle scariche elettriche sui conduttori metallici. L'idea di sfruttare tale azione erosiva prodotta dalle scariche innescate tra due elettrodi con l'interposizione di un dielettrico si deve agli scienziati sovietici B.R. e N.I. Lazarenko, i quali, nel 1943, pubblicarono uno studio in cui analizzavano la possibilità di applicare industrialmente tale fenomeno.

Successivamente i fratelli Lazarenko riuscirono a mettere a punto un circuito elettrico alimentato in corrente continua, costituito da un condensatore caricato attraverso una resistenza variabile, accoppiato a due elettrodi posti ad una distanza tale da permettere l'innesco della scintilla per effetto della scarica prodotta dal condensatore stesso.

Il processo venne ripreso da numerosi studiosi in tutto il mondo, ma fu solo nel 1952 che, alla fiera europea delle macchine utensili, Charmilles Technologies presentò quella che divenne a breve la prima macchina per elettroerosione in commercio.

Il numero di macchine vendute crebbe negli anni al pari delle nuove applicazioni della tecnologia, fino a che negli anni 70', l'introduzione del controllo numerico permise un livello di controllo del processo tale da rendere l'elettroerosione una tecnologia diffusa in numerosi settori dell'industria manifatturiera, come mostrato in figura 1.2.1.



Fig. 1.2.1: Settori principali di applicazione dell'elettroerosione. [2]

Ad oggi, l'integrazione CAD/CAM permette la generazione di codici di controllo dei parametri di macchina e del percorso di lavorazione sempre più efficaci, che permetterà un trend di crescita costante negli anni a venire come illustrato in figura 1.2.2.

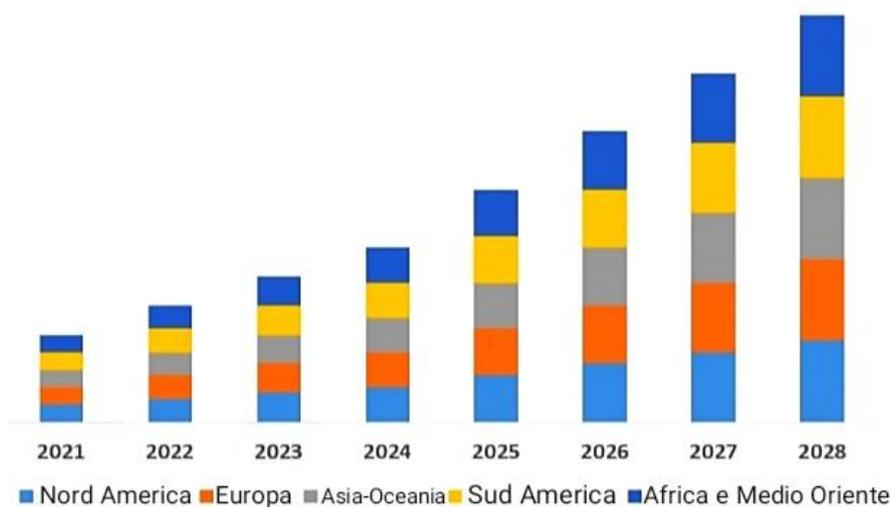


Fig. 1.2.2: Aspettative di crescita del mercato. [3]

1.3 Principio di funzionamento

Nell'EDM è la scarica elettrica che permette l'erosione del componente in lavorazione. Sebbene possa sembrare un fenomeno istantaneo, la formazione della scarica è un fenomeno articolato, costituito dalle seguenti fasi:

1. L'elettrodo-utensile viene avvicinato al pezzo fino a raggiungere la distanza minima necessaria perché possa scoccare la scintilla (gap minimo), a questo punto il sistema di controllo chiude il circuito e si ha la generazione di un campo elettrico locale in corrispondenza delle asperità superficiali di elettrodo e pezzo ("*potere delle punte*").
2. Gli elettroni emessi dall'elettrodo negativo (pezzo) iniziano a migrare verso l'elettrodo-utensile positivo. Contemporaneamente il fluido dielettrico presente nel gap tende a ionizzarsi a causa dell'aumento della tensione; le particelle neutre presenti in esso si scindono in positive e negative; il dielettrico non funge più da isolante, inizia il passaggio di corrente e si ha una diminuzione della tensione.
3. Gli ioni elettropositivi generatisi si muovono verso l'elettrodo negativo mentre quelli elettronegativi migrano nella stessa direzione degli elettroni. Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico presente generando il canale di scarica, la corrente sale mentre la tensione continua a scendere.
4. I gas che provengono dalla scomposizione del dielettrico e dai vapori metallici degli elettrodi iniziano a formare una bolla intorno alla scarica, il canale di scarica si espande, la tensione si stabilizza al valore assegnato al gap e la corrente al valore di picco.
5. Il campo magnetico associato al passaggio di corrente esercita un'azione che tende a comprimere il canale di scarica, aumentando così la pressione e la temperatura della bolla di gas, permettendo la formazione di una zona di plasma ad altissima temperatura (8000-12000°C).
6. Con il raggiungimento delle massime intensità di scarica e temperatura si ha una rapida espansione della bolla di vapore che causa la fusione e sublimazione delle zone di metallo interessate dalla scarica. Alla fine di questa fase il circuito viene aperto automaticamente, interrompendo la corrente elettrica fornita dal generatore.
7. L'interruzione della corrente causa la perdita della sorgente di calore, diminuisce il numero delle particelle conduttrici, si riduce velocemente la pressione che agiva sul canale di plasma, causandone l'implosione e contribuendo al distacco del metallo con un effetto di cavitazione. Alla fine di questa fase il fluido dielettrico invade la zona tra gli elettrodi ripristinando l'isolamento.
8. Il metallo fuso surriscaldato evapora in forma implosiva, il materiale eroso viene proiettato all'esterno del cratere; nel fluido dielettrico rimangono, in sospensione, particelle metalliche solidificatesi sotto forma di piccole sfere cave (cenosfere), carbonio e gas che vengono asportati dalla zona di lavoro (lavaggio).
9. Terminata la fase di lavaggio si ha la chiusura automatica del circuito per dare inizio all'impulso successivo.

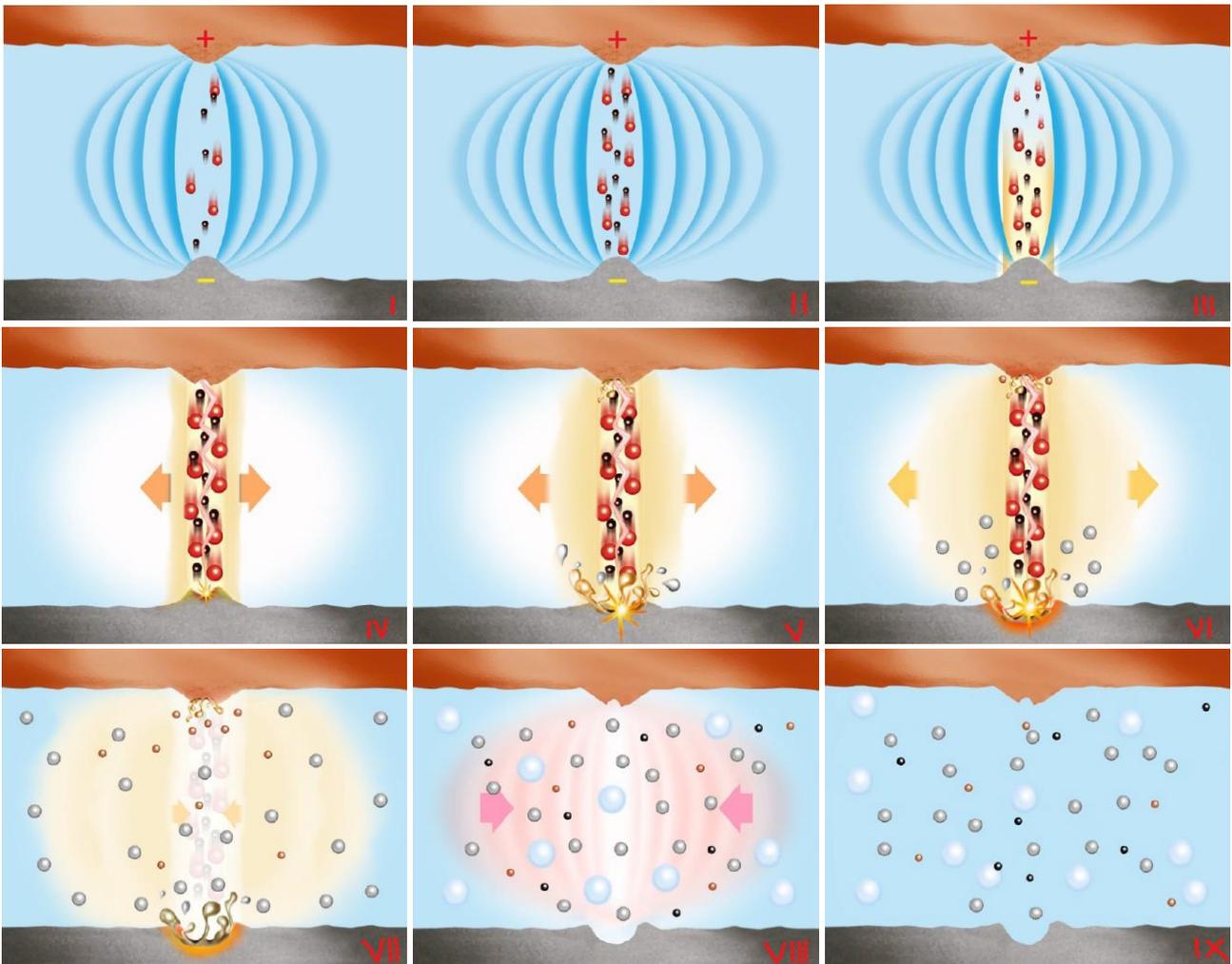


Fig. 1.3.1: Fasi del fenomeno elettroerosivo. [4]

Di seguito, in figura 1.4.1, vengono mostrati schematicamente i valori di corrente e voltaggio assunti durante ogni singola scarica.

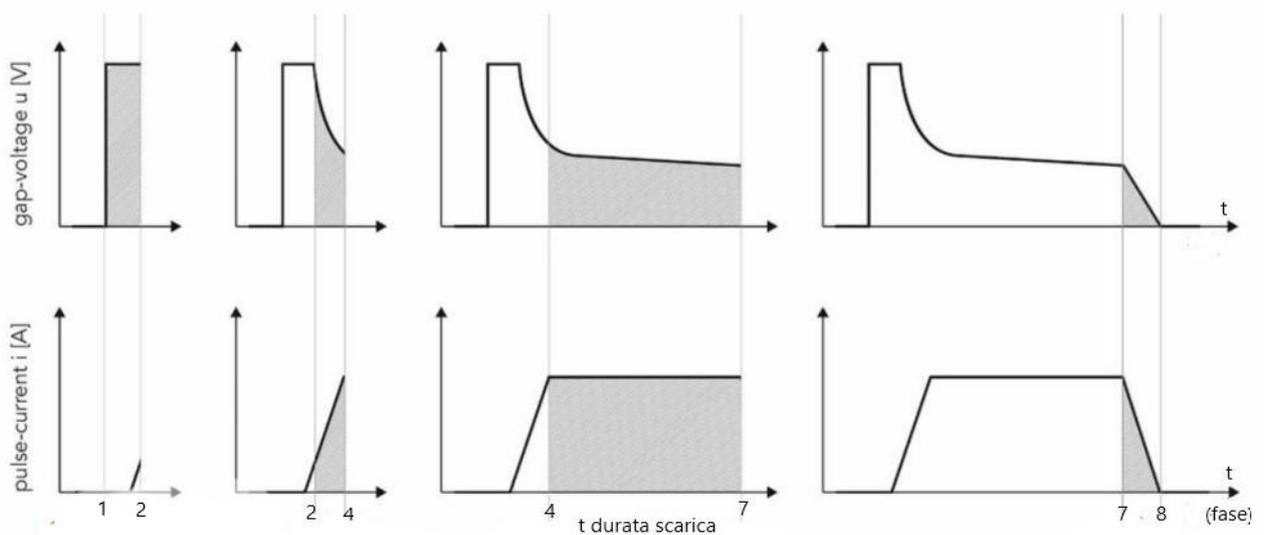


Fig.1.3.2: Intensità di corrente e voltaggio durante il processo. [5]

L'erosione sul sistema elettrodo utensile – elettrodo pezzo è dissimmetrica e dipende da numerosi fattori quali: polarità, conduttività termica e temperatura di fusione dei due componenti, intensità e durata della scarica, tipologia di lavorazione. L'erosione che ha luogo sull'elettrodo utensile viene detta usura, quella sul pezzo in lavorazione si chiama asportazione; in condizioni ottimali l'asportazione può rappresentare una quota superiore al 99,5% del materiale complessivamente eroso.

Tali eventi si ripetono a frequenze elevatissime in funzione delle esigenze e dei corrispondenti parametri di macchina. Per garantire un'erosione continua del pezzo, l'elettrodo utensile viene costantemente spinto verso il basso, fino a raggiungere il gap minimo, da un sistema automatico comandato dal CNC della macchina; il quale gestisce anche un innalzamento dell'elettrodo stesso in fase di pausa per garantire un migliore lavaggio della zona di lavoro da parte del fluido dielettrico.

Il canale conduttore si forma tra punte sempre diverse, garantendo così un'erosione uniforme. Il numero delle scariche aumenta con l'estensione della superficie da lavorare ed i parametri impostati.

1.4 Elettroerosione a tuffo

L'elettroerosione a tuffo è nata per risolvere i problemi sempre più complessi della costruzione di stampi per particolari aeronautici, automobilistici e carrozzerie; infatti ad oggi, negli stampi di medie e grandi dimensioni sono richieste lavorazioni di dettagli con tolleranze strettissime e situati in zone difficili, se non impossibili, da raggiungere con utensili tradizionali.

La tecnica ha poi trovato applicazione in numerosi altri settori dell'industria manifatturiera, tra cui microlavorazioni, elettronica e biomedicale, ma la realizzazione di stampi rimane tutt'oggi l'impiego principale dell'EDM; numerosi degli stampi per iniezione di materie plastiche o metalli, quelli per sinterizzazione di polveri o per vetrerie e quelli per lo stampaggio delle lamiere sono infatti realizzati con questa tecnica.

L'elettrodo, realizzato in materiale con elevata conducibilità, viene lavorato con macchine utensili tradizionali e/o con elettroerosione a filo, fino ad ottenere una forma speculare a quella che si vuole ottenere sul pezzo da lavorare, tenendo però conto dell'usura dell'elettrodo stesso e dei gap di scarica.

La conoscenza della struttura di una macchina per elettroerosione a tuffo, figura 1.4.1, è fondamentale per capire come avviene la lavorazione; esse è costituita da una struttura in monoblocco, oppure avente rigidità monolitica, che comprende il basamento ove è montata la tavola a croce portapezzo, contornata dalla vasca per il dielettrico ed il montante che reca nell'estremità superiore il canotto nel quale è fissata la testa di lavoro con il mandrino porta-elettrodo. Il canotto di forma prismatica si muove verticalmente lungo l'asse Z grazie ad un cilindro idraulico o ad una vite a ricircolo di sfere azionati da un motore elettrico servoregolato che produce una risoluzione micrometrica con alta velocità di risposta, anche in caso di carichi elevati. Il rilievo

della penetrazione dell'elettrodo nel pezzo viene effettuato da un sensore elettronico, nell'esempio un encoder ottico lineare, che trasmette la posizione del canotto lungo l'asse Z al controllo numerico. Il canotto presenta un sistema frenante che viene utilizzato nel solo caso particolare in cui vengono applicate attrezzature porta-elettrodi per l'esecuzione di lavorazioni planetarie o orbitali.

Sul basamento è fissata la tavola a croce porta-pezzi, generalmente costruita in ghisa, il cui spostamento lungo gli assi X e Y è fatto con viti a ricircolo di sfere azionate, nelle macchine più moderne, da servomotori e controllato con misurazione elettronica della posizione. La struttura della tavola e delle guide deve essere molto robusta, anche se non si hanno sollecitazioni elevate durante la lavorazione, perché la stabilità del posizionamento del pezzo è fondamentale per garantire la precisione della lavorazione e ridurre il consumo dell'elettrodo. La tavola porta-pezzi è contenuta in una vasca a tenuta stagna nella quale è stoccato il dielettrico necessario per far avvenire il processo elettroerosivo.

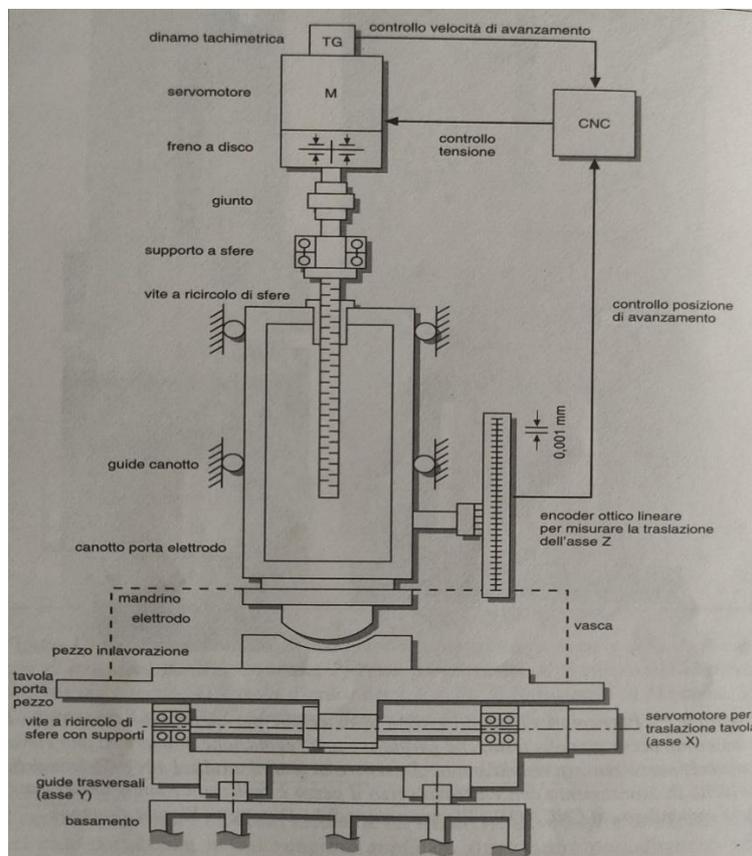


Fig. 1.4.1: Tradizionale struttura macchina EDM. [6]

Oltre agli assi di traslazione orizzontale X e trasversale Y della tavola portapezzo e all'asse di traslazione verticale Z della testa porta-elettrodo, le macchine per elettroerosione a tuffo possono essere dotate di un quarto asse, chiamato asse C, dato dalla rotazione dell'elettrodo-utensile attorno all'asse Z, eseguita questa dalla testa della macchina.

L'asse C, da solo o accoppiato con altri assi, permette di realizzare molteplici lavorazioni che non sarebbero altrimenti possibili, come l'erosione angolare generata dal moto elicoidale ottenuto

interpolando la rotazione con il movimento lungo l'asse Z, figura 1.4.2a; la riproduzione di una sagoma lungo una circonferenza grazie all'orbitazione planetaria attorno all'asse Z, figura 1.4.2b, oppure l'espansione planetaria circolare attorno all'asse Z, fig. 1.4.2c; ottenute con lo sfasamento dell'asse dell'elettrodo rispetto a Z stesso.

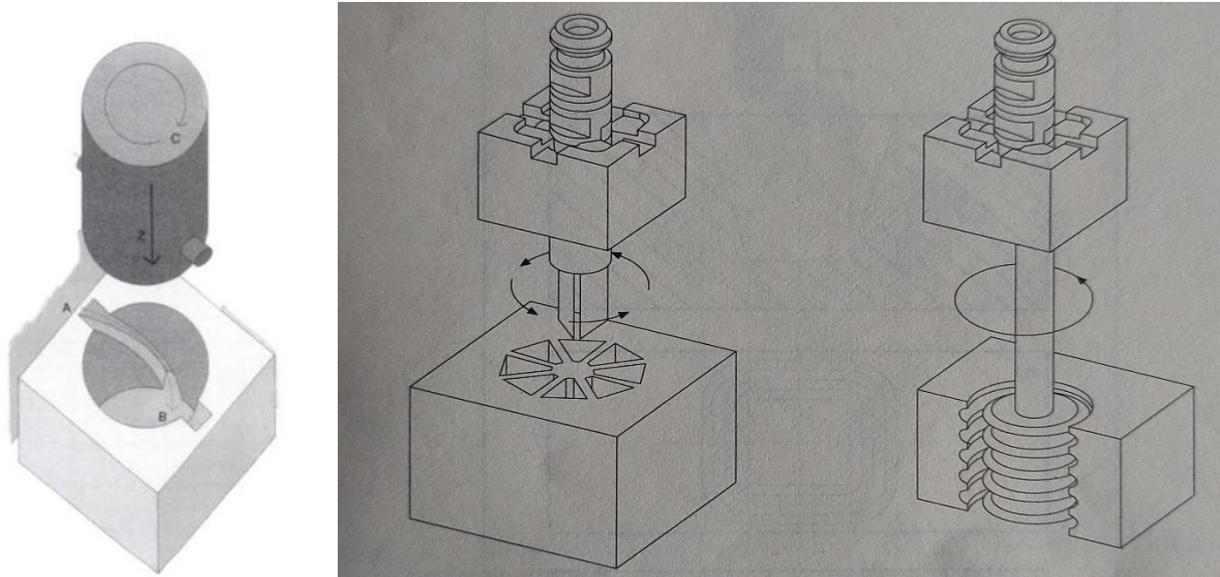


Fig. 1.4.2: [a]Erosione angolare.

[b] Orbitazione planetaria.

[c]Espansione planetaria circolare. [6]

Il sistema di assi usato per la lettura delle righe ottiche solidali con le parti della macchina in movimento è detto sistema assoluto e permette alla macchina di conoscere istante per istante la propria posizione; tale sistema è però poco pratico per l'operatore, viene perciò introdotto un nuovo sistema di assi, detto sistema macchina, che l'operatore può modificare a suo piacimento, e permette alla macchina di individuare la posizione del pezzo rispetto agli assi della tavola.

GAP

Come detto, il gap o distanza di scarica rappresenta il valore che permette o meno l'innesco del processo di lavorazione; esso dipende dalle condizioni tecnologiche della lavorazione come parametri impostati al generatore, contaminazione del dielettrico ecc.

Per l'elettroerosione a tuffo vengono definiti specificatamente diversi tipi di gap:

- Gap statico: è il valore della distanza pezzo-elettrodo che si ha quando, dopo essere scoccata la scintilla, l'elettrodo resta fermo e possono quindi aversi altre scintille. Quando l'erosione del pezzo fa sì che la scintilla non scocchi più, tale gap viene ripristinato automaticamente per far continuare il processo.
- Gap frontale: definisce la distanza misurata nella direzione dell'asse di avanzamento dell'elettrodo; il suo valore varia generalmente tra 0,025 e 0,125mm e viene determinato regolando il movimento dell'elettrodo lungo l'asse Z. Con la regolazione del gap frontale si controllano i valori relativi all'asportazione di materiale e all'usura dell'utensile.
- Gap laterale: durante la penetrazione dell'elettrodo nel pezzo si producono delle scariche erosive meno intense, ma continue, anche sulle pareti laterali del pezzo, con il risultato di

provocare l'allargamento della sede tra elettrodo e pezzo in direzione perpendicolare all'asse di avanzamento dell'elettrodo stesso; tale distanza cresce man mano che l'utensile penetra nel pezzo fino a stabilizzarsi ad un valore pari a circa la metà del gap frontale che rimane costante per tutta la profondità del pezzo. Questi ultimi due sono illustrati in figura 1.4.3

- Gap limite: rappresenta la distanza massima fra l'elettrodo, considerato integro, e il fondo dei crateri prodotti durante la lavorazione di sgrossatura. Occorre prevedere un piccolo margine di sicurezza per evitare che restino tracce del fondo dei crateri a seguito della finitura.
- Gap orbitale: indica la distanza elettrodo-pezzo misurata nella direzione perpendicolare a quella di orbitazione. Tale valore rimane costante su tutta la superficie lavorata perché spostandosi durante la lavorazione l'elettrodo mantiene fisso il valore del gap.
- Gap medio: rappresenta la distanza tra l'elettrodo, considerato integro, e la linea mediana dei crateri prodotti sul pezzo in lavorazione. Questo valore viene utilizzato per sottodimensionare gli elettrodi nel caso in cui la superficie non venga sottoposta a trattamenti di finitura.

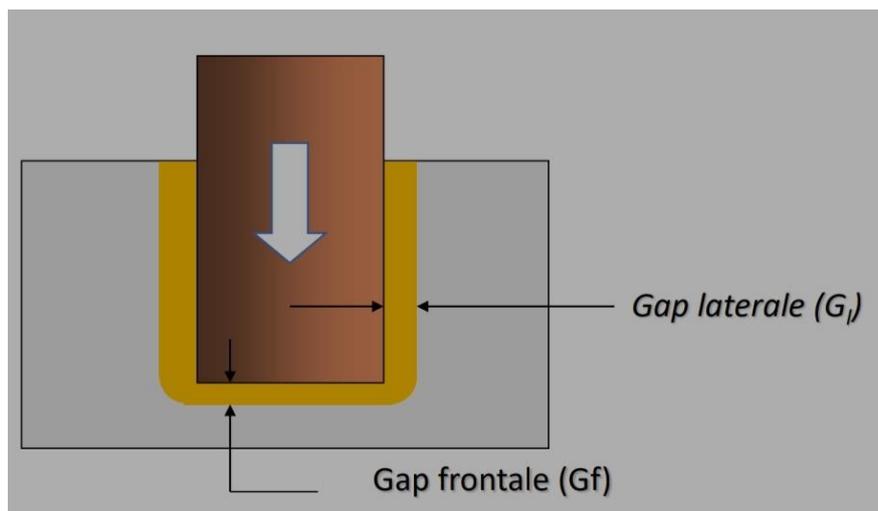


Fig. 1.4.3: Gap laterale e frontale durante la lavorazione. [7]

Al fine di rispettare le dimensioni di progetto occorre costruire gli elettrodi con dimensione opportunamente ridotta per compensare i valori dei gap frontale e laterale. Per effettuare questo sottodimensionamento esistono delle tabelle che permettono di calcolare il valore esatto considerando il grado di finitura che si vuole ottenere, il materiale di pezzo ed elettrodo, i parametri elettrici ed il tipo di lavaggio.

ELETTRODI

Come già detto, la principale caratteristica che deve avere un elettrodo è un'elevata conducibilità elettrica σ [Siemens/m], cioè la propensione del materiale a farsi attraversare da corrente. Altre proprietà che vengono prese in considerazione sono capacità di asportazione, resistenza all'usura, finitura ottenibile, lavorabilità, costo ed elevato punto di fusione.

Gli elettrodi possono essere di numerosi materiali, tra cui i principali sono:

- Rame: utilizzato per la lavorazione di componenti con piccoli dettagli come monete o gioielli, figura 1.4.4; ha il notevole vantaggio che l'usura, coi giusti parametri di processo, risulta talmente bassa che la finitura può essere effettuata senza cambiare elettrodo.
- Ottone: ha il pregio di essere facilmente lavorabile, ma presenta usura elevata e scarsa capacità di asportazione, difetti che lo rendono ormai poco utilizzato.
- Tungsteno: utilizzato nell'esecuzione di micro fori calibrati permette di raggiungere tolleranze inferiori al millesimo.
- Acciaio: è applicato nella lavorazione di stampi in acciaio per iniezione di materie plastiche o pressofusione di leghe leggere.
- Grafite: garantisce un inferiore consumo dell'elettrodo, maggiore resistenza al calore, più elevata velocità di asportazione e miglior lavorabilità rispetto al rame; inoltre non è tossica e si presta a costruire elettrodi con pareti sottili o lamellari, come visibile in figura 1.4.5, che sarebbero altrimenti soggette al rischio di piegature causate da urti accidentali o elevata pressione di lavaggio. Queste caratteristiche hanno determinato negli ultimi anni un sempre più diffuso utilizzo degli elettrodi in grafite che hanno ormai soppiantato quelli in rame.
- Rame-tungsteno: utilizzato per produrre elettrodi di piccole dimensioni, presenta minima usura e discreta asportazione, è particolarmente adatto a lavorare materiali duri.
- Rame-grafite: materiale combinato costituito da grafite impregnata di rame, conserva tutte le qualità della grafite ed in più elimina la sua fragilità.
- Altri materiali come leghe a base di rame contenenti ZrB₂ o TiC presentano valori di MRR migliori del solo rame e trovano quindi applicazione in svariate operazioni.

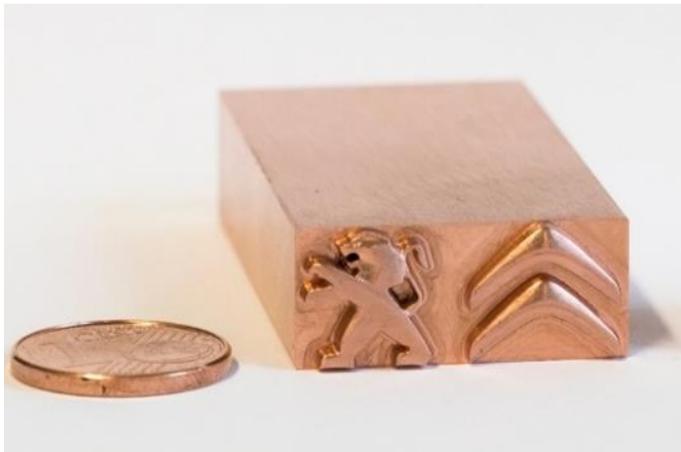


Fig.1.4.4: Elettrodo in rame. [8]



Fig.1.4.5: Elettrodo in grafite. [9]

Gli elettrodi vengono solitamente costruiti utilizzando tecniche produttive tradizionali come fresatura, tornitura, coniatura, fusione, imbutitura, attacco chimico, galvanoplastica e elettroerosione a filo; tuttavia negli ultimi anni è stato oggetto di numerosi studi ed ha già trovato applicazione nell'industria l'impiego di elettrodi realizzati con tecniche di fabbricazione additiva. Elettrodi in materiale conduttivo realizzati con la tecnica DMLS hanno portato a ottimi risultati in

termini di velocità di asportazione e bassa usura, così come elettrodi in materiale non conduttivo realizzati tramite stereolitografia.

DIELETTRICO

Come già accennato il dielettrico è fondamentale in una lavorazione di elettroerosione in quanto funge da isolante tra elettrodo-utensile e pezzo e, ionizzandosi raggiunta la tensione di rottura, permette la creazione delle scariche elettriche; ha però altre due funzioni fondamentali, cioè quelle di raffreddare la zona di lavoro e quella di liberarla dalle particelle di materiale eroso durante la fase di lavaggio.

Nell'elettroerosione a tuffo il fluido dielettrico viene fornito alla vasca situata nella zona di lavoro da un circuito idraulico costituito da due pompe per il ricircolo, una vasca di decantazione del fluido, un filtro, solitamente a labirinto, a letto di polvere o a cartucce, che serve ad intrappolare le particelle di materiale rimosso presenti in sospensione ed un sistema refrigerante che ha la funzione di mantenere il fluido alla corretta temperatura di utilizzo. La portata di fluido fornita alla zona di lavoro dagli ugelli situati nei pressi del pezzo è la caratteristica più importante per un impianto di questo tipo; un afflusso insufficiente può infatti causare surriscaldamento del pezzo, basso MRR, veloce erosione dell'elettrodo ed uno scorretto funzionamento della macchina, mentre un afflusso eccessivo può ridurre la velocità di asportazione ed aumentare il tasso di usura dell'utensile. Oltre ad un corretto e costante afflusso del dielettrico è fondamentale anche l'efficienza del filtro, in quanto la pulizia del fluido è essenziale per ottenere un'elevata finitura superficiale dei pezzi lavorati.

Un buon fluido dielettrico deve quindi possedere le seguenti caratteristiche:

- Elevato calore specifico in modo da svolgere al meglio la funzione di refrigerante.
- Bassa viscosità per garantire una migliore rimozione delle particelle di detriti.
- Punto di infiammabilità elevato per una maggiore sicurezza.
- Veloce riacquisizione delle proprietà isolanti per permettere una frequenza di scarica più elevata.
- Buona resistenza all'ossidazione visto l'elevato calore generato nella zona delle scariche.
- Rigidità dielettrica tale da garantire un adeguato ritardo di accensione.

I fluidi che possiedono le proprietà elencate e sono dunque utilizzati come dielettrico nelle lavorazioni di elettroerosione sono sostanzialmente classificabili in tre categorie distinte:

- **Composti idrocarburici:** si tratta di oli minerali raffinati come paraffina o cherosene, garantiscono la stabilità del processo di elettroerosione a tuffo, ma hanno il difetto di non essere ecologici, possono generare gas nocivi e liberare carbonio in grado di reagire a formare composti che si depositano sull'elettrodo intaccando la qualità della lavorazione.
- **Acqua deionizzata:** non presenta rischi per l'ambiente e la salute ed ha un elevato potere refrigerante, risulta però poco utilizzata nell'elettroerosione a tuffo in quanto causa un

eccessivo TWR e provoca corrosione durante la lavorazione di pezzi ferrosi; trova applicazione nella WEDM e nella realizzazione di micro fori.

- Dielettrici a base gassosa: di introduzione relativamente recente, sono attualmente oggetto di numerosi studi in quanto sono ecologici, atossici e più economici dei dielettrici liquidi derivanti da idrocarburi, ma garantiscono comunque ottimi risultati; tuttavia esistono ancora alcuni problemi tecnici che li rendono industrialmente poco diffusi.

1.5 Elettroerosione a filo

L'elettroerosione a filo o Wire-EDM (WEDM) è una tecnica di elettroerosione utilizzata specificatamente per il taglio di sagome dal contorno anche complesso. Risulta molto conveniente nella realizzazione di componenti quali stampi per trancitura, matrici per estrusione, utensili sagomati ed elettrodi da utilizzare nell'elettroerosione a tuffo.

L'elettrodo-utensile, costituito da un filo in materiale ad alta conducibilità (rame, ottone, tungsteno, ecc.) si svolge a velocità programmata da una bobina di carica e, dopo essere passato attraverso delle pulegge per il trascinamento ed il controllo del tensionamento, raggiunge il guidafile superiore e successivamente la zona del componente in lavorazione, per poi passare attraverso il guidafile inferiore e avvolgersi su una bobina di recupero, figura 1.5.1.

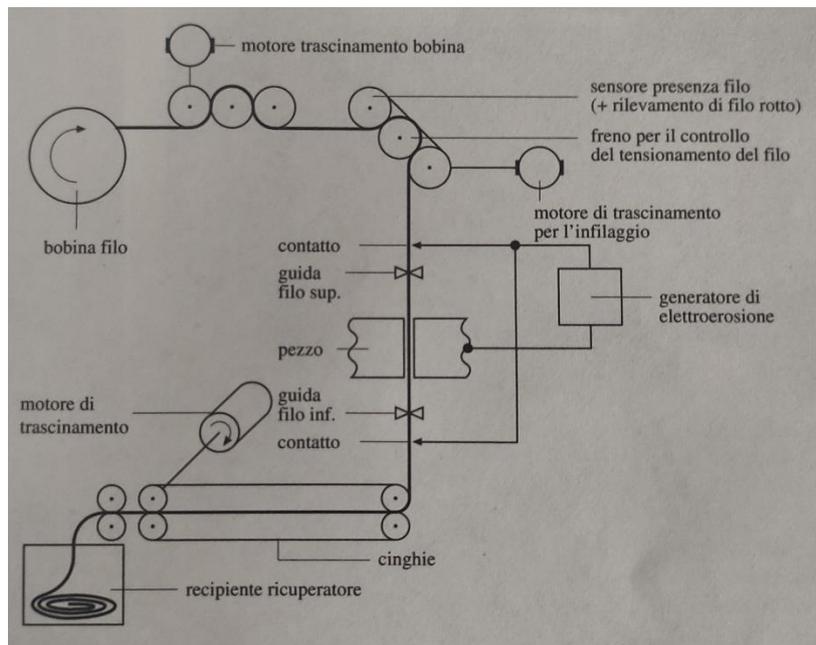


Fig. 1.5.1: struttura tradizionale macchina WEDM. [6]

La zona di lavoro viene costantemente bagnata con il fluido dielettrico utilizzando uno più ugelli, ma esistono anche macchine che lavorano a filo sommerso per permettere una maggiore velocità di taglio.

Il pezzo non viene fissato sul fondo della vasca di lavoro, ma su dei supporti distanziatori che, sorreggendolo ad una quota opportuna, consentono il libero scorrimento del filo sotto al pezzo, garantendo un lavaggio più efficiente.

È possibile realizzare tagli obliqui e anche forme differenti sulle due facce del componente in lavorazione (figura 1.5.2) grazie al fatto che la macchina possiede, oltre ai due assi inferiori X e Y per lo spostamento in piano del pezzo in rapporto alla testa inferiore, anche due assi superiori U e V, paralleli rispettivamente ad X ed Y e perpendicolari tra loro, che gestiscono lo spostamento della testa superiore portafilo e possono essere azionati automaticamente dal CNC (figura 1.5.3).

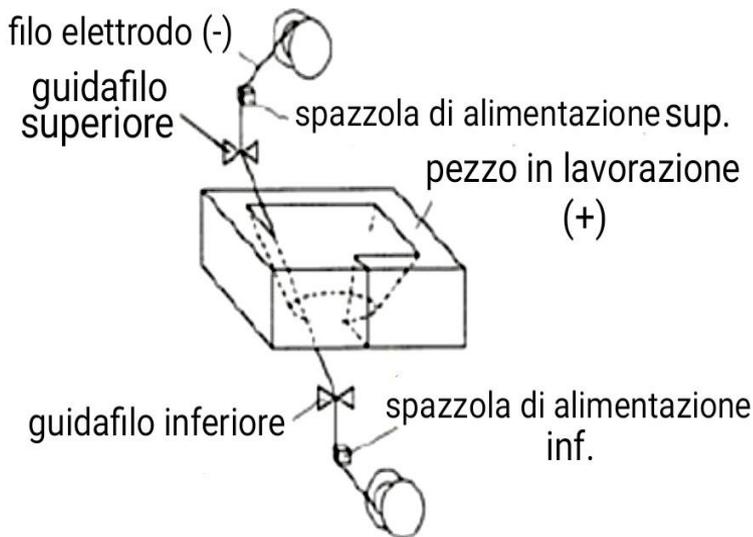


Fig.1.5.2: Taglio obliquo. [10]

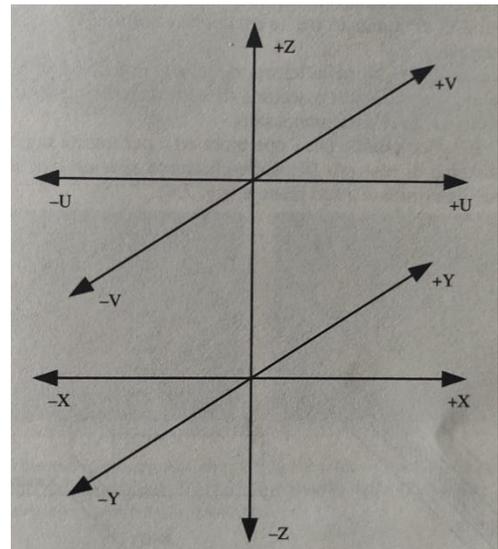


Fig. 1.5.3: Assi macchina. [6]

Occorre sempre prevedere nel componente in lavorazione un foro di inizio lavoro in cui inserire il filo; è consigliabile posizionarlo ad almeno 20mm dalla superficie da lavorare ed in una zona in cui non è fondamentale il risultato estetico.

L'inserimento del filo lungo tutto il percorso avviene in modo automatico sia all'inizio della lavorazione sia in caso di rottura, ed è guidato nel foro mediante un getto d'acqua ad alta pressione; superato il pezzo, il filo viene guidato, mediante un meccanismo di traino a cinghia, dalla guida inferiore fino ai rulli di trascinamento e quindi alla vasca/bobina di raccolta. Questo automatismo permette alla macchina di procedere autonomamente con la lavorazione evitando tempi morti dovuti alla rottura accidentale del filo.

GAP

In questo tipo di lavorazione l'elettrodo-utensile che effettua la lavorazione è sempre lo stesso filo, ma con sezione sempre diversa ad effettuare il taglio, ciò fa sì che la sua usura sia ininfluenza sulla precisione del taglio e sul calcolo del gap frontale necessario affinché si origini il processo di scarica. Il solco di taglio avrà una larghezza L (equazione 1), funzione della distanza alla quale non si ha più la scarica elettrica, detta gap radiale, che sarà inferiore alla distanza d'azione limite, chiamata gap asintotico, oltre la quale è nulla la possibilità che scocchi la scintilla, figura 1.5.4.

$$L = \varnothing_{\text{filo}} + (2 \times \text{gap radiale}) \quad (1)$$

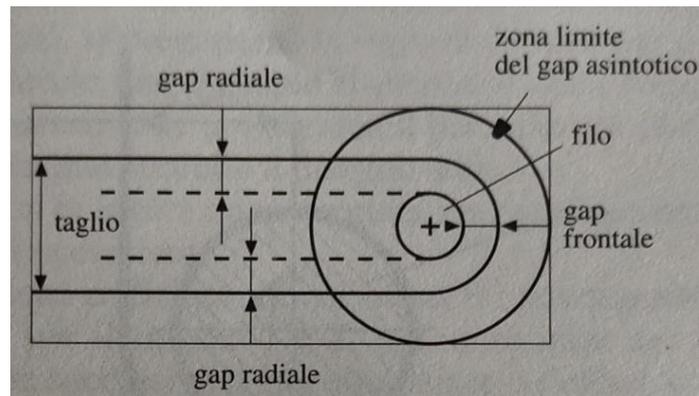


Fig.1.5.4: Vari Gap elettroerosione a filo. [6]

Il gap radiale si può valutare misurando la larghezza di taglio su un campione di prova ottenuta con un filo di diametro noto utilizzando la seguente formula (eq.2):

$$\text{gap radiale} = \frac{\text{larghezza taglio} - \varnothing_{\text{filo}}}{2} \quad (2)$$

Tale valore cambia però col variare dei valori dell'energia di scarica fornita al filo, della tensione, della corrente, dei tempi di scarica e pausa, del flusso del dielettrico, della velocità di avanzamento, dello spessore del pezzo e della sagoma che si vuole tagliare.

Questo valore risulta fondamentale, in quanto, nel programmare la lavorazione occorre tenerne conto se si vuole ottenere la misura ricercata; il filo andrà quindi spostato rispetto al profilo da realizzare con un valore di offset pari al gap radiale; conto questo che viene effettuato in automatico dalla macchina noto il diametro del filo ed il tipo di lavorazione.

ELETTRODO

Come già detto l'elettrodo è costituito da un unico filo conduttore continuo; esso deve avere elevate conducibilità termica, elettrica e temperatura di fusione, ottima piegabilità ed una notevole resistenza. Mentre le prime caratteristiche citate dipendono essenzialmente dal materiale, la piegabilità e la resistenza alle sollecitazioni di trazione presenti possono essere ottenute producendo il filo mediante trafilatura, grazie all'orientazione delle fibre nella struttura del materiale in direzione della sollecitazione; la trafilatura garantisce anche costanza e rotondità della sezione del filo, garantendo così una costante larghezza del taglio.

I fili utilizzati hanno diametri unificati compresi tra 0.03 e 0.33mm e sono classificabili in due categorie:

- Fili omogenei: costituiti da un singolo materiale, generalmente rame, ottone, bronzo e acciaio con molibdeno, tungsteno o zincato.
- Fili compositi: costituiti da un'anima di rame o ottone rivestita di zinco oppure, per alcune applicazioni particolari, da un'anima di molibdeno rivestita di rame.

Durante la lavorazione il filo si svolge dalla bobina di carica, in cui è avvolto per una lunghezza variabile da 6 a circa 60m, con un velocità variabile da 0.15 a 15 m/min in base a materiale e dimensioni di pezzo ed elettrodo. A causa dell'usura non può essere riutilizzato.

DIELETTRICO

Nel caso dell'elettroerosione a filo si hanno alcune differenze rispetto a quanto illustrato per l'elettroerosione a tuffo, sia in termini di fluido utilizzato sia per quanto riguarda l'impianto che fornisce il dielettrico alla zona di lavoro.

Per consentire un lavaggio efficiente e ottenere una lavorazione precisa il fluido dielettrico deve circondare il filo per tutta la lunghezza del taglio e penetrare nei più piccoli interstizi della zona di lavoro. Perché questo accada, il fluido dielettrico deve avere conducibilità e viscosità molto basse; il più adatto è l'acqua demineralizzata, ma esistono macchine che lavorano in bagno d'olio per permettere l'asportazione con debole intensità di scarica elettrica ed evitare il fenomeno dell'ossidazione che, nel caso di utilizzo dell'acqua, avviene sia durante che dopo la lavorazione, motivo per cui i pezzi vanno immediatamente puliti ed asciugati al termine della stessa.

La demineralizzazione dell'acqua viene generalmente effettuata da un impianto a ciclo continuo integrato alla macchina, ed il suo apporto alla zona di lavoro è garantito da sistemi simili a quelli descritti per l'elettroerosione a tuffo; spesso, soprattutto in lavorazioni di sgrossatura, per garantire una migliore eliminazione dei trucioli non è presente una vasca di contenimento del dielettrico in cui viene eseguita la lavorazione in immersione, ma degli ugelli comandati da elettrovalvole che garantiscono un flusso con pressione ed intensità corrette indirizzato verso la zona di taglio.

Parametri di lavoro caratteristici

- **Tensione meccanica del filo:** durante la lavorazione, il filo è influenzato da diverse forze che si generano durante il taglio, dovute ai fenomeni elettrostatici, all'induzione elettromagnetica, alla spinta idraulica del dielettrico ecc. che attirano il filo verso il pezzo o lo respingono. Per garantire che il filo sia costantemente rigido e segua stabilmente la direzione impressa dai guidafile, occorre variare la tensione meccanica del filo, in modo da garantire un perfetto equilibrio delle forze in gioco sul filo nella zona di lavoro.
Il valore da impostare varia in funzione della tipologia di filo utilizzato, della lavorazione che si vuole effettuare e dipende dall'esperienza dell'operatore.
Maggiore è la tensione meccanica, tanto più il filo sarà stabile, va però sempre posta attenzione al limite oltre il quale si rischia la rottura del filo.
- **Velocità di taglio:** dipende dalla velocità di avanzamento del filo nel taglio e dalla sua velocità di scorrimento nelle guide. Essa varia in base alla forma della sagoma da tagliare e all'altezza del taglio. Se trasla la tavola secondo gli assi X e Y, la velocità di taglio dipende dal moto che il pezzo esegue contro il filo, mentre se trasla la testa portafilo secondo gli assi U e V, allora essa dipende dal moto del filo verso il pezzo; infine, se i quattro assi sono contemporaneamente interessati dal movimento, anche con velocità diverse, la velocità di taglio dipende dal moto reciproco.

- Velocità di scorrimento del filo: a seguito dell'introduzione del filo nel pezzo, esso è trainato da un motore che regola la sua velocità di scorrimento in funzione dello spessore del pezzo, dei parametri elettrici e della qualità ricercata. Generalmente un maggiore spessore del pezzo richiede una velocità di scorrimento più elevata, bisogna però assicurare un regolare svolgimento del filo ed evitare l'eccessiva usura dello stesso con conseguente rischio di rotture.

Per realizzare le migliori condizioni di lavoro in operazioni complesse, intervengono i controlli automatici che sono in grado di modificare i parametri per eseguire il taglio perfettamente adeguato alla forma geometrica del pezzo in lavorazione.

1.6 Indicatori prestazionali elettroerosione

MRR (Material Removal Rate)

Il tasso di rimozione del materiale è un importante fattore per misurare le prestazioni di una lavorazione per elettroerosione, esso rappresenta infatti la quantità percentuale di materiale rimosso durante la lavorazione, in funzione della durata, secondo la seguente formula (equazione 3):

$$MRR = \left(\frac{W_i - W_f}{\rho * t} \right) * 100 \quad (3)$$

Dove: W_i e W_f rappresentano il peso del campione rispettivamente prima e dopo la lavorazione; ρ la densità del materiale e t il tempo della lavorazione.

Il MRR aumenta in modo proporzionale con il valore della corrente, quello della tensione al generatore e con la durata del tempo di scarica. Occorre però sapere che un eccessivo aumento di questi fattori comporta un notevole aumento della rugosità superficiale e del consumo dell'utensile.

A differenza delle lavorazioni tradizionali ad asportazione di truciolo, la durezza del materiale in lavorazione non ha alcuna influenza sul tasso di rimozione del materiale. Questo comporta la possibilità di lavorare tramite elettroerosione materiali con durezza molto elevata.

Valori tipici per il processo di EDM sono nell'ordine dei 10^2 [mm^3/min]. Tuttavia in lavorazioni di sgrossatura o in produzioni di lotti numerosi l'aumento dell'MRR assume un ruolo fondamentale nella riduzione dei tempi di lavorazione, sono per questo nate alcune varianti dell'EDM improntate specificatamente all'aumento di tale fattore, le più diffuse sono l'UEDM (Ultrasonic assisted EDM) e la DEDM (Dry-EDM), che verranno nel seguito descritte.

TWR (Tool Wear Rate)

L'usura dell'utensile è dovuta alla collisione degli elettroni migranti verso l'utensile, che funge da elettrodo positivo, con la superficie dello stesso; tale scontro genera calore e causa l'erosione di una piccola quantità di materiale dall'utensile.

Il tasso di usura dell'utensile in una lavorazione di elettroerosione viene calcolato con la seguente formula (equazione 4):

$$TWR = \frac{(W_{tb} - W_{ta})}{t} \quad (4)$$

Dove W_{tb} e W_{ta} rappresentano il peso dell'elettrodo-utensile prima e dopo la lavorazione di cui t è la durata.

L'usura dell'utensile avviene principalmente all'inizio del ciclo, ciò perché gli elettroni, essendo più leggeri, hanno maggiore mobilità e colpiscono l'anodo prima che gli ioni positivi arrivino al pezzo; la leggerezza degli elettroni spiega in parte anche il fatto che l'usura dell'utensile sia molto inferiore rispetto all'asportazione di materiale dal componente [6].

Alcune delle recenti varianti dell'elettroerosione garantiscono un notevole miglioramento anche per quanto riguarda questo parametro; in particolare nella DEDM si ha una drastica riduzione del TWR a causa dell'assenza del fluido dielettrico.

SR (Rugosità Superficiale)

La rugosità superficiale, assieme ad altri parametri come le tensioni superficiali residue e la densità dei difetti in superficie, ha un notevole impatto su prestazioni, durata ed affidabilità dei componenti lavorati; per questo il controllo di tale fattore assume importante rilevanza nei moderni processi produttivi.

Nel processo di elettroerosione, la rugosità è influenzata da diversi dei parametri di processo; in particolare, l'aumento della frequenza di scarica, a parità di energia erogata in un dato lasso di tempo, permette di migliorare la rugosità, così come la riduzione del gap; valori eccessivi di tensione, corrente o durata della scarica comportano tendenzialmente un peggioramento della finitura superficiale.

1.7 Parametri di processo e loro influenza

Pulse-on-time (t_{on})

Il pulse on time rappresenta l'intervallo di tempo durante il quale si verifica la scarica; la sua durata, dell'ordine di pochi millisecondi, rappresenta un parametro fondamentale. Una durata maggiore della scarica elettrica si traduce in un cratere associato alla singola scarica più profondo, il che comporta tendenzialmente un aumento del tasso di rimozione di materiale ed un peggioramento della rugosità superficiale.

Pulse-off-time (t_{off})

Il pulse off time è l'intervallo di tempo tra due scintille consecutive durante il quale non c'è alimentazione di corrente agli elettrodi e avviene la deionizzazione del dielettrico. La sua durata è sempre nell'ordine dei millisecondi, ma tendenzialmente maggiore di quella del ton.

L'effetto sulla rugosità è chiaramente minore rispetto a quello del pulse on, che rappresenta il momento di asportazione vero e proprio; tuttavia viene dimostrato in molti articoli scientifici come un aumento del t_{off} comporta un leggero miglioramento della finitura superficiale, ma anche una riduzione della velocità della lavorazione; può inoltre causare la rottura del filo nel caso di WEDM.

Peak current (IP)

Rappresenta il massimo valore di corrente raggiunto tra gli elettrodi durante il pulse on time. Un aumento della corrente crea crateri più ampi, con conseguente aumento dell'MRR, e tende a deteriorare la qualità della finitura superficiale.

Servo Voltage (SV)

È la tensione che, dato un certo gap, garantisce che si verifichi la scintilla. Un valore troppo basso aumenta il rischio che la scarica elettrica spontanea si interrompa, mentre un valore troppo elevato comporta un peggioramento della rugosità.

Frequenza di scarica

Viene calcolata come l'inverso del tempo ciclo (pulse on time + pulse off time) e rappresenta la quantità di scariche che vengono fornite in un dato lasso temporale.

Un frequenza di scarica elevata (molte centinaia di kHz) viene utilizzata per la finitura, in quanto comporta molti crateri di piccole dimensioni e poco profondi; al contrario una frequenza di scarica ridotta (inferiore a 200Hz) causa crateri grandi e profondi, utili se si vuole ottenere un elevato tasso di asportazione, come in lavorazioni di sgrossatura.

Altri parametri

Esistono altri parametri che possono risultare importanti in una lavorazione per elettroerosione tra i quali figurano:

- Velocità di avanzamento utensile/filo: una velocità troppo bassa può causare la rottura del filo nel caso di WEDM, e comporta per entrambi i tipi di lavorazione un TWR elevato ed una scarsa finitura superficiale.
- Pressione e portata del fluido dielettrico: vanno adeguatamente regolate in base alla profondità della lavorazione e al materiale del componente.
- Materiale dell'elettrodo.

- Tensione del filo: parametro presente nel solo caso di lavorazione WEDM; un valore troppo basso comporta scarse precisione dimensionale e accuratezza geometrica e può determinare la rottura del filo.

1.8 Evoluzioni del processo

Nel corso degli anni, il progredire della ricerca ha portato ad un'evoluzione continua del processo di elettroerosione, numerose varianti si sono aggiunte ai comuni procedimenti EDM (elettroerosione a tuffo) e WEDM (elettroerosione a filo), di cui alcune, di seguito brevemente descritte, hanno assunto notevole importanza a livello industriale e di ricerca, come mostrato in figura 1.8.1.

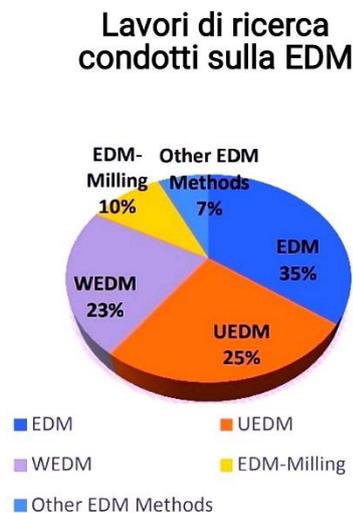


Fig. 1.8.1: Studi attualmente condotti sull'elettroerosione. [11]

- Elettroerosione a tuffo fresante: questa variante dell'elettroerosione a tuffo ha il notevole vantaggio che non occorre realizzare elettrodi specifici per la sagoma richiesta, figura 1.8.2, ma basta guidare il percorso di un elettrodo standardizzato per ottenere la rimozione del materiale nelle zone volute, al pari di quanto viene fatto programmando il percorso utensile di una fresa. Il limite principale di questa specifica tecnica è dato dal fatto che le geometrie realizzabili sono limitate a quelle ottenibili con la fresatura, trova infatti applicazione nella realizzazione di matrici e punzoni, in quanto l'assenza del tempo di progettazione e lavorazione degli elettrodi permette di ridurre tempi e costi di produzione.

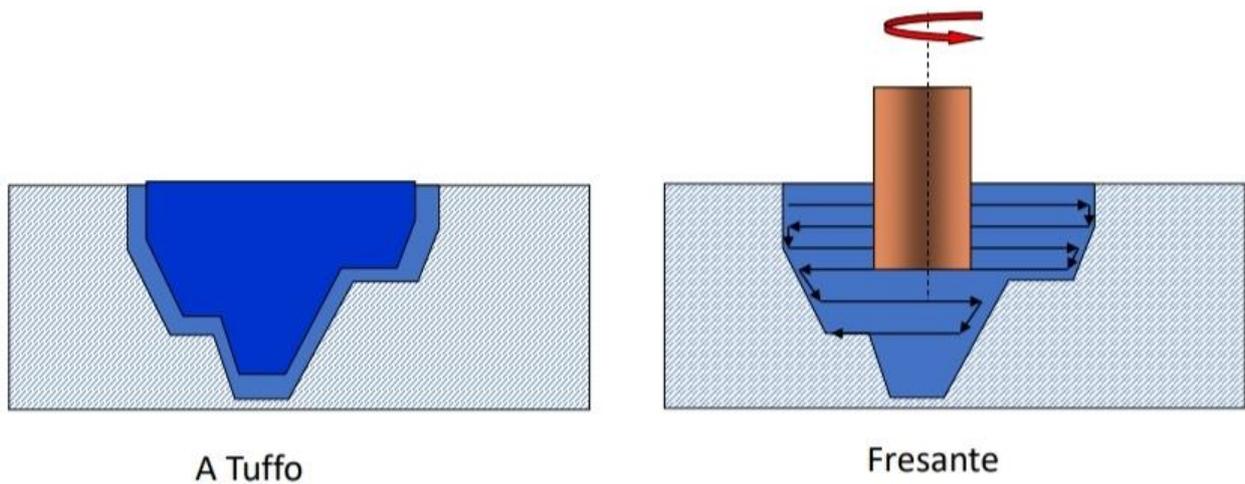


Fig.1.8.2: Elettroerosione a tuffo fresante VS tradizionale. [7]

- μ -EDM (micro EDM): nata per lavorare componenti molto piccoli, con dimensioni inferiori ai 100 μm , utilizza gli stessi principi dell'EDM, ma necessita di un micro-utensile e di un controllo molto preciso dei parametri di processo in modo da ottenere un MRR nanometrico. Esistono diverse varianti come la μ -EDM drilling per realizzare fori dal diametro nell'ordine dei micron, figura 1.8.3, la μ -EDM milling per la fresatura con precisioni elevatissime o la MFEMDM (Magnet Force-assisted MicroEDM), figura 1.8.4, dove dei magneti posti su entrambi i lati del componente in lavorazione creano un campo magnetico che migliora la rimozione dei detriti dalla zona di lavoro e conseguentemente anche la finitura superficiale ottenibile.

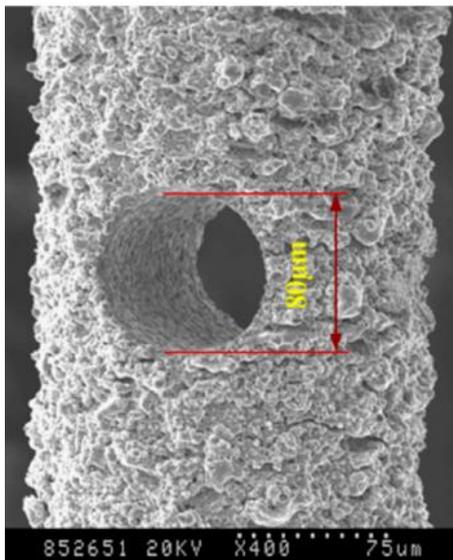


Fig. 1.8.3: foro realizzato μ -EDM drilling. [12]

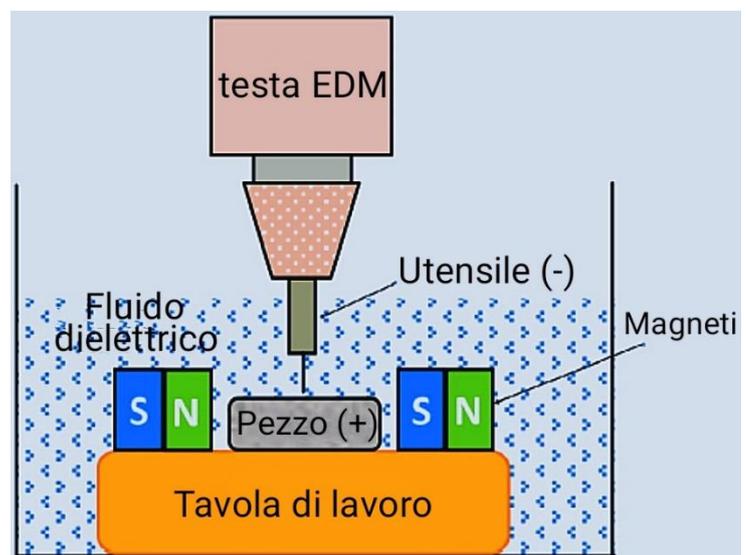


Fig.1.8.4: MFEMDM (Magnetic Force-assisted Micro-EDM). [13]

- UEDM (Ultrasonic vibration assisted EDM): la vibrazione ultrasonica introdotta nel dielettrico, figura 1.8.4, o nel componente in lavorazione è uno dei metodi utilizzati per migliorare le prestazioni dell'EDM, risulta in particolare vantaggioso nella lavorazione di materiali molto duri, in quanto la vibrazione permette una migliore circolazione del

dielettrico [14], facilitando la rimozione dei detriti e generando una maggiore pressione tra pezzo e utensile, fattori questi che permettono un aumento dell'MRR e un miglioramento della rugosità superficiale.

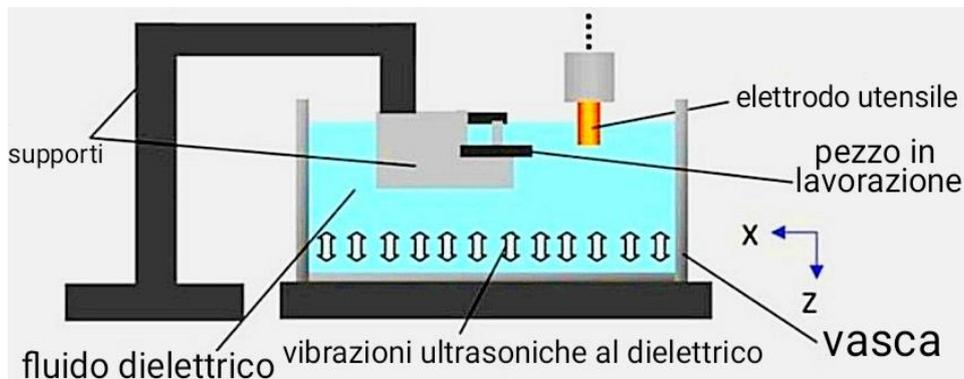


Fig. 1.8.5: Lavorazione UEDM. [15]

- DEDM (Dry-EDM): l'elettroerosione a secco nasce per far fronte al problema dei gas tossici prodotti durante il processo a causa dell'utilizzo di oli derivanti da idrocarburi come dielettrico per migliorare l'MRR; questa tecnica fa uso di un elettrodo cavo rotante all'interno del quale viene insufflato gas ad alta pressione per permettere la rimozione dei detriti presenti nel gap tra gli elettrodi durante la lavorazione, figura 1.8.6. Si ottiene in questo modo un processo sicuro, senza emissioni inquinanti e con costi operativi ridotti, pur mantenendo ottimali risultati di processo; alcune varianti con gli stessi obiettivi, come la Near-Dry EDM e l'EDM in acqua, sono oggetto di studio.

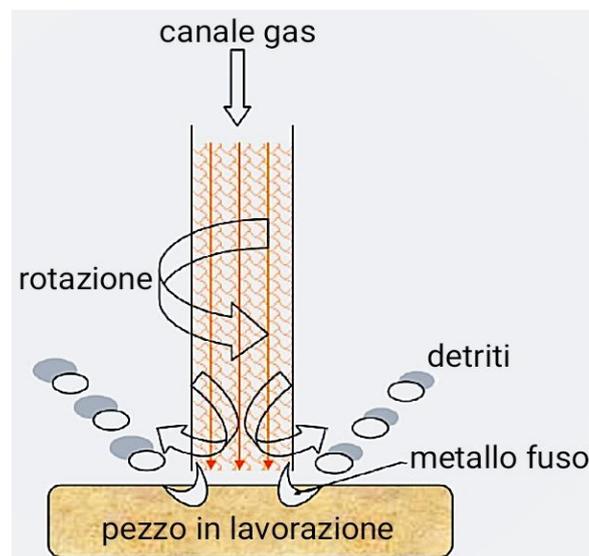


Fig.1.8.6: Lavorazione DEDM. [13]

- Powder-mixed EDM: questa tecnica utilizza polveri di materiali come nichel o addirittura ceramici in miscela con il fluido dielettrico; questa aggiunta ha un notevole effetto sul processo, infatti le particelle di polvere riempiono il vuoto tra elettrodo-utensile e pezzo. Quando viene applicata la tensione durante la lavorazione, la presenza delle particelle

costringe l'elettrodo ad allontanarsi dal pezzo per compensare la riduzione del gap. Si ottiene così un'esplosione precoce con scariche più veloci che comportano un aumento del MRR.

- ECDM (Electrical-Chemical discharge Machining): trova la sua applicazione principale nella lavorazione di materiali non conduttivi come ceramici e compositi, in particolare nella realizzazione di strutture complesse per MEMS (micro electro mechanical system). Questa tecnologia unisce i principi di EDM ed ECM (electro chemical machining); il particolare da lavorare, come visibile in figura 1.8.7, viene immerso in una soluzione elettrolitica appropriata, una tensione continua viene applicata tra l'elettrodo utensile che funge da catodo ed il contro-elettrodo che funge da anodo. L'elettrodo utensile viene immerso di alcuni millimetri nell'elettrolita; il contro-elettrodo, molto più grande, viene posizionato ad alcuni centimetri di distanza e anch'esso parzialmente immerso.

Le scariche elettrochimiche si verificano quando la tensione raggiunge un valore variabile in funzione della concentrazione dell'elettrolita e della geometria da lavorare; si crea una zona gassosa, con all'interno un notevole campo elettrico, che isola l'elettrodo ed il pezzo in lavorazione dall'elettrolita permettendo il passaggio della scarica; il calore da essa generato, unito a fenomeni chimici, causano l'erosione del componente.

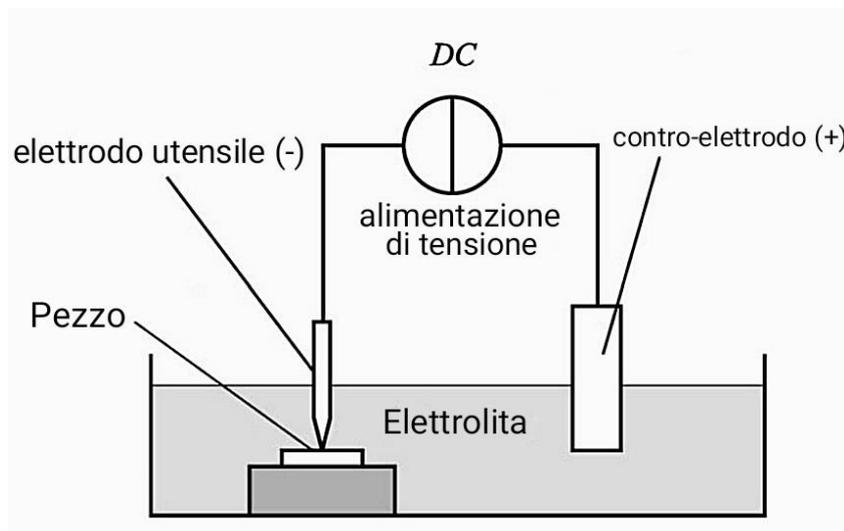


Fig. 1.8.7: Lavorazione ECDM. [16]

Capitolo 2 - LPBF (Laser Powder Bed Fusion)

2.1 introduzione

La LPBF (Laser Powder Bed Fusion), nota anche come SLM (Selective Laser Melting) o DMLS (Direct Metal Laser Sintering), è una delle tecnologie di fabbricazione additiva più utilizzate per la realizzazione di particolari in metallo. Si tratta di una tecnica a letto di polvere, la quale viene deposta strato dopo strato e solidificata selettivamente dall'azione di un fascio laser concentrato ad alta potenza. Si ha il notevole vantaggio di poter realizzare componenti metallici di forma molto complessa, figura 2.1.1, garantendo allo stesso tempo notevoli caratteristiche meccaniche dovute alla microstruttura fine causata dalla rapida fusione e solidificazione delle polveri metalliche.



Fig. 2.1.1: Particolari prodotti tramite LPBF. [17]

2.2 Cenni storici

Nel 1989 il tedesco Schwarze, proprietario con Fockele della F&S Stereolithographietechnik ebbe l'idea di utilizzare un laser per fondere selettivamente polveri metalliche leggendo un articolo scientifico riguardante la già sperimentata tecnica di fabbricazione additiva di polimeri chiamata stereolitografia di SLA 3D.

Nel 1995 il Fraunhofer institute ILT di Aquisgrana, nelle figure dei Dottori Meiners e Wissenbac, contattò la F&S Stereolithographietechnik con l'idea di sviluppare in collaborazione una nuova tecnologia di stampa in grado di produrre componenti "che non si romperebbero se cadessero dal tavolo", cosa non scontata per i particolari metallici sperimentalmente prodotti fino ad allora mediante tecnologia additiva.

La collaborazione portò già l'anno successivo al brevetto di base per il processo e, nel 1998 la F&S Stereolithographteknik consegnò la sua prima macchina commerciale al cliente Trumpf. Da allora la struttura di base delle macchine ed il procedimento di produzione sono rimasti invariati, ma ciò che veniva prodotto in un giorno con un laser da 12W può oggi essere realizzato in meno di mezz'ora grazie all'utilizzo di un laser con potenza di 400W ed un migliore controllo dei parametri di processo.

Nel 2000, Schwarze e Fockele depositarono il marchio SLM, ancora oggi erroneamente utilizzato per descrivere l'intera tecnica, ed iniziarono una collaborazione con quella che sarebbe diventata MTT Technologies. Dal 2011 l'azienda si chiama SLM Solutions GmbH ed ancora oggi è una delle principali realtà per la realizzazione di macchine per LPBF. Altre realtà leader in questo settore sono la tedesca EOS e l'americana 3d Systems.

I settori in cui trova applicazione la tecnica sono numerosi, come mostrato in figura 2.2.1; ad occupare la più ampia fascia di mercato sono, ad oggi, gli ambiti in cui la forma complessa e/o il peso ridotto risultano fondamentali come automotive, aerospace e biomedicale.

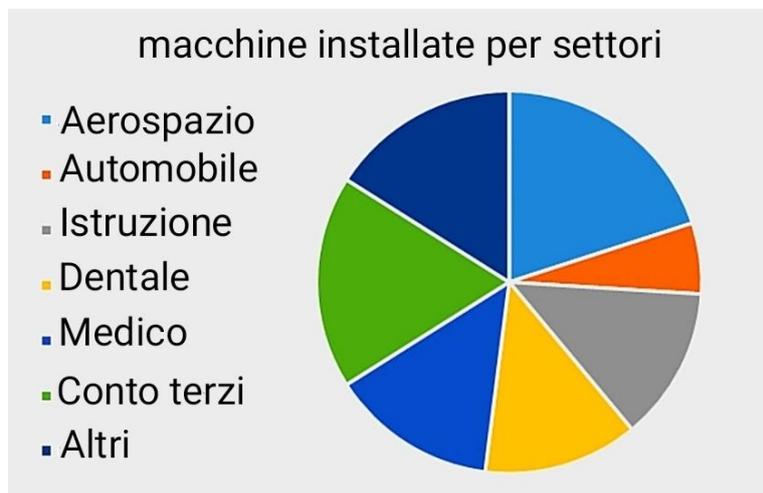


Fig. 2.2.1: Settori di applicazione della tecnica. [18]

La realizzazione di componenti metallici mediante tecnica LPBF è inoltre uno degli argomenti di ricerca più comuni, questo perché l'introduzione relativamente recente della tecnologia rende realistiche buone ottimizzazioni del processo e del prodotto.

Il numero di impianti installati, al pari delle nuove applicazioni della tecnica LPBF, è in continuo aumento fin dalla sua introduzione e, come si vede in figura 2.2.2 per le leghe di alluminio, è previsto che negli anni a venire il trend di crescita sarà esponenziale, non solo per quanto riguarda la realizzazione di prototipi, ma soprattutto in ambito produttivo; dove è attesa l'affermazione definitiva di quella che molti credono essere la principale tecnologia futura per la produzione di componenti meccanici su piccola e media scala.

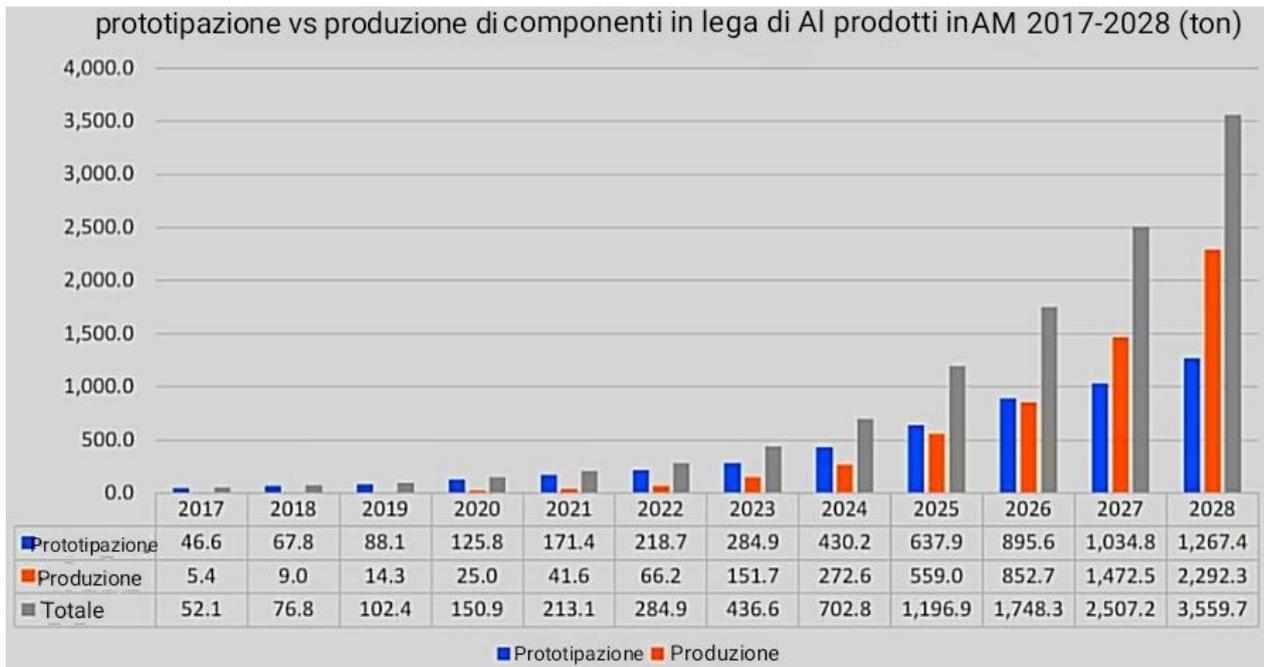


Fig. 2.2.1: Prospettive di crescita per applicazione della tecnica. [19]

2.3 Descrizione processo

Il processo si basa sulla fusione selettiva, strato dopo strato, di polveri metalliche deposte su una apposita piattaforma di lavoro. L'energia termica necessaria alla fusione delle polveri viene fornita da una sorgente laser che sfrutta come mezzo laser attivo CO₂ o un cristallo di ittrio e alluminio drogato (Nd-Yag) per generare un fascio laser di potenza compresa tra 200 e 1000W indirizzato poi da un sistema di specchi.

L'energia fornita deve essere attentamente calcolata in base al materiale delle polveri e allo spessore dello strato e deve garantire anche la rifusione di un determinato spessore dello strato di polvere deposto precedentemente, in modo da garantire la continuità strutturale tra gli strati ed evitare il rischio di delaminazione.

La polvere, stipata in un contenitore apposito, viene fornita alla zona di lavoro da un elevatore e livellata da una lama o da un rullo; dal lato opposto della macchina vi è un serbatoio di raccolta della polvere eccedente.

La piattaforma di lavoro viene precedentemente riscaldata per favorire l'adesione dello strato iniziale; il suo movimento lungo l'asse z viene gestito dal controllo della macchina. Sono necessari i supporti per evitare il distacco del componente dalla piattaforma a causa del ritiro di solidificazione; questi andranno rimossi a componente ultimato e sarà necessario un trattamento post-produttivo per eliminare il segno della loro presenza.

Quanto descritto avviene in una camera di lavoro in cui viene flussato del gas inerte per mantenere la percentuale di ossigeno al di sotto dello 0,1% in modo da ridurre l'ossidazione delle polveri e, in caso di leghe particolarmente reattive, impedire l'innesco di fiamme.

A differenza di altre tecniche a letto di polvere, nella LPBF la temperatura della camera di lavoro non viene controllata; a causa della rapida solidificazione e raffreddamento si generano tensioni termiche interne al componente che rendono necessario non solo l'utilizzo i supporti per aiutare la diffusione termica localizzata, ma anche un trattamento termico di rilascio delle tensioni post-produzione prima della rimozione dei componenti dalla piattaforma.

La struttura di base di una piattaforma interna ad una macchina LPBF viene mostrata in figura 2.3.1.

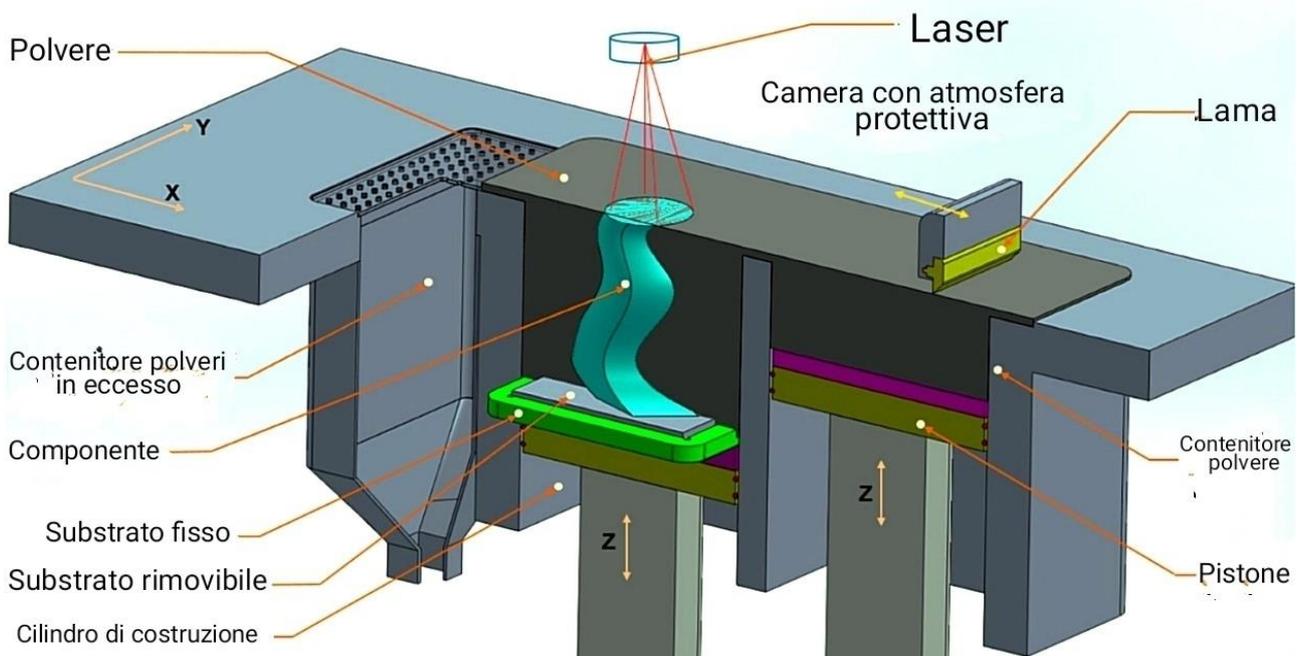


Fig. 2.3.1: Produzione di un componente con la tecnica LPBF. [20]

In passato, il processo non garantiva la completa fusione della miscela di polveri a causa dell'utilizzo di laser CO₂ e ciò comportava una notevole porosità nei componenti; ad oggi è invece possibile, se il processo viene adeguatamente controllato, raggiungere una densità prossima al 100%. Sono però ancora presenti dei difetti la cui presenza costituisce un problema anche quando sono necessarie delle operazioni di finitura, ad esempio tramite WEDM; quando il filo in lavorazione incontra una porosità, l'assenza del gap necessario a far scoccare correttamente la scintilla causa difetti superficiali, problematici nel momento in cui si ricerca una impeccabile finitura superficiale del componente.

2.4 Materiali – AlSi10Mg

I materiali attualmente più utilizzabili per realizzare componenti con la tecnica LPBF sono una ristretta fascia, tra cui spiccano i seguenti: leghe Cr-Co, lega di titanio Ti6Al4V, Inconel IN625, Inconel 718, leghe di Au, acciaio inox, acciaio per stampi e la lega di alluminio AlSi10Mg. Componenti prodotti con questa lega trovano infatti applicazione in diversi settori quali motorsport, automotive ed aerospace, dove il peso ridotto e le notevoli prestazioni in termini di durezza e resistenza, unite ai vantaggi dati dalla fabbricazione additiva, risultano notevolmente vantaggiosi.

Le leghe Al-Si rappresentano circa l'80% delle leghe di alluminio utilizzate nei processi fusori, questo grazie alle seguenti proprietà:

- Elevata fluidità, dovuta al grande volume di liquido eutettico.
- Buona durezza.
- Elevata saldabilità garantita dal fatto che il Si riduce il ritiro da solidificazione e abbassa il coefficiente di espansione termica.
- Buona resistenza alla corrosione.

Essendo la lega binaria Al-Si un sistema eutettico con il 12% in peso di silicio alla composizione eutettica a circa 577°C, la lega AlSi10Mg, avendo una percentuale di Si inferiore all'11% è una lega ipoeutettica (figura 2.4.1).

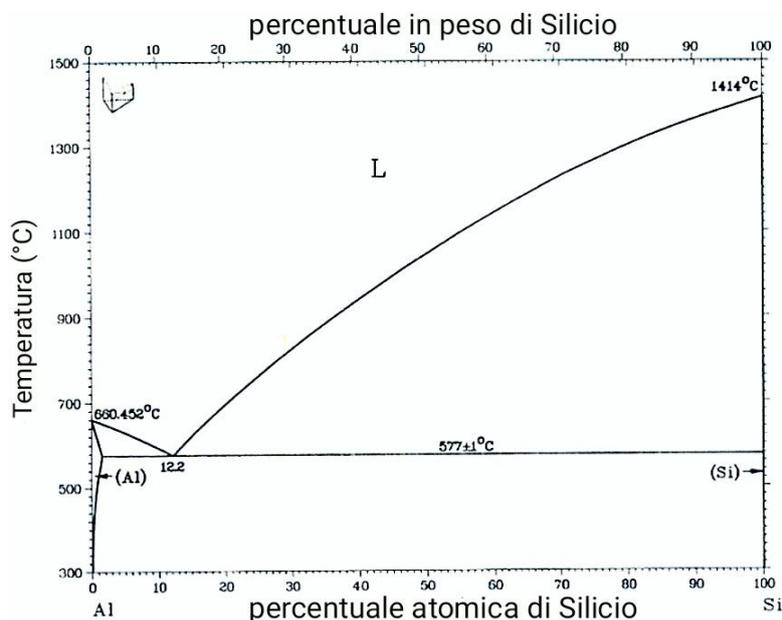


Fig. 2.4.1: Diagramma delle fasi Al-Si. [21]

La presenza del Magnesio permette di effettuare il trattamento T6 (tempra ed invecchiamento artificiale) che migliora resistenza e duttilità, ciò grazie ai meccanismi di rafforzamento per dispersione di particelle di silicio micrometriche e per precipitazione di particelle di Mg₂Si nanometriche.

A differenza di quanto avviene durante un getto fusorio, dove generalmente si ottiene una struttura continua con fase primaria α in matrice eutettica di α e Si (figura 2.4.2), nella fabbricazione tramite LPBF, a causa delle rapide fusione e solidificazione, si ottiene un'unica struttura formata dalle componenti in lega (figura 2.4.3); la quale risulta influenzata dai parametri di processo utilizzati; le proprietà risultano molto simili a quelle ottenute in seguito al trattamento T6 su componenti fusi.

Nel caso di componenti prodotti tramite fabbricazione additiva non sono raccomandati trattamenti termici post-produzione, viene tuttavia consigliato un ciclo di stress relieving di 2 ore a 300°C.

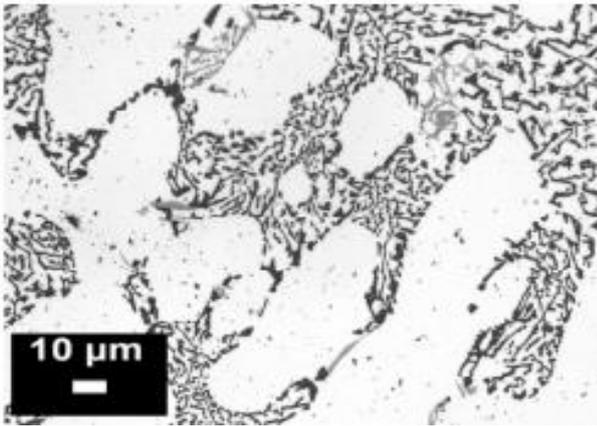


Fig. 2.4.2: Micrografia AlSi10Mg fuso. [22]

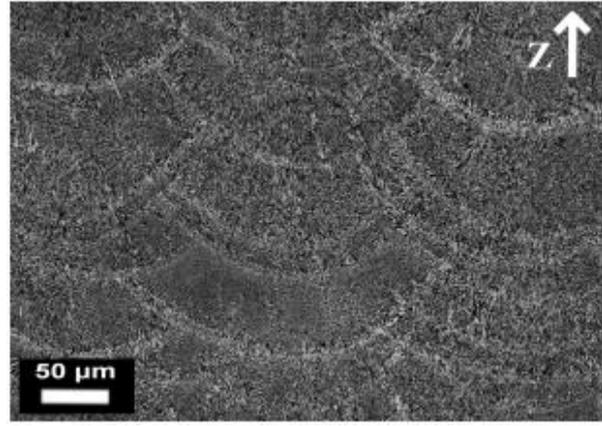


Fig. 2.4.2: Micrografia AlSi10Mg realizzato con LPBF. [22]

Nei componenti realizzati tramite LPBF, le caratteristiche meccaniche dei particolari finali dipendono notevolmente dalle proprietà del materiale costituente le polveri e, essendo queste portate a fusione, quanto espresso per le leghe da getto rimane valido. Oltre a composizione chimica, temperatura di fusione e conducibilità termica del materiale, risultano molto importanti anche delle caratteristiche proprie delle polveri utilizzate quali forma, taglia e distribuzione.

Per quanto riguarda la forma è noto il fatto che particelle di polvere sferiche garantiscono un'elevata densità del letto di polvere ed una buona scorrevolezza, fondamentale per ottenere uno spessore costante dello strato solidificato. Particelle di polvere di taglia ridotta garantiscono resistenza meccanica, rugosità superficiale e maggiore densità del componente finale, mentre particelle più grandi comportano un migliore allungamento a rottura; la presenza di una gamma di taglie più ampia produce una maggiore densità del componente finale a parità di intensità del raggio laser.

Le polveri vengono prodotte per atomizzazione, processo che, per le lega in questione, consiste nella dispersione del materiale in fase liquida mediante un getto di gas; la lega liquida viene forzata in un ugello e atomizzata tramite un flusso di gas inerte che permette alle particelle di metallo fuso di solidificarsi. Il controllo del processo risulta fondamentale per ottenere la forma e le dimensioni volute.

La descrizione della composizione chimica delle polveri di AlSi10Mg e delle proprietà fisiche ottenibili della polvere utilizzati in questo lavoro sono indicate nella tabella 4.2.1. Vengono fornite anche le proprietà meccaniche dei componenti, sia per componenti As Built, sia per componenti trattati (tabella 4.2.2).

Composizione chimica	Al (restante) Si (9.0 – 11.0 wt-%) Fe (≤ 0.55 wt-%) Cu (≤ 0.05 wt-%) Mn (≤ 0.45 wt-%) Mg (0.2 – 0.45 wt-%) Ni (≤ 0.05 wt-%) Zn (≤ 0.10 wt-%) Pb (≤ 0.05 wt-%) Sn (≤ 0.05 wt-%) Ti (≤ 0.15 wt-%)
Densità relativa	circa 99.7 %
Densità	2.67 g/cm ³ 0.096 lb/in ³

Tab. 4.2.1: Proprietà chimico-fisiche AlSi10Mg EOS. [23]

	come prodotto	trattato termicamente [8]
Resistenza a trazione [5]		
- in direzione orizzontale (XY)	445 ± 20 MPa 64.5 ± 2.9 ksi	335 ± 20 MPa 48.6 ± 2.9 ksi
- in direzione verticale (Z)	405 ± 20 MPa 58.7 ± 2.9 ksi	325 ± 20 MPa 47.1 ± 2.9 ksi
Resistenza allo snervamento (Rp0.2 %) [5]		
- in direzione orizzontale (XY)	275 ± 10 MPa 39.9 ± 1.5 ksi	225 ± 10 MPa 32.6 ± 1.5 ksi
- in direzione verticale (Z)	230 ± 10 MPa 33.4 ± 1.5 ksi	220 ± 10 MPa 31.9 ± 1.5 ksi
Modulo di elasticità		
- in direzione orizzontale (XY)	approx. 70 ± 5 GPa approx. 10.2 ± 0.7 Msi	approx. 70 ± 5 GPa approx. 10.2 ± 0.7 Msi
- in direzione verticale (Z)	approx. 65 ± 5 GPa approx. 9.4 ± 0.7 Msi	approx. 65 ± 5 GPa approx. 9.4 ± 0.7 Msi
Allungamento a rottura [5]		
- in direzione orizzontale (XY)	(6.5 ± 2) %	(11 ± 2) %
- in direzione verticale (Z)	(3.5 ± 2) %	(7 ± 2) %
Durezza [6]		
	120 ± 5 HBW	
Resistenza a fatica [7]		
- in direzione verticale (Z)	97 ± 7 MPa 14.1 ± 1.0 ksi	

- [5] resistenza meccanica testata secondo ISO 6892-1:2009 (B) allegato D provini proporzionali, diametro provino 5 mm, lunghezza iniziale misurata 25 mm.
- [6] prova di durezza secondo Brinell (HBW 2.5/62.5) - DIN EN ISO6506-1. Si noti che la durezza può variare in modo significativo a seconda di come è stato preparato il campione.
- [7] test di fatica eseguito con frequenza 50Hz, R=-1, misura rilevata al raggiungimento di 5 milioni di cicli senza frattura.
- [8] trattamento antistress: ricottura 2h a 300°C (572°F)

Tab. 4.2.2: Proprietà meccaniche AlSi10Mg EOS. [23]

Capitolo 3 – Analisi bibliografica

Dall'analisi bibliografica sui lavori riguardanti WEDM e lega Al-Si, sono state estrapolate importanti informazioni utili a condurre correttamente le prove sperimentali.

Emilia et al. [24] considerano simultaneamente l'intensità di corrente (I) impostata sulla macchina WEDM e la velocità di scansione del laser (v_s) utilizzata durante la realizzazione del componente in AlSi10Mg. I provini, di dimensione 7x4x20mm e prodotti uno sull'altro, si differenziano per quattro diverse velocità di scansione ed i tagli per altrettante differenti intensità di corrente, mentre tutti gli altri parametri vengono mantenuti costanti, sia per quanto riguarda la produzione, tabella 3.1, che per il taglio, tabella 3.2.

Parameter	Value
Laser power [W]	175
Hatching space [μm]	200
Shielding gas	Ar
Diameter of laser beam [μm]	30
Laser wavelength [nm]	1.070
Chamber temperature [$^{\circ}\text{K}$]	299.95 (27% RF)
Oxygen level [%]	0.11

Tab. 3.1: parametri costanti LPBF con macchina TruPrint 1000 metal 3D printer (Trumpf)

Machining Parameter	Value/Characteristic
Current amplitude, I [A]	8; 16; 24; 32
Pulse time, t_{on} [μs]	10
Pulse off time, t_{off} [μs]	350
The initial interelectrode gap size, S_0 [mm]	0.28
Wire feed rate, v_f [mm/s]	10
Working fluid	Demineralized water with electrical conductivity 89.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Temperature of working fluid, T [$^{\circ}\text{K}$]	~ 294

Tab. 3.2: parametri costanti taglio WEDM con macchina BP95d (Zaklad automatyki Przemyslowej B.P.)

Con i quattro tagli consecutivi, effettuati con un filo di ottone di diametro 0.25mm ed in direzione perpendicolare ai layer di produzione, si sono ottenuti campioni di dimensione 1x7x4mm su cui effettuare le misure di rugosità; dalle quali sono emersi i risultati presentati nell'immagine seguente, figura 3.1.

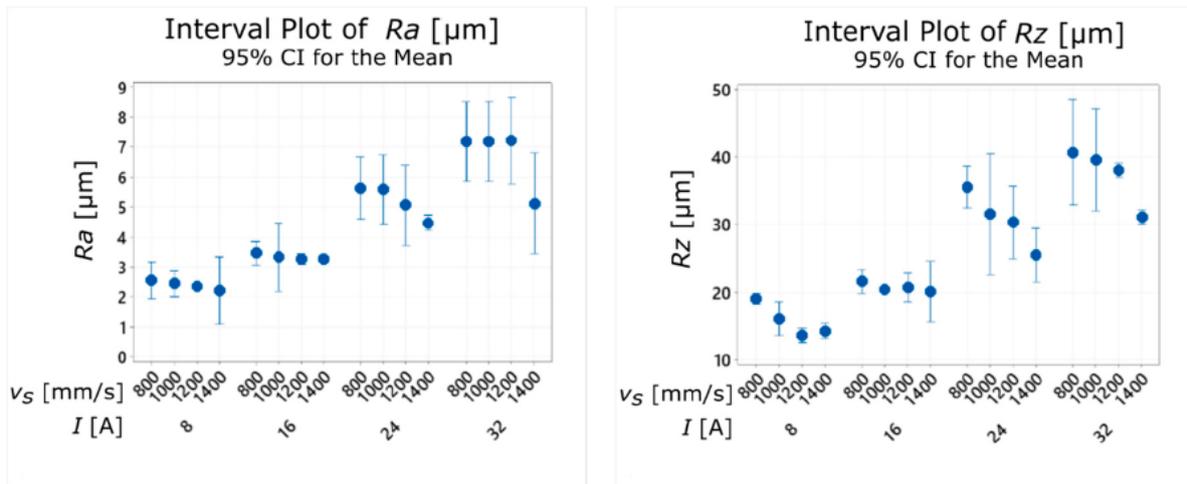


Fig. 3.1: Risultati ottenuti in termini di Ra ed Rz.

Dai risultati emerge in modo evidente come l'aumento dell'intensità di corrente si traduca in un peggioramento dei parametri medi relativi alla finitura superficiale; ciò trova spiegazione nel fenomeno alla base dell'elettroerosione, infatti una corrente più forte genera dei crateri più grandi e profondi che sono causa del peggioramento della rugosità.

Guardando più nel dettaglio il confronto tra i risultati di Ra ed Rz ottenuti a parità di v_s , considerando anche un provino realizzato tramite una fusione tradizionale, figura 3.2, si può vedere come il peggioramento della rugosità sia, con l'aumento della I , più evidente nel caso di velocità di scansione maggiori. Infatti l'aumento della v_s comporta tendenzialmente un lieve miglioramento della finitura se si analizzano i valori di corrente più bassi, il trend si amplifica invece notevolmente nel caso di correnti elevate.

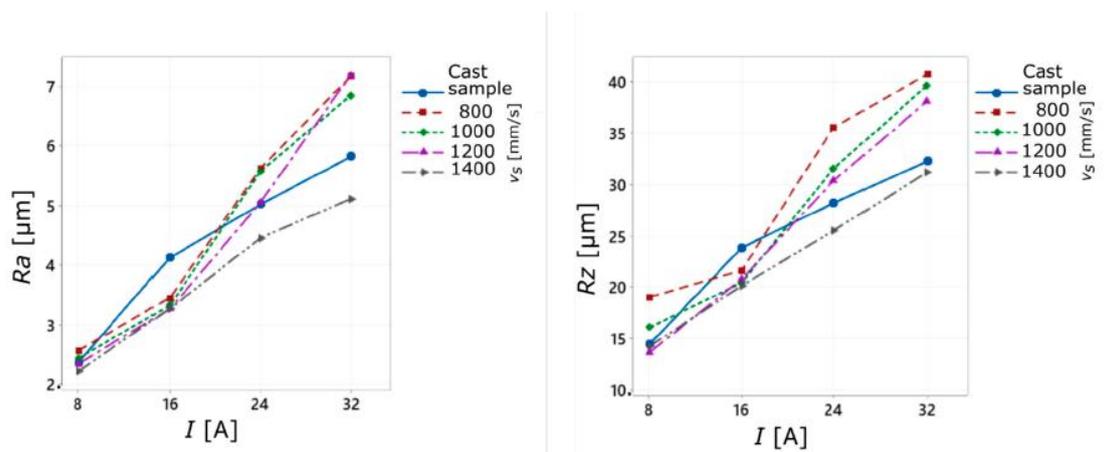


Fig. 3.2: Relazioni Ra-I ed Rz-I per ogni provino.

Il risultato di grande interesse rimane il fatto che, indipendentemente da ogni altra variabile, si ha sempre un peggioramento della rugosità con l'aumento dell'intensità di corrente.

Fakkir et al. [25] studiano i seguenti parametri di taglio WEDM: pulse on (t_{on}), pulse off (t_{off}) ed intensità di corrente (I). Ciascuno di questi viene fatto variare su tre livelli, tabella 3.3.

S. No	Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
1	Pulse on (μs)	33	36	39
2	Pulse off (μs)	5	7	10
3	Current (Amps)	1	1.5	2

Tab. 3.3: fattori del piano sperimentale e rispettivi livelli.

Non viene fornita alcuna informazione riguardo la tecnologia utilizzata per la produzione dei provini; si conosce però il loro materiale, cioè AA6082, la cui composizione chimica, tabella 3.4, risulta paragonabile a quella del materiale di nostro interesse, essendo l'alluminio l'elemento di base con silicio e magnesio principali componenti in lega.

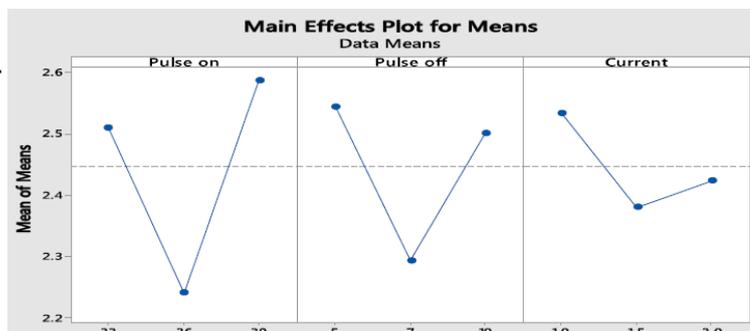
S. No	Elements	% of Composition
1	Si	0.7-1.3
2	Fe	0.0-0.5
3	Cu	0.0-0.1
4	Mn	0.4-1.0
5	Mg	0.6-1.2
6	Zn	0.0-0.2
7	Ti	0.0-0.1
8	Cr	0.0-0.25
9	Al	Balance

Tab. 3.4: composizione chimica AA6082 dei provini.

La macchina utilizzata per condurre le prove di taglio è una BAOMA DK-7731, modello molto simile a quello a nostra disposizione; il filo utilizzato ha diametro 0.2mm ed è in tungsteno.

Avendo tre fattori su tre livelli, per ridurre il piano sperimentale, è stato scelto di utilizzare la matrice ortogonale L9 di Taguchi, tabella 3.5, effettuando poi l'analisi del rapporto S/N e l'ANOM per trovare il livello di ogni fattore che ottimizzasse il risultato di rugosità; di seguito sono presentati i soli risultati dell'analisi delle medie, figura 3.3, in quanto quelli ottenuti con l'analisi del rapporto S/N portano agli stessi esiti.

S. No	Pulse on (μs)	Pulse off (μs)	Current (Amps)	SR (μm)
1	33	5	1.0	2.82
2	33	7	1.5	2.12
3	33	10	3.0	2.59
4	36	5	1.5	2.32
5	36	7	3.0	2.19
6	36	10	1.0	2.21
7	39	5	3.0	2.49
8	39	7	1.0	2.57
9	39	10	1.5	2.70



Tab. 3.5: Ra medie ottenute dalle misurazioni.

Fig. 3.3: Risultati analisi medie.

Dall'analisi emerge che il livello intermedio di ognuno dei tre fattori è quello che comporta la minore rugosità superficiale media. Non vengono investigate le relazioni tra i vari fattori che, guardando i risultati, meriterebbero invece attenzione; soprattutto considerando che ai valori minori del ton e della corrente non corrisponde la migliore rugosità. Sebbene nove prove, rispetto alle ventisette necessarie per eseguire un piano completo, non siano sufficienti per avere certezze sull'importanza dei fattori, si può comunque vedere, tabella 3.6, come il pulse on assuma importanza maggiore rispetto agli altri due, cosa confermata anche dagli altri articoli in cui vengono effettuate più prove. Riguardo alla maggiore incisività sulla finitura del pulse off rispetto alla corrente, si hanno invece risultati contrastanti rispetto al resto degli articoli consultati.

Response table for means.

S. No	Level	Pulse on	Pulse off	Current
1	1	2.510	2.543	2.533
2	2	2.240	2.293	2.380
3	3	2.587	2.500	2.423
4	Delta	0.347	0.250	0.153
5	Rank	1	2	3

Tab. 3.6: Tabella di risposta analisi medie Ra.

In un altro articolo vengono analizzati da Ravindranadh et al. [26] i risultati di prove di taglio WEDM effettuate su provini di dimensione 240x80x30mm in alluminio balistico (0.5%Mg, 0.45%Si, 0.3%Fe, 0.1%Mn, 0.02%Zn, 0.02%Ti, Al restante).

Utilizzando un piano ortogonale ridotto L18 si sono valutati i risultati in termini di material removal rate (MRR), rugosità (SR) e gap current (GC), facendo variare ton, toff, IP e SV sui livelli indicati in tabella 3.7:

Parameters	Symbol	Level 1	Level 2	Level 3	Units
Pulse on time	TON	0.85	1.35	—	µs
Pulse off time	TOFF	18	36	56	µs
Peak current	IP	10	13	16	A
Spark voltage	SV	10	15	20	Volt

Tab. 3.7: fattori e corrispondenti livelli del piano sperimentale.

Le prove, effettuate con una macchina ELECTRONICA, hanno restituito i risultati indicati in tabella 3.8:

Expt. no	TON	TOFF	IP	SV	MRR (mm ³ /min)	SR (μm)	GC (A)
1	0.85	18	10	10	12.42	1.84	2.1
2	0.85	18	13	15	13.87	2.31	2.9
3	0.85	18	16	20	14.45	2.79	3.4
4	0.85	36	10	10	11.21	1.75	3.1
5	0.85	36	13	15	12.95	1.98	2.4
6	0.85	36	16	20	14.17	2.89	1.8
7	0.85	56	10	15	13.54	1.54	2.3
8	0.85	56	13	20	13.74	2.47	2.6
9	0.85	56	16	10	13.48	2.61	2.8
10	1.35	18	10	20	13.11	1.94	3.2
11	1.35	18	13	10	13.27	3.21	2.7
12	1.35	18	16	15	15.47	3.64	3.6
13	1.35	36	10	15	14.19	2.76	2.9
14	1.35	36	13	20	14.91	2.87	3.1
15	1.35	36	16	10	15.12	3.04	3.5
16	1.35	56	10	20	13.41	1.39	2.5
17	1.35	56	13	10	13.97	3.29	3.4
18	1.35	56	16	15	14.42	3.85	3.1

Tab. 3.8: Risultati prove.

Per ognuno dei valori di interesse è stata effettuato un test ANOVA da cui; per quanto riguarda la rugosità superficiale, è stato dedotto con l'analisi del p-value, tabella 3.9, come il picco di corrente (IP) ed il pulse on (ton) siano molto più influenti sul risultato finale rispetto agli altri due fattori.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
TON	1	18.453	18.453	18.452	8.15	0.017
TOFF	2	1.26	1.26	0.629	0.28	0.763
IP	2	67.339	67.339	33.669	14.86	0.001
SV	2	2.674	2.674	1.337	0.59	0.572
Error	10	22.653	22.653	2.265		
Total	17	112.379				

Tab. 3.9: Risultati test ANOVA.

È stata poi effettuata un'analisi con il metodo di Grey per comprendere quale fosse la migliore combinazione dei quattro fattori per ottenere un MRR elevato, mantenendo comunque una finitura accettabile; la prova più soddisfacente è risultata essere la tredicesima effettuata in cui erano stati impostati i seguenti livelli dei fattori: ton (2), toff (1), IP (3), SV (2).

Per quanto riguarda il solo effetto sulla rugosità superficiale sono utili le seguenti immagini, figure 3.4a e 3.4b, per comprendere meglio l'effetto dei vari fattori, in particolare di quelli che si è stabilito essere i due più significativi.

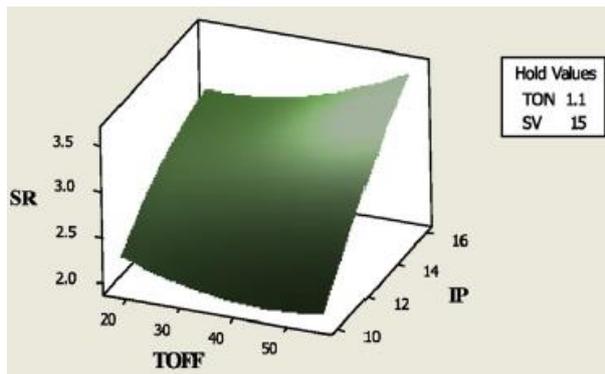


Fig. 3.4a: Risultati SR relazione TOFF-IP

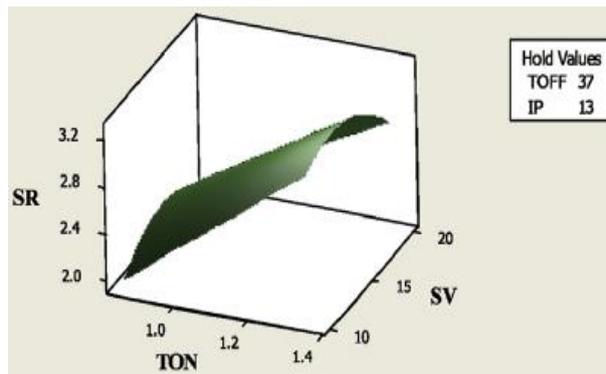


Fig. 3.4b: Risultati SR relazione TON-SV

È possibile dedurre che diminuendo i valori di ton e IP, l'SR si riduce notevolmente; per quanto riguarda l'effetto dell'IP si può vedere come esso comporti un peggioramento della finitura più marcato nel caso di toff più elevati, invece l'effetto della variazione del SV rispetto al ton non causa che minime differenze di SR. Con valori al minimo di ton e IP si ha però un MRR molto basso, di conseguenza la lavorazione sarà molto lenta; per questo non vengono riportati i risultati dell'analisi di Grey, in quanto nel lavoro si è cercata la migliore combinazione dei vari fattori e non la sola ottimizzazione della finitura.

Wasif et al [27] analizza invece i risultati ottenuti per tre differenti angoli di taglio (30,45 e 60°) mantenendo sempre costante il ton e variando toff e corrente su due livelli ciascuno, tabella 3.10. Vengono presentati e analizzati i risultati di 12 prove effettuate su provini in lega di alluminio 5454 con presenza di magnesio (0.5%) e tracce di Si (0.25%). I parametri costanti utilizzati sulla macchina CW-43F (CHMER) sono invece illustrati in tabella 3.11.

Parameter		Levels		
		1	2	3
Taper Angle (A)	Degree	30	45	60
Current (C)	Ampere	5	10	-
Pulse-off time (POT)	Micro Second	20	40	-

Tab. 3.10: fattori e corrispondenti livelli considerati.

Factor	Unit	Value
Wire Material	-	Brass
Wire Diameter	mm	0.25
Pulse-on time	µs	25
Dielectric medium	-	Ionized water
Ser. Voltage	V	6
Wire tension	N	12
Flush rate	l/hr	2
Wire feed rate	mm/min	3
Feed rate	mm/min	20

Tab. 3.11: parametri di lavoro costanti.

I valori della rugosità (Ra [10⁻⁴m]), tabella 3.12, sono stati ottenuti per ogni prova mediando i risultati restituiti dal profilometro ConturoMatic TS a tre diverse altezze sulla superficie di taglio di ogni provino.

A	C	POT	SR
30	5	20	0.0265
	5	40	0.0188
	10	20	0.0368
45	10	40	0.0290
	5	20	0.0275
	5	40	0.0245
60	10	20	0.0525
	10	40	0.0608
	5	20	0.0308
	5	40	0.0365
	10	20	0.0478
	10	40	0.0439

Tab. 3.12: Risultati prove.

Per valutare i risultati ottenuti è stato effettuato un test ANOVA, il quale ha fornito, per quanto riguarda la finitura superficiale, i risultati presentati in tabella 3.13.

Parameter/Interaction	DOF	Adj. SS	Mean SS	F-Value	P-Value
Taper Angle (A)	2	0.0008796	0.0004398	7.92	0.006
Current (C)	1	0.0018780	0.0018780	33.82	0.000
Pulse-off Time (POT)	1	0.0000116	0.0000116	0.21	0.655
Angle*Current	2	0.0005056	0.0002528	4.55	0.034
Angle*POT	2	0.0001241	0.0000620	1.12	0.359
Current*POT	1	0.0000005	0.0000005	0.01	0.929
Angle*Current*POT	2	0.0001089	0.0000545	0.98	0.403
Error	12	0.0006662	0.0000555		
Total	23				

Tab. 3.13: Risultati test ANOVA.

Dall'analisi p-value si può vedere come angolo di taglio e soprattutto corrente sono i fattori che influenzano il valore della rugosità, avendo $p\text{-value} \ll 0.05$; risulta considerevole anche l'interazione tra gli stessi due fattori, mentre il valore del toff non assume pressoché alcuna importanza riguardo la qualità della finitura superficiale, così come l'interazione tra esso e gli altri fattori, figura 3.5a.

Per quanto riguarda l'angolo di taglio si ha la rugosità minima per un valore di 30° e quella massima a 45° ; per la corrente invece si può confermare quanto già dedotto dagli articoli precedenti; infatti aumentandone il valore si è trovato un notevole peggioramento della rugosità, figura 3.5b.

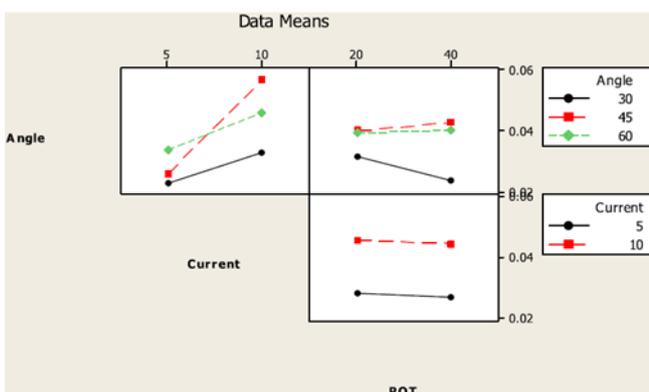


Fig. 3.5a: Interazioni tra fattori.

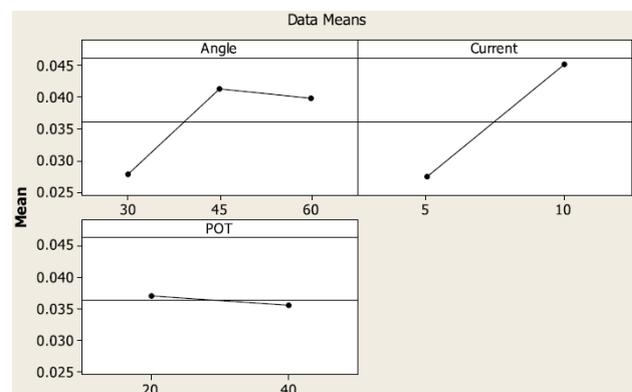


Fig. 3.5b: Rugosità medie per livello.

Guardando invece i valori degli F-value è possibile comprendere come la corrente sia il parametro notevolmente più influente; seguono per importanza l'angolo di taglio con un F-value di 7.92, circa cinque volte meno rispetto a quello della corrente, e l'interazione angolo-corrente che, con F-value=4.55, si conferma come unica interazione influenzante la finitura.

Soundararajan et al [28] analizzano i risultati in termini di rugosità e MRR ottenuti su provini, con spessore 15mm, di una lega Al-Si (A413) prodotti mediante squeeze casting, cioè un processo che consiste nel far colare il metallo liquido in uno stampo lubrificato e preriscaldato, forgiandolo mentre esso solidifica. Viene utilizzata per il taglio una macchina ELEKTRA SPRINTCUT 734 con un filo di ottone zincato di diametro 0.25mm, acqua demineralizzata come dielettrico; pressione di lavaggio, picco di tensione e tensione del filo costanti, andando a variare ton, toff e corrente secondo lo schema presentato in tabella 3.14, dove sono visibili anche i valori medi di rugosità ottenuti da tre misurazioni per ogni taglio.

Run	Block	A: Ton μ s	B: Toff μ s	C: IP Amps	R2: SR μ m
1	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.28
2	Block 1	0.85	52.00	180.00	1.97
3	Block 1	1.35	32.00	180.00	2.72
4	Block 1	0.35	32.00	180.00	1.65
5	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.06
6	Block 1	0.85	12.00	180.00	2.43
7	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.19
8	Block 1	1.15	44.00	200.00	2.36
9	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.16
10	Block 1	0.85	32.00	150.00	1.39
11	Block 1	0.55	44.00	160.00	1.63
12	Block 1	1.15	44.00	160.00	1.84
13	Block 1	0.55	44.00	200.00	1.89
14	Block 1	1.15	20.00	160.00	2.29
15	Block 1	0.55	20.00	160.00	1.76
16	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.12
17	Block 1	0.55	20.00	200.00	1.89
18	Block 1	0.85	32.00	210.00	2.37
19	Block 1	1.15	20.00	200.00	3.16
20	Block 1	0.85	32.00	180.00	2.23

Tab. 3.14: Prove e risultati ottenuti.

Per comprendere la significatività dei vari fattori e delle loro interazioni è stato eseguito un test ANOVA considerando un intervallo di fiducia del 95%, i cui risultati sono presentati in tabella 3.15.

Source	Sum of squares	DF	Mean of square	F-Value	Contribution%	P-value
Model	2.98	9	0.33	40.99	97.38	<0.0001
A-Ton	1.34	1	1.34	165.79	43.79	<0.0001
B-Toff	0.34	1	0.34	41.99	11.11	0.0001
C-IP	0.86	1	0.86	106.39	28.1	<0.0001
AB	0.16	1	0.16	19.38	5.22	0.0013
AC	0.13	1	0.13	15.45	4.24	0.0028
BC	6.050E-003	1	6.050E-003	0.75	0.19	0.4074
A^2	9.696E-004	1	9.696E-004	0.12	0.031	0.7364
B^2	2.629E-003	1	2.629E-003	0.32	0.085	0.5812
C^2	0.14	1	0.14	17.69	4.57	0.0018
Residual	0.081	10	8.089E-003		2.64	
Lack of Fit	0.050	5	0.010	1.63	1.63	0.3020
Pure Error	0.031	5	6.147E-003		1.01	
Total	3.06	19				

Tab. 3.15: Risultati test ANOVA.

L'analisi dei p-value indica che tutti e tre i fattori risultano significativi e che lo sono anche le interazioni Ton-Toff, Ton-IP e IP^2 ; guardando gli F-value si può vedere come il parametro più significativo risulti ancora una volta il Ton, con importanza relativa del 43.79%, seguito dalla corrente (28.1%) e, in misura molto minore dal toff (11.11%). L'interazione tra i due fattori di importanza minore risulta l'unica trascurabile, mentre le altre due hanno importanza simile (~5%), al pari della IP al secondo ordine.

Nota la significatività dei vari fattori, per capire come essi influenzassero la finitura si sono valutate le immagini delle superfici di risposta ottenute col metodo RSM, figure 3.6a, 3.6b e 3.6c.

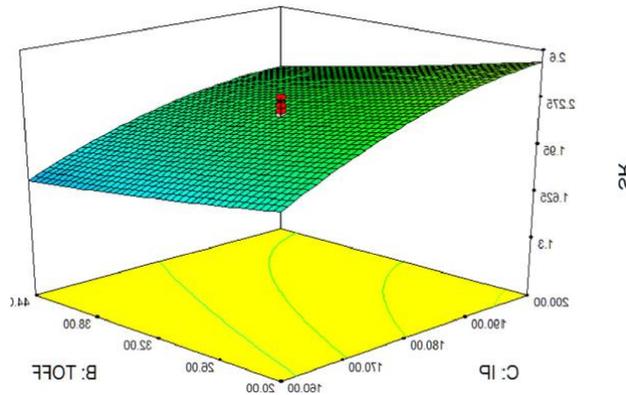


Fig. 3.6a: SR in funzione di IP e TOFF.

All'aumentare del valore della corrente si ha un peggioramento della rugosità, qualsiasi sia il valore del toff, la cui ridotta influenza è evidente anche da questa figura, la crescita del valore della SR è infatti molto meno evidente lungo l'asse con riportati i valori del toff rispetto a quello in cui viene riportata l'intensità di corrente, e la differenza tra valore di IP con toff minimo e quello con toff massimo rimane pressoché invariato, a dimostrare ancora che l'interazione tra i due fattori è poco influente.

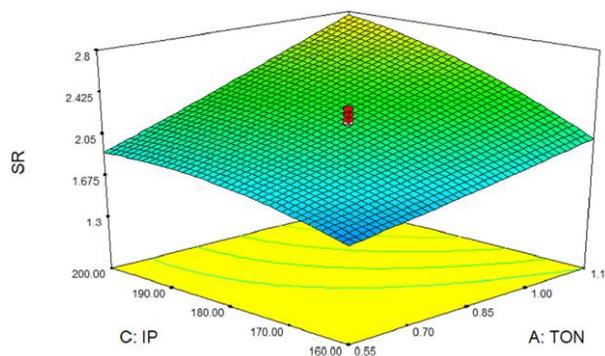


Fig. 3.6b: SR in funzione di IP e TON.

Come già visto negli articoli precedenti ad un aumento di ton o IP corrisponde un peggioramento della finitura; dall'immagine si può infatti vedere come il valore più elevato di rugosità si abbia con entrambi i fattori al loro livello massimo, mentre il migliore risultato si ha con ambedue al minimo. Importante in questo caso appare anche l'influenza dei due fattori considerati simultaneamente,

infatti con valori di IP ridotti la crescita del valore di SR con quello del ton è molto meno marcata rispetto a valori di IP vicini al massimo.

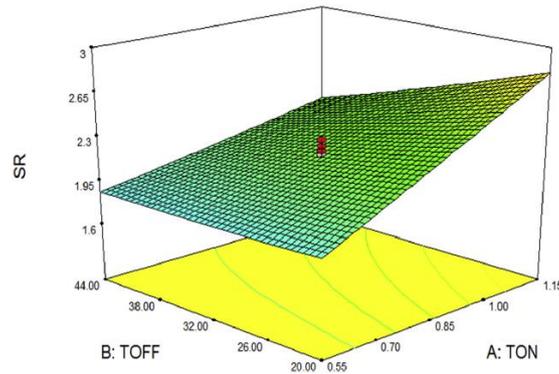


Fig. 3.6c: SR in funzione di TON e TOFF.

Anche analizzando l'immagine che combina l'influenza di ton e toff accoppiati si trova conferma del fatto che l'interazione tra i due fattori sia determinante sul valore della rugosità; il peggioramento di SR è infatti evidente con la crescita del ton, qualunque sia il valore del toff; si ha però un aumento molto più accentuato nel caso di toff ridotti.

Heralge et al [29] analizzano i risultati di taglio con macchina WEDM 'Electronica Ultracut' su tre diverse leghe leggere per applicazioni aeronautiche, tra cui auna lega di alluminio invecchiato. I parametri di taglio vengono mantenuti tutti costanti ad esclusione di ton e IP dove vengono analizzati rispettivamente tre e due livelli, tabella 3.16. Viene anche valutata l'influenza del materiale del filo, cambiando tra ottone semplice e zincato a parità di tutti gli altri parametri.

Sr No	Parameters	Value
1	Pulse on time (μsec)	110,120 and 130
2	Pulse off time (μsec)	50
3	Servo voltage (Volts)	20
4	Wire tension (N)	15
5	Wire feed (m/min)	8
6	Water pressure (Kg/cm^2)	4
7	Servo feed (mm/min)	25
8	Current	11,12
9	Type of wire	Plain brass and zinc coated

Tab. 3.16: Parametri di macchina utilizzati.

Il piano sperimentale adottato risulta completo, infatti per ognuno dei due differenti fili utilizzati sono state provate tutte e sei le possibili combinazioni tra i tre livelli di pulse on time ed i due di corrente.

I risultati presi in considerazione per ogni prova di taglio sono stati larghezza del taglio (KW), velocità di taglio (v_c) e rugosità superficiale (R_a), tabella 3.17.

Ex. No.	Control Factors				Responses								
	Wire	I	T _{ON}	Ti alloy			Ni alloy			Al alloy			
				Vc (mm/min)	KW (mm)	Ra (μm)	Vc (mm/min)	KW (mm)	Ra (μm)	Vc (mm/min)	KW (mm)	Ra (μm)	
1	UC	11	110	0.923	0.3424	2.3100	0.831	0.3041	2.7580	1.57	0.2915	3.0000	
2	UC	11	120	1.25	0.3872	3.0248	1.1278	0.312	3.7091	1.6519	0.3343	3.9924	
3	UC	11	130	1.25	0.3853	2.9410	1.2087	0.3148	3.6203	1.6538	0.339	4.1900	
4	UC	12	110	1.0018	0.3479	2.4857	0.9225	0.2931	2.6206	1.6146	0.3043	3.0251	
5	UC	12	120	1.49	0.4102	3.3575	1.415	0.34	3.4622	1.8248	0.3776	4.2400	
6	UC	12	130	1.5	0.421	3.4075	1.4763	0.3391	3.7369	1.8292	0.3808	4.6538	
7	C	11	110	1.03	0.3421	2.2337	0.95	0.2914	2.5625	1.5806	0.2947	3.0261	
8	C	11	120	1.3	0.3839	3.1144	1.2	0.311	3.5165	1.6556	0.3387	3.9234	
9	C	11	130	1.32	0.3879	2.9465	1.19	0.321	3.5033	1.6538	0.347	3.9575	
10	C	12	110	1.12	0.3422	2.3577	1.0252	0.2929	2.6277	1.6198	0.3044	3.2460	
11	C	12	120	1.6	0.4056	3.2515	1.4691	0.3399	3.6100	1.8181	0.367	4.5586	
12	C	12	130	1.61	0.4081	3.2504	1.5151	0.3377	3.6527	1.8337	0.3713	4.4384	

Tab. 3.17: Prove e risultati

Una preliminare analisi dei risultati è stata fatta analizzando un grafico, figura 3.7, dove viene riportata la rugosità in funzione di ton e tipo di filo utilizzato.

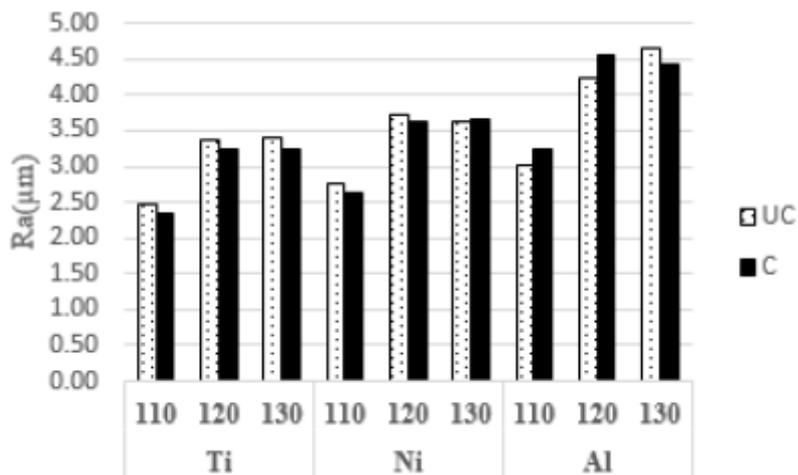


Fig. 3.7: Ra in funzione di ton e tipologia di elettrodo.

È innanzitutto interessante osservare come a parità degli altri parametri, la lega di alluminio risulti quella con valore peggiore di Ra; questo si spiega con il fatto che l'Al ha un punto di fusione più basso rispetto a Ni e Ti, ciò si traduce in crateri più grandi e profondi.

All'aumentare del valore della corrente si ha anche in questo caso un peggioramento della finitura, cosa che per la lega di nostro interesse è ancor più evidente rispetto alle altre due; fa però eccezione il taglio con il filo rivestito e l'ampereaggio più elevato, dove si riscontra una riduzione rispetto al livello inferiori di corrente.

Mentre per Ti e Ni, in un'ottica improntata alla sola minimizzazione del valore di Ra, si ha un risultato migliore utilizzando un elettrodo rivestito, nel caso dell'alluminio è preferibile l'utilizzo di un filo tradizionale senza rivestimento. Questo risultato è interessante perché è il primo articolo tra quelli analizzati in cui si testa la differenza di risultati cambiando l'elettrodo e si dimostra come esso sia una variabile influente sulla qualità della finitura superficiale ottenuta.

Sridhar Reddy et al [30] analizzano i risultati ottenuti da trenta prove facendo variare su cinque livelli ciascuno pulse off time (toff), pulse on time (ton), peak current (IP) e servo voltage (SV) e rilevando per ognuna la rugosità (Ra), lo spessore dello strato rifuso (RCT) e la densità delle fessure superficiali (SCD); i risultati ottenuti per la grandezza di interesse sono presentati in tabella 3.18.

In questo caso il materiale su cui vengono effettuate le prove di taglio è un composito a matrice metallica costituito da Al2124, cioè Alluminio con Mg come principale elemento in lega, rinforzato con 25% in peso di particelle di SiC.

Le prove vengono condotte su una macchina ELPUL-S40ADLX (Electronica sprint cut) utilizzando un filo in ottone di diametro 0.25mm, provini spessi 10mm, e mantenendo costanti velocità di avanzamento del filo, picco di tensione e pressione di lavaggio.

Run	A:Ton μs	B:Toff μs	C:IP A	D:SV V	Ra μm
1	105	50	30	60	1.72
2	115	50	30	40	1.65
3	110	45	40	50	2.265
4	115	50	30	80	2.263
5	115	50	30	60	1.903
6	115	60	30	60	2.187
7	110	45	20	50	1.583
8	125	50	30	60	2.789
9	120	45	20	50	1.99
10	115	50	10	60	1.78
11	115	50	30	60	1.588
12	120	45	40	70	2.148
13	110	55	40	50	1.82
14	115	40	30	60	1.796
15	115	50	30	60	1.685
16	120	55	20	50	1.973
17	110	55	40	70	1.896
18	115	50	30	60	1.78
19	120	55	20	70	3.325
20	115	50	30	60	1.693
21	120	55	40	70	2.778
22	120	45	40	50	2.258
23	110	45	20	70	1.85
24	120	45	20	70	2.675
25	115	50	50	60	2.01
26	120	55	40	50	2.44
27	115	50	30	60	1.45
28	110	55	20	70	1.913
29	115	50	30	60	1.805
30	110	45	40	70	1.808
31	110	55	20	50	1.368

Tab. 3.18: Prove e risultati.

Con i valori ottenuti è stato eseguito un test ANOVA con livello di fiducia del 95%, l'analisi del p-value ha evidenziato che tutti e quattro i fattori risultano significativi, così come l'interazione IP-SV e il ton al secondo ordine. Guardando invece i valori di F-value si può determinare la percentuale di contribuzione dei vari parametri, figura 3.8.

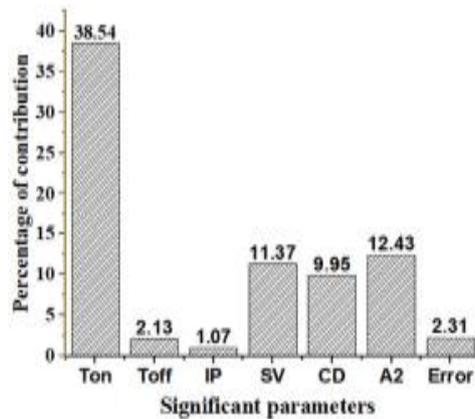


Fig. 3.8: Significatività fattori e loro interazioni.

Il fattore più significativo risulta il ton, cosa comune con gli altri risultati analizzati in precedenza; si hanno però numerose differenze. Il risultato più sorprendente è la ridotta importanza assunta da IP, che solitamente giocava un ruolo molto importante; l'effetto dell'interazione di questo fattore con SV (CD) la rende comunque non trascurabile. Altro risultato di interesse è l'influenza considerevole del SV, fattore che nella gran parte degli altri lavori veniva mantenuto costante e supera invece per importanza IP e toff, almeno nel caso particolare di composito a matrice metallica per cui le considerazioni fatte finora sembrano non valere a pieno.

Se cambia l'importanza relativa dei vari parametri non si notano però differenze nel livello di finitura ottenuto facendo variare un solo fattore; infatti ad un aumento del solo ton o della sola IP a parità degli altri valori si ottiene un peggioramento della rugosità; stesso risultato si ha anche aumentando il solo SV.

Selvakumar et al [31] analizzano i risultati in termini di rugosità (Ra) e velocità di taglio (CS) ottenuti da un piano sperimentale ridotto L9, facendo variare su tre livelli ciascuno i seguenti quattro parametri: ton (A), toff (B), picco di corrente (C) e tensione del filo (D); come mostrato in tabella 3.19. L'esperimento viene condotto con una macchina Electra supercut 734 series 2000.

Sample No.	Control factor	Symbol for coded value	Level		
			1	2	3
1	Pulse-on time (μ s)	A	0.5	0.7	0.9
2	Pulse-off time (μ s)	B	14	26	38
3	Peak current (A)	C	20	60	100
4	Wire tension (g)	D	420	540	660

Tab. 3.19: Fattori e livelli del piano sperimentale.

I provini utilizzati, aventi dimensione 5x5x15mm, sono realizzati in lega di Alluminio 5083 con magnesio principale legante e presenza di silicio.

Tutti gli altri parametri di macchina sono stati mantenuti costanti per tutte le prove.

I risultati ottenuti sono illustrati in tabella 3.20.

Experimental No.	A	B	C	D	Average cutting speed/(mm·min ⁻¹)	Average $R_a/\mu\text{m}$
1	1	1	1	1	0.46	1.561
2	1	2	2	2	0.52	1.653
3	1	3	3	3	0.41	1.698
4	2	1	2	3	1.06	2.057
5	2	2	3	1	0.85	2.096
6	2	3	1	2	0.37	1.739
7	3	1	3	2	1.26	2.085
8	3	2	1	3	0.57	1.712
9	3	3	2	1	0.74	2.156

Tab. 3.20: Prove e risultati.

Dalla successiva analisi della varianza basata sul rapporto S/N si è trovata la contribuzione percentuale dei vari fattori; il più determinante con 54.67% è risultato essere il pulse on time seguito dalla corrente con 38.47%, mentre toff e tensione del filo, con valori inferiori al 5%, risultano trascurabili.

Si ha dunque conferma, anche per questa lega, del fatto che i due parametri che più influenzano la rugosità ottenuta sono il pulse on time ed il picco di corrente. Inoltre, analizzando l'immagine seguente, figura 3.9, si può vedere come anche il loro effetto non cambi; infatti ad un aumento del valore di entrambi i fattori corrisponde un peggioramento del rapporto S/N (η) e quindi della rugosità.

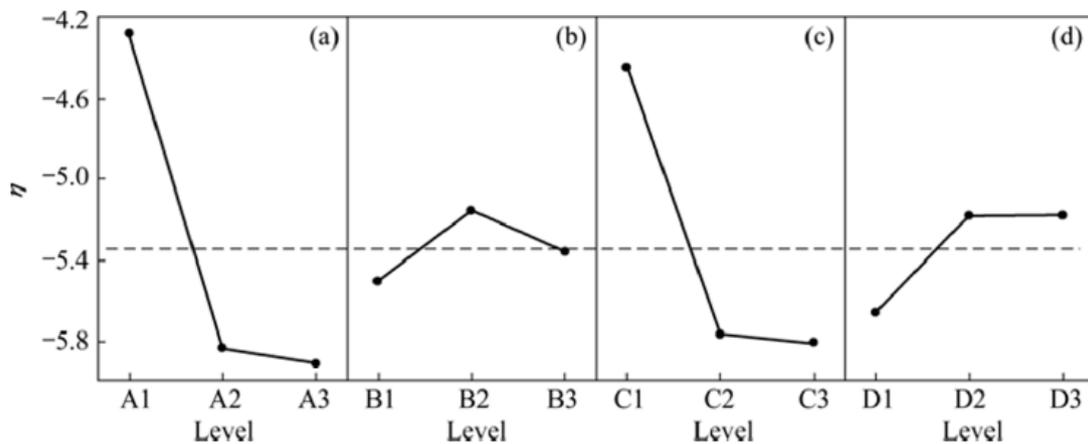


Fig. 3.9: η di ogni fattore ad ogni livello.

Balaji et al [32] valutano i risultati ottenuti eseguendo un piano completo 3x3 in termini di rugosità e MRR, tabella 3.21.

Anche in questo articolo il materiale testato è un composito a matrice metallica, infatti alla lega di alluminio AA8011 sono state aggiunte particelle di SiC per una percentuale in peso del 10%.

Gli esperimenti di taglio, condotti con una macchina T-3822, sono stati eseguiti su provini di lunghezza 26mm e spessore 7mm. I parametri scelti come fattori sono ton, toff e IP, ciascuno su tre livelli; tutti gli altri sono stati mantenuti costanti.

S. NO	Current(A)	T _{on} (10 ⁻⁶ S)	T _{off} (10 ⁻⁶ S)	MRR (g/sec)	Ra (μm)
1	10	40	9	0.142279	3.34
2	10	40	7	0.171849	2.12
3	10	40	2	0.2043	1.28
4	10	30	9	0.183904	2.23
5	10	30	7	0.198982	1.008
6	10	30	2	0.220795	2.66
7	10	20	9	0.189172	1.073
8	10	20	7	0.206497	2.81
9	10	20	2	0.23894	1.26
10	20	40	9	0.149139	3.53
11	20	40	7	0.178709	2.31
12	20	40	2	0.21116	1.47
13	20	30	9	0.190764	2.42
14	20	30	7	0.205842	1.198
15	20	30	2	0.227655	2.85
16	20	20	9	0.196032	1.263
17	20	20	7	0.213357	3.001
18	20	20	2	0.2458	1.45
19	30	40	9	0.151639	4.05
20	30	40	7	0.181209	2.83
21	30	40	2	0.21366	1.39
22	30	30	9	0.193264	2.94
23	30	30	7	0.208342	1.118
24	30	30	2	0.230155	3.37
25	30	20	9	0.198532	1.183
26	30	20	7	0.215857	3.52
27	30	20	2	0.2483	1.37

Tab. 3.21: Prove e risultati.

È poi stata effettuata una classifica degli esperimenti con Grey alla ricerca del miglior rapporto tra MRR elevato e rugosità ridotta, oltre ad un test ANOVA per determinare l'influenza dei fattori, considerati però unitamente.

Per quanto riguarda la sola rugosità si può confermare, anche in questo caso, come il toff non abbia influenza considerevole sulla finitura e, all'aumentare del ton il valore di Ra cresce.

Velmurugan et al [33] analizzano i risultati di taglio ottenuti da 30 diverse prove su campioni spessi 7mm in AA6061 rinforzato con 10%wt SiC e 5%wt grafite, facendo variare ton, toff, IP e WF su 3 livelli ciascuno.

Il filo utilizzato è di ottone zincato ed ha diametro 0.25mm; tutti gli altri parametri di macchina vengono mantenuti costanti.

I risultati sperimentali ottenuti in termini di rugosità superficiale vengono poi confrontati con le previsioni fatte con un modello ANFIS, trovando uno scostamento percentuale massimo inferiore al 2,5%

Di seguito vengono presentati i risultati delle prove, tabella 3.22, e del test ANOVA, tabella 3.23, effettuato per comprendere la significatività dei vari parametri specificatamente riguardo la SR.

Exp. No.	Ton	Toff	IP	WF	Experimental SR
1	116	50	140	4	5.35
2	116	45	140	4	5.82
3	116	50	140	4	4.84
4	116	50	140	4	4.87
5	126	55	180	6	5.45
6	126	45	100	4	4.82
7	126	55	100	6	4.26
8	116	50	140	10	4.79
9	116	50	140	2	5.58
10	106	45	180	4	3.49
11	116	50	140	4	4.77
12	106	45	180	6	4.45
13	106	55	180	6	3.77
14	126	45	180	6	6.22
15	116	50	140	4	3.83
16	106	45	100	6	3.09
17	126	45	180	4	6.01
18	116	45	140	4	5.08
19	106	55	100	4	2.30
20	106	50	140	4	3.31
21	106	55	100	6	2.48
22	126	50	140	4	4.03
23	116	50	140	4	4.90
24	126	45	100	6	3.43
25	126	55	100	4	4.15
26	106	45	100	4	3.04
27	126	55	180	4	5.39
28	116	50	180	4	4.89
29	106	55	180	4	3.75
30	116	50	140	4	5.58

Tab. 3.22: Prove e risultati.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	27.0826	1.80551	5.84	0.001
Blocks	1	0.0750	0.07502	0.24	0.630
Linear	4	2.8585	0.71463	2.31	0.109
Ton	1	2.4450	2.44502	7.92	0.014
Toff	1	0.6071	0.60709	1.97	0.183
IP	1	0.0010	0.00102	0.00	0.955
WF	1	0.0014	0.00141	0.00	0.947
Square	4	5.1717	1.29294	4.19	0.020
Ton*Ton	1	2.4388	2.43877	7.89	0.014
Toff*Toff	1	0.5577	0.55773	1.81	0.200
IP*IP	1	0.0304	0.03036	0.10	0.759
WF*WF	1	0.1330	0.13305	0.43	0.522
2-Way Interaction	6	0.6825	0.11375	0.37	0.887
Ton*Toff	1	0.0182	0.01823	0.06	0.812
Ton*IP	1	0.2162	0.21623	0.70	0.417
Ton*WF	1	0.1237	0.12365	0.40	0.537
Toff*IP	1	0.0078	0.00779	0.03	0.876
Toff*WF	1	0.0001	0.00013	0.00	0.984
IP*WF	1	0.3094	0.30942	1.00	0.334
Error	14	4.3247	0.30891		
Lack-of-Fit	8	2.5920	0.32400	1.12	0.457
Pure Error	6	1.7327	0.28878		
Total	29	31.4073			

Tab. 3.23: Risultati test ANOVA.

Analizzando i p-value si vede come il ton sia il fattore più importante, considerevole è anche l'interazione tra ton e toff, mentre tutti gli altri fattori risultano non significativi. Anche in questo caso come per il primo materiale composito analizzato, si può vedere come la corrente sia ininfluenza, cosa assolutamente falsa per tutti gli altri articoli analizzati.

Anche in questo caso viene confermato che un aumento del ton a parità degli altri parametri comporta un peggioramento della finitura.

Capitolo 4 – Lavoro sperimentale

4.1 Realizzazione dei provini

I provini sono stati realizzati attraverso la già ampiamente descritta tecnologia LPBF utilizzando la apposita macchina EOSINT M270 Dual Mode, figura 4.1.1, le cui caratteristiche tecniche sono evidenziate in tabella 4.1.1.



Technical data EOSINT M 270	
Usable construction volume	250 mm x 250 mm x 215 mm (incl. building platform)
Layer thickness	20 µm or 40 µm
Laser type	Yb-fibre laser; 200 W
Precision optics	F-theta lens, high-speed scanner
Scanning speed	up to 7.0 m/s
Focus diameter	100 µm
Measurements (w x d x h)	
System	2,000 mm x 1,050 mm x 1,940 mm
Recommended installation space	about 3.5 m x 3.6 m x 2.5 m
Weight	about 1,130 kg
Software	
EOS RP Tools, Cambridge	
Optional accessories	
Powder conveyor and screen module IPCM-M extra, wet separator, blast cabin	

Fig. 4.1.1: EOSINT M270.

Tab. 4.1.1: Caratteristiche tecniche EOSINT M270.

In tabella 4.1.2 sono indicati i parametri di processo utilizzati per la fabbricazione dei campioni.

Process parameters used.

Process parameters	Down-skin (3 layers)	Core	Up-skin (2 layers)	Contour
Laser power [W]	190	195	190	80
Scan speed [mm/s]	900	800	800	900
Hatching distance [mm]	0.10	0.17	0.10	–
Layer thickness [µm]	30	30	30	–
Beam-spot size [µm]	100	100	100	100

Tab. 4.1.2: parametri di processo utilizzati per la realizzazione dei provini.

Come si può vedere dalla tabella soprastante sono state impostate quattro differenti set di valori dei parametri; con 'core' è stato realizzato il cuore del componente, cioè tutta la struttura interna; con la modalità 'down-skin' le parti inferiori rappresentate in giallo in figura j, con 'up-skin' quelle superiori rappresentate in blu e, infine, con 'contour' tutte le superfici di contorno. Questa differenziazione, figura 4.1.2, permette di migliorare la qualità del componente sia per quanto riguarda l'aspetto estetico, sia in termini funzionali.

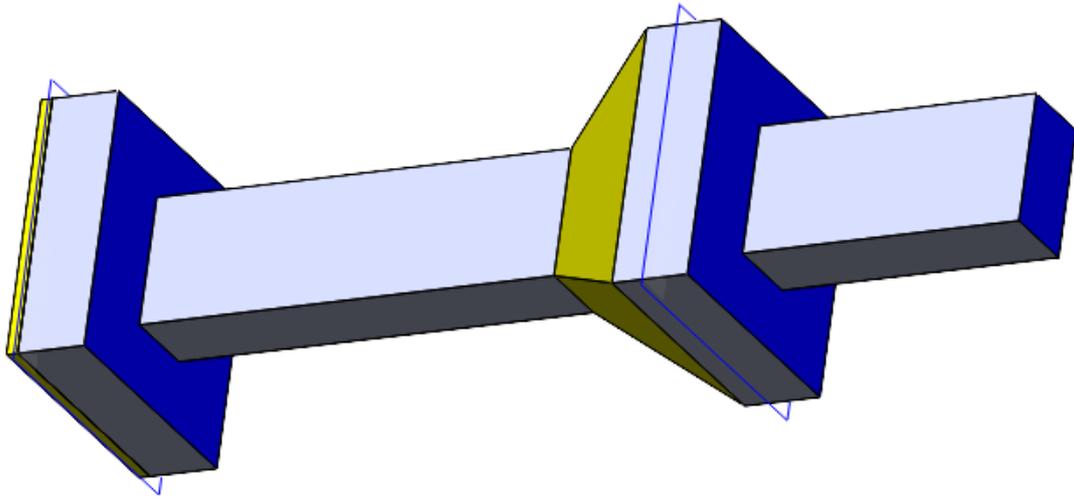


Fig. 4.1.2 particolare con evidenziate le zone a differente modalità di produzione ed i piani di taglio.

I provini sono stati prodotti con scanning direction costante per tutte le diverse modalità e pari a 67°.

Le dimensioni finali dei provini sono presentate nelle immagini seguenti, figure 4.1.3a e 4.1.3b:

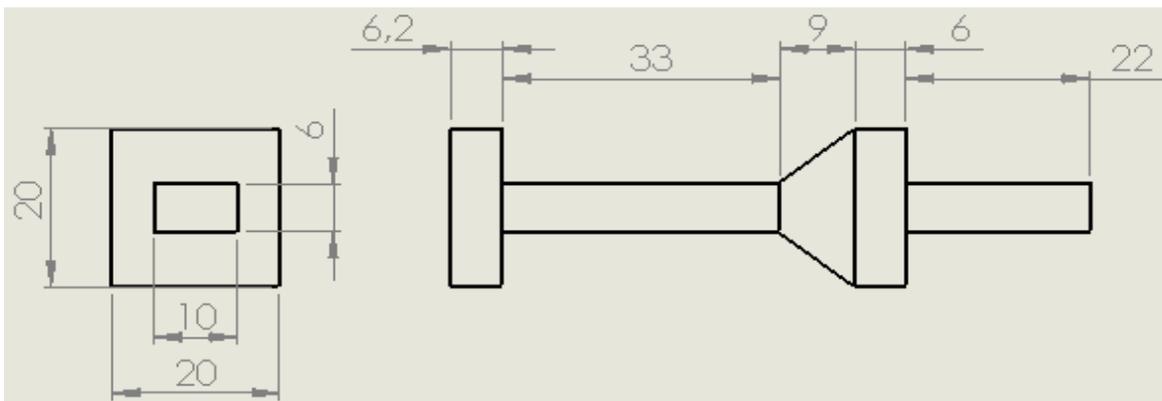


Fig. 4.1.3a: Provino standard per tagli di lunghezza 25 e 50mm.

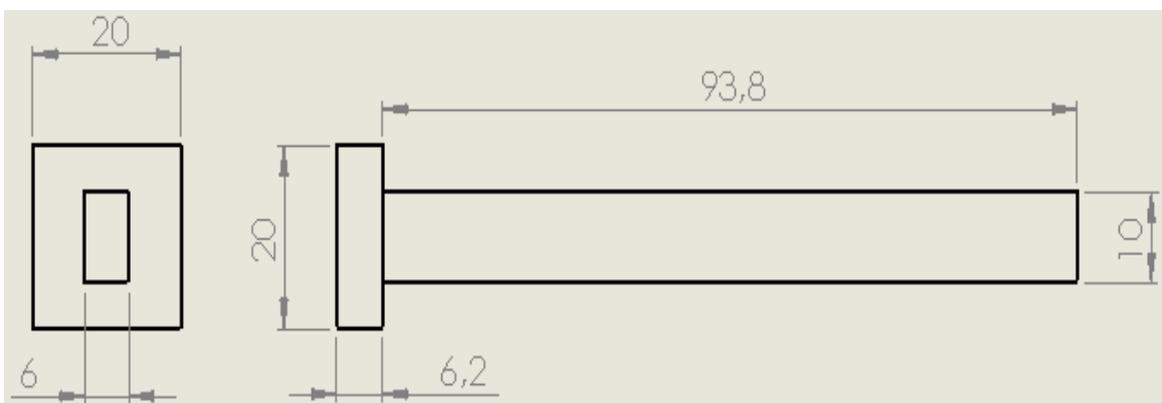


Fig. 4.1.3b: Provino standard per taglio di lunghezza 100mm.

Nel dimensionare i provini si sono tenute in considerazione diverse variabili; per prima cosa si sono scelte le tre diverse lunghezze a sbalzo rispetto ai piani di taglio, rispettivamente 25, 50 e 100mm;

variabile questa che sarà fattore del piano sperimentale. Si è dovuto inoltre considerare una corretta distanza tra la piattaforma ed il piano di taglio, individuata in 1.2mm, cioè il primo multiplo dello spessore del layer superiore ai primi tre strati realizzati in modalità 'down-skin', questo per far sì che il taglio avvenisse in una zona che non potesse essere in nessun modo interessata da una microstruttura di transizione tra uno strato e l'altro; infatti la parziale rifusione dello strato precedente durante la fusione del nuovo layer fa sì che, all'altezza considerata (linea azzurra nell'immagine sottostante), il materiale sia stato allo stato fuso nello stesso istante e presenti quindi identica microstruttura; la seguente immagine, figura 4.1.4, può essere utilizzata per comprendere meglio il ragionamento descritto.

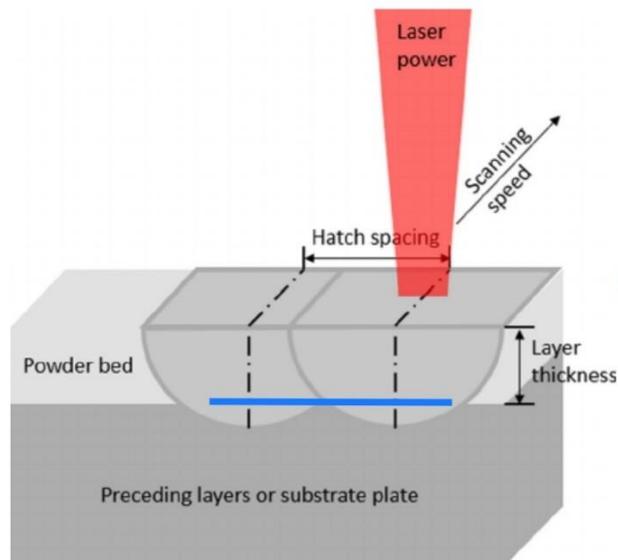


Fig. 4.1.4: Linea di taglio a metà del Recast Layer Thickness.

4.2 Taglio dei provini

Il taglio dei provini avviene utilizzando una macchina e.cut per elettroerosione a filo del produttore cinese Suzhou Boama, modello DK7732, figura 4.2.1.



Fig. 4.2.1: E.cut BOAMA DK 7732.

La macchina, i cui componenti sono coerenti con quelli indicati nel paragrafo 1.7, è costituita da un basamento in ghisa HT250 sul quale sono situati la tavola a croce con gli assi X e Y, il sistema di svolgimento del filo e la colonna verticale con il braccio inferiore fisso e quello superiore mobile.

La tavola di lavoro consiste di due slitte, una superiore che regola il movimento lungo l'asse X ed una inferiore lungo l'asse Y, montate su pattini a ricircolo di sfere e guide in acciaio temprato. I movimenti sono dati da motori passo e trasmessi da viti a ricircolo di sfere precaricate.

Il filo utilizzato, di diametro 0.18mm, è realizzato in molibdeno.

Per quanto riguarda il liquido di lavaggio si è utilizzato un apposito liquido dielettrico mischiato ad acqua con un rapporto del 10%; questo viene fornito alla zona da appositi ugelli posti sopra e sotto la zona di lavoro, viene poi raccolto ed inviato alla vasca di raccolta, previo passaggio da un panno in feltro, figura 4.2.2, che funge da filtro trattenendo le particelle metalliche asportate dalla lavorazione.



Fig. 4.2.2: Filtro in feltro.

4.3 Rilevazione della rugosità superficiale

Una volta conclusa l'operazione di taglio dei provini occorre misurare la rugosità ottenuta. Per fare ciò ci si avvale di un apposito strumento chiamato rugosimetro; nel nostro caso è stato utilizzato il modello RTP80, figura 4.3.1a, dotato di traslatore TL90, figura 4.3.1b.



Fig. 4.3.1a: Unità di controllo RTP80.



Fig. 4.3.1b: Traslatore TL90 con tastatore SB10/60

L'unità costituita da questi due componenti presenta le specifiche tecniche riportate in tabella 4.3.1.

DATI TECNICI	
Campo di misura:	±500μ
Risoluzione:	0,001μm
Classe di precisione:	1° secondo ISO/DIN
Lunghezza di cut-off:	0,25 - 0,8 - 2,5 - 8 mm
Numero di cut-off:	Selezionabile da 1 a 19
Corsa di esplorazione:	Fino a 50 mm
Tastatore:	Induttivo ruotabile di 90° per misure laterali
Parametri di misura:	54 parametri (Ra, Rq, Rt, Rz, Rp, Rc, Rv, Rsk, Rku, Rsm, Rdc, RPc, Pa, Pq, Pt, Pp, Pc, Pv, Psm, Pdc, PPc, Wa, Wq, Wt, Wz, Wp, Wv, Wc, WSm, Wdc, WPc, Rk, Rpk, Pvk, Mr1, Mr2, Pt, Pdc, PPc, R, Rx, AR, Wte, W, AW, Wx, Rke, Rpke, Rvke, Mr1e, Mr2e Rmax, R3z, R3zm)

Tab. 4.3.1: Dati tecnici strumento di misura.

Sul traslatore è stato montato il tastatore SB 10/60, figura 4.3.2, il quale permette di eseguire le misure senza pattino.

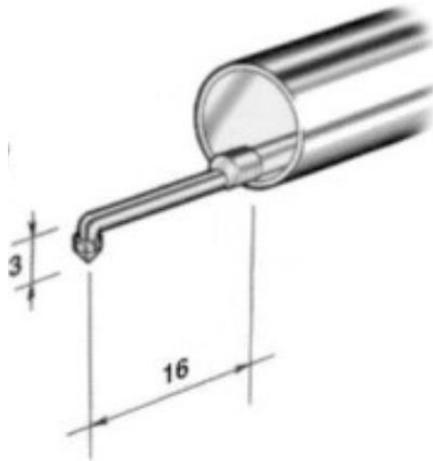


Fig. 4.3.2: Tastatore SB10/60.

Per effettuare correttamente le misurazioni occorre impostare i parametri di misura scelti, mostrati in figura 4.3.3, tra cui lunghezza di cut-off, numero di cut-off, velocità di misura e campo di misura più adeguati per le rilevazioni su componenti prodotti tramite tecnologia additiva.



Fig. 4.3.3: Impostazioni di misura.

Per l'effettuazione delle misure occorre seguire uno schema preciso che garantisca di trovare un valore medio di rugosità che rappresenti al meglio il reale livello di finitura della superficie. Sulla base dell'esperienza si è scelto di effettuare sette diverse rilevazioni seguendo lo schema di figura 4.3.4: tre vanno eseguite parallelamente alla direzione del filo durante il taglio (linee blu) indicativamente a destra, a sinistra ed al centro dell'area; due in direzione perpendicolare alla precedente (linee gialle), ma solamente ai lati della superficie ed infine due lungo le diagonali della superficie di taglio (linee rosse).

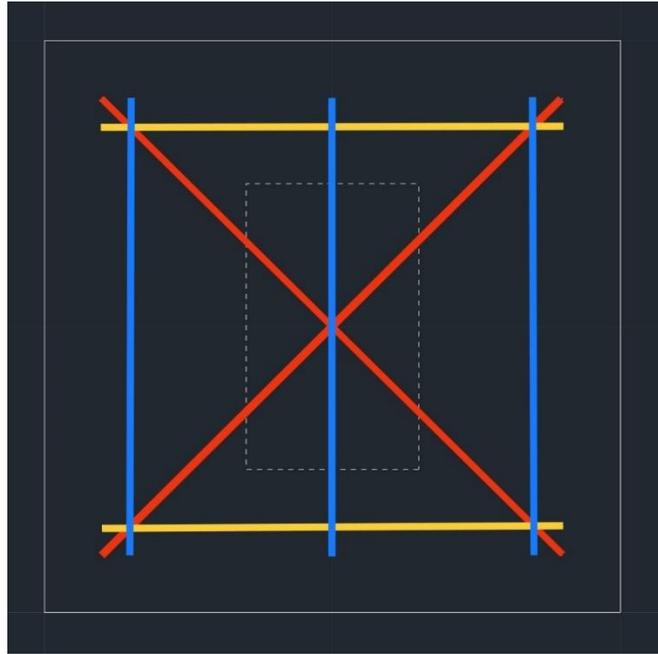


Fig. 4.3.4: Schema effettuazione misure.

4.4 Primo piano sperimentale

Per prima cosa si sono valutati i parametri da utilizzare come fattori del piano sperimentale. Considerando che il filo utilizzato durante le prove rimane lo stesso, ipotizzando che il suo consumo sia trascurabile e, tralasciando in prima approssimazione l'effetto della lunghezza a sbalzo rispetto alla linea di taglio, i parametri su cui è possibile agire a livello di macchina sono pulse on (t_{on}), pulse off (t_{off}) e intensità di corrente (I). Riscontrato che tutti gli articoli analizzati ottengono come risultato il fatto che il t_{off} non ha pressoché nessuna influenza sulla rugosità superficiale ottenuta, si è scelto per questa analisi preliminare di non utilizzarlo come fattore, ma di impostarlo volta per volta seguendo i valori consigliati dal costruttore in base agli altri parametri di lavoro ed alla larghezza dei componenti da tagliare; in questo modo è possibile a parità di numero di prove, andare a scegliere con maggiore precisione i valori di pulse on e intensità di corrente che ottimizzano la rugosità superficiale. In questa analisi preliminare verrà quindi effettuato un piano sperimentale completo in cui saranno fatti variare su due livelli t_{on} e I ; in modo da determinare la combinazione dei due che fornisce il migliore risultato in termini di finitura e confermare la validità delle osservazioni bibliografiche anche nel caso di componenti in AlSi10Mg prodotti mediante tecnologia additiva.

I valori di t_{on} impostabili variano da 10 a 85 μ s, mentre quelli consigliati dal produttore per una lunghezza di taglio simile alla nostra da 10 a 33 μ s; avendo come unico obiettivo dell'esperimento l'ottimizzazione della finitura superficiale, facendo sempre riferimento ai risultati ottenuti in tutti gli articoli analizzati, dove viene riscontrato che valori elevati del t_{on} si traducono sempre in un peggioramento del valore di rugosità, si è scelto in prima battuta di considerare come livelli del fattore i valori 10 e 15 μ s, cioè il minimo valore impostabile ed uno di poco superiore.

Anche per il valore di intensità di corrente è possibile fare un ragionamento analogo, dai risultati bibliografici è infatti evidente che valori di corrente troppo elevati comportano un notevole peggioramento della finitura; essendo selezionabili sulla macchina tre livelli del valore di corrente, identificati con 1, 2 e 3 a rappresentare valori crescenti di intensità, si è scelto, per operare sullo stesso numero di livelli del fattore precedente, di trascurare il valore più elevato, utilizzando gli altri due per le prove.

Scelti i fattori ed i corrispondenti livelli di interesse si è utilizzato per scegliere l'ordine delle prove il software minitab, il quale, inseriti i valori dei parametri scelti, presenta in output l'ordine preferenziale delle prove da eseguire per garantire che i risultati ottenuti siano il più possibile svincolati da eventuali errori nell'esecuzione delle prove stesse.

Il risultato ottenuto è il seguente:

StdOrder	RunOrder	I	Ton
4	1	2	15
3	2	1	15
2	3	2	10
1	4	1	10

L'obiettivo principe di queste prove sarà quello di analizzare la rugosità ottenuta e stabilire che, anche per il materiale analizzato, valgono i risultati di base riscontrati in letteratura.

Nella tabella seguente, tabella 4.4.1, vengono presentati i risultati ottenuti dalle misurazioni di rugosità effettuate seguendo i criteri presentati nel paragrafo precedente.

misure di rugosità	campione 1		campione 2		campione 3		campione 4	
	Ra [µm]	Rz [µm]						
parallelo centro	6,102	35,062	4,135	24,417	4,799	27,648	3,660	21,332
parallelo dx	4,748	28,787	3,588	20,215	4,027	23,917	3,729	21,848
parallelo sx	5,505	28,715	4,012	22,634	3,686	21,175	3,832	24,298
ortogonale dx	5,514	31,441	6,160	36,005	4,155	26,323	4,370	25,508
ortogonale sx	5,645	31,041	5,618	33,410	4,460	27,238	4,047	24,149
diagonale /	4,769	27,768	5,684	31,638	4,440	26,561	3,728	22,356
diagonale \	6,439	36,337	6,814	35,418	4,888	26,379	4,562	24,842
media	5,532	31,307	5,144	29,105	4,351	25,606	3,990	23,476
deviazione standard	0,627	3,294	1,229	6,523	0,427	2,286	0,352	1,614

Tab. 4.4.1: Risultati misurazioni rugosità.

Analizzando la media dei valori di Ra ed Rz ottenuti per ogni provino è possibile osservare come la rugosità ottenuta diminuisca con la riduzione dell'intensità di corrente a parità di pulse on e come lo faccia in maniera ancora più evidente riducendo il pulse on a parità di intensità di corrente; per

vedere meglio ciò è utile analizzare i grafici a linee in cui sono espressi i risultati in termini di Ra ottenuti a parità di corrente, variando il ton, figure 4.4.1, e viceversa, figure 4.4.2.

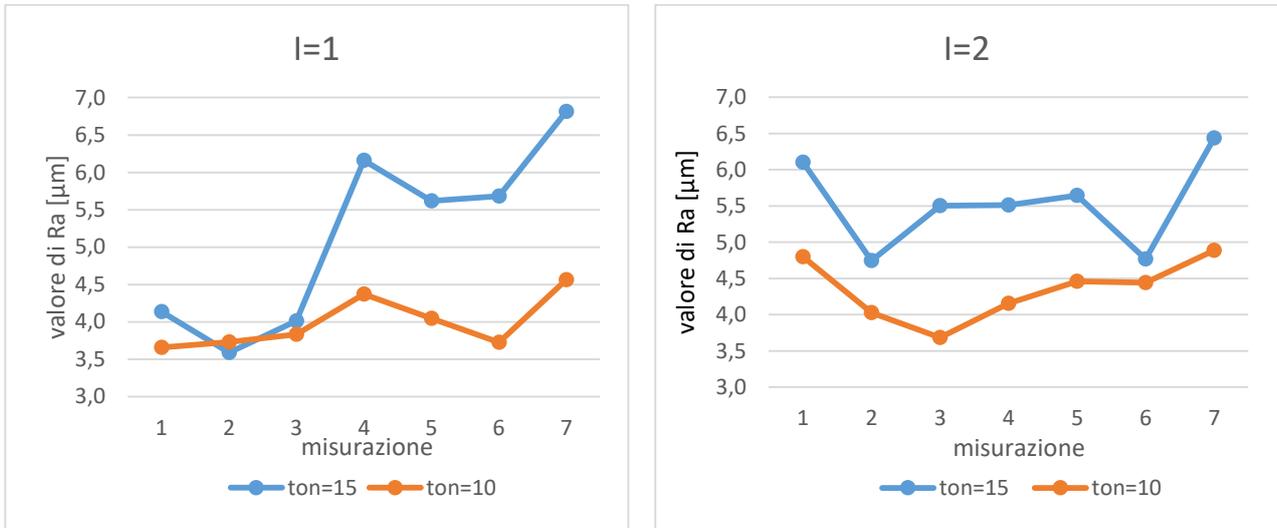


Fig. 4.4.1: Valori di Ra a parità di corrente variando ton.

Confrontando nel dettaglio i risultati ottenuti a parità di intensità di corrente, considerando i due diversi livelli di pulse on, appare subito evidente come nella quasi totalità delle misurazioni (nell'unica eccezione lo scarto è minimo) si ottiene un valore di rugosità più basso nel caso del tempo di scarica minore.

Si può inoltre notare che con la corrente impostata al livello 2, lo scarto tra le misure è tendenzialmente minore, con eccezione per le misure effettuate parallelamente alla direzione di taglio.

La massima differenza tra due misure eseguite nella stessa direzione risulta di circa 2.2µm, valore questo superiore rispetto a quello speculare ottenuto a parità di ton variando la corrente, a conferma del fatto che tra i due parametri quello che influenza maggiormente il valore di Ra è proprio il ton.

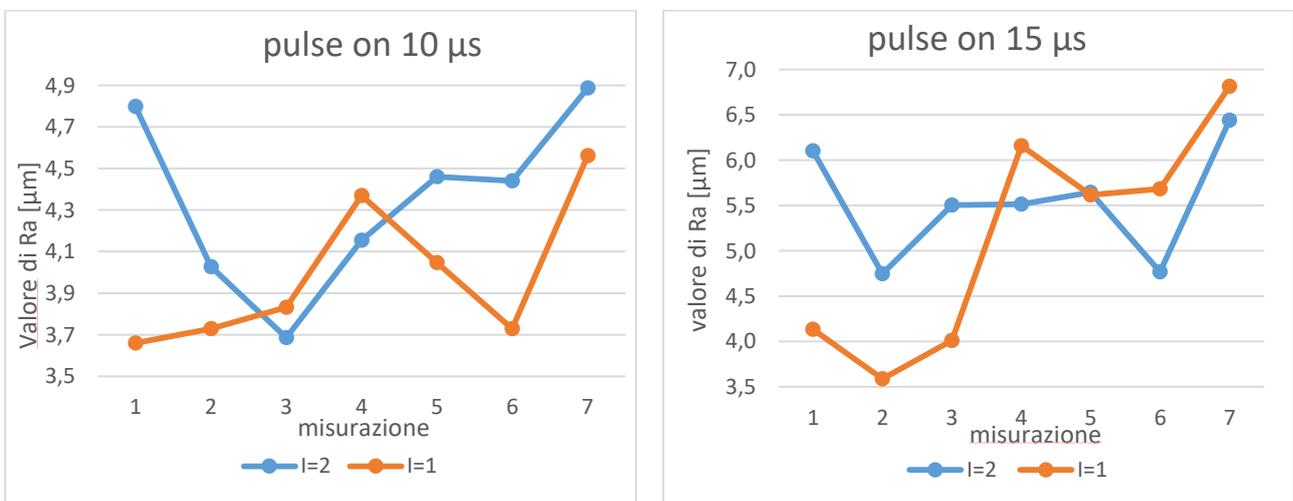


Fig. 4.4.2: Valori di Ra a parità di ton variando la corrente.

Analizzando invece i risultati ottenuti a parità di ton e facendo variare l'intensità di corrente ci si accorge di come la distribuzione dei valori sia meno lineare, infatti, la già dimostrata maggiore influenza del ton rispetto alla corrente sul valore della rugosità, fa sì che le prove in cui si ottiene un valore di rugosità superiore con il livello di corrente inferiore siano ben tre, con anche uno scarto superiore rispetto a quello minimo evidenziato nel caso precedente.

Tuttavia considerando che la gran parte delle prove portano ad un valore di rugosità più elevato con maggiore intensità di corrente e, visto che la differenza in questo caso è sempre maggiore che a rapporto invertito, si può comunque concludere che un aumento della corrente si traduce tendenzialmente in un valore più elevato, quindi peggiore, della Ra; come del resto evidenziato dalla gran parte degli articoli scientifici analizzati.

Per quanto riguarda l'influenza della direzione di prova ci si accorge che il valore di Ra minimo ottenuto si ha sempre in direzione parallela a quella di taglio, mentre quello massimo si trova eseguendo la misurazione lungo la diagonale della sezione di taglio.

Non è possibile eseguire invece valutazioni sul lato in cui viene eseguita la misura in quanto, nell'indicare lato destro e sinistro, non è stata tenuta traccia della posizione del provino sulla piattaforma; ma interessando a noi l'Ra, cioè la misura media di rugosità dell'intera superficie, tale fattore non sarebbe comunque risultato importante.

Come anticipato, è stata effettuata un'analisi statistica, in particolare un test ANOVA per confermare quanto visualizzato graficamente. Inserendo le informazioni sui fattori, tabella 4.4.2, e tralasciando l'interazione tra i due per lasciare il grado di libertà necessario all'analisi, si sono ottenuti i risultati presentati in tabella 4.4.3

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Ton	Fixed	2	10; 15
I	Fixed	2	1; 2

Tab. 4.4.2: Fattori e livelli inseriti.

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	SS	MS	F	P
Ton	1	1,36306	1,36306	7479,05	0,007
I	1	0,14025	0,14025	769,55	0,023
Error	1	0,00018	0,00018		
Total	3	1,50349			

Tab. 4.4.3: Risultati ANOVA Ra.

Il test è stato eseguito con un livello di fiducia del 95%, di conseguenza, analizzando il p-value si può facilmente comprendere che entrambi i fattori risultano significativi.

Guardando invece il valore dell'F-value si trova conferma del fatto che il ton risulta essere il fattore con maggiore incidenza sulla rugosità.

È possibile confermare in modo più completo i risultati analizzando alcuni grafici restituiti dal software a seguito dell'analisi statistica, in particolare il diagramma di Pareto (figura 4.4.4) ed i grafici relativi agli effetti principali (figura 4.4.5) ed alle interazioni (figura 4.4.6).

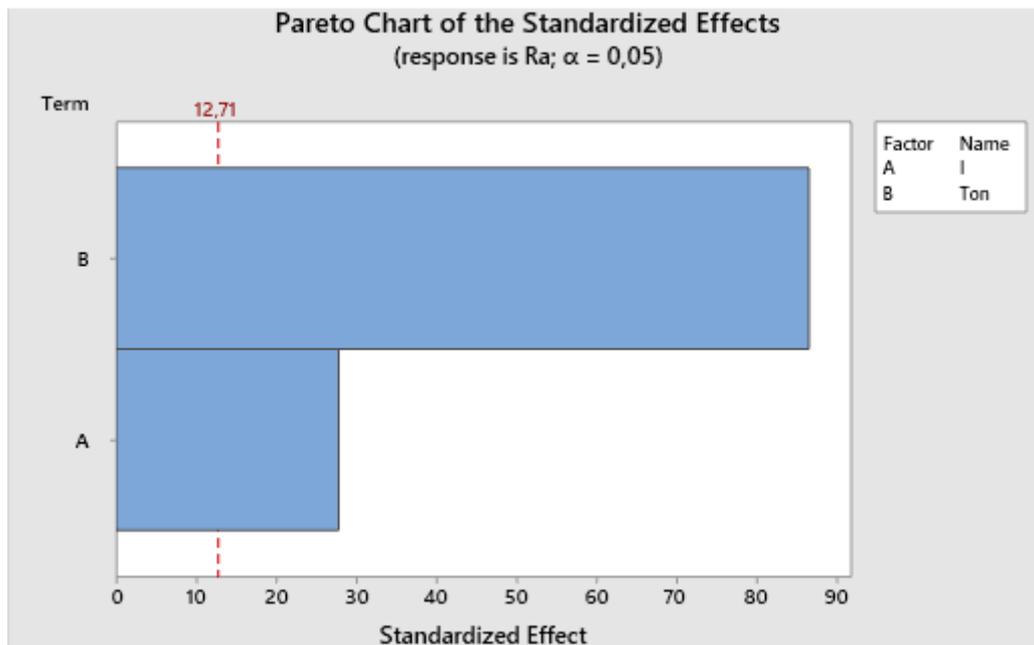


Fig. 4.4.4: Diagramma di Pareto.

Questo diagramma a barre è utile per comprendere graficamente l'importanza dei singoli fattori; la linea rossa rappresenta il livello raggiunto il quale il fattore diventa significativo, viene quindi confermato il fatto che entrambi i fattori risultano di interesse e si comprende meglio in quale proporzione lo siano, con il pulse on che raggiunge un valore di circa il triplo rispetto all'intensità di corrente.

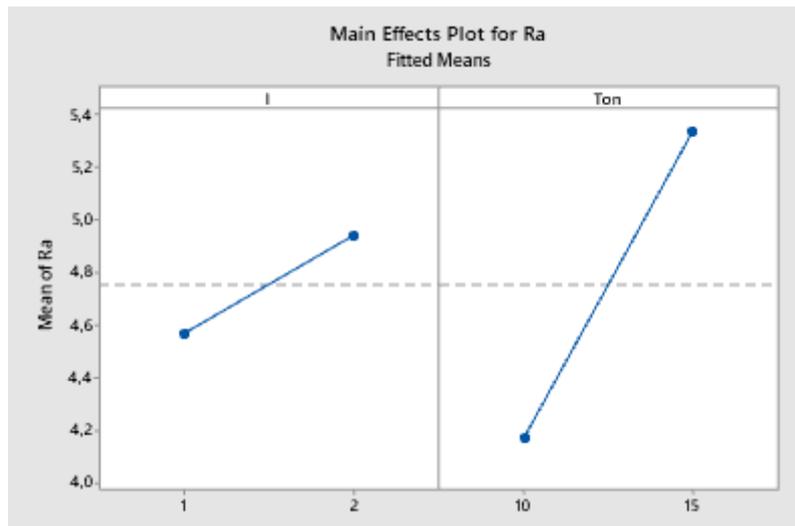


Fig. 4.4.5: Diagramma degli effetti.

I punti rappresentati in questo diagramma indicano il livello di finitura mediamente ottenuto per ogni livello di ognuno dei fattori. Essendo l'obiettivo quello di valutare i livelli che garantiscono il valore di Ra più basso appare subito evidente come in entrambi i casi quello ottimale sia il minore.

La maggiore pendenza della retta relativa ai valori ottenuti a parità di pulse on rispetto a quella che collega i valori medi ottenuti con la costanza della corrente è ulteriore conferma del fatto che l'incidenza del tempo di scarica sia superiore sul livello di finitura ottenuto.

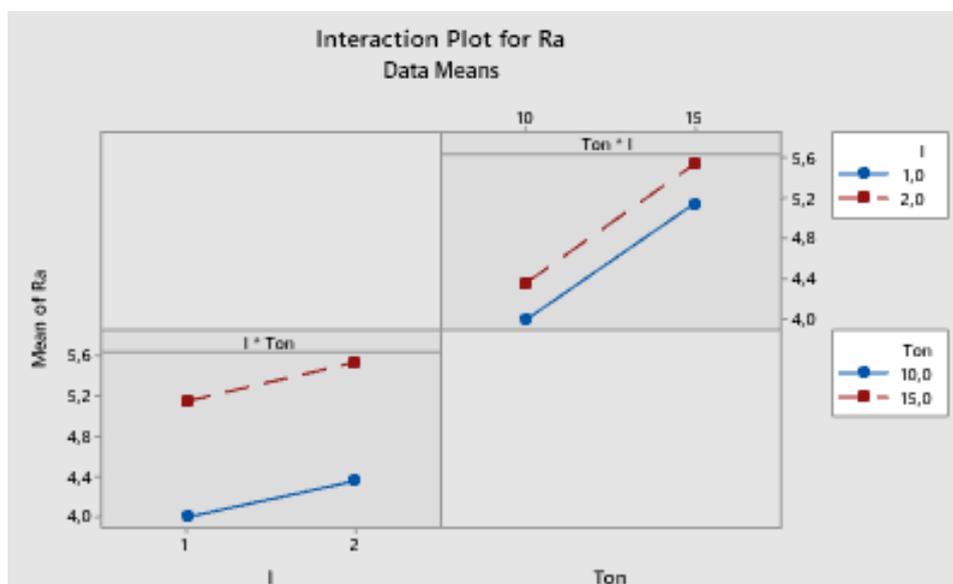


Fig. 4.4.6: Diagramma delle interazioni.

In questo caso risulta invece fondamentale l'analisi del grafico per avere conferma del fatto che le interazioni tra i fattori considerati siano effettivamente trascurabili; l'assenza di intersezioni tra le linee in entrambi i casi valida tale fatto.

Per completezza è stata effettuata la stessa analisi anche relativamente ai valori medi ottenuti di Rz; i risultati sono presentati in tabella 4.4.4.

Analysis of Variance for Rz

Source	DF	SS	MS	F	P
Ton	1	32,0922	32,0922	24762,52	0,004
I	1	4,6916	4,6916	3620,03	0,011
Error	1	0,0013	0,0013		
Total	3	36,7851			

Tab. 4.4.4: Risultati ANOVA Rz.

Anche in questo caso è possibile affermare che entrambi i fattori risultano determinanti sulla rugosità superficiale e che, tra i due, quello con incidenza maggiore è il pulse on.

L'ottenimento di questi risultati è una conferma importante in quanto le variabili non considerate, come ad esempio la diversa lunghezza, e quindi il peso, della parte di provino soprastante la sezione di taglio, potevano influenzare notevolmente i valori ottenuti; invece il fatto che sia possibile confermare i risultati auspicati anche nel caso di provini in AlSi10Mg prodotti tramite LPBF, rende questo esperimento preliminare un successo, e permette di passare ad un'analisi successiva più accurata e completa.

4.5 Secondo piano sperimentale

Acquisite le informazioni volute dal primo lavoro si è deciso di condurre il secondo esperimento per valutare l'influenza della lunghezza a sbalzo e del peso dei provini rispetto alla sezione di taglio.

A questo proposito sono stati utilizzati dei provini differenti con forma, dimensione e distribuzione della massa tali da poter descrivere al meglio un numero più elevato possibile di casi che si possono riscontrare nei componenti progettati per la tecnologia additiva L-PBF.

Anche in questo caso ognuno dei due fattori è stato inizialmente considerato su due livelli; 75 e 100mm come altezze, spesso e sottile come grandezza delle pareti.

Nelle seguenti immagini, figure 4.5.1, sono visibili i modelli CAD quotati dei provini.

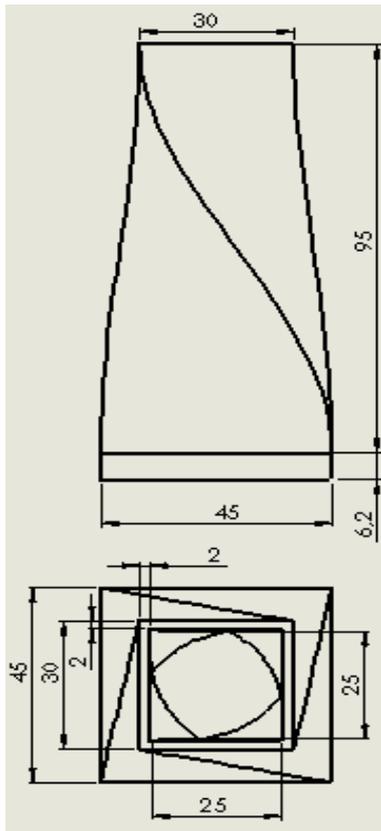


Fig. 4.5.1a: provino L=75mm, parete sottile.

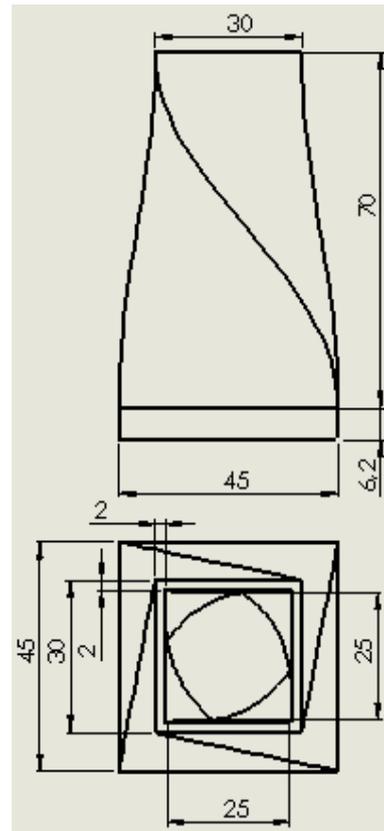


Fig. 4.5.1b: provino L=100mm, parete sottile.

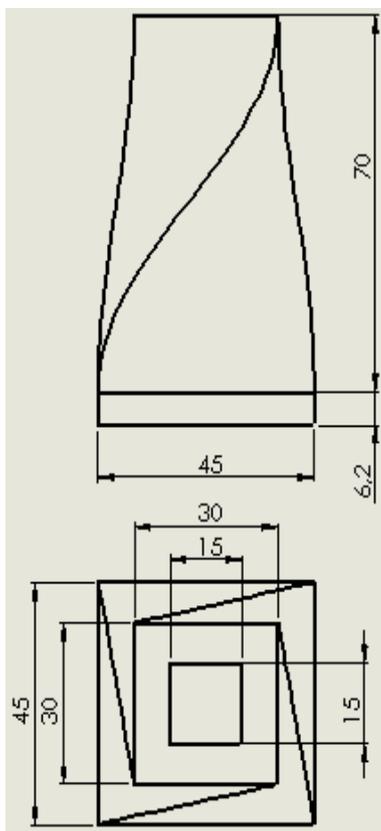


Fig. 4.5.1c: provino L=75mm, parete spessa.

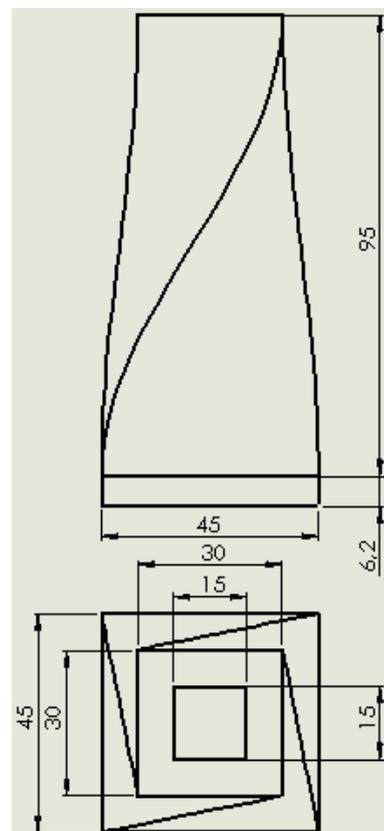


Fig. 4.5.1d: provino L=100mm, parete spessa.

Anche in questo caso il taglio è stato effettuato ad una distanza di 1.2mm dalla piattaforma.

Per le rilevazioni della rugosità si è seguita la stessa procedura descritta in precedenza; questa volta si è però tenuto conto della posizione in macchina dei provini, in modo da poter eseguire tutte le misurazioni nella stessa identica zona per ognuno di essi, senza rischiare di avere uno sfasamento di 180°.

Il calcolo del peso dei provini a seguito del taglio ha restituito i seguenti valori:

- L=75mm, parete sottile: 59g
- L=100mm, parete sottile: 73g
- L=75mm, parete spessa: 172g
- L=100mm, parete spessa: 232g

Avendo impostato il pulse off al livello costante di 8 μ s, come consigliato dal produttore della macchina per il nostro materiale ed uno spessore del provino di 45mm, si è ottenuta, nella zona in cui il filo era a contatto con il componente per soli 30mm, una rugosità visibilmente maggiore, figura 4.5.2.

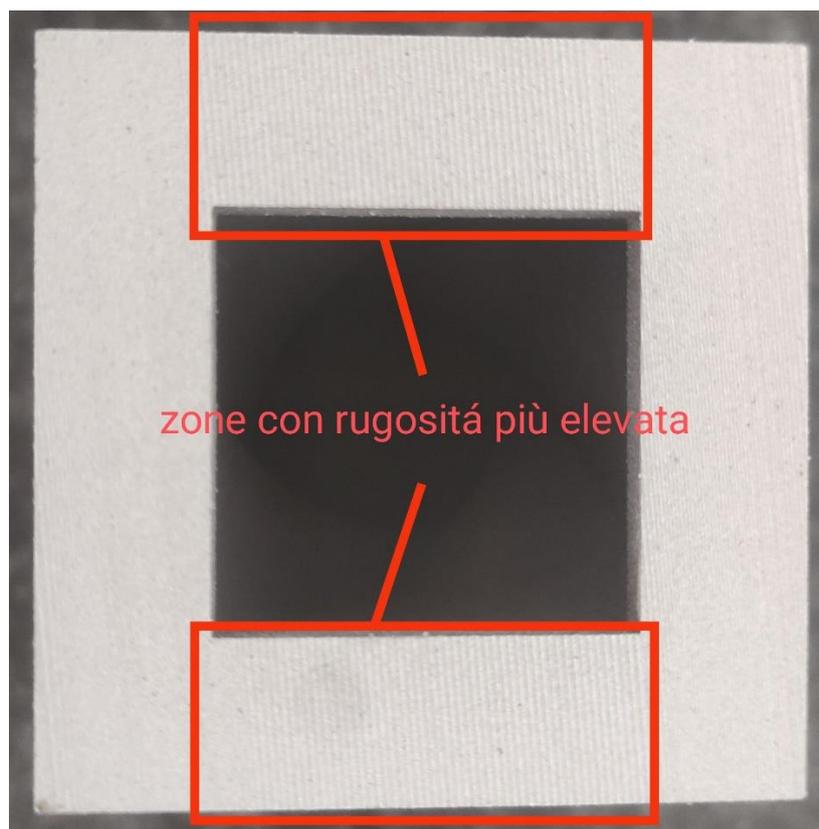


Fig. 4.5.2: Sezione di taglio con evidenziate zone a rugosità differente.

Per questo motivo le rilevazioni ortogonali sono state effettuate lateralmente, in zone non interessate da questa differenza, seguendo lo schema di figura 4.5.3, dove le linee rosse rappresentano le misurazioni parallele al filo durante il taglio, quelle gialle le misurazioni ortogonali e le azzurre le rilevazioni diagonali.

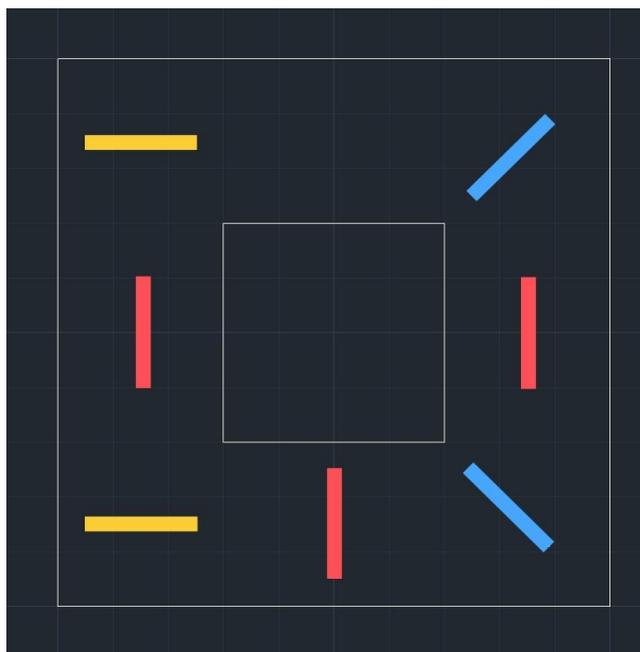


Fig. 4.5.3: Dettaglio delle rilevazioni effettuate.

Vengono di seguito riportati in tabella 4.5.1 i risultati in termini di Ra ed Rz ottenuti dalle prove effettuate.

misurazione	100mm spessa		75mm sottile		75mm spessa		100mm sottile	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
parallelo centro	4,247	26,021	4,835	27,402	4,544	25,866	3,533	21,616
parallelo dx	3,95	26,302	4,962	25,696	4,374	26,706	3,981	25,916
parallelo sx	4,317	23,192	3,98	22,671	4,503	26,326	3,909	24,428
ortogonale dx	5,577	29,355	9,667	44,019	10,288	49,563	7,294	38,331
ortogonale sx	5,419	29,724	8,923	41,993	9,752	46,625	6,543	33,298
diagonale /	4,69	27,132	8,675	42,669	10,99	50,102	7,195	21,153
diagonale \	5,193	31,188	8,515	42,322	10,093	46,259	7,466	36,905
media	4,770429	27,55914	7,079571	35,25314	7,792	38,77814	5,703	28,80671
dev. st.	0,633629	2,716646	2,374462	9,473818	3,126318	11,75865	1,801098	7,237414

Tab. 4.5.1: Risultati rilevazioni rugosità superficiale.

Per prima cosa, analizzando il grafico con indicati i risultati di tutte e ventotto le prove (figura 4.5.4), si vede subito come per ognuno dei campioni si abbia uno scostamento evidente dei risultati delle misurazioni parallele rispetto alle altre; questo trova spiegazione guardando la superficie di taglio e confrontandola con la posizione delle rilevazioni indicate in precedenza, dove appare evidente ad occhio nudo che la rugosità, se misurata parallelamente alla direzione di taglio del filo, risulta inferiore rispetto alle direzioni ortogonale o diagonale.

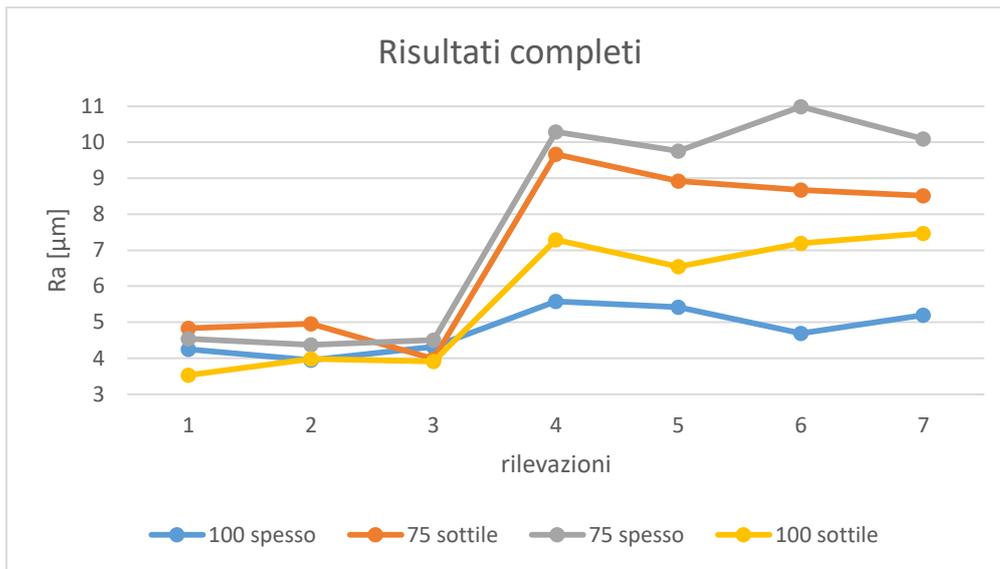


Fig. 4.5.4: Grafico risultati completi ottenuti dalle misurazioni.

Come per l'esperimento precedente può essere utile effettuare un'analisi preliminare sui grafici ottenuti mantenendo costante, ad ogni suo livello, un fattore e facendo variare l'altro sui due livelli disponibili.

Analizzando i risultati ottenuti a parità di lunghezza considerando i due diversi spessori della parete, figura 4.5.6, si vede come, mentre nel caso di lunghezza a sbalzo di 100mm si hanno valori di rugosità tendenzialmente migliori nel caso di parete spessa e quindi peso maggiore, per la lunghezza di 75mm si ottiene il risultato contrario e cioè una finitura quasi sempre migliore nel caso di parete sottile e quindi peso ridotto.

Questi risultati non trovano un'immediata spiegazione logica e necessitano di un'analisi più approfondita in cui le due variabili di lunghezza e peso dei campioni vengano valutate contemporaneamente, anche con elementi statistici, per poter comprendere meglio l'importanza dei singoli fattori ed un'eventuale influenza dell'interazione tra essi. Si può però notare come gli scostamenti massimi sono, nel caso di pari lunghezza, al massimo, di poco superiori ai 2μm; mentre a parità di spessore della parete, figura 4.5.7, si arriva ad uno scostamento massimo di quasi 6μm; ciò lascia pensare che la lunghezza di sbalzo influisca più del peso.

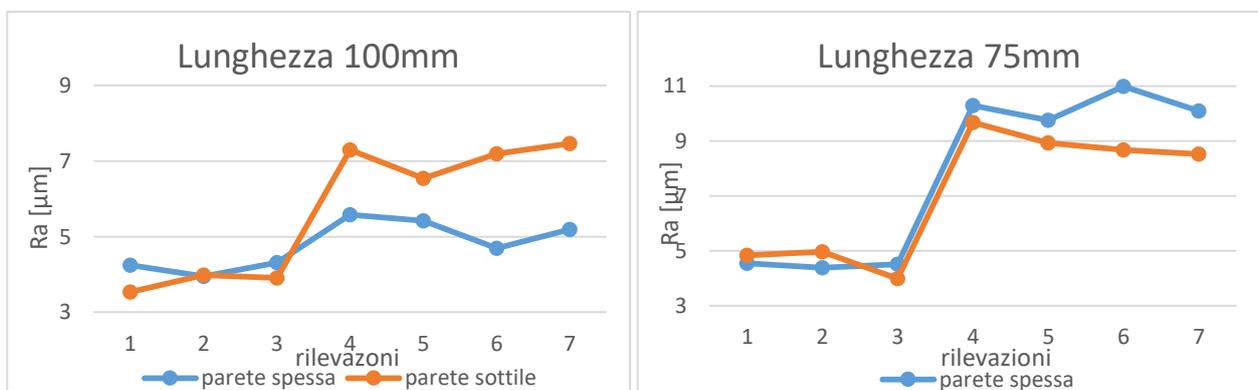


Fig. 4.5.6: Valori di Ra a parità di lunghezza variando spessore parete.

Guardando invece i grafici ottenuti considerando le due diverse lunghezze a parità di spessore delle pareti si nota come, in entrambi i casi, si ottengono sempre valori di rugosità migliori nel caso di lunghezza a sbalzo dei provini (e quindi peso) più elevata; questo risultato è in contraddizione con quanto si pensava di ottenere dalla prova sperimentale e può essere spiegato in prima ipotesi con il fatto che, durante il taglio, un peso maggiore tende a staccare maggiormente il provino ampliando il gap e rendendo minore l'intensità della scintilla (e quindi la quantità di materiale asportato noto che un MRR più basso comporta una rugosità migliore).

Tale ipotesi è avvalorata dal fatto che lo scostamento dei valori è molto meno marcato per le prime tre misurazioni, cioè quelle effettuate parallelamente alla direzione di taglio, piuttosto che nelle altre; questo perché le misurazioni parallele risentono ovviamente meno di questa variabile. Inoltre tale scostamento è maggiormente visibile nel caso di parete spessa, dove la differenza di peso tra i due provini lungo e corto a parità di sezione è molto maggiore.

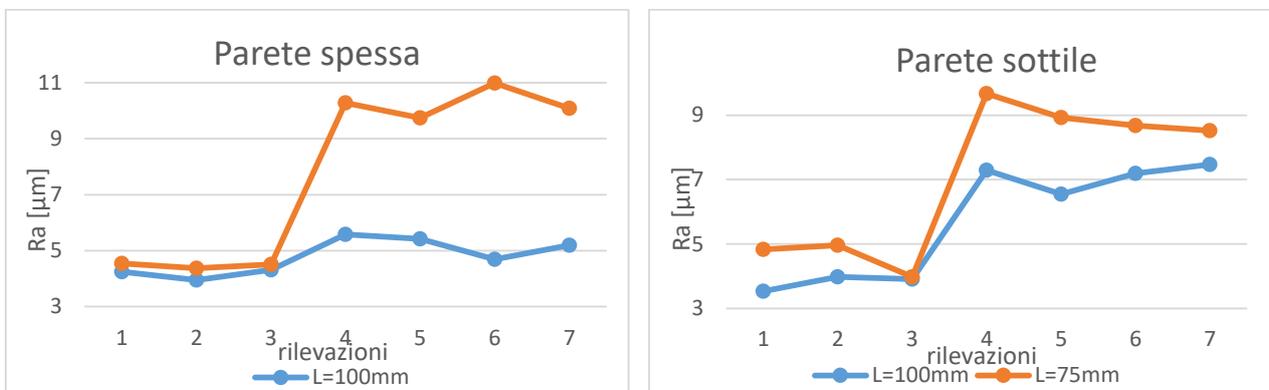


Fig. 4.5.6: Valori di Ra a parità di spessore parete variando lunghezza.

Fatte queste considerazioni grafiche si è proceduto con un test ANOVA per cercare di determinare precisamente l'influenza dei due fattori di variabilità. Sono stati inserite le informazioni sui fattori presenti in figura 4.5.7, mentre i risultati forniti sono illustrati in figura 4.5.8.

Factor Information

Factor	Levels Values
lunghezza	2 75; 100
parete	2 sottile; spessa

Fig. 4.5.7: Fattori e livelli considerati.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	2	4,84816	2,42408	3,58	0,350
Linear	2	4,84816	2,42408	3,58	0,350
lunghezza	1	4,83604	4,83604	7,15	0,228
parete	1	0,01212	0,01212	0,02	0,915
Error	1	0,67651	0,67651		
Total	3	5,52467			

Fig. 4.5.8: Risultati ANOVA Ra medio.

Dall'analisi dei valori di p-value ottenuti si capisce subito che le prove effettuate non bastano per dare un giudizio definitivo al livello di fiducia considerato del 95%; ciò risulta evidente anche guardando il diagramma di Pareto mostrato in figura 4.5.9, dove si vede che nessuno dei fattori raggiunge la linea rossa che lo rende significativo. Si possono comunque ottenere delle informazioni che confermano quanto ipotizzato in precedenza riguardo la maggiore influenza della lunghezza del provino rispetto allo spessore, e quindi intrinsecamente al peso, del provino. Sarà tuttavia

necessario confermare quanto trovato con un'analisi ulteriore che restituisca valori di p-value dei fattori molto inferiori rispetto a quelli attuali.

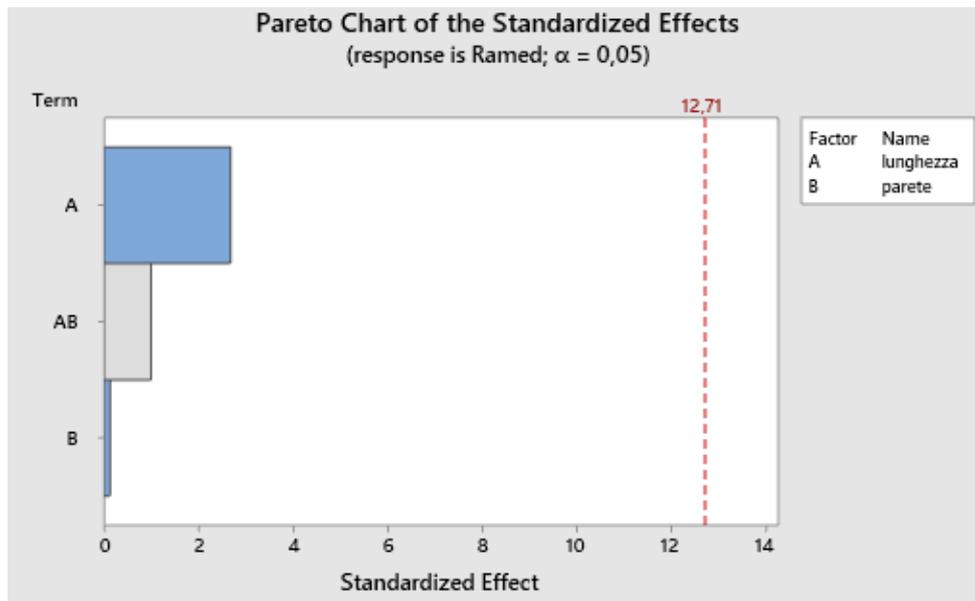


Fig. 4.5.9: Diagramma di Pareto.

Un'altra intuizione che sembra trovare conferma è la considerevole importanza assunta dall'interazione di primo livello dei due fattori, la quale risulta addirittura più determinante sulla finitura rispetto al peso. Osservando il diagramma delle interazioni, figura 4.5.10, è infatti evidente l'intersezione tra le due linee dei fattori.

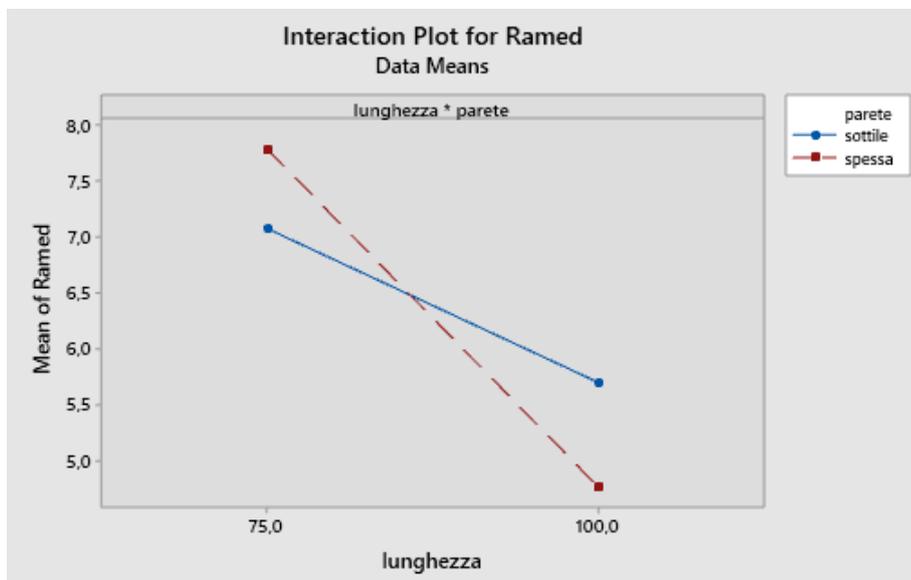


Fig. 4.5.10: Diagramma delle interazioni.

I risultati mostrati nel caso di analisi dell'R_a medio di tutte le prove effettuate hanno trovato riscontro anche analizzando l'R_z, le singole rilevazioni e gruppi divisi rispetto alla direzione di misura. In tutti i casi la lunghezza è risultata più importante dello spessore della parete.

Per ottenere informazioni statisticamente più attendibili riguardo l'influenza sulla rugosità dei due parametri considerati, si è deciso di effettuare nuovamente le misurazioni, andando a ripetere in modo identico e per altre due volte le stesse rilevazioni, così da avere tre ripetizioni totali per ogni zona; in questo modo il software ha a disposizione un set di dati più ampio e l'effetto di errori durante la procedura di misura o punte locali di rugosità dovrebbe essere mitigato.

I valori ottenuti dalla seconda ripetizione delle misure sono mostrati in tabella 4.5.2; quelli derivanti dalla terza ripetizione in tabella 4.5.3.

seconda misurazione	100mm spessa		75mm sottile		75mm spessa		100mm sottile	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
parallelo centro	3,984	21,499	4,306	24,002	4,31	26,89	3,244	20,423
parallelo dx	4,018	22,441	4,352	25,252	4,22	21,594	2,82	16,489
parallelo sx	4,144	20,847	5,188	32,433	4,113	23,248	3,543	20,562
ortogonale dx	5,194	3,328	8,874	41,538	19,576	81,677	3,61	21,228
ortogonale sx	4,502	24,629	9,499	44,25	16,972	65,081	4,126	23,044
diagonale /	5,295	28,271	9,579	48,379	9,932	50,372	3,548	20,65
diagonale \	5,23	27,943	9,719	47,267	10,043	47,848	3,447	21,168
media	4,623857	21,27971	7,359571	37,58871	9,880857	45,24429	3,476857	20,50914

Tab. 4.5.2: Seconda serie di misure.

terza misurazione	100mm spessa		75mm sottile		75mm spessa		100mm sottile	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
parallelo centro	4,057	23,636	4,189	23,559	4,649	26,81	3,807	24,067
parallelo dx	4,147	20,625	4,633	27,817	4,587	23,059	4,214	24,169
parallelo sx	4,799	25,587	4,252	22,77	4,689	28,987	3,803	20,983
ortogonale dx	4,656	24,912	8,083	37,869	20,127	78,122	3,447	20,879
ortogonale sx	4,934	25,062	9,506	47,232	17,477	71,868	4,714	26,348
diagonale /	4,932	27,935	9,52	48,085	10,778	50,622	6,714	33,859
diagonale \	5,333	31,063	8,529	43,068	9,932	46,538	3,774	21,644
media	4,694	25,54571	6,958857	35,77143	10,31986	46,57229	4,353286	24,56414

Tab. 4.5.3: Terza serie di misure.

Analizzando i dati ci si accorge subito come tutte le misurazioni presentino nelle tre differenti ripetizioni valori molto simili (discordanti, se non in un caso, al massimo di $1\mu\text{m}$ per Ra) ad esclusione delle misure ortogonali nel provino con parete sottile e lunghezza 100mm, dove sembra evidente un errore nella prima serie di misure condotta.

Ripetendo l'analisi della varianza con l'aggiunta di questi dati si sono ottenuti i risultati di figura 4.5.11, dai quali è subito evidente che questa volta, con un livello di fiducia del 95%, entrambi i fattori risultano significativi ed è quindi possibile andare ad effettuare considerazioni veritiere sull'effetto che lunghezza e peso del componente hanno sulla finitura. L'interazione dei due fattori,

che sembrava prima essere addirittura più importante del solo peso, non raggiunge invece la soglia di significatività, essendo il suo p-value superiore a 0,05.

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	46,792	15,5973	19,94	0,000
Linear	2	43,752	21,8761	27,96	0,000
parete	1	4,260	4,2600	5,44	0,048
lunghezza	1	39,492	39,4922	50,48	0,000
2-Way Interactions	1	3,040	3,0397	3,89	0,084
parete*lunghezza	1	3,040	3,0397	3,89	0,084
Error	8	6,259	0,7824		
Total	11	53,051			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Ramed} = 19,12 + 4,12 \text{ parete} - 0,1451 \text{ lunghezza} - 0,0403 \text{ parete*lunghezza}$$

Fig. 4.5.11: Test ANOVA e modello regressione.

Guardando il nuovo diagramma di Pareto risultante, figura 4.5.12, è subito evidente come entrambi i fattori considerati risultino superare la linea che demarca la soglia di significatività; si può anche vedere in che misura lo fanno, con un'importanza della lunghezza a sbalzo notevolmente più alta rispetto allo spessore della parete.

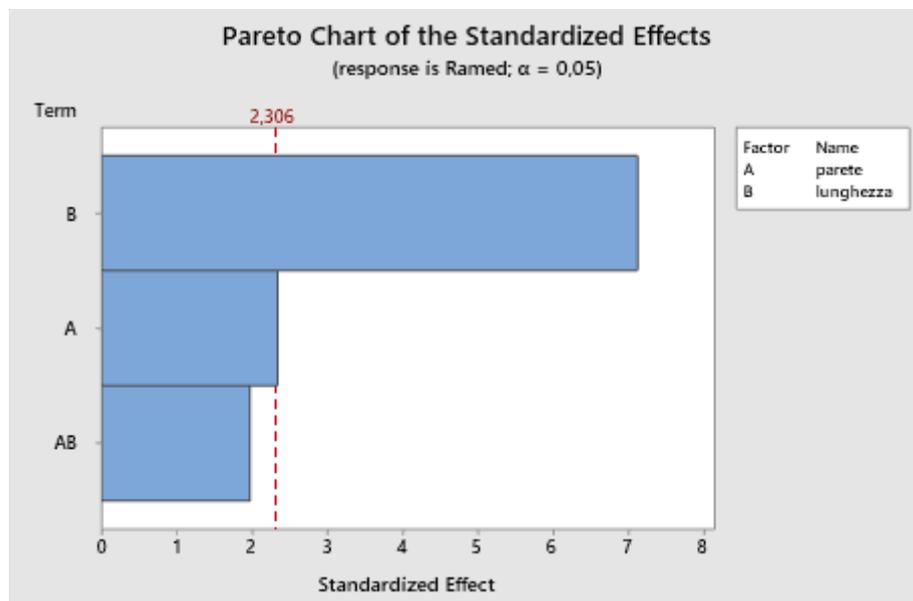


Fig. 4.5.12: diagramma di Pareto Ra medio.

Dal diagramma degli effetti mostrato in figura 4.5.13 è invece possibile stabilire come influiscano i livelli a cui si trovano i fattori. I punti raffigurati nel diagramma rappresentano il valore di rugosità mediamente ottenuto per ogni livello di ognuno dei fattori.

Per quanto riguarda lo spessore della parete si capisce come la rugosità risulti mediamente migliore con spessore, e quindi peso del provino, inferiore; mentre analizzando l'influenza della lunghezza si comprende come una leva maggiore comporti una finitura notevolmente migliore; ciò avvalorava l'ipotesi che il più ampio GAP generato comporta una riduzione del MRR con conseguente abbassamento del valore di Ra.

La maggiore pendenza della retta relativa ai valori ottenuti a parità di lunghezza rispetto a quella che collega i valori medi ottenuti con la costanza dello spessore della parete è ulteriore conferma del fatto che essa sia maggiormente influente.

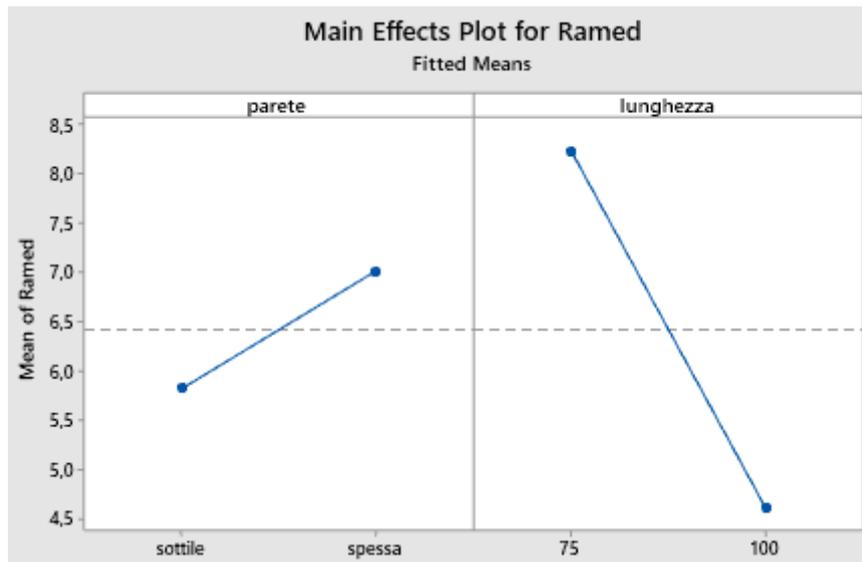


Fig. 4.5.13: Diagramma degli effetti.

Anche in questo caso la stessa analisi è stata svolta identicamente utilizzando come variabile i valori trovati di Rz medio e singolarmente ognuna delle sette misurazioni di Ra; nel primo caso si sono ottenute indicazioni simili sull'influenza dei fattori sulla rugosità, a farla da padrone rimane infatti la lunghezza del provino, seguita dallo spessore, e in ultimo dall'interazione dei due. Va precisato che, come evidente dal diagramma di Pareto di figura 4.5.14, il fattore spessore non raggiunge per pochissimo la soglia di rilevanza; bisogna però dire che, trattando questa misura di rugosità i soli cinque picchi più alti e altrettante valli più profonde, i risultati possono aver subito l'influenza di alcune zone particolari della sezione di taglio, in prossimità della fine del taglio, dove la rugosità aumenta localmente in modo repentino. Anche per quanto riguarda i risultati sulle singole misure di Ra si hanno risultati simili in tutte le zone e per ognuna delle direzioni, i quali tendono a confermare i risultati del valore medio, con alcune eccezioni dove erano già stati individuati singoli valori discordanti.

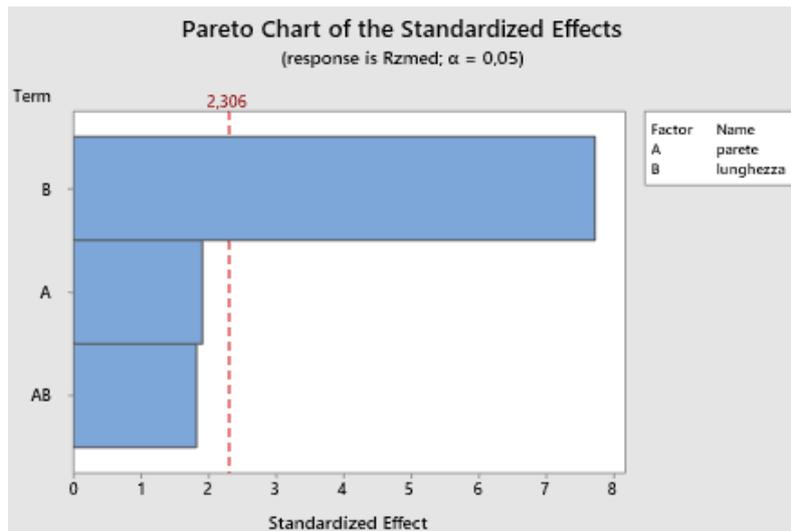


Fig. 4.5.14: Diagramma di Pareto Rz medio.

Ottenuti dei risultati utili a stabilire, con il livello di fiducia desiderato, le informazioni volute sull'influenza dei due fattori considerati sulla finitura superficiale dei componenti soggetti a taglio WEDM, si è deciso di condurre sugli stessi provini una nuova serie di misurazioni con l'obiettivo di trovare riscontro matematico di un fenomeno osservato durante il taglio stesso.

Risultava infatti evidente che con il procedere del filo lungo il suo percorso, il provino tendeva ad aprirsi e piegarsi sempre più evidentemente sotto l'effetto del proprio peso, seguendo un movimento, illustrato in figura 4.5.15, che ricorda quello che compie una pagina di libro presa nel suo angolo alto di sinistra e aperta per tornare alla pagina precedente.

Va specificato che, a differenza di quanto si possa immaginare visto il peso nettamente inferiore, tale distacco è risultato visivamente più evidente nel caso di provini a parete sottile.

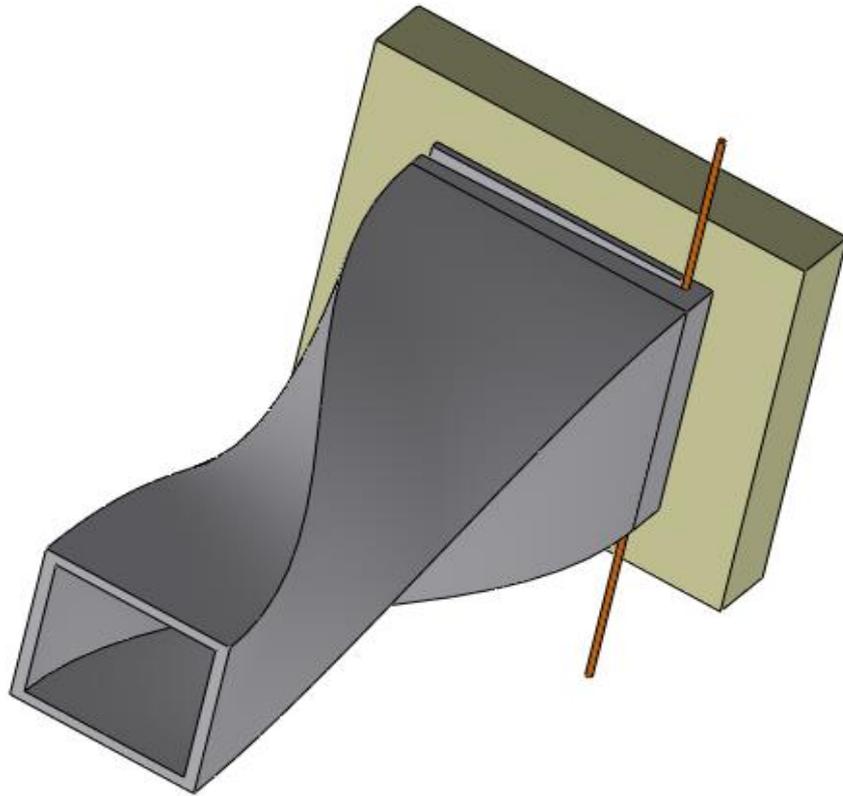


Fig.4.5.15: Movimento dei provini durante il taglio.

Si è deciso di indagare su eventuali effetti causati da questo comportamento sulla rugosità nelle diverse zone della sezione di taglio del provino; a questo scopo si è scelto di effettuare una serie di otto misurazioni, ripetute ciascuna tre volte e tutte ortogonali alla direzione di taglio, in modo che la maggiore rugosità rilevabile in tale direzione potesse rendere più evidenti discordanze del valore medio di Ra tra le varie zone.

In figura 4.5.16 viene mostrato il nuovo schema di rilevazione, con indicata la nomenclatura di ogni rilevazione ed anche la direzione di taglio, rappresentata dalla freccia blu.

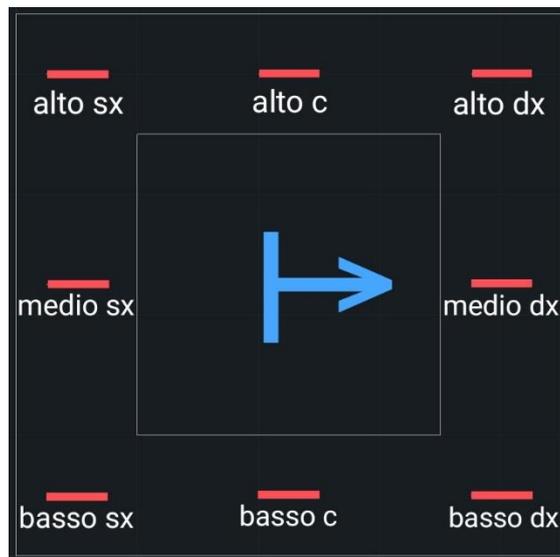


Fig. 4.5.16: Schema di rilevazione.

Visto il successo riscontrato nell'analisi precedentemente descritta, sono state effettuate nuovamente tre ripetizioni per ogni misura, in modo da poter individuare eventuali errori. I risultati ottenuti vengono mostrati in tabella 4.5.4.

misurazione	100mm spessa		75mm sottile		75mm spessa		100mm sottile		100sp	75st	75sp	100st
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz	Ramed	Ramed	Ramed	Ramed
bassosk1	3,97	24,078	9,058	43,083	11,675	49,023	9,182	41,73				
bassosk2	5,289	27,021	9,136	45,296	10,361	45,816	8,642	41,464	4,5437	9,5273	11,256	8,848
bassosk3	4,372	25,891	10,388	49,604	11,733	51,129	8,72	40,203				
bassoc1	6,702	33,389	20,499	80,264	19,63	81,124	12,258	49,658				
bassoc2	6,23	32,688	20,584	81,559	18,903	78,943	10,903	43,123	6,3073	20,045	19,033	11,186
bassoc3	5,99	31,384	19,051	73,969	18,566	73,452	10,397	43,674				
bassodk1	4,543	25,544	9,996	49,866	9,527	47,583	3,275	20,284				
bassodk2	5,065	30,904	9,11	44,512	9,79	46,319	3,506	20,034	4,8527	9,794	9,9843	3,7733
bassodk3	4,95	26,014	10,276	45,542	10,636	50,107	4,539	24,296				
mediosk1	3,804	22,503	9,106	44,833	10,628	48,383	8,763	39,431				
mediosk2	3,945	21,839	8,785	41,686	10,734	49,233	8,371	42,136	3,7357	8,824	10,542	8,27
mediosk3	3,458	20,077	8,581	42,666	10,263	46,265	7,676	38,898				
mediodk1	4,7	25,732	10,131	48,507	10,868	47,809	5,627	27,192				
mediodk2	4,996	25,98	8,542	46,462	11,286	51,002	5,223	29,386	4,609	9,3257	10,731	5,7673
mediodk3	4,131	26,425	9,304	43,613	10,039	47,838	6,452	30,186				
altosk1	4,129	23,035	8,459	41,24	11,164	51,471	6,754	29,937				
altosk2	4,043	25,962	8,904	42,119	10,406	47,396	6,645	34,121	4,1853	8,2493	10,726	6,7557
altosk3	4,384	26,921	7,385	38,218	10,608	50,332	6,868	33,183				
altoc1	5,107	28,822	17,63	73,274	17,866	75,987	6,866	35,091				
altoc2	5,738	30,172	16,342	62,953	17,588	70,436	7,078	35,581	5,2013	17,078	17,368	6,574
altoc3	4,759	26,538	17,262	72,839	16,649	69,23	5,778	30,502				
altodk1	4,418	25,786	8,99	44,596	9,696	47,268	5,736	30,339				
altodk2	4,699	33,664	8,896	44,744	10,318	47,593	6,654	35,374	4,4947	8,929	10,061	6,0863
altodk3	4,367	25,34	8,901	42,087	10,17	45,135	5,869	28,904				
media	4,7412	26,905	11,472	51,814	12,463	54,953	7,1576	34,364				

Tab. 4.5.4: Risultati rilevazioni.

Analizzando inizialmente i valori medi ottenuti si nota subito come nei primi tre provini tagliati risulti sempre una rugosità migliore nella parte alta della sezione rispetto alla parte bassa dello stesso lato.

Si può vedere lo stesso comportamento anche nelle zone sinistra e centrale del provino di lunghezza 100mm e parete sottile; mentre nella parte destra si nota un'unica eccezione alla regola. Ciò può però trovare spiegazione in una variazione procedurale occorsa; infatti per il taglio dell'ultimo provino è stato tolto e riposizionato uno dei morsetti che fissano la piattaforma alle guide, onde evitare che si trovasse lungo la corsa dell'elettrodo. Durante il taglio si è notato, a causa di tale operazione ed in modo sempre più evidente con l'avanzare della lavorazione, un leggero distacco della piattaforma dalla guida che ha portato ad un taglio diagonale e non perfettamente rettilineo. Considerando trascurabile l'ultimo dato perché influenzato da quanto successo, si può passare ad un'analisi più accurata facendo riferimento ai grafici in figura 4.5.17.

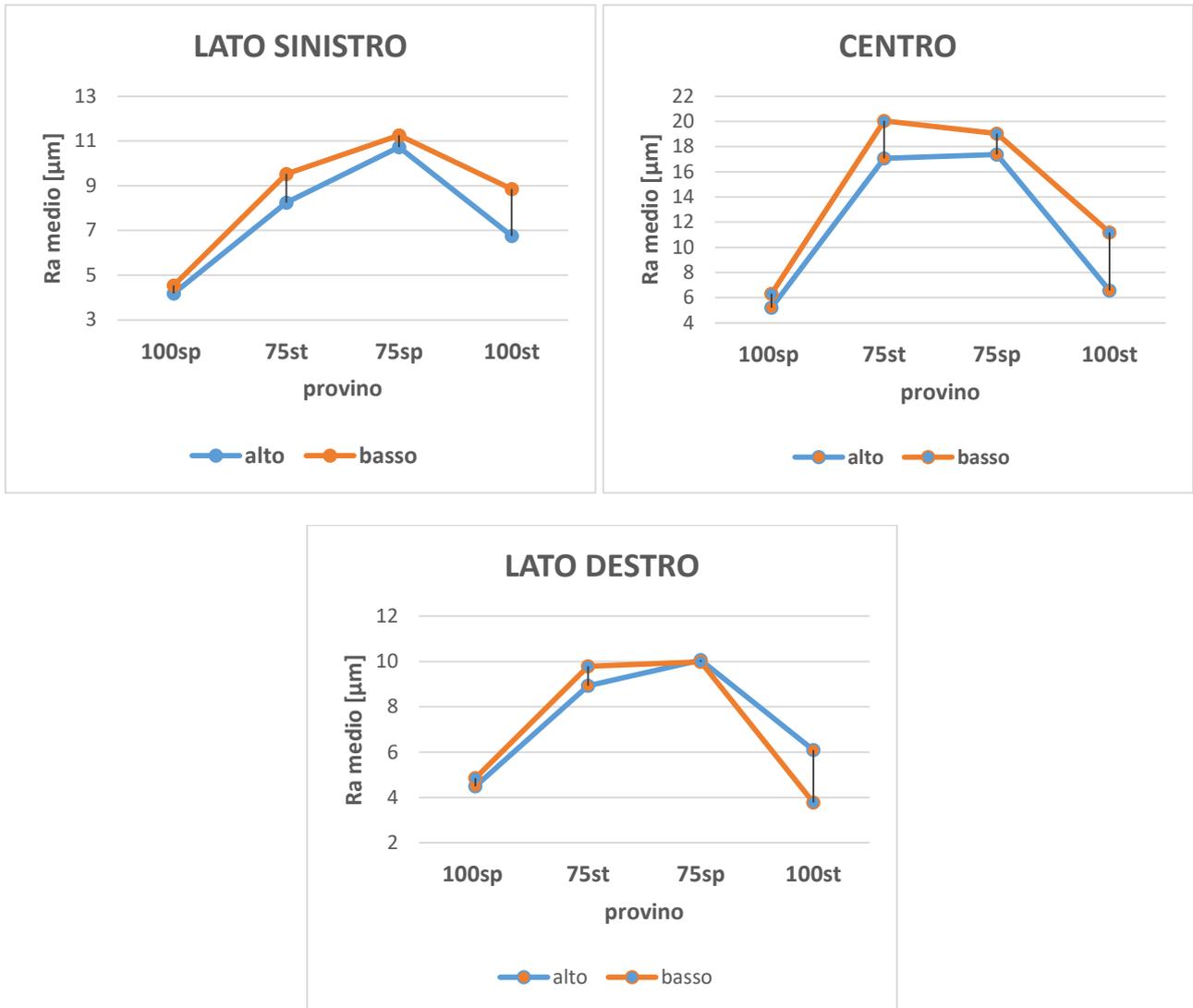


Fig. 4.5.17: Grafici Ra medio zone alta e bassa dei provini.

Il fatto che, ad esclusione dell'eccezione spiegata per cui la fisica dell'operazione nella zona è differente, in ogni altro provino sia sempre migliore la rugosità nella parte alta della sezione di taglio, conferma quanto ipotizzato sul fatto che un aumento del gap migliori la finitura; infatti il peso proprio del componente tende nella parte inferiore della sezione a ridurre il gap rispetto a quello presente nella zona superiore, come mostrato, esagerando l'effetto, in figura 4.5.18.

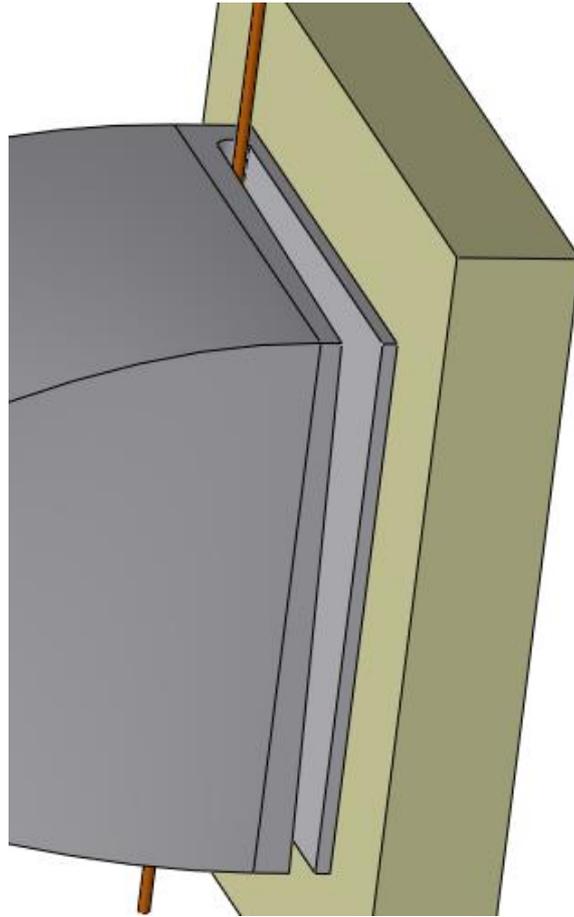


Fig. 4.5.18: Dettaglio differenza di GAP alto-basso.

Guardando poi i primi due grafici, ci si accorge di uno schema ridondante; la differenza nel valore di Ra medio trova infatti scostamenti più ampi per i provini con parete sottile, con un massimo per quello di lunghezza 100mm, e differenze meno evidenti nel caso di parete spessa.

Questo risultato ha a capo il fenomeno già descritto di un distacco maggiormente evidente nel caso di componenti più leggeri.

Il fatto che la maggiore lunghezza, e quindi la leva più ampia, a parità di spessore porti ad un maggiore scostamento conferma ancora l'influenza di un maggiore GAP.

Provando invece a riportare i risultati ottenuti nella parte destra, quindi la prima interessata dal taglio, ed in quella sinistra, non si è trovata alcuna differenza rilevante e comune tra i provini; questo può essere spiegato dal fatto che nella zona interessata momentaneamente dall'erosione, trovandosi essa sempre in prossimità del punto di ancoraggio, non vi sono differenze di gap rilevanti tra i lati dovute alla differente "apertura" del provino, come schematizzato in figura 4.5.19.

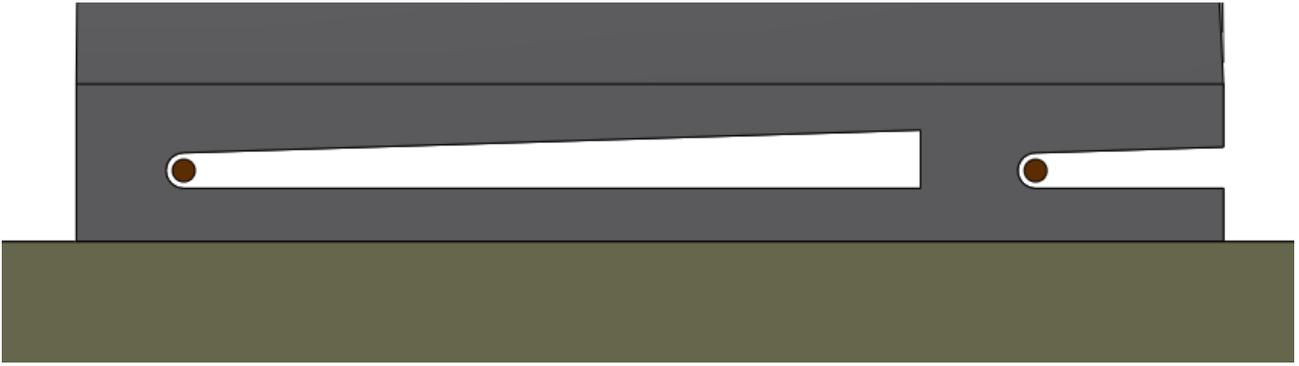


Fig. 4.5.19: Dettaglio lati destro e sinistro.

Conclusioni

Nell'odierno mercato globale la qualità dei prodotti è sempre più una prerogativa fondamentale per rimanere competitivi.

La necessità di ottenere una finitura pregevole per componenti tagliati ha reso l'elettroerosione a filo sempre più diffusa; sebbene l'influenza dei parametri di macchina sia già stata ampiamente trattata dalla letteratura scientifica, pochi sono gli studi relativi alla lavorazione di componenti metallici prodotti con le sempre più diffuse tecniche di fabbricazione additiva e, ancora meno, quelli riguardanti particolari realizzati tramite LPBF.

I componenti così prodotti necessitano infatti di essere separati dalla piattaforma di deposizione; la WEDM risulta essere una delle tecnologie più indicate per eseguire tale operazione garantendo un'ottima precisione ed un'elevata finitura, prerogative indispensabili visti la durata ed il costo di produzione notevoli propri della LPBF. Il presente studio si è posto come obiettivo quello di analizzare la finitura ottenuta su componenti in AlSi10Mg, lega di alluminio tra le più comuni per additive; cercando in primo luogo di confermare, anche per tale materiale, quanto trovato in letteratura riguardo l'influenza dei parametri di taglio e andando poi ad effettuare un'analisi senza precedenti alla ricerca di un'eventuale correlazione tra grado di finitura e parametri fisici del componente da tagliare.

Nel primo esperimento eseguito si è in particolare investigata l'influenza di pulse on e intensità di corrente, facendo variare entrambi su diversi livelli. I risultati ottenuti dalle misurazioni della rugosità hanno ampiamente confermato le informazioni presenti in letteratura secondo le quali una riduzione, entro certi livelli, dell'intensità di corrente o del tempo di scarica garantiscono una migliore finitura superficiale.

Nel secondo piano sperimentale si è invece cercato di trovare una correlazione eventuale tra grado di finitura e due parametri fisici del componente oggetto di lavorazione, cioè la lunghezza a sbalzo dello stesso rispetto alla sezione di taglio ed il peso, rappresentato intrinsecamente nel piano sperimentale con due differenti spessori di parete. I valori inizialmente ottenuti non hanno permesso di giungere a risultati chiari, soprattutto a causa dei soli due livelli utilizzati per ciascuna delle variabili; la triplice ripetizione delle misure di rugosità ha permesso però di ottenere delle informazioni su entrambi i fattori; si è infatti determinato che la lunghezza a sbalzo risulta molto più influente del peso, con finitura migliore nei casi di una leva più lunga e di una massa minore.

Questo risultato permette di giungere ad una conclusione importante per quanto riguarda la ricerca di una finitura sempre migliore; il fatto che una maggiore lunghezza a sbalzo del provino garantisce una minore rugosità superficiale, permettere di stabilire che, durante la separazione di un componente prodotto con LPBF dalla piattaforma di deposizione tramite WEDM, la forza di gravità agente sul particolare ha un effetto positivo, e non è dunque conveniente cercare di contrastarla.

Si è infine cercato di stabilire, eseguendo una nuova serie di misurazioni sugli stessi provini, un eventuale legame tra la differente rugosità riscontrata e le diverse zone della sezione di taglio; anche in questo caso, seppur senza nessuna conferma statistica, sono state tratte alcune conclusioni, le

quali sembrano trovare una spiegazione logica nella fisica del processo; si è infatti riscontrata la presenza di una migliore finitura in presenza di un maggiore gap di scarica, fatto questo in accordo con la teoria del processo.

Bibliografia

- [1]. <https://www.researchgate.net/figure/Examples-of.parts-with-complex-features-and-channels-produced-by-EDM-machining-1-7-281114059/amp>
- [2]. <https://www.ctemag.com/news/industry-news/study-adoption-cost-effective-wire-edms-gain-momentum>
- [3]. <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-electrical-discharge-machine-edm-market>
- [4]. Materiale didattico UNIPI: "L'EDM il processo" http://www.dimnp.unipi.it/dini-g/index_file/PPI1%20-%20Electro%20%Discharge%Machining_Introduzione.pdf
- [5]. "The phases of an electrical discharge in EDM (Konig & Klocke, 1997)".
- [6]. "GRIMALDI FORTUNATO, 1995, EDM macchine e sistemi per elettroerosione, Melzo(MI), Tecniche Nuove".
- [7]. "CALIGNANO F., Materiale didattico del corso "Sistemi integrati di produzione". Politecnico di Torino, Anno Accademico 2020/2021".
- [8]. <https://www.incisionizanelli.it/elettrodi.php>
- [9]. <https://www.meccanicanews.com/2016/09/20/grafite-per-elettroerosione-come-alternativa-al-rame/>
- [10]. KUNIEDA M., LAUWERS B., RAJURKAR K.P., SCHUMACHER B.M., 2005, "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 54, pp.64-87.
- [11]. JAMWAL, AGGARWAL, GAUTAM, DEVARAPPALI "Electro-discharge Machining: Recent Developments and trends" ResearchGate, (2018)
- [12]. QUDEIRI, JABER E. ABU, AIMAN ZAIOUT, ABDEL-HAMID I. MOURAD, MUSTUFA HAIDER ABIDI, and AHMED ELKASEER. "Principles and Characteristics of Different EDM Processes in Machining Tool and Die Steels." *Applied Sciences* 10.6 (2020): 2082.
- [13]. NAHAK, BINAYAKA, and ANKUR GUPTA. "A Review on Optimization of Machining Performances and Recent Developments in Electro Discharge Machining." *Manufacturing Review (Ulis, France)* 6 (2019): 2.
- [14]. MOHD ABBAS, NORLIANA, DARIUS G SOLOMON, and MD FUAD BAHARI. "A Review on Current Research Trends in Electrical Discharge Machining (EDM)." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47.7 (2007): 1214-228.
- [15]. SABYROV, NURBOL, M P JAHAN, AZAT BILAL, and ASMA PERVEEN. "Ultrasonic Vibration Assisted Electro-Discharge Machining (EDM)-An Overview." *Materials* 12.3 (2019): 522.
- [16]. WÜTHRICH, R., and V. FASCIO. "Machining of Non-conducting Materials Using Electrochemical Discharge Phenomenon—an Overview." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45.9 (2005): 1095-108.
- [17]. <https://www.materflow.com/en/slm-selective-laser-melting-2/>
- [18]. <https://www.idtechex.com/de/research-report/3d-printing-of-metals-2015-2025/441>
- [19]. <https://www.replicatore.it/68420/amp/>

- [20]. NGUYEN, DINH-SON, HONG-SEOK PARK, and CHANG-MYUNG LEE. "Applying Selective Laser Melting to Join Al and Fe: An Investigation of Dissimilar Materials." *Applied Sciences* 9.15 (2019): 3031.A
- [21]. MOHAMMAD SHAMASUZZOHA, LAURENTIU NASTAC, ANWARUL HAQUE, "Development of High-Strength and Highly Ductile Hypo-Eutectic Al-Si alloys by nano-Refining the Constituent Phases" *Light Metals 2014*, Edited by: John Grandfield, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 365-357 (2014).
- [22]. TREVISAN, FRANCESCO, FLAVIANA CALIGNANO, MASSIMO LORUSSO, JUKKA PAKKANEN, ALBERTA AVERSA, ELISA PAOLA AMBROSIO, MARIANGELA LOMBARDI, PAOLO FINO, and DIEGO MANFREDI. "On the Selective Laser Melting (SLM) of the AlSi10Mg Alloy: Process, Microstructure, and Mechanical Properties." *Materials* 10.1 (2017): 76.
- [23]. Material Data Sheet EOS Aluminium AlSi10Mg for EOSINT M270.
- [24]. FRANCIZYK, EMILIA, MAGDALENA MACHNO, and WOJCIECH ZĘBALA. "Investigation and Optimization of the SLM and WEDM Processes' Parameters for the AlSi10Mg-Sintered Part." *Materials* 14.2 (2021): 410.
- [25]. MOHAMED, M. FAKKIR, and K. LENIN. "Optimization of Wire EDM Process Parameters Using Taguchi Technique." *Materials Today : Proceedings* 21 (2020): 527-30.
- [26]. BOBBILI, RAVINDRANADH, V. MADHU, and A.K GOGIA. "Multi Response Optimization of Wire-EDM Process Parameters of Ballistic Grade Aluminium Alloy." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18.4 (2015): 720-26.
- [27]. WASIF, MUHAMMAD, YASIR AHMED KHAN, ALI ZULQARNAIN, and SYED AMIR IQBAL. "Analysis and Optimization of Wire Electro-Discharge Machining Process Parameters for the Efficient Cutting of Aluminium 5454 Alloy." *Alexandria Engineering Journal* 61.8 (2022): 6191-203
- [28]. SOUNDARARAJAN, R., A. RAMESH, N. MOHANRAJ, and N. PARTHASARATHI. "An Investigation of Material Removal Rate and Surface Roughness of Squeeze Casted A413 Alloy on WEDM by Multi Response Optimization Using RSM." *Journal of Alloys and Compounds* 685 (2016): 533-45.
- [29]. HERALGE, SANJAY, UMASHANKER GUPTA, and JAMIL DABIR. "Multi-Criteria Optimization of Aerospace Alloys in WEDM Using TOPSIS." *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering* 998.1 (2020): 12044.
- [30]. SRIDHAR REDDY, B., A.B KOTESWARA RAO, and G. RANGA JANARDHANA. "Multi-objective Optimization of Surface Roughness, Recast Layer Thickness and Surface Crack Density in WEDM of Al2124/SiCp Using Desirability Approach." *Materials Today : Proceedings* 39 (2021): 1320-326.
- [31]. SELVAKUMAR, G., G. SORNALATHA, S. SARKAR, and S. MITRA. "Experimental Investigation and Multi-objective Optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) of 5083 Aluminium Alloy." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 24.2 (2014): 373-79.
- [32]. BALAJI, N., M. AVINASH, S. ABINASH, and A.D. AKSHITH. "Experimental Investigation of AA8011 Metal Matrix Composite Using Grey Relational Analysis by WEDM." *Materials Today : Proceedings* (2021): Materials Today : Proceedings, 2021-02.

- [33]. VELMURUGAN, N., A. MUNIAPPAN, K.L. HARIKRISHNA, and T.G. SAKTHIVEL. "Surface Roughness Modelling in Wire EDM Machining Aluminium of Al6061 Composite by ANFIS." *Materials Today : Proceedings* (2021): Materials Today : Proceedings, 2021-07.