POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

EFFETTO DEI PARAMETRI DI TAGLIO DELL'ELETTROEROSIONE A FILO SU COMPONENTI REALIZZATI CON TECNOLOGIE ADDITIVE

Relatrice:
Prof.ssa Flaviana Calignano

Correlatrici:
Ing. Manuela Galati
Prof.ssa Eleonora Atzeni

Candidato:
Paolo Antonioni

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

Introduzione 4

1 Elettroerosione a filo 5

1.2 Il processo 10

1.3 Struttura macchina WEDM 15

1.3.1 Struttura Meccanica 15

1.3.2 Controllo Numerico Computerizzato (CNC) 16

1.3.3 Generatori di scarica 18

1.3.4 Fluido dielettrico e Sistema di gestione 19

1.3.5 Sistema del filo 19

1.4 Parametri di processo 21

1.4.1 Parametri Elettrici 21

1.4.2 Parametri non elettrici 22

1.4.3 Indici di Performance 23

1.5 Review dei parametri di processo 26

1.5.1 Effetti su MRR e SR 26

1.5.2 Effetti su KW 28

1.5.3 Effetti su TWR e rottura elettrodo 29

1.5.4 Interazioni e proprietà dei materiali 30

1.5.5 WEDM e Additive Manufacturing 31

2 Processo Sperimentale 32

2.1 Materiali ed attrezzature 32

2.1.1 Materiale e descrizione del provino 32

2.1.2 WEDM 33

2.1.3 Sistemi di AM per la produzione dei campioni 35

2.1.4 Sistemi e procedura utilizzati per la misura 37

2.2 Esperimenti preliminari 39

2.3 Design of Experiment (DoE) 44

2.5 Realizzazione degli esperimenti 48

3 Analisi Statistica 49

3.1 Procedura ed Elementi di Statistica descrittiva ed inferenziale 49

3.1.1 Analisi preliminare dei dati sperimentali 49

3.1.2 Principi di Esclusione 50

3.1.3 Verifica di normalità 52

3.1.4 Test d'ipotesi 53

3.1.5 Analisi della Varianza 54

3.1.6 La Regressione 56
3.2 Analisi dei dati della rugosità superficiale (Ra) per il processo di L-PBF 58
3.2.1 Distribuzione dei dati sperimentali 59
3.2.2 Effetto Corrente 62
3.2.3 Effetto Ton 64
3.2.4 Effetto Toff 67
3.2.5 Effetto Spessore 69
3.2.6 Modello di Regressione 71
3.2.7 Effetti dei Parametri di Processo 75
3.3 Analisi dei dati della velocità di taglio (Vt) per il processo di L-PBF 76
3.3.1 Distribuzione dei dati sperimentali 76
3.3.2 Effetto della Corrente 79
3.3.3 Effetto Ton 82
3.3.4 Effetto Toff 84
3.3.5 Effetto Spessore 86
3.3.6 Modello di Regressione 88
3.3.7 Effetto dei parametri di processo 90
3.4 Analisi dei dati della rugosità superficiale (Ra) per il processo di EBM 91
3.4.1 Distribuzione dei dati sperimentali per il processo di EBM 91
3.4.2 Effetto Corrente 94
3.4.3 Effetto Ton 96
3.4.4 Effetto Toff 99
3.4.5 Effetto Spessore 101
3.4.6 Modello di Regressione 103
3.4.7 Effetto dei parametri di processo 105
3.5 Analisi dei dati della velocità di taglio (Vt) per il processo di EBM 106
3.5.1 Distribuzione dei dati sperimentali 106
3.5.2 Effetto della Corrente 109
3.5.3 Effetto Ton 111
3.5.4 Effetto Toff 113
3.5.5 Effetto Spessore 115
3.5.6 Modello di Regressione 117
3.5.7 Effetto dei Parametri di processo 119
3.6 Confronto tra L-PBF e EBM 120

4 Conclusioni 123

Bibliografia 125

Introduzione

Le tecniche di Additive Manufacturing (AM) per il metallo hanno rivoluzionato le metodologie di progettazione e di produzione dei componenti finiti, offrendo infatti la possibilità di produrre componenti altamente performanti e con minori vincoli geometrici rispetto ai processi di produzione tradizionali. La realizzazione dei componenti parte da polveri metalliche che vengono fuse selettivamente da una fonte energetica che differisce a seconda del processo utilizzato. Le tecnologie più diffuse, come Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) ed Electron Beam Melting (EBM) utilizzano rispettivamente un raggio laser e un fascio di elettroni. Dal momento che durante la costruzione si può verificare il distacco o il movimento del componente, per evitarlo è possibile che esso venga costruito direttamente a partire dalla piattaforma di costruzione oppure può essere ancorato ad essa mediante l'uso di supporti. Finita la lavorazione risulta necessario separare componente e piattaforma, tale separazione avviene tipicamente mediante il processo di elettroerosione a filo (WEDM) poiché introduce delle tensioni residue minori rispetto ai processi convenzionali. L'obiettivo del seguente elaborato è quindi quello di studiare l'interazione tra le tecnologie di Additive Manufacturing (AM) e il processo di elettroerosione a filo (WEDM). Nello specifico si vuole determinare quali siano gli effetti dei parametri di processo sulla rugosità superficiale e la produttività dei tagli eseguiti tramite elettroerosione a filo su provini realizzati in lega di Titanio Ti-6Al-4V tramite le tecniche di L-PBF ed EBM.

La struttura del lavoro è la seguente:

Nella prima parte dell'elaborato, dopo una breve panoramica generale riguardo all'evoluzione del processo di elettroerosione a filo e la struttura generale delle macchine, si presenterà il processo di rimozione del materiale per mezzo di scariche elettriche e dei fenomeni fisici coinvolti. Si presenteranno anche i principali parametri di processo per la lavorazione e i loro effetti, rinvenuti in letteratura da precedenti indagini, per componenti prodotti tramite processi convenzionali e tecnologie additive.

Nella seconda parte verrà esposta la procedura sperimentale. Si presenteranno quindi la metodologia di realizzazione del piano sperimentale e tutta la strumentazione utilizzata nella realizzazione dei provini, degli esperimenti e delle misurazioni delle grandezze di interesse.

Successivamente si riporterà la procedura di analisi statistica dei dati, dalla quale è stato possibile determinare l'effetto di ogni singolo parametro di processo sulla lavorazione e determinare un modello di Regressione dei dati sperimentali per entrambi i processi additivi. Alla fine di questa parte è stata analizzata l'influenza della tecnologia produttiva del provino sui risultati del processo di elettroerosione a filo.

In ultimo, si riportano le conclusioni sulle indagini sperimentali effettuate e gli eventuali sviluppi futuri.

1 Elettroerosione a filo

Il processo di elettroerosione a filo, anche detto WEDM dall'inglese *Wire Elctrical Discharge Machining*, è un processo elettro-termico. Si sfrutta la corrente elettrica che scorre tra pezzo in lavorazione e l'elettrodo utensile, un filo in tensione e movimentato tramite degli appositi sistemi, sottoforma di scarica elettrica per generare calore e quindi vaporizzare e rimuovere materiale dal pezzo in lavorazione. Dal momento che si sfrutta la corrente elettrica, questo processo si utilizza su materiali elettricamente conduttivi. Una grande differenza rispetto alle lavorazioni convenzionali è che non è presente un contatto fisico tra l'elettrodo e il componente lavorato ma anzi va evitato per permettere il proseguo della lavorazione. Si eliminano quindi le forze dovute al contatto tra utensile e pezzo, ciò risulta molto vantaggioso nell'ottica di processare materiali difficilmente lavorabili per via tradizionale, purché siano conduttori. Il processo risulta perciò molto interessante nell'ottica di ridurre le tensioni dovute alle lavorazioni. La rimozione del materiale, quindi la formazione della scarica elettrica, è garantita dalla distanza tra elettrodo e pezzo, nota come *sparking gap* o semplicemente *gap*. In realtà, per poter operare con il seguente processo è necessario l'utilizzo di un fluido dielettrico, che fluisce tra elettrodo e pezzo in lavorazione. Il fluido dielettrico, in questo caso si tratta di acqua deionizzata, si comporta come un isolante elettrico ma quando gli si applica un opportuno valore di tensione, diventa un conduttore e permette la formazione delle scariche elettriche. Variando i valori di tensione, è possibile ottenere intervalli di tempo in cui sono presenti scariche elettriche, quindi si erode materiale da pezzo in lavorazione, e altri in cui sono assenti in maniera tale da poter far defluire i detriti prodotti dalla lavorazione e mantenere pulito il *gap*. Il fluido viene apportato nella zona di lavoro tramite degli ugelli, in alcuni casi, oltre agli ugelli, la lavorazione avviene con immersione del pezzo nel dielettrico. In Figura 1 è riportato uno schema del processo.

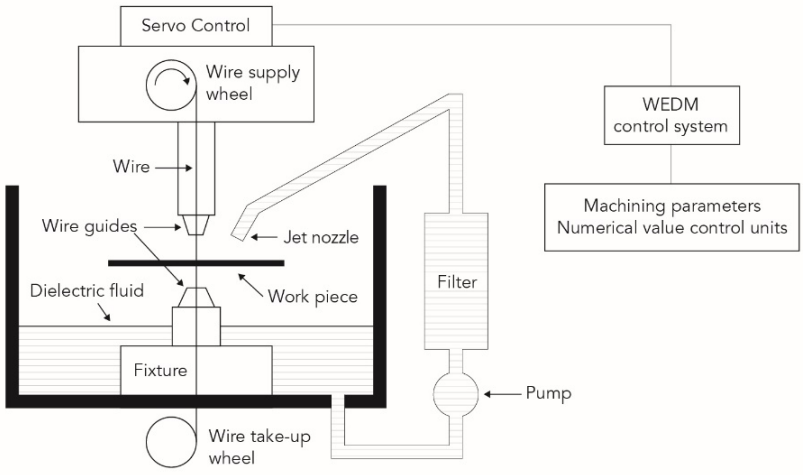

Figura 1 - Schema del processo di elettroerosione a filo WEDM

Quanto detto rappresenta solo una definizione semplificata e generale del processo di elettroerosione, si farà nel seguito di questo capitolo un'analisi più accurata del processo e dei fenomeni fisici coinvolti. Oltre ad essere utilizzato come processo per la realizzazione di componenti partendo da grezzi, il processo viene utilizzato anche in ambito dell'Additive Manufacturing sia per effettuare alcune particolari operazioni di finitura sia per distaccare i componenti dalla piattaforma dopo la costruzione, tagliando quindi eventuali supporti o direttamente il materiale a seconda della metodologia di costruzione del pezzo seguita.

1.1 Breve storia del processo

Il potere erosivo delle scariche elettriche è noto da molto tempo, come testimoniano alcuni scritti di Joseph Priestley databili attorno al 1775. Egli era interessato dallo strano comportamento che presentavano le scariche elettriche quando andavano a colpire una superficie metallica. Le scariche andavano ad erodere il materiale creando una forma circolare ad anello attorno ad un cratere centrale. Paisley notò anche che la profondità e la quantità di materiale erosa dipendeva dal materiale su cui si scaricava la corrente elettrica, notò ad esempio che i crateri prodotti dalle scariche erano più grandi sulle lamine d'oro piuttosto che d'argento [1].
Sebbene fosse noto l'effetto delle scariche elettriche su un materiale metallico e gli archi elettrici trovarono alcune applicazioni a livello industriale, per avere lo sviluppo di un vero e proprio processo di elettroerosione si dovette attendere fino agli inizi della Seconda Guerra Mondiale. Durante tale periodo il Tungsteno era ampiamente utilizzato all'interno dei contatti elettrici dei motori in ambito automobilistico e quindi militare. Si notò che tali contatti sottoposti alle scintille erano soggetti ad un fenomeno erosivo simile al pitting e quindi, per garantire il funzionamento dei mezzi bellici, era necessario un'attenta manutenzione. Ciò però limitava la disponibilità di mezzi oltre che comportare un elevato consumo di Tungsteno per la sostituzione dei contatti. Per questo motivo, il governo sovietico finanziò due scienziati: Dr. Boris Lazarenko e Dr. Natalya Lazarenko affinché trovassero un metodo per minimizzare l'usura dei componenti [2]. Sebbene fallirono nel loro compito, i due trovarono che immergendo i contatti in olio o in un dielettrico non si andava ad eliminare la presenza delle scintille ma si poteva avere una formazione di scariche e un'erosione puntualmente più uniforme e controllabile rispetto al caso in aria. I due scienziati osservarono inoltre una disuniformità erosiva su due contatti elettrici: il contatto positivo risultava fortemente eroso e tendeva a ricopiare la forma del contatto elettrico negativo, che invece presentava livelli di erosione ridotti.
Questo risultato ha portato all'idea di poter mettere a punto un processo di rimozione del materiale tramite l'erosione controllata causata dalle scariche elettriche.
Fu così che nel 1943, i due scienziati comunicarono all'interno della loro tesi intitolata: "Inversion of the Erosion of metals and measures against contact devastation" [3] di poter invertire l'effetto erosivo presente sui contatti elettrici per poter realizzare un processo produttivo. Realizzarono anche un prototipo di un sistema di elettroerosione basato su un circuito elettrico formato da una resistenza e un condensatore, per tale motivo noto come circuito R-C oppure come circuito a rilassamento. In tale sistema l'elettrodo negativo (catodo) viene pensato come l'utensile mentre l'elettrodo positivo (anodo) è il materiale che viene lavorato. Si ha perciò la lavorazione, tramite scariche elettriche, dell'anodo tramite catodo. I continui sviluppi della macchina da parte dei Lazarenko hanno portato alla creazione di un servo sistema che potesse mantenere costante in maniera automatica la distanza elettrodo e il pezzo in lavorazione, ovvero lo spazio di scarica [2]. In Figura 2 è visibile lo schema di una macchina da elettroerosione con il circuito appena esposto.

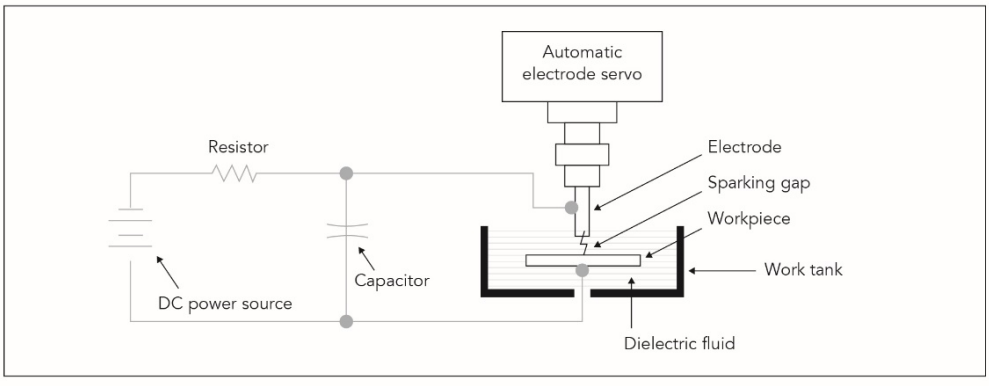

Figura 2 – Schema del prototipo della macchina di elettroerosione basato su circuito R-C; Fonte: modificato da [2]

Il processo ideato dai Lazarenko si diffuse dapprima in URSS durante la Seconda Guerra Mondiale per processare materiali difficilmente lavorabili tramite lavorazioni convenzionali, come ad esempio il Tungsteno e il carburo di Tungsteno. Successivamente le macchine per l'elettroerosione, EDM, si diffusero in Europa e nel resto del mondo.
In realtà, quasi contemporaneamente agli esperimenti dei due scienziati sovietici, anche negli USA si sviluppò una tecnologia simile, pensata però per rimuovere gli utensili maschiatori e le punte da foratura che si rompevano nei corpi di alluminio delle valvole idrauliche che venivano prodotte per l'industria aerospaziale. Harold Stark, Victor Harding, e Jack Beaver ebbero l'idea di utilizzare le scariche elettriche per erodere e quindi rimuovere gli utensili incastrati all'interno del corpo delle valvole [2].
A differenza del processo ideato dai Lazarenko, la variante americana utilizza la corrente alternata. L'elettrodo che funge da utensile viene posizionato a contatto l'oggetto da rimuovere appena viene alzato si verifica la scarica e quindi la rimozione. Inizialmente si utilizzava l'aria compressa sia come dielettrico sia per rimuovere il materiale fuso durante la scarica. Il processo però utilizzava quantità troppo elevate di aria in pressione senza espellere in maniera corretta il metallo fuso. Si trovò che l'utilizzo di acqua poteva aumentare l'efficienza del processo e facilitare l'espulsione del materiale sciolto durante la scarica. Furono apportati ulteriori accorgimenti, come il potenziamento del dispositivo di scarica e infine si automatizzò il processo in maniera tale da avere una maggiore produttività ed efficienza.
In Figura 3 si riporta uno schema della macchina automatizzata dai tre scienziati statunitensi.

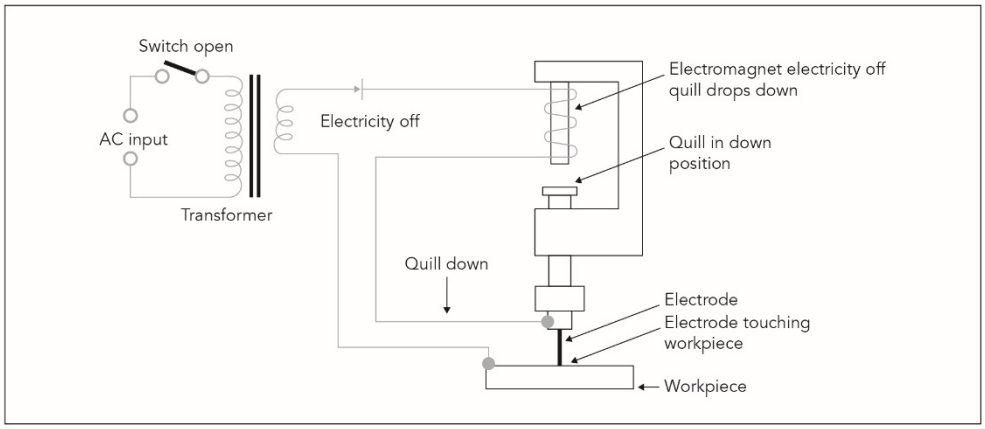

Figura 3 – Schema del prototipo americano del processo di elettroerosione; Fonte: modificato da [2]

Il funzionamento del macchinario illustrato in figura era il seguente: quando non si aveva in circolo corrente elettrica, l'elettrodo che fungeva da utensile si trovava a contatto con il componente da rimuovere. Quando invece si commutava l'interruttore, la corrente scorreva all'interno dell'elettrodo, dell'elettromagnete e del pezzo. Si aveva perciò l'energizzazione dell'elettromagnete che sollevava l'utensile e di conseguenza andava a causare la scarica elettrica. La distanza aveva anche il compito di interrompere il flusso di corrente. Senza elettricità, l'elettromagnete perdeva il suo magnetismo e di conseguenza l'elettrodo tornava in battuta con il corpo da rimuovere. Ciò faceva sì che la corrente riprendesse a scorrere e quindi si facesse un nuovo ciclo, ovvero si otteneva la magnetizzazione del magnete che separando l'elettrodo causava la scarica, come esposto in precedenza.
Il processo ideato dai Lazarenko ed in parte anche il processo ideato dagli americani hanno portato allo sviluppo del processo di elettroerosione a tuffo.
Finita la Seconda Guerra Mondiale, l'URSS era la leader mondiale del processo di elettroerosione sia per lo studio dei fenomeni fisici coinvolti nella lavorazione sia per la realizzazione di prototipi e macchine. La Russia impiegò diverse istituzioni e scienziati nello studio e sviluppo del processo, B.N. Solotych fu uno dei primi a formulare una teoria riguardante il fenomeno della scarica elettrica e della conseguente erosione. I suoi studi confluirono in una relazione, pubblicata nel 1952, che rappresentava la prima descrizione del processo di elettroerosione [4]. Per quanto riguarda la realizzazione di macchinari, i sovietici fondarono l'ENIMS (Metalcutting Machine Tools, Experimental Scientific Research Institute) che, insieme a ZNL-Elektrom, sviluppò macchinari, tecnologie, dispositivi e materiali per gli

elettrodi. Le attività furono così numerose che il direttore del gruppo di EDM, il prof. Livshiz, nel 1959 pubblicò una relazione in cui esponeva tutte le varianti del processo, gli sviluppi e le applicazioni [5].
La diffusione del processo di elettroerosione fu importante, ma subì un'ulteriore spinta più tardi grazie al Controllo Numerico Computerizzato (CNC) degli assi che permetteva di ottenere una maggiore precisione nella dimensione delle parti. I continui sviluppi alle macchine e al processo hanno permesso l'introduzione di diverse migliorie: il sistema di compensazione per l'erosione dell'elettrodo utensile, con lo scopo di limitare le distorsioni di forma, e nuovi fluidi dielettrici con proprietà più consone al processo.

Nel corso degli anni sono state introdotte diverse modifiche ai generatori di scarica per migliorarne le performance. Il circuito R-C pensato dai Lazarenko presentava un limite nella frequenza di scarica a causa del tempo necessario alla carica del condensatore presente nel circuito, in aggiunta non era possibile controllare separatamente la durata della scarica e il tempo intercorrente tra due scariche. Per ovviare a queste limitazioni si iniziò ad introdurre un induttore all'interno del circuito, passando ad un circuito RCL. Questa modifica, sebbene comportasse una frequenza di scarica maggiore aveva una ripercussione negativa sulla stabilità del processo. L'energia di scarica non era più uniforme durante la lavorazione ma variava durante il ciclo di lavorazione [6]. Poiché il processo di elettroerosione si era ormai diffuso in tutto il mondo, ogni costruttore o gruppo di ricerca dei vari stati aveva creato circuiti che superassero i limiti dei circuiti RC sfruttando induttori o altri elementi elettronici. Ad esempio, si introdussero dei diodi all'interno dei circuiti per evitare gli effetti potenzialmente dannosi per gli elettrodi dovuti all'inversione di polarità al termine della scarica elettrica.

Le innovazioni tecnologiche avvenute nel campo dei semi-conduttori e dell'elettronica negli anni '60 e '70 hanno permesso un ulteriore sviluppo delle macchine di EDM. L'invenzione nel 1959 del transistor, che fornì le basi per la creazione della tecnologia dei circuiti integrati, e l'introduzione del primo processore nel 1971, che porterà allo sviluppo dei sistemi a Controllo Numerico Computerizzato (CNC), sono le principali cause del superamento dei limiti dei circuiti RC e dei limiti sulla produttività, ripetibilità e precisione dei componenti realizzati. Grazie ai transistor, si rese possibile la creazione del generatore di scariche statico anche detto ad onda quadra. Questo generatore di scariche non solo permetteva delle frequenze operative più elevate dei precedenti tipi ma permetteva il controllo separato del tempo di scarica e corrente di scarica, garantendo una flessibilità maggiore nel controllo della scarica e quindi del processo [7].

Nonostante questo, i circuiti RC vengono ancora utilizzati poiché permettono di limitare la scarica a livelli di energia e durata molto ridotti, così che una quantità di materiale limitata può essere rimossa dal componente. Secondo [5], l'avvento delle innovazioni tecnologiche sopra enunciate andò però a svantaggio dei sovietici che non potevano disporre di tali dispositivi immediatamente e quindi persero il loro ruolo di leader tecnologici. Il loro posto fu preso dalle industrie giapponesi, le quali esistono sul mercato tutt'ora. Contemporaneamente agli sviluppi del processo elettroerosione a tuffo (die-sinker EDM), ci si iniziò a chiedere se fosse possibili sostituire gli elettrodi, che dovevano essere realizzati in maniera tale da avere la forma del negativo del pezzo da produrre, con qualcosa di più semplice da realizzare e soprattutto meno costoso. Fu così che tra gli anni '60 e '70 comparve la prima variante del processo di elettroerosione nota con il nome di elettroerosione a filo o WEDM. Come suggerisce il nome stesso, questa lavorazione utilizza come elettrodo un filo. Il problema fondamentale che si dovette fronteggiare fu l'erosione del filo dovuta dalle scariche. Sebbene questa fosse molto più limitata rispetto a quella che si verifica sul pezzo in lavorazione, su un diametro ridotto come quello di un filo (0.03-0.3 mm) si aveva un importante indebolimento progressivo che ne causava la rottura. Per rimediare a questo problema si utilizzò come elettrodo un filo in movimento, questo limitava l'usura dell'elettrodo prolungandone la vita.

Vennero costruiti diversi prototipi di macchine di elettroerosione a filo ma non fu possibile parlare di sistemi industriali veri e propri fino all'avvento del controllo numerico (NC). Questo permetteva il posizionamento corretto degli assi tramite lettura di un nastro forato, tramite il quale avveniva il controllo dei movimenti della macchina. Questa tecnologia era già in uso sui sistemi di elettroerosione tradizionali, quindi i primi sistemi vennero sviluppati utilizzando

i generatori e i sistemi di NC delle macchine di EDM facendo prima delle opportune modifiche alle infrastrutture delle macchine.

La prima macchina di WEDM fu costruita da sovietici e presentata nel 1967 in un'esposizione di macchinari a Montreal, Canada. La macchina era equipaggiata con il controllo numerico e motori passo passo per garantirne il corretto posizionamento. La macchina era in grado di effettuare un taglio di 127 mm su un componente di 12,7 mm di spessore in tre ore [2].La macchina fu accolta molto positivamente e venne ritenuta un'autentica innovazione, l'unica limitazione era ritenuta la programmazione del controllo numerico che richiedeva personale altamente specializzato e che quindi non la rendeva alla portata di tutti.

Come già anticipato, la nuova variante del processo fu accolta così positivamente che anche altri costruttori si impegnarono nella realizzazione di macchine di elettroerosione a filo. Infatti, nel 1969 la ditta AGIE presentò AGIEcut DEM 15, la sua macchina da elettroerosione a filo riportata in Figura 4. Lo sviluppo della macchina avvenne grazie alla recente creazione dei circuiti integrati. La macchina era provvista di motori passo passo per permettere la movimentazione lungo gli assi X e Y, entrambi controllati grazie ad un servo sistema. Anche su questa macchina era presente sistema di controllo numerico [5].

Figura 4 – Macchina AGIE DEM 15, Fonte:[8]

Nonostante la macchina ideata dai sovietici venne cronologicamente prima di quella costruita da AGIE, quest'ultima venne ritenuta il primo sistema disponibile commercialmente.

Sempre negli anni '60 avvenne un'altra importante innovazione per il processo di WEDM. Lo scienziato D.H. Dulebohn, insieme al suo gruppo di ricerca, sviluppò un sistema ottico di inseguimento. Questo si occupava di tracciare il disegno e di trasferirlo al sistema di posizionamento della macchina degli assi X-Y. Il sistema richiedeva un disegno di riferimento molto accurato della geometria del componente da lavorare, tale disegno determinava anche la precisione ottenibile dal processo. Si notò che la precisione poteva essere notevolmente migliorata se il disegno fosse stato generato tramite computer. Dulebohn e il suo gruppo di ricerca svilupparono quindi il software e l'hardware per produrre un sistema a controllo numerico computerizzato (CNC) per generare il disegno di riferimento. Durante lo sviluppo del sistema computerizzato, Dulebohn si accorse che questo poteva essere applicato al processo di WEDM per migliorarne le prestazioni. Fu così che nel 1974 applicò per la prima volta il sistema di inseguimento ottico alle macchine di WEDM per controllare automaticamente la forma del componente in lavorazione [9]. In seguito, ci si accorse che lo stesso programma per il CNC che veniva utilizzato per la generazione del disegno, poteva essere utilizzato per il controllo diretto della macchina. Si poteva così eliminare il sistema di inseguimento ottico e nel 1976, dopo alcune modifiche, si ottenne la prima macchina e il primo processo di WEDM a controllo numerico computerizzato.

Negli anni successivi, come avvenne per il processo di EDM tradizionale, si apportano diverse migliorie sia all'hardware che al software delle macchine. Il CNC rimpiazzò totalmente la programmazione tramite nastri forati, vennero introdotte le viti a ricircolo di sfere che permisero di ridurre gli attriti. Si adottarono diverse soluzioni costruttive per limitare gli attriti sulle guide e migliorare la precisione e la risoluzione degli spostamenti. Furono introdotti a tal proposito i servo motori che includevano encoder e la possibilità di avere un feedback tachimetrico. Lo sviluppo dell'hardware portò anche ad uno sviluppo del software macchina, venne creato infatti il software di controllo del processo di WEDM. Inizialmente il programma risultava complicato nel suo utilizzo e richiedeva la presenza di esperti programmatori CNC. Negli anni a venire il software venne semplificato notevolmente rendendolo più intuitivo in maniera tale che fosse accessibile anche da operatori non specializzati [2]. Lo sviluppo del processo continua tutt'ora, sono state fatte diverse migliorie al design delle macchine, ai sistemi di monitoraggio e controllo del processo, alla sensoristica oltre che ai software macchine che ora permettono la realizzazione di geometrie complesse. Tutto questo è sfociato in macchine con prestazioni rilevanti, tanto da rendere le macchine di elettroerosione a filo una valida alternativa ai processi convenzionali per i materiali difficili da lavorare.

1.2 Il processo

Per il lavoro che verrà esposto nei seguenti capitoli e necessario approfondire i fenomeni fisici coinvolti all'interno del processo di WEDM e più in generale in qualsiasi processo di elettroerosione.
L'obbiettivo del processo è quello di rimuovere materiale da pezzi elettricamente conduttivi sfruttando l'erosione di scariche controllate.
Sebbene il processo sia molto sviluppato e diffuso, non si ha ancora una comprensione totale del processo della formazione della scarica e del relativo meccanismo di erosione. Fin dalla creazione di questa lavorazione sono state proposte diverse teorie per poter spiegare questi fenomeni. Kang e Rajurkar nel 1977 hanno riportato la teoria elettro-meccanica e la teoria termo-meccanica. Secondo la prima teoria un campo elettrico abbastanza grande sarebbe in grado di separare le particelle di materiale del pezzo in lavorazione una volta sorpassato il valore della forza di coesione di particelle del reticolo del materiale. La seconda teoria invece sostiene che una seria di effetti elettrici prodotti dalla scarica elettrica sarebbero in grado di fondere il materiale del pezzo che si sta lavorando. In realtà, nessuna delle due teorie è supportata da evidenze sperimentali [10]. Oggi, dopo diversi studi, si crede che il processo si possa basare e spiegare sulla base dell'effetto elettro-termico. Quindi il processo di erosione è dovuto dall'effetto erosivo di scariche elettriche che si verificano sulla superficie di due materiali conduttori. In Figura 5 si riportano le fasi caratterizzanti del processo associate al relativo andamento di corrente e tensione.

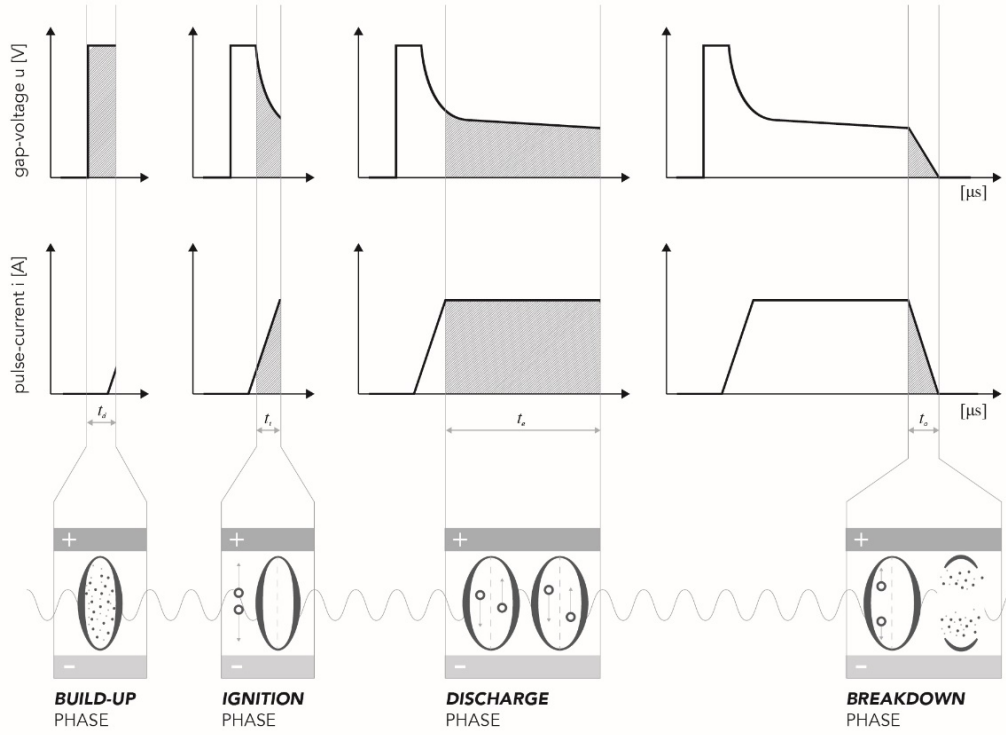

Figura 5 - Fasi del processo di elettroerosione e i relativi livelli di corrente e tensione, Fonte: modificato da [11]

A seconda di come si vogliono accorpare i fenomeni fisici che si verificano durante il processo, è possibile dividerlo in fasi [7], [11]:

- Fase di pre-ionizzazione o *buildup phase*
- Fase di formazione del plasma o *ignition phase*
- Fase di scarica o *discharge phase*
- Fase di espulsione o *breakdown/ejection phase*

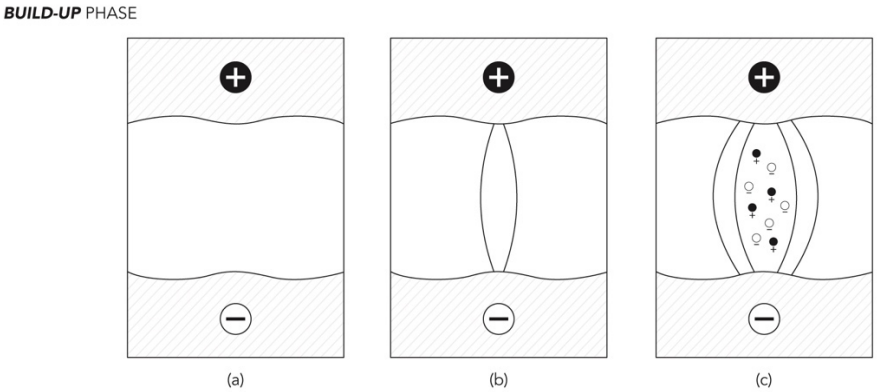

Figura 6 – Build-up Phase: a) Situazione iniziale; b) Applicazione della differenza di potenziale; c) Formazione del campo elettrico e accelerazione delle particelle portatrici di carica; Fonte: modificato da [12]

La prima fase, di cui si riporta la schematizzazione in Figura 6, consiste nel sottoporre il filo e il pezzo a una differenza di potenziale nota come *open circuit voltage* di valore compreso tra 80 e 200 Volt a seconda della lavorazione, sempre mantenendo una stanza tra i due nota come *gap* che è fondamentale affinché si verifichi la scarica. I due elettrodi presentano polarità diverse e in questo specifico caso il filo possiede quella negativa mentre il pezzo quella positiva. Gli atomi del fluido presente nel *gap*, che inizialmente funge da isolante elettrico, risentono della tensione dovuta alla diversa polarità. Come conseguenza della tensione applicata si genera un forte campo elettrico che è più forte dove la distanza tra i due elettrodi è minima e si ha un'accelerazione delle particelle portatrici di carica all'interno del dielettrico lungo le linee di campo. I due elettrodi vengono avvicinati progressivamente grazie al servosistema e man mano il numero di ioni all'interno del dielettrico aumenta, riducendo così le proprietà di isolante del dielettrico lungo un canale di dimensioni ridotte centrato nella zona dove il campo elettrico è più forte. Il canale così formatosi prende il nome di *canale di scarica*. Questa fase perdura fino a che non si giunge al punto di ionizzazione, ovvero al momento in cui il dielettrico passa da isolante elettrico a conduttore permettendo così il passaggio della corrente. Per questo motivo, questa prima fase è caratterizzata da un parametrio chiamato *ionization delay time* (t_d), che misura il tempo necessario affinché il dielettrico muti comportamento. Controllando questo parametro è possibile monitorare che il *gap* e il processo siano in condizioni ottimali [13].

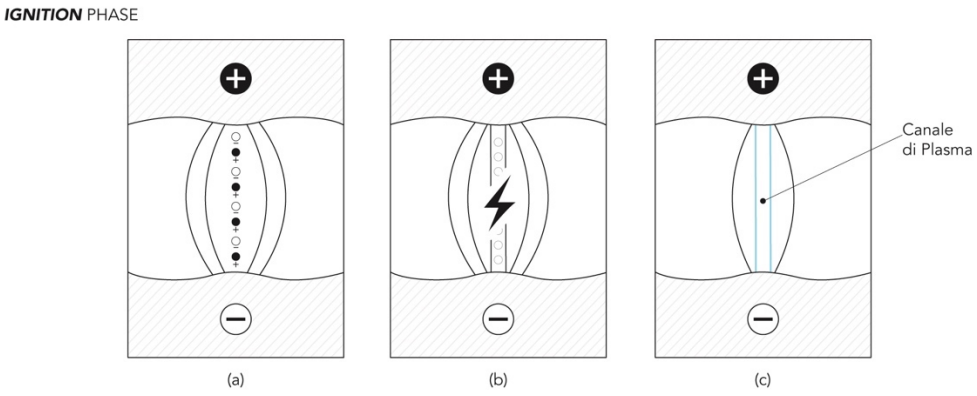

Figura 7 – Ignition Phase: a) Formazione del canale di scarica; b) Raggiungimento del punto di ionizzazione e inizio scorrimento della corrente elettrica; c) Formazione del canale di plasma; Fonte: modificato da [12]

In Figura 7 si riporta lo schema della seconda fase, che è caratterizzata dal raggiungimento del punto di ionizzazione. Gli elettroni accelerati causano una ionizzazione delle particelle neutre e delle molecole, aumentando così il numero di portatori di carica fino a che non si supera una determinata soglia, a questo punto il dielettrico diventa un conduttore e perciò si ha una variazione nei valori di corrente e tensione. La tensione diminuisce gradualmente fino ad un valore detto *machining voltage* che dipende dalla distanza tra i due elettrodi e quindi dal valore di resistenza del *gap*. Inizia anche il passaggio di corrente, dapprima solo sulla superficie del canale di scarica e successivamente si estende a tutto il canale, e la sua intensità aumenta gradualmente fino al valore prescelto. La corrente elettrica fluendo riscalda il dielettrico vaporizzandolo e formando un gas conduttivo noto come plasma. La sua formazione è pressoché istantanea (<50 nano sec) e la sua particolarità è che al suo interno il numero di elettroni e ioni positivi è pressoché uguale. In queste condizioni gli elettroni fluiscono all'interno del plasma sotto forma di scarica elettrica. Inoltre, attorno alla zona di scarica si formano delle bolle di vapore dovute alla vaporizzazione del fluido dielettrico [7], [14].

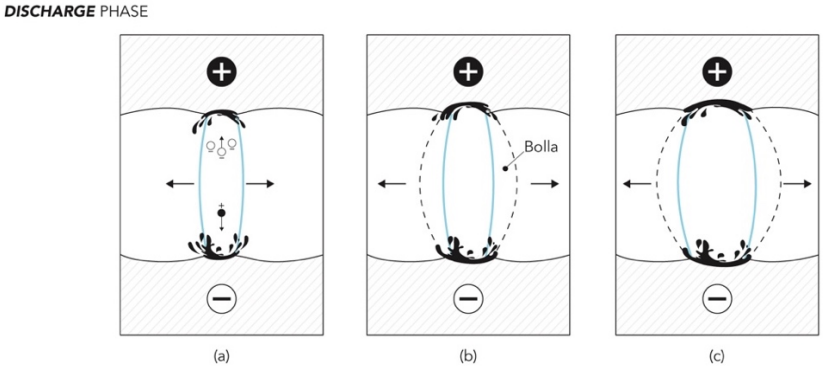

Figura 8 – Discharge Phase: a) Inizio dell'erosione del materiale tramite scariche elettriche; b) Erosione e formazione della bolla per evaporazione del materiale e del dielettrico, c) Progressivo allargamento del canale di scarica, Fonte: modificata da [12]

A questo punto si verifica la fase responsabile dell'erosione del materiale, ovvero la fase di scarica elettrica, la cui schematizzazione è riportata in Figura 8. Si mantiene un flusso di corrente, questo permette un bombardamento costante di ioni ed elettroni sui due elettrodi. Queste particelle vengono accelerate lungo il canale di scarica e quando impattano sulla superficie di uno degli elettrodi, la loro energia cinetica viene convertita in calore. Si genera così un flusso di calore localizzato e intenso, si possono raggiungere e superare temperature di 10000°C [15] che causano l'evaporazione del dielettrico, del materiale del filo e del materiale del pezzo in lavorazione. Quindi si verifica l'espansione delle bolle precedentemente formate fino alla creazione di un'unica bolla che racchiude il canale di scarica. Il volume eroso da una singola scarica è in genere molto ridotto, nell'ordine di 10^{-6}-10^{-4} mm^3, ma in questo processo si ripete anche per 10000 volte al secondo e questo garantisce un'adeguata rimozione del materiale [14].

Si ha anche la formazione di una zona di materiale fuso (melt pool) sulla superficie del pezzo, la cui area aumenta gradualmente poiché durante questa fase si verifica l'espansione del canale di scarica. Poiché il bombardamento avviene da entrambi i lati e tenendo conto della polarità degli elettrodi, si avrà che gli elettroni saranno attratti dall'elettrodo positivo e causeranno l'erosione e la vaporizzazione del pezzo in lavorazione, mentre gli ioni positivi saranno attratti dall'elettrodo negativo e quindi causano l'erosione del filo, definita usura. In realtà, poiché gli ioni positivi possiedono una massa superiore a quella degli elettroni sono più difficili da accelerare e quindi un minor numero giungerà sulla superficie dell'elettrodo. L'erosione quindi sul filo risulta più limitata ed è per questo che gli elettroni sono ritenuti la principale causa del processo di rimozione del materiale. Dal momento che però l'erosione avviene su entrambi gli elettrodi, all'interno della colonna di fluido ionizzato saranno presenti le nuvole di vapore appartenenti ad entrambi i materiali e che quindi avranno polarità opposte e relative a quelle degli elettrodi [13], [16]. La fase di scarica ha una durata dell'ordine dei microsecondi e il tempo caratteristico della scarica solitamente è denominato T_{on}.

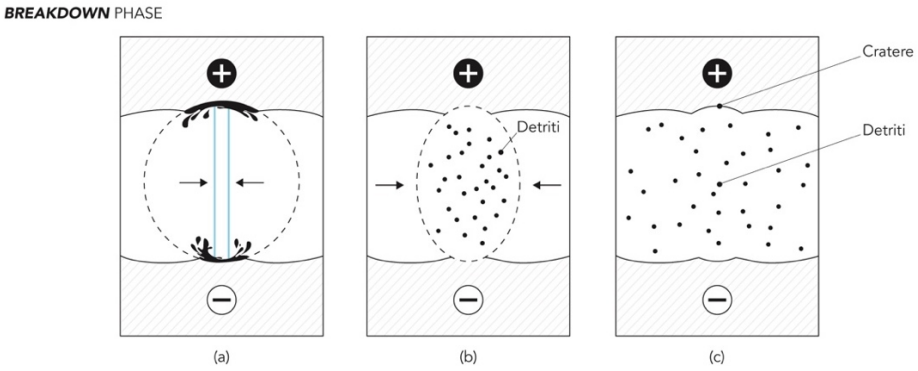

Figura 9 – Breakdown Phase: a) Restringimento del canale di scarica dovuto all'interruzione di corrente e tensione, b) Progressivo restringimento della bolla contenente detriti, c) Implosione della bolla ed evacuazione dei detriti; Fonte: modificato da [12]

Terminata la fase di scarica inizia la quarta ed ultima fase, il cui schema è riportato in Figura 9. Qui si verifica l'interruzione del flusso di corrente e tensione, perciò il fluido dielettrico torna a comportarsi da isolante elettrico. Non appena termina la fase di scarica elettrica, il plasma e la bolla di vapore implodono a causa della pressione imposta dal dielettrico circostante. Questo provoca l'espulsione del materiale fuso dalla superficie del pezzo all'interno del gap e la comparsa di piccoli crateri sulla superficie dell'elettrodo [17]. I vapori di materiale polarizzati si attraggono tra loro all'interno della zona di lavoro e, insieme al materiale che viene fuso durante la fase di scarica, solidificano in piccole particelle di forma sferica, formando così quelli che vengono chiamati detriti che sono formati sia da materiale appartenente al filo che da materiale appartenente al pezzo in lavorazione. Durante questa fase è necessario che il liquido dielettrico diminuisca la temperatura della zona di lavoro, permetta la solidificazione del materiale rimosso e lo espella dalla zona di lavoro. Questa fase è molto importante perché determina la qualità della lavorazione ottenibile tramite le scariche successive. La presenza dei detriti all'interno del gap può avere effetti negativi sulla lavorazione poiché essi vanno ad aumentare la conducibilità elettrica del fluido dielettrico e di conseguenza porta ad un cattivo controllo del processo e della fase di ionizzazione, oltre che a portare a peggioramenti della superficie e contaminazioni di altri materiali [2]. In merito a questa problematica, Bommeli et al. hanno dimostrato che la concentrazione di detriti all'interno del *gap* è direttamente correlata al *ionization delay time*, nello specifico all'aumentare di questi anche il tempo richiesto affinché avvenga la ionizzazione del dielettrico aumenta. Dato che la rigidezza del dielettrico, ovvero il valore limite di campo elettrico oltre il quale si ha il passaggio di corrente, decresce al decrescere della distanza tra i due elettrodi e aumenta con l'aumento della concentrazione di detriti, il tempo necessario alla ionizzazione del dielettrico t_d può essere utilizzato come parametro per controllare lo stato o il grado di pulizia dello spazio tra i due elettrodi [18]. Inoltre, la presenza di particelle conduttive nel *gap* può portare all'instaurazione di scariche anomale tra elettrodo e detriti oppure causare cortocircuiti, impedendo così di ottenere i risultati che si otterrebbero in corrette condizioni di lavoro. Questa fase è presente tra una scarica e l'altra, la sua durata è dell'ordine dei microsecondi e il parametro temporale è solitamente chiamato T_{off}. Per facilitare l'espulsione dei detriti, oltre che impostare una durata adeguata della fase, è necessario permettere che il dielettrico fluisca all'interno del *gap*, controllandone pressione e portata.

A causa delle alte temperature in gioco durante il processo si verifica la formazione di una zona termicamente alterata, detta *HAZ* (Heat Affected Zone). Il suo spessore varia in base ai parametri utilizzati durante la lavorazione ma solitamente presenta dimensioni ridotte (<1mm). A sua volta questa può essere suddivisa in diverse zone o strati [19], [20]. In Figura 10 si riporta uno schema delle zone e degli strati.

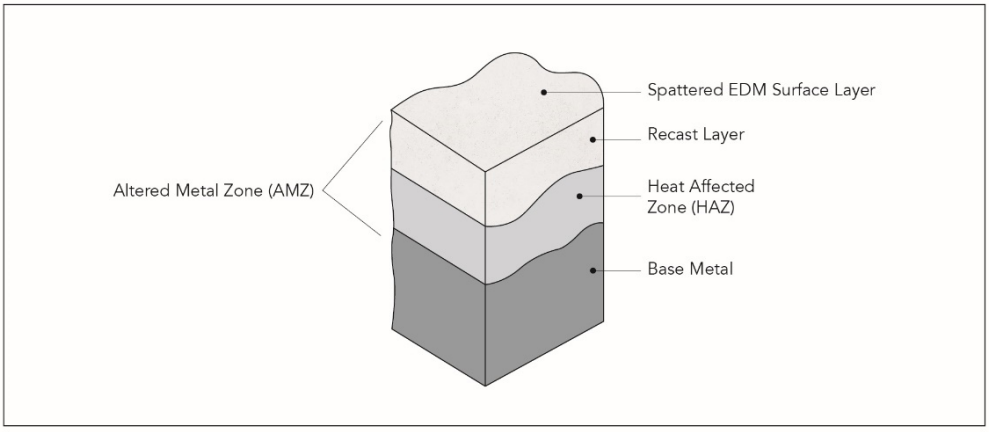

Figura 10 - Zona termicamente alterata (HAZ) generata dal processo, Fonte: modificato da [21]

- *White layer o re-deposited layer*: Zona direttamente bombardata da elettroni, si raggiungono temperature molto elevate e avviene la vaporizzazione del materiale ma parte di esso rimane vicino al cratere. Quindi, a scarica terminata, il materiale solidifica sulla superficie del pezzo, è però possibile trovare anche materiale appartenente al filo. Questa zona subisce un raffreddamento simile ad una tempra e di conseguenza risulta particolarmente dura.
- *Particelle globulari*: possono essere considerate parte della *re-deposited layer*, queste sono quindi particelle sferiche che si trovano sulla superficie del componente lavorato. Si sono formati a causa del distaccamento di piccole quantità di vapore e quando termina la fase di scarica entrano in contatto con la zona esposta in precedenza e solidificano in forma sferica.
- *Re-solified layer:* si raggiunge una temperatura abbastanza elevata da fondere il materiale ma questo non si separa dalla superficie dal cratere e quindi risolidifica a fine scarica. L'insieme di *re-deposited layer* e *re-solified layer* forma la zona che viene chiamata *recast layer*.
- Infine, si può poi trovare una zona in cui la temperatura non è abbastanza elevata da causare cambi di stato ma si possono avere delle modifiche a livello di microstruttura o di proprietà fisiche.

In alcuni casi il processo ha portato alla formazione di cricche e crepe superficiali causate dagli sbalzi termici che caratterizzano in processo, la loro presenza non è accettabile poiché potrebbero causare il fallimento del componente realizzato. Si è notato inoltre che la presenza di crepe è inversamente proporzionale alla conducibilità termica del materiale mente il numero di crepe e la dimensione della zona termicamente alterata sono direttamente proporzionale all'energia di scarica [22].

1.3 Struttura macchina WEDM

La macchina nel suo insieme è composta da svariati componenti che assolvono a compiti ben definiti, per semplicità è possibile dividere i principali componenti della macchina in sottosistemi [23]:

1. Struttura Meccanica
2. Controllo Numerico Computerizzato (CNC)
3. Generatori di scarica
4. Fluido dielettrico e sistema di gestione
5. Sistema del filo

Ognuno di questi gruppi verrà ora analizzato separatamente.

1.3.1 Struttura Meccanica

La struttura della meccanica solitamente possiede una forma a C oppure una struttura a portale, inoltre i movimenti possibili dipendono dal numero di assi controllati che possono essere: due, tre oppure cinque. In fig. vengono riportati il numero massimo di assi che è possibile controllare su una macchina da WEDM.

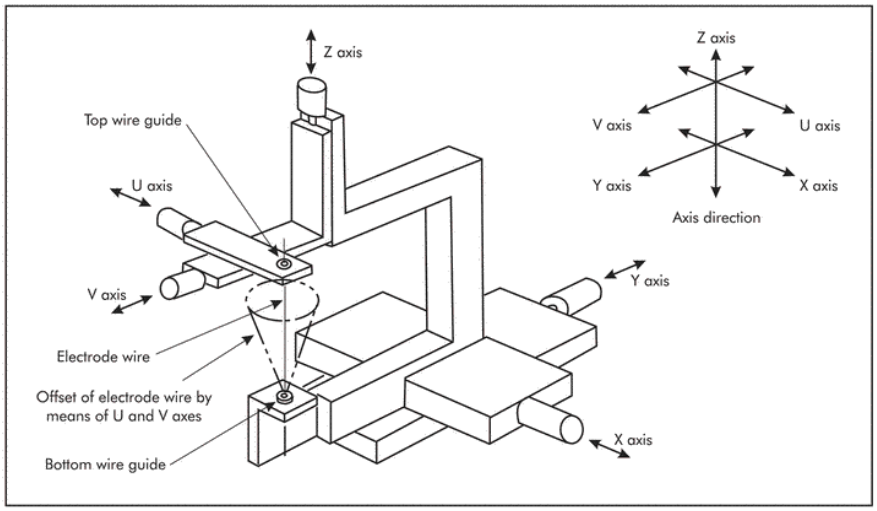

Figura 11 - Assi e direzioni controllabili dalle macchine di EDM, Fonte: [2]

Gli assi X-Y, solitamente controllati tramite servomotori, permettono il moto di avanzamento e tale movimento può essere posseduto o dalla tavola porta pezzo oppure dallo stesso elettrodo.
Gli assi U-V invece permettono di gestire l'offset dell'elettrodo dalla posizione verticale, quindi la sua inclinazione, tendenzialmente si opera tra 0° e 15°. Possono essere gestiti manualmente oppure possono essere controllanti anche questi tramite servo motore. L'asse Z controlla il posizionamento della guida superiore in prossimità del componente che deve essere lavorato, in maniera tale da consentire il corretto passaggio del fluido dielettrico all'interno della zona di scarica. Oltre alla classificazione per numero di assi controllati, è possibile suddividere le macchine anche per l'architettura complessiva della macchina. Le macchine possono essere divise in sistemi ad architettura aperta, ovvero tutti i sottogruppi sono separati l'una dall'altro e quindi è possibile accedere facilmente ad ognuno di questi. I sistemi chiusi invece dispongono degli stessi sottosistemi ma sono racchiusi all'interno di un unico modulo.
La zona di lavoro solitamente possiede una forma rettangolare e le sue dimensioni variano a seconda della macchina e del costruttore, però è possibile avere un'area di lavoro che oltre a permettere il bloccaggio del pezzo per permetterne la lavorazione, funge anche da vasca e quindi è possibile l'immersione del componente nel dielettrico. Questa soluzione risulta particolarmente vantaggiosa nel caso si vogliano tagliare componenti di spessore elevato.

1.3.2 Controllo Numerico Computerizzato (CNC)

Questo sottogruppo può essere identificato come il cervello della macchina. Il CNC, infatti controlla tutti i servomotori che determinano sia i movimenti degli assi della macchina e quindi dell'elettrodo sia la velocità con cui lo stesso elettrodo viene srotolato dal rocchetto e messo in circolo nella zona di lavoro. Lo sviluppo del software macchina ha permesso l'inserimento di svariate funzioni, si può infatti inserire direttamente dal software, o tramite file CAD, il percorso dell'utensile oltre che inclinare gli assi per realizzare geometrie più complesse. Oltre al controllo dei movimenti, il CNC permette l'inserimento dei parametri di processo ed effettuata i calcoli necessari per determinare l'efficienza, il tempo di lavorazione e gli interventi correttivi da effettuare per mantenere la stabilità della lavorazione. Il CNC svolge diverse funzioni di monitoraggio, come ad esempio il controllo dello stato del dielettrico. Una delle funzioni più interessanti possibili grazie al CNC è il controllo adattativo che viene utilizzato per il controllo del *gap*.
Un moto di avanzamento costante dell'elettrodo può portare a problemi di scarica, come i cortocircuiti o l'instabilità del processo. Il controllo adattativo della macchina misura i parametri della caratteristica della scarica e, in base a questi, modifica il moto di avanzamento in maniera tale da mantenere una distanza ottimale tra gli elettrodi e di conseguenza un processo di scarica ottimale [7].

Le modalità con cui il controllo adattativo interviene sulla velocità di avanzamento a seconda dei casi riportati in Figura 12 sono le seguenti:

1. La distanza tra elettrodo e pezzo è troppo elevata e a causa di questo non si verifica la scarica elettrica, sebbene venga fornita la tensione adeguata alla ionizzazione del dielettrico. Il controllo adattativo cerca di ridurre il *gap* aumentando la velocità di avanzamento. In figura si fa riferimento a questa situazione con il termine No-load discharge.
2. Nel caso in cui la distanza tra gli elettrodi sia quella ottimale e di conseguenza la scarica avviene in maniera corretta, si mantiene l'avanzamento costante. In figura fare riferimento a Normal discharge.
3. La scarica avviene in maniera anticipata a causa di una distanza ridotta rispetto a quella ottimale. Si opera quindi per aumentare il *gap* e quindi si diminuisce l'avanzamento. Si fa riferimento a questa situazione con Arc discharge e si ritiene che questa modalità di scarica sia instabile e non permetta una corretta lavorazione del componente.
4. Nel caso in cui si dovesse avere un corto circuito tra elettrodo e pezzo poiché i due sono a contato, è bene allontanare i due elettrodi in maniera tale da permettere la formazione delle scariche e quindi la rimozione del materiale. In questa fase infatti si verifica il passaggio di corrente senza formazione della scarica elettrica.

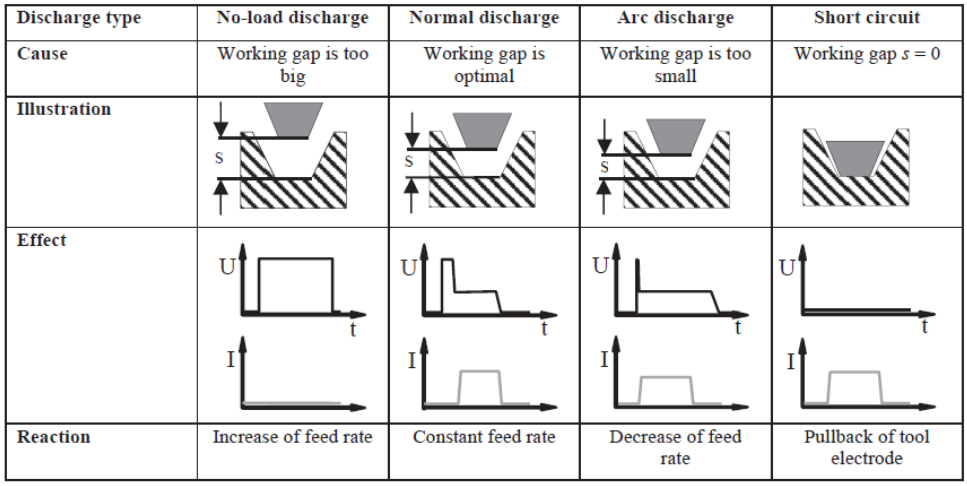

Figura 12 - Schema di funzionamento del controllo adattativo nelle diverse condizioni di lavoro, Fonte: [7]

Il controllo può avvenire con diversi algoritmi o principi, come ad esempio stimando la distanza tra i due elettrodi, lo *ionization delay time*, l'average gap voltage o altri indicatori per poterli comparare con quelli corretti derivanti dai parametri di processo inseriti. Si possono comparare la corrente e la tensione che si misurano si stimano durante la scarica con quelle impostate come parametro di processo, quindi con una corrente e tensione di riferimento, detta servo voltage. In alternativa è possibile utilizzare lo *ionization delay time*, infatti oltre a variare a causa della presenza dei detriti all'interno del *gap*, varia anche in funzione della distanza tra gli elettrodi. Questo parametro viene utilizzato anche per distinguere le scariche stabili (Normal discharge) da quelle anomale (Arc discharge) [14].

1.3.3 Generatori di scarica

I generatori di scarica sono una delle parti più importanti dell'intera macchina, essi sono infatti responsabili della generazione delle scariche elettriche, tramite questo elemento è possibile determinare la potenza della singola scarica e la frequenza con cui esse si verificano. Come anticipato nel capitolo riguardante la storia del processo, esistono due tipologie differenti di generatori di scarica: a rilassamento e statico.

Il generatore statico, riportato in Figura 13, è basato su transistor, all'interno del circuito ogni singolo transistor permette il passaggio di una determinata quantità di corrente. Perciò, il numero di transistor che permettono contemporaneamente il passaggio di corrente determina la quantità di corrente che si avrà durante la lavorazione. Il grande vantaggio di questo tipo di generatori risiede nella loro flessibilità. Si può infatti controllare separatamente la durata della scarica e della corrente di scarica, cosa non possibile con un circuito a rilassamento, oltre che ad avere un controllo sulla forma dell'impulso e durata dell'impulso [24].

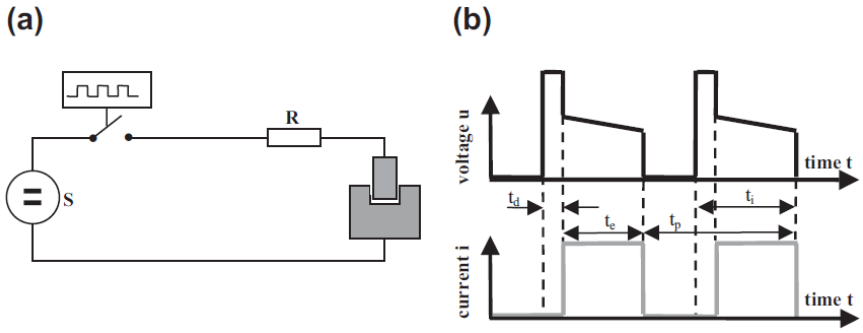

Figura 13 - Generatore statico di scariche: a) Schema del circuito, b) Curve caratteristiche di corrente e tensione, Fonte: [7]

Il generatore a rilassamento, riportato in Figura 14, è invece basato su un circuito RC anche se a volte si può presentare come un circuito RLC o LC. I parametri su cui si può operare risultano più limitati, poiché la durata della scarica e la corrente di scarica sono legati tra loro dalla capacità del condensatore e all'eventuale induttanza. Oltre a ciò, la frequenza di scarica che si può ottenere non è elevata, come nel caso del generatore statico, poiché essa dipende dal tempo di ricarica del condensatore [25]. Il suo pregio però è la velocità di scarica, i condensatori si scaricano molto velocemente permettendo scariche della durata anche di nanosecondi ma con energie di scariche molto ridotte. Nel primo tipo di generatori ciò non è possibile a causa dei ritardi dovuti ai transistor che fungono da interruttori e quindi non è possibile mantenere tempi di scarica eccessivamente ridotti [6]. Inoltre, dalla figura è possibile notare l'effetto dell'inversione della corrente nel caso dei generatori RCL, per evitarlo viene utilizzato un diodo.

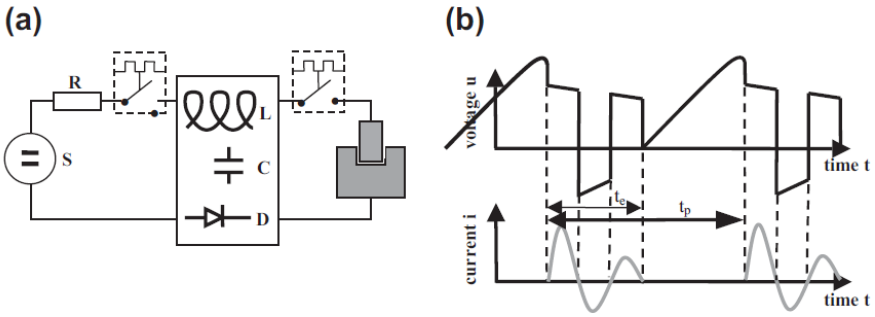

Figura 14 - Generatore di scariche R-C-(L): a) Schema del circuito, b) Curve caratteristiche di corrente e tensione; Fonte: [7]

1.3.4 Fluido dielettrico e Sistema di gestione

Come è già stato anticipato nel paragrafo 1.2, fluido dielettrico è in isolante elettrico che si oppone al passaggio della corrente fino a che non si applica un valore opportuno di tensione che ne muta in comportamento, diventando così un conduttore elettrico. Il momento in cui si ha il cambio di comportamento e il valore di tensione associato è detto *punto di ionizzazione*. Quando si giunge a questo punto la corrente inizia a scorrere sottoforma di scarica elettrica fino a che la tensione non diminuisce tanto da far ritornare il dielettrico un isolante. Nel caso di WEDM, si utilizza acqua deionizzata e i suoi compiti principali sono: formare una barriera elettrica tra elettrodo e pezzo in lavorazione oltre che permettere di concentrare l'energia di scarica in una regione molto ristretta, ridurre la temperatura sia del filo che del pezzo, permettere la solidificazione del materiale vaporizzato formando così i detriti ma allo stesso tempo rimuovere i detriti dalla zona di lavoro [26].

Per poter svolgere tutti i compiti elencati è necessario che il fluido sia provvisto di un'elevata resistenza elettrica in modo da poter essere un buon isolante, di un'elevata capacità termica per massimizzare lo scambio termico e quindi il raffreddamento e infine una bassa viscosità, così da fluire più velocemente e quindi favorire la rimozione dei detriti [24]. Dielettrici differenti possono avere proprietà differenti e di conseguenza possono andare a modificare, anche significativamente, le performance del processo.
Il dielettrico viene immesso nella zona di lavoro tramite una pompa e due ugelli, uno superiore ed uno inferiore. In alcuni casi è possibile regolare la portata e la pressione del fluido. Una volta che si siano verificate un serie di scariche, il fluido porta con sé un'elevata quantità di detriti che diminuiscono la resistività del fluido e permettono il passaggio della corrente anche quando non dovrebbe verificarsi. Per riutilizzare il fluido è necessario ripristinare la resistività originale e rimuovere i detriti. Per fare ciò, il fluido viene forzato a passare in un sistema di filtraggio. Il filtro, solitamente, è realizzato in carta. Dopodiché viene fatto passare in una cartuccia deionizzante per correggere la resistività e se si misura il valore desiderato allora viene inviato al serbatoio del dielettrico pulito. Il valore della resistività viene monitorato continuamente e se si registra una variazione rispetto al valore desiderato, il fluido viene forzato a passare attraverso una resina deionizzante tramite un'apposita pompa [27]. Il sistema di filtraggio è molto importante poiché ripristinando le proprietà originarie del fluido dielettrico si provvede a mantenere stabili le performance della macchina e quindi i risultati della lavorazione. Se il fluido di lavoro presenta al suo interno un'elevata concentrazione di detriti, viene meno il comportamento di isolante elettrico oltre che possibili cortocircuiti e un processo non stabile caratterizzato dalla presenza di scariche anomale.

1.3.5 Sistema del filo

L'elettrodo e il suo sistema hanno il compito di condurre corrente elettrica fino alla zona di lavoro in modo che si possano avere le scariche elettriche e quindi la rimozione del materiale. Il sistema è generalmente composto da un rocchetto, sul quale è avvolto il filo, e due rulli o guide poste rispettivamente sopra e sotto al pezzo in lavorazione. Questi due elementi hanno la funzione di guidare correttamente il filo all'interno della zona di lavoro affinché si mantenga il più possibile dritto e sono regolabili anche in funzione dell'altezza del pezzo. Oltre a questi elementi, le macchine dispongono di un sistema atto alla regolazione della tensione agente sul filo in maniera tale che il filo non si defletta durante il taglio e non vibri.

Il rocchetto sul quale è avvolto il filo è movimentato tramite un motore elettrico ed è quindi possibile regolare la velocità con cui si svolge dal rocchetto e arriva nella zona di lavoro. Dopo aver raggiunto la zona di scarica ed esserne uscito, il filo potrebbe essere notevolmente consumato e quindi non viene più utilizzato, ma viene tagliato tramite un apposito

sistema in maniera tale che possa essere riciclato. Le macchine che utilizzano questo sistema vengono dette *CNC low-speed feed wire cut machine.*

Esiste una variante di questo tipo di sistema. Invece che utilizzare una volta il filo e poi riciclarlo, lo si sfrutta per diversi tagli. Questo sistema alternativo è formato sempre dalle due guide tra le quali si trova il pezzo che viene lavorato, ma invece che il rocchetto si utilizza un tamburo, movimentato tramite un motore elettrico, su cui viene avvolta una quantità di filo arbitraria e di cui si imposta la corsa orizzontale. Quando si avvia il taglio, se il tamburo ruoterà in senso orario movimenterà il filo dall'alto verso il basso, ma quando si giunge al fine corsa del movimento laterale del tamburo allora questo invertirà il senso di rotazione e il filo viaggerà in direzione opposta a quella precedente. Questo sistema per funzionare necessita di fili più resistenti rispetto al sistema tradizionale e sono realizzati in molibdeno. Le macchine che sfruttano questo sistema vengono definite *CNC high-speed feed wire cut machine.*

Le proprietà ottimali per un filo sono le seguenti: elevata conducibilità termica per favorire il trasferimento del calore, elevata rigidezza e resistenza meccanica per poter utilizzare un maggiore tensione del filo ed evitare la deflessione e la rottura durante il taglio, elevata conducibilità elettrica per limitare il consumo della potenza e favorire le scariche, elevata resistenza ai carichi termici per resistere ad alte temperature raggiunte nel processo, permettere elevate velocità di taglio e quindi scariche potenti e infine avere un costo limitato [28].
I materiali comunemente utilizzati per la realizzazione degli elettrodi sono: rame, ottone, molibdeno e gli elettrodi rivestiti o ricotti [29].
Il rame fu il primo materiale con cui si realizzarono gli elettrodi per WEDM, anche se il rame possiede una buona conducibilità elettrica, il loro uso ora è però molto poco diffuso poiché, le scarse proprietà meccaniche, l'elevata temperatura di fusione e la bassa tensione di vapore ne limitano le prestazioni. Al suo posto si è iniziato ad utilizzare l'ottone. La presenza dello zinco ha portato quindi a proprietà meccaniche superiori, temperatura di fusione ridotta e una tensione di vapore ridotta. Date le migliorie apportate dallo zinco, si è pensato di utilizzarlo in un altro modo per migliorare ulteriormente le prestazioni degli elettrodi e questo è il caso dei fili rivestiti o ricotti. In entrambi i casi è presente a cuore un materiale con un'alta conducibilità termica (es. ottone) e buone proprietà meccaniche mentre all'esterno è presente un rivestimento di zinco o un metallo con basso punto di ebollizione. In alcuni casi è presente un ulteriore strato di un materiale con elevate proprietà meccaniche. Lo strato di zinco protegge il materiale a cuore dallo shock termico e quindi ne limita il rischio di rottura e l'usura durante il taglio, oltre a garantire velocità di taglio maggiori. Durante il processo, il calore generato dalle scariche elettriche fa evaporare lo strato di zinco e, dato che possiede una ridotta temperatura di ebollizione, si trova ad una temperatura minore rispetto alla temperatura di fusione del materiale a cuore. Si forma così una barriera di vapore di zinco attorno al filo che assorbe il calore generato dalle scariche, limitando così il flusso termico verso il cuore del filo e quindi l'usura [30], [31].
Queste tipologie di filo prevedono di essere utilizzate una volta soltanto, quindi vengono utilizzate su macchina che possiedono il sistema di movimentazione del filo esposto per primo.
La scelta dell'elettrodo è importante poiché l'utilizzo di un materiale piuttosto che un altro determina ha effetto sulle prestazioni della macchina e sulla lavorazione.

La differenza di performance tra fili in ottone e fili rivestiti è stata analizzata da Antar et al. Si è riscontrato che nel taglio di Ti6246 e Udimet 720 la differenza di produttività tra i due tipi di elettrodi fosse rispettivamente del 70% e del 40% a favore dell'elettrodo rivestito. Sono state rilevate anche performance migliori per l'elettrodo rivestito in termini di spessore di zona termicamente alterata e *recast layer*, più sottili rispettivamente del 40% e del 25% [32].

Il filamento il molibdeno non presenta rivestimenti ed è concepito per essere riutilizzato più volte all'interno del processo. L'usura durante il processo presente su questa tipologia di filo è molto ridotta rispetto agli elettrodi rivestiti ed è perciò definito elettrodo non consumabile. Le performance dei filamenti in molibdeno sono state comparate con quelli degli altri elettrodi. Secondo gli esperimenti fatti da (nome autori) durante il taglio di una lega di Titanio, il filo in molibdeno ottiene prestazioni migliori sia per produttività sia per rugosità superficiale rispetto all'elettrodo in ottone

[33]. Secondo quanto esposto da Poros et al. dopo aver realizzato dei tagli su Ti6Al4V, le prestazioni dei filamenti di molibdeno sono inferiori rispetto a quelle degli elettrodi rivestiti per produttività e ampiezza della zona termicamente alterata. Mentre presentano migliori prestazioni per quanto riguarda l'usura [34].

1.4 Parametri di processo

I principali indici di performance del processo di elettroerosione a filo sono:

- Rugosità superficiale (SR)
- Larghezza di Taglio (KW)
- Material Removal Rate (MRR)
- Usura dell'elettrodo (TWR)

Si può agire su questi indici e quindi sul risultato della lavorazione agendo su dei parametri di processo che possono essere divisi in parametri elettrici e parametri non elettrici [26].

1.4.1 Parametri Elettrici

I parametri elettrici hanno il principale scopo di gestire la potenza della scarica elettrica, il processo di ionizzazione e la stabilità del processo.

La potenza erogabile da una singola scarica può essere mediante l'equazione (1):

$$E = \int_0^{T_{on}} V(t) \cdot I(t)\ dt \tag{1}$$

Se si tratta di generatore di scariche statico può essere semplificata e può essere calcolata mediante l'equazione (2) [35]:

$$E = V \cdot I \cdot T_{on} \tag{2}$$

Se invece il generatore si basa su un circuito a rilassamento allora la precedente relazione è ancora utilizzabile, ma poiché non è possibile controllare separatamente la corrente elettrica e la durata della scarica, le due saranno vincolate e perciò si può utilizzare l'equazione (3):

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \tag{3}$$

Dato che nel processo di WEDM i generatori statici sono largamente diffusi mentre i generatori basati sul classico circuito a rilassamento sono oggi poco diffusi e trovano maggiormente applicazione nel processo di µ-WEDM, ci si concentrerà sui primi e quindi sull'equazione (2). Risulta subito chiaro che i principali parametri elettrici che permettono di gestire la quantità di energia che si scarica sul componente sono:

- T_{on} [µs]: Intervallo di tempo durante il quale avviene la scarica elettrica, misurato dal momento in cui avviene la ionizzazione del dielettrico.
- I [A]: Intensità di corrente che fluisce tra i due elettrodi durante la scarica elettrica.
- V [V]: Valore di tensione che si ha durante la scarica elettrica.

Da ciò si può affermare che aumentando o diminuendo i valori di questi parametri si possa andare ad aumentare o ridurre l'energia delle scariche elettriche e quindi regolare la quantità di materiale che si vuole erodere. Grazie a questo è quindi possibile effettuare dei tagli di finitura, caratterizzati da una bassa energia di scarica, e dei tagli di sgrossatura caratterizzati da elevate energia di scarica e quantità di materiale eroso maggiori, se confrontate con i primi.

Occorre però fare una precisazione riguardo il ruolo della tensione, sebbene essa figuri all'interno dell'equazione (2) e quindi il suo valore possa influire sull'energia delle scariche, essa ha anche lo scopo di stabilizzare il processo e la lavorazione. Come si è detto nel paragrafo 1.3, il valore della tensione durante il processo passa da un valore più alto noto come *open circuit voltage* ad un valore minore, detto *machining voltage*, durante la fase di scarica elettrica. La tensione a seconda della fase del processo ha funzioni e valori diversi. Per questo motivo la tensione in alcune macchine viene divisa in due distinti parametri elettrici controllabili che sono: *Open circuit voltage* e *Servo Voltage* [SV]. Con il primo parametro si va ad impostare la tensione durante la fase di ionizzazione. Dato che la tensione durante il processo dipende dalla vicinanza tra i due elettrodi, fissato l'*Open circuit voltage* e facendo avanzare l'elettrodo, la dimensione del gap e quindi la resistenza risultante determina la tensione e la corrente che si avranno durante la scarica. La stabilità del processo delle macchine che presentano il controllo di questo solo parametro di tensione dipende dalla velocità di avanzamento perché è ciò che determina l'ampiezza della distanza tra gli elettrodi. Molte macchine però permettono un controllo più stabile della lavorazione monitorando e operando istante per istante sulla distanza tra i due elettrodi e quindi sulla velocità di avanzamento. Questo controllo è possibile tramite il *Servo Voltage* [SV] che sostanzialmente rappresenta un valore di tensione di riferimento. Impostato tale valore la macchina verifica istantaneamente che il valore del *machining voltage* sia pari al valore di riferimento, nel caso in cui non lo fosse la macchina opera nel seguente modo: se il valore di tensione è superiore a quello desiderato si va a ridurre la distanza tra i due elettrodi. Se si verifica il caso contrario, ovvero un valore di tensione inferiore a quello di riferimento, si allontanano i due elettrodi. Entrambe le operazioni di distanziamento hanno l'obbiettivo di riportare il valore di tensione a quello desiderato, garantendo la stabilità del processo.

Un'altra fase molto importante è quella che si verifica tra una scarica e l'altra. Durante questa fase, come detto nel paragrafo 1.3, si verifica l'evacuazione del materiale dalla zona di lavoro. Bisogna garantire che vengano espulsi il maggior numero possibile di detriti dalla zona di lavoro, per non andare a ridurre la stabilità della lavorazione o peggiorarne i risultati. Il parametro di riferimento per questa fase è il T_{off} [µs] che corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra una scarica e l'altra, la sua durata è dell'ordine dei microsecondi. Questo, sebbene non compaia nella formula dell'energia di scarica, è un parametro elettrico il cui scopo non è più quello di far variare l'energia delle scariche ma quello di garantire una corretta rimozione ed espulsione del materiale eroso dalla zona appena processata, oltre che permettere il raffreddamento degli elettrodi e della zona di lavoro.

1.4.2 Parametri non elettrici

La lavorazione può essere influenzata anche da parametri che non vanno a modificare l'intensità della scarica elettrica oppure le fasi del processo di rimozione del materiale ma che operino modificando le condizioni di lavoro dell'hardware della macchina. Questi parametri vanno ad agire principalmente sulle condizioni operative del filo e sulla fase di rimozione dei detriti prodotti in fase di lavorazione.

I parametri non elettrici che riguardano l'utensile, cioè il filo sono:

- Tensione del filo o *Wire Tension* [WT]
- Velocità del filo o Wire Feed Rate [WF]

Sebbene ad una prima occhiata i due parametri possano sembrare ininfluenti per quanto riguarda il processo di scarica e quindi la rimozione del materiale, questi hanno influenza su diversi indici di performance.

Sebbene il processo di WEDM non preveda il contatto tra utensile e pezzo in lavorazione e quindi non ci sia uno scambio di forze elevate dovute al loro contatto, ciò non significa che durante il processo il filo non sia soggetto a forze. Questo, infatti è sottoposto ad una forza causata principalmente dalle continue espansioni e contrazioni delle bolle che si formano attorno ai canali di scarica. Le misurazioni hanno evidenziato che il picco della forza a cui è sottoposto

l'elettrodo si raggiunge quando la bolla gassosa è in stato di compressione e decresce progressivamente durante l'espansione [36]. Sebbene sia stato dimostrato che la forza diminuisca all'aumentare del numero di scariche che si verificano nel gap a causa della presenza di numerose bolle gassose [37], il loro effetto non è trascurabile sul filo, data la sua limitata frequenza naturale, perciò durante il processo il filo vibra e questo può avere ripercussioni sulla precisione del processo. Per limitare l'ampiezza delle vibrazioni è possibile quindi aumentare la tensione agente sul filo che permette anche una maggiore precisione. Solitamente la tensione che si applica al filo è dell'ordine della decina di Newton, anche se il valore dipende dal sistema utilizzato dalla macchina.

L'altro parametro preso in esame è la velocità con cui il filo attraversa la zona di lavoro ovvero il Wire Feed Rate [WF]. Per dimostrare l'importanza di questa variabile bisogna ricordare che durante il processo di erosione del materiale sia l'elettrodo che il pezzo sono bombardati da elettroni e ioni ad alta velocità. Il filo avendo carica negativa è bombardato da ioni positivi, che sebbene causino un'erosione più limitata di quella che ha luogo sul pezzo, portano al suo consumo e possono provocarne la rottura. Perciò all'aumentare della velocità con cui questo viaggia durante il processo, si può diminuirne l'usura oppure aumentarla se si riduce la velocità. A seconda della classificazione vista al paragrafo 1.3.5 si avranno valori di velocità diversi, infatti se si utilizzano macchine ad elettrodo consumabile i valori di velocità del filo saranno più contenuti per evitare costi di lavorazione troppo elevati.

I parametri non elettrici che invece vanno ad operare sull'efficacia dell'espulsione dei detriti dalla zona di lavoro sono:

- Pressione del dielettrico o Dielectric Preessure (DP)
- Portata del dielettrico o Dielectric Flowrate (DF)

Il compito a cui essi assolvono è identico ma misurano due fattori distinti; il primo parametro indica la pressione con cui il fluido fuoriesce dagli ugelli che lo indirizzano verso la zona di lavoro. Il secondo parametro fa invece riferimento alla portata di fluido che attraversa gli ugelli nell'unità di tempo.

A seconda del sistema utilizzato si avranno campi di variazione e sistemi di controllo diversi per questi due parametri.

1.4.3 Indici di Performance

I parametri precedentemente esposti hanno effetto sulla lavorazione e modificandoli opportunamente è possibile ottenere diversi risultati di cui è possibile valutare l'efficienza delle varie combinazioni di parametri tramite degli appositi indici a seconda di ciò che si vuole ottenere. Questi possono anche essere utilizzati per poter determinare quale sia l'effetto della variazione di uno o più parametri e come questi influenzino la lavorazione, come si vedrà nel seguito del presente elaborato.

Rugosità Superficiale (SR)

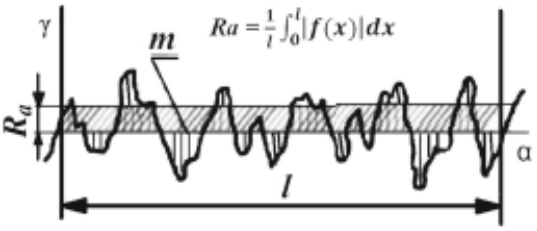

Figura 15 - Profilo di rugosità; Fonte: [38]

La rugosità superficiale è una delle possibili irregolarità lasciate sulla superficie del componente di cui è responsabile la lavorazione durante il processo di rimozione del materiale. Questa viene utilizzata come indice utile all'analisi della qualità superficiale o delle irregolarità e della loro distribuzione sul componente. Ogni processo produttivo è

caratterizzato da un intervallo di valori di rugosità a seconda delle combinazioni dei possibili valori dei parametri di processo, nel caso della WEDM è possibile raggiungere rugosità inferiori a 1µ. In realtà questo è un risultato indicativo poiché sono diverse le variabili che entrano in gioco nella determinazione della rugosità del componente finale. Dato che è possibile effettuare operazioni di finitura e di sgrossatura, il peso di questo indice di performance varia a seconda che ci si trovi nell'una o nell'altra condizione.

Larghezza di Taglio (KW)

Il *Kerf Width* corrisponde all'effettiva larghezza del taglio effettuato dalla macchina. Come è già stato detto nel paragrafo 1.3, il processo per poter operare necessita che ci sia distanza tra i due elettrodi altrimenti si avrebbe cortocircuito e di conseguenza non si avrebbe rimozione del materiale. Perciò la dimensione del taglio non corrisponde solo e soltanto alla dimensione del filo ma occorre tenere conto anche di questo *gap*. Questo basterebbe a determinare la dimensione del taglio se ci si trovasse in un caso ideale. Infatti, come precedentemente osservato, durante il processo di taglio il filo è soggetto a vibrazioni. Bisogna quindi tenere conto anche di questo fenomeno per determinare l'ampiezza reale e quindi la formula che ne permette il calcolo è quella riportata in equazione (4) [38]:

$$KW = d + 2 \cdot d' + 2 \cdot A \quad [mm] \tag{4}$$

Dove:

- d = diametro del filo [mm]
- d' = distanza tra i due elettrodi [mm]
- A = ampiezza della vibrazione laterale [mm]

Per avere una maggiore chiarezza in Figura 16 si riporta uno schema che raffigura quanto è stato appena esposto.

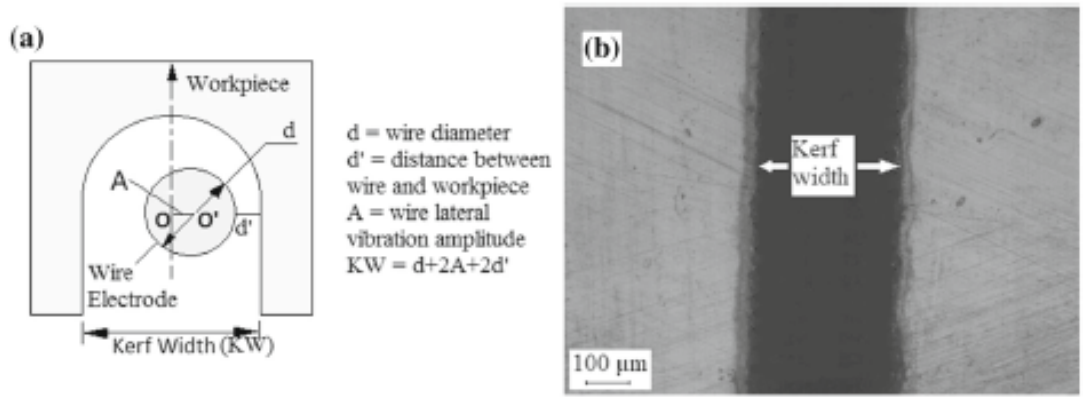

Figura 16 - Kerf width: a) Schema per il calcolo di KW; b) Vista al microscopio del KW dopo il taglio; Fonte: [38]

Bisogna sottolineare che il taglio non ha una dimensione fissa poiché sia la dimensione del *gap* che l'ampiezza delle vibrazioni sono due grandezze che variano in funzione dei parametri di processo impostati.

Material Removal Rate (MRR)

Il Material Removal Rate non è altro che il tasso di rimozione volumetrico che si ha in macchina come conseguenza di una determinata combinazione di parametri di processo. La relazione che si utilizza per la sua determinazione è quella riportata in equazione (5) [39]:

$$MRR = KW \cdot V_t \cdot h \quad [mm^3/min] \tag{5}$$

Dove:

- KW = larghezza del taglio [mm]
- V_t = velocità di taglio [mm/min]
- h = spessore [mm]

A sua volta la velocità di taglio è calcolata tramite equazione (6):

$$V_t = \frac{\text{lunghezza del taglio}}{\text{tempo impiegato}} \tag{6}$$

Poiché la larghezza del taglio deve essere determinata tramite apposite misurazioni, in molto casi si fa riferimento ad un tasso di rimozione che non è il MRR.

Si utilizza infatti un tasso di rimozione calcolato come riportato in equazione (7), dove i termini hanno il medesimo significato delle equazioni precedenti.

$$\text{Tasso rimozione} = V_t \cdot h \quad [\text{mm}^2/\text{min}] \tag{7}$$

Oppure si può fare riferimento alla velocità di taglio V_t come indice di performance se si vuole analizzare la velocità di avanzamento e quindi la produttività del processo.

Tool Wear Rate [TWR]

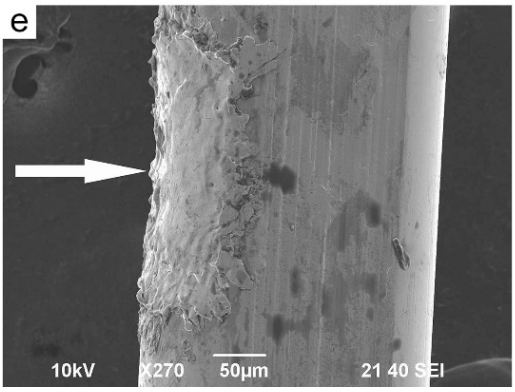

Figura 17 - Dettaglio usura del filo; Fonte: [40]

Durante il processo, a causa del bombardamento di ioni positivi, il filo si erode a sua volta indebolendosi e riducendo la sua sezione. Nell'ottica di avere un processo che sia produttivo e stabile è importante che non si verifichino rotture improvvise del filo, poiché la sua rottura e conseguente sostituzione obbliga al fermo della macchina con evidente perdita di produttività e allo stesso tempo potrebbe portare a scartare il componente che si stava lavorando a causa di eventuali danni superficiali. Per evitare che questa situazione si verifichi, è necessario mettere a punto una combinazione di parametri di processo che vada a minimizzare l'usura del filo mentre è in lavorazione e cerchi di garantire l'ottenimento delle caratteristiche predefinite del pezzo.
Solitamente l'usura del filo è misurata a fine taglio in termini di materiale perso durante il processo. Il filo viene infatti pesato e si determina il grado di usura del filo mediante l'equazione (8) [41]:

$$\text{TWR} = \frac{\text{WWL}}{\text{IWW}} \tag{8}$$

Dove:

- WWL = peso del filo a fine lavorazione
- IWW = peso iniziale del filo

A seconda dei parametri di processo varia la quantità di materiale perso durante la lavorazione.

1.5 Review dei parametri di processo

In questo paragrafo verranno presentati gli effetti dei parametri di processo sui vari indici di performance che sono stati rinvenuti in letteratura, oltre che l'integrazione tra i processi di WEDM e Additive Manufacturing che è il soggetto dell'analisi di questa tesi.

1.5.1 Effetti su MRR e SR

In letteratura sono presenti molte pubblicazioni che indagano l'influenza dei parametri e le variazioni sugli indici di performance introdotte da variazioni di questi, da queste è stato possibile notare una linea comune riguardo a molti parametri nonostante siano stati utilizzati diversi materiali, provini e macchine.
Infatti, secondo diverse fonti, aumentando l'energia di scarica agendo sia sulla corrente (I) che sulla durata della scarica elettrica (T_{on}) a parità di *machining voltage*, si vanno ad aumentare sia il MRR che la rugosità della superficie. Mentre utilizzando dei valori ridotti dei due parametri si riduce l'energia di scarica e si ottengono un MRR ridotto ma anche una rugosità superficiale ridotta. Questo è dovuto dal fatto che elevate energie di scarica producono crateri maggiori e quindi un alto tasso di asportazione del materiale ma una rugosità elevata a causa delle elevate dimensioni dei crateri. Le due combinazioni di T_{on} e I possono quindi essere identificate con la fase di sgrossatura, caratterizzata da tempi di scarica elevati e correnti elevate, e la fase di finitura, caratterizzata da durate brevi e valori di corrente ridotti. Han et al. hanno approfondito maggiormente il fenomeno di asportazione del materiale e di formazione dei crateri su provini realizzati in Cr12, individuando così due ulteriori modalità con cui è possibile effettuare una scarica dal medesimo contenuto energetico. La prima modalità consiste in durante di scarica elevate e valori di corrente limitati, la seconda invece è caratterizzata da durate ridotte e intensità di corrente elevata. Si è osservato che la seconda modalità permette di ottenere dei valori di rugosità minori e MRR rispetto alla prima. Ciò è dovuto dal fatto che i canali di scarica, nel secondo caso, sono più stretti e di conseguenza formano crateri di minori dimensioni. I crateri così formati sebbene più piccoli in diametro, presentano però una profondità maggiore rispetto al primo caso. Se si considera in aggiunta che T_{on} minori, a parità di T_{off} per entrambi i casi, permettono una frequenza di scarica più elevata e quindi una maggiore quantità di crateri prodotti in un dato intervallo di tempo, questo ha come prima conseguenza quella di ottenere un maggiore MRR. La differenza tra i crateri è molto marcata in caso di energia di scarica ridotta, quindi in finitura, ma tende ad annullarsi per energie elevate [42].

L'intervallo di tempo che intercorre tra due fasi di scarica, noto come T_{off}, è un ulteriore parametro elettrico che è stato soggetto ad analisi. Valori ridotti di questo parametro permettono di ottenere delle frequenze di scarica più elevate e produttività maggiore, poiché il tempo che intercorre tra due scariche elettriche è improduttivo in termini di asportazione di materiale. Alcuni studi [43], [44] hanno evidenziato che un aumento del valore di T_{off} corrisponde ad un decremento del MRR e delle velocità di taglio V_t. Sebbene durante questo intervallo di tempo non avvenga erosione di materiale, questa fase è importante per permettere la corretta fuoriuscita del materiale eroso dal *gap* e allo stesso tempo ridurre la temperatura dei due elettrodi e della zona di lavoro, mantenendo così il processo in condizioni stabili ed evitando che il materiale precedentemente eroso solidifichi sulla superficie del componente in lavorazione. A sostegno

di questo, Chalisgaonkar e Kumar effettuando un'analisi dell'influenza dei parametri di processo su titanio commercialmente puro, hanno rilevato sia che l'aumento di T_{off} va a ridurre la produttività della macchina ma allo stesso tempo consente di ottenere rugosità superficiali più ridotte [45]. In realtà si sono registrati andamenti discordanti da quanto appena descritto, in alcuni casi non è stato rilevato un andamento totalmente decrescente bensì la decrescita della rugosità superficiale legata all'aumento di T_{off} si è verificata solamente fino ad un certo valore, dopodiché ha ripreso ad aumentare [44], [46], [47]. In altri casi l'andamento di T_{off} e SR si è rivelato direttamente proporzionale, all'aumentare di uno si verifica l'aumento del secondo [34], [48]. Questo dimostra che oltre alla possibile influenza del materiale sul processo e della macchina, l'intervallo di valori considerati per lo studio di un parametro può comportare risultati andamenti diversi.

Si è dimostrato che, oltre ai parametri elettrici precedentemente esposti, anche il voltaggio influenza la lavorazione e di conseguenza può portare a risultati diversi in termini di MRR e rugosità superficiale a seconda dei valori che vengono impostati. Tosun et al. hanno indagato quali effetti potessero avere le variazioni dei parametri di processo sulla rugosità superficiale di un componente realizzato in AISI 4140. I parametri studiati sono: T_{on}, Open circuit voltage, WF e DP. I parametri fissi sono invece: la velocità di avanzamento del filo, WT e T_{off}. In questa occasione si è dimostrato che aumentare il valore di Open circuit voltage porta ad ottenere valori di rugosità più elevati a causa della maggiore energia di scarica [49]. Oltre all'Open circuit Voltage è stato anche indagato il ruolo del Servo Voltage [SV] all'interno del processo produttivo. Questa indagine è stata svolta in molti esperimenti su materiali diversi come: Inconel [50], Titanio e leghe [45], [51], [52], Acciaio Maraging [53] e altri. Tutti questi lavori hanno messo in evidenza una medesima influenza del parametro all'interno del processo, ovvero all'aumentare del SV si ha una progressiva diminuzione di MRR e rugosità superficiale. La giustificazione di tale tendenza è data dal fatto che aumentando il valore di SV, il *gap* tra i due elettrodi si allarga causando un aumento di resistenza e si riduce così l'intensità di corrente che viene trasmessa tramite la scarica. Diminuendo l'energia di scarica, si va a diminuire anche la quantità di materiale che si va ad erodere e quindi il MRR ma allo stesso tempo si creano crateri di dimensioni minori che portano all'ottenimento di rugosità superficiali più basse.

Non solo i parametri elettrici hanno effetto su MRR e SR, esperimenti condotti sulla velocità con cui si muove il filo all'interno della zona di lavoro, WF, hanno evidenziato che un aumento progressivo di questo fattore, mantenendo invariati tutti gli altri, permette di ottenere un maggiore MRR e una rugosità superficiale ridotta rispetto al caso in cui fosse mantenuto ad un livello basso. Oltre agli effetti su MRR e SR, l'aumento di WF produce anche un aumento della larghezza di taglio [54].

Gli altri parametri non elettrici che vanno ad influenzare i due indici di performance sono: la tensione del filo, la pressione e la portata del dielettrico. La tensione del filo, WT, è un parametro che influenza specialmente la rugosità superficiale. Aumentando la tensione agente su filo è possibile andare a limitare l'ampiezza delle vibrazioni che hanno luogo durante il processo e quindi avere una superficie più regolare e una rugosità ridotta. Oltre a questo, è stato però anche rinvenuto che l'aumento di WT possa portare anche ad un aumento di MRR [55], [56]. Pressione e portata del dielettrico contribuiscono a mantenere libera da detriti la zona di lavoro, aumentandole è possibile quindi ridurre la rugosità superficiale ed aumentare MRR. Se però vengono portate ad un valore eccessivo, quello che si ottiene è invece un processo instabile con riduzione di velocitò di taglio.

1.5.2 Effetti su KW

Conoscere quali siano gli effetti dei parametri di processo sulla larghezza del taglio è fondamentale nei casi in cui si voglia andare a massimizzare la precisione della macchina, oppure per avere una misurazione precisa del MRR del processo.

Come si è visto nell'equazione riguardante la larghezza del taglio, questa dipende da due grandezze variabili che sono: l'ampiezza delle vibrazioni del filo e il *gap* tra i due elettrodi.

Lo studio delle interazioni dell'interazione dei parametri e della vibrazione del filo durante il processo ha rivelato che gli spostamenti del filo e la sua deflessione e deformazione sono causati dall'elevata quantità di calore che si genera dalle scariche elettriche che è dovuta da una combinazione ed interazione tra la tensione del filo e T_{on}, T_{off} e la corrente di scarica [57].

Venkata Rao et al. hanno studiato e approfondito il fenomeno che causa la vibrazione del filo durante il processo e la sua interazione con i parametri di processo, proponendo un modello che descrivesse il movimento del filo all'interno del *gap* considerando la vibrazione in due direzioni. In Figura 18 si riporta una schematizzazione della cinematica del filo durante il processo.

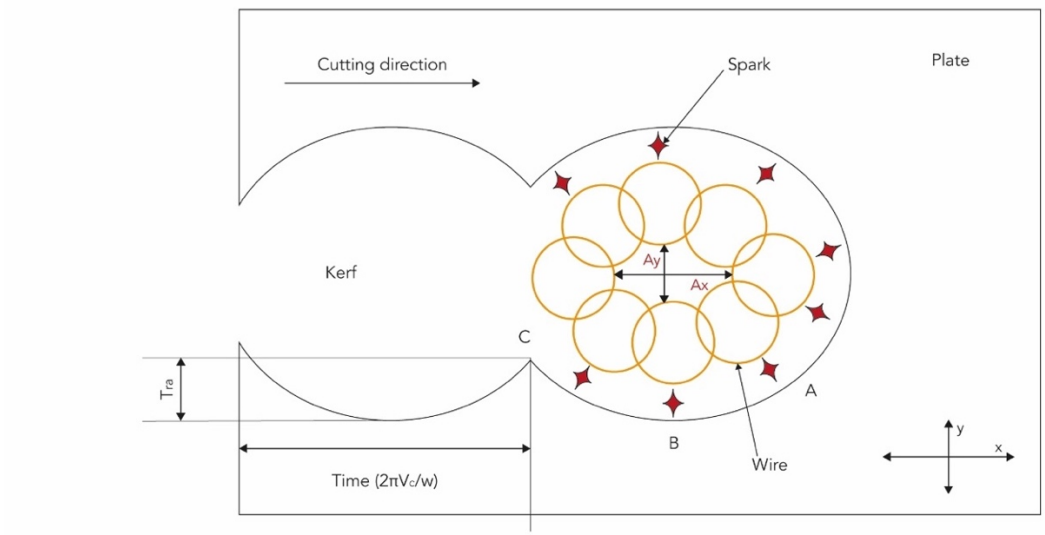

Figura 18 - Schema di vibrazione del filo; Fonte: modificato da [58]

L'equazione (9) descrive la situazione presentata in Figura 18:

$$KW(t)=2\cdot A_y\cdot \sin\left(2\pi f_y t\right)+\sqrt{Re^2+\left(A_x\cdot \sin\left(2\pi f_y t\right)^2\right)} \tag{9}$$

Dove A e f rappresentano l'ampiezza e la frequenza della vibrazione nella direzione x o y a seconda del pedice utilizzato mentre Re corrisponde al raggio dell'elettrodo. Dagli esperimenti condotti si è individuato che i parametri più significativi che agiscono sull'ampiezza della vibrazione sono: la corrente, la durata della scarica elettrica e la tensione del filo. In questo studio non è stata presa in considerazione la tensione. Elevate ampiezze di vibrazione, causate da parametri di processo che comportano elevate energie di scarica, generano una larghezza di taglio maggiore. Il parametro che limita l'ampiezza di vibrazione è la tensione del filo, infatti man mano che aumenta si registrano ampiezze di vibrazione ridotte [58].

La tensione influenza anch'essa la larghezza del taglio, poiché valori elevati di SV o Open circuit voltage determinano una maggiore distanza maggiore tra i due elettrodi e di conseguenza una maggiore larghezza. Inoltre è stato confermato

il ruolo dell'energia di scarica, poiché al crescere della durata della scarica e della corrente si è registrato un aumento del KW [59]–[61].

Oltre agli effetti dei parametri appena esposti anche la pressione e la portata del dielettrico possono avere effetto sulla larghezza di taglio. Infatti, se vengono utilizzati valori troppo elevati innescano vibrazioni del filo e ne causano la sua deflessione, allargando così il taglio soprattutto nel caso in cui sul filo agiscono tensioni limitate [62]. Anche il WF ha effetto sul taglio, più la velocità è alta e più la larghezza aumenta.

1.5.3 Effetti su TWR e rottura elettrodo

Kumar et al. hanno misurato e studiato l'effetto che i parametri di processo hanno sull'usura dell'elettrodo. Nello specifico hanno indagato l'effetto di T_{on}, T_{off}, I, SV, WF e WT. Dalle loro analisi è stato ottenuto che il principale fattore che influisce sull'usura dell'elettrodo è l'energia di scarica, nello specifico adottando elevati valori di T_{on} e I si va ad aumentare la temperatura nel *gap*, che contribuisce all'indebolimento del filo, e si vanno ad aumentare il numero di crateri che si formano sul filo per unità di lunghezza. La profondità di questi crateri aumenta con l'aumento dell'energia di scarica. Invece valori elevati di SV e WF vanno a mitigare l'usura sull'utensile [41]. Tosun e Cogun hanno condotto uno studio simile al precedente ma considerando dei parametri di processo differenti. Si è indagata l'influenza di T_{on}, *Open circuit voltage*, DP e WF. Gli altri parametri, come la velocità di avanzamento sono stati mantenuti fissi. I risultati ottenuti hanno evidenziato che il parametro più significativo è stato la tensione, seguita dalla corrente di scarica. Il risultato è coerente con il precedente poiché con la velocità di avanzamento fissa, la tensione è il termine che influisce maggiormente sull'energia di scarica [63].

Oltre all'usura dell'elettrodo, in alcuni studi è stato dimostrato che i parametri di processo giocano un ruolo importante anche nella frequenza con cui si verifica la rottura del filo durante il processo. Come si può ben immaginare, i parametri che causano una maggiore usura sono anche responsabili di aumentare la frequenza con cui si verifica il fallimento dell'elettrodo durante il processo. Quindi i all'aumentare dei parametri che producono un aumento dell'energia di scarica si ha un aumento del numero di rotture. All'aumentare di T_{off}, SV e WF si riducono i rischi di fallimento dell'elettrodo poiché essi vanno a stabilizzare la lavorazione. Si è rilevato sperimentalmente che la tensione agente sul filo ha un importante ruolo nella facilità con cui si rompe il filo [64].

Il ruolo della tensione del filo e delle motivazioni per cui si verifica la rottura dell'elettrodo è stato approfondito da Pramanik e Basak. Si è evidenziato che durante il processo la forma e la morfologia della superficie del filo cambia a causa dell'elevata temperatura, della tensione agente sul filo e dell'erosione del materiale. La rottura del filo è associata nella maggior parte dei casi all'elevata presenza di detriti nel *gap*, ad elevate tensioni agenti sul filo e da durate di scarica sostenute. Il motivo per cui si era precedentemente osservato una diminuzione dell'usura e della frequenza di rottura dell'elettrodo all'aumentare del T_{off} è il seguente: i detriti presenti nel *gap*, che sono particelle elettricamente conduttive, favorisco la formazione di scariche tra loro e il filo oltre a quelle che già si verificano tra i due elettrodi. Queste scariche portano all'aumento localizzato della temperatura del filo e lo indeboliscono, oltre a formare un cratere. Se il filo è sottoposto a tensioni sufficientemente elevate, lo sforzo che si genera localmente può superare la resistenza del materiale e di conseguenza si verifica la sua rottura. In condizioni del *gap* particolarmente sfavorevoli le scariche possono avere luogo anche solo tra filo e particelle e non sul pezzo in lavorazione, creando così cortocircuito. Oltre alle ragioni viste in precedenza, elevate energie di scarica facilitano la rottura del filo perché aumentano la presenza di detriti all'interno del *gap*. Infine, è stato evidenziato un meccanismo di rottura simile al fenomeno della strizione. Il meccanismo può essere diviso in tre fasi, nella prima il filo di sezione circolare inizia ad ovalizzarsi e il diametro nelle due direzioni è diverso, questo fenomeno è dovuto sia al calore sia alla movimentazione del filo lungo le due direzioni. Durante la seconda fase la sezione ovale inizia a diminuire progressivamente. Infine, nella terza fase il filo mentre riduce progressivamente la sezione e si allunga leggermente, questo succede quando la tensione all'interno del filo super la sua

resistenza allo snervamento. In questa fase la sezione si riduce notevolmente fino a ritornare ad avere una forma circolare. Infine, nel punto dove la sezione è minima, si verifica la rottura dell'elettrodo [65]. In Figura 19 si riporta uno schema del meccanismo appena esposto.

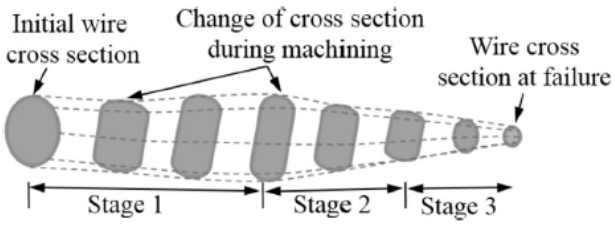

Figura 19 - Processo di rottura del filo; Fonte: [65]

1.5.4 Interazioni e proprietà dei materiali

Sebbene la variazione di un parametro produca un effetto sulla lavorazione più o meno significativa, l'interazione di due o più parametri che originariamente potrebbero sembrare poco influenti, può produrre un effetto più importante dell'effetto della variazione del singolo parametro. Aggarwal et al. durante le prove sperimentali hanno riportato le interazioni tra i vari parametri sia per quanto riguarda la velocità di taglio sia per la rugosità superficiale. Le interazioni analizzate nonché quelle più significative sono quelle che intercorrono tra T_{on}- T_{off}, T_{on}- I, T_{on}- SV, T_{off} - SV e I – SV. L'interazione più significativa sia per MRR che per SR è quella che intercorre tra T_{on}- SV e questa sottolinea, nel caso del MRR, che al crescere del valore di SV si verifica una diminuzione di velocità di taglio, ma questa decrescita diventa più importante più aumenta il valore di T_{on}. Nel caso della rugosità superficiale l'interazione indica che al diminuire del SV si ha un aumento della rugosità superficiale e questo aumento diventa sempre più significativo più aumenta il valore del T_{on} [66].

A seconda dei parametri che si considerano per calcolare i loro effetti sull'indice di performance si hanno diverse interazioni che possono essere più o meno significative. Per quanto riguarda il MRR, rugosità superficiale e KW sono state individuate delle interazioni tra I - T_{on} e tra I - DF che hanno una notevole influenza sul risultato ottenibile dalla lavorazione [61]. Altre interazioni possono essere trovate a seconda dei parametri e delle condizioni di lavoro in cui si effettua la lavorazione. Ovviamente non tutte le interazioni sono significative in ugual modo oppure, anche se sono significative, possono avere un impatto limitato sul processo. Per questo motivo, è bene analizzare l'influenza delle interazioni prima di complicare il modello del processo per tenere conto dei loro effetti.

Non solo le combinazioni dei parametri e le loro possibili interazioni ma anche lo spessore e il materiale del componente in lavorazione possono influenzare più o meno significativamente il risultato del processo e quindi gli indici di performance. Infatti, studi comprativi eseguiti su due o più materiali hanno individuato che l'effetto dei parametri di processo e la loro importanza è legata anche al materiale in lavorazione. Nello specifico Roque Calvo et al. hanno studiato l'effetto dei parametri di processo sulla rugosità superficiale sia su Al 6082 che su AISI M42. I risultati hanno evidenziato che nel caso dell'alluminio i parametri più importanti sono la corrente, T_{on} e T_{off}. Mentre invece per l'AISI M42 la corrente non è più il parametro più importante, al suo posto la tensione ricopre un ruolo decisivo nella determinazione della rugosità superficiale [47]. In aggiunta è stato rilevato che la rigidità, intesa come modulo elastico, del materiale processato influisce anche sulla rugosità ottenibile, al crescere di questa si ottengono superfici con rugosità minori e più uniformi. Bisogna precisare che l'analisi è stata effettuata considerando i medesimi parametri di processo per entrambi i materiali. Choudhuri et al., analizzando l'influenza dei parametri sulla lavorazione, hanno approfondito quali siano le cause delle differenze tra i diversi materiali sottoposti ai medesimi parametri di processo. Lo studio

condotto su SS 316, M42 e H21 ha evidenziato come le differenze dei risultati siano giustificabili dalle diverse proprietà fisiche dei materiali. I materiali sono stati processati in tre condizioni di energia di scarica: alta, intermedia, bassa. Si è evidenziato che, soprattutto ad elevate energie di scarica, l'H21 è il materiale che permette di ottenere una maggiore velocità di taglio e MRR. Questo è stato giustificato dal fatto che l'elevata conducibilità termica e la presenza del tungsteno permettono una rimozione del materiale più rapida. Un andamento simile è stato ritrovato anche per il KW. Per la rugosità superficiale, l'H21 presenta quella più elevata per energie di scarica elevate ed intermedie mentre a basse energie presenta la rugosità superficiale minore. Questo viene giustificato dal fatto che l'elevata temperatura di fusione di questo materiale, a basse energie di scarica, limita la quantità di materiale eroso [38]. Infine, è stato riscontrato sperimentalmente e riconfermato da altri studi [44], [67] che materiali con una conducibilità termica maggiore presenteranno una zona termicamente alterata (HAZ) maggiore. Sebbene in questa pubblicazione si sostenga che il ruolo della conducibilità termica è quello di promuovere la rimozione del materiale, in letteratura è oggetto di controversie. Secondo altre fonti infatti [7], [68], la proprietà fisica che promuove principalmente la velocità del processo e quindi la velocità di taglio è la conducibilità elettrica del materiale mentre la conducibilità termica presenta un'influenza negativa in termini di MRR o velocità di taglio. Oltre alla conducibilità elettrica, un parametro che va a modificare le prestazioni della macchina sono i trattamenti termici. Nella lavorazione di DC53 e STD11, è stato rinvenuto che, oltre alla conducibilità elettrica, anche i trattamenti termici hanno effetto sulla lavorazione [69], [70]. L'influenza dello spessore del componente lavorato su MRR e SR è stata dimostrata essere significativa, oltre ad aver trovato che anche il materiale di cui è realizzato il filo introduce delle variazioni sull'importanza degli effetti di determinati parametri sulla lavorazione [71].

1.5.5 WEDM e Additive Manufacturing

Data l'elevato numero di dati raccolti in letteratura riguardo l'analisi del processo e la sua ottimizzazione per materiali e componenti prodotti per via tradizionale, si è cercato di reperire dei dati riguardanti l'interazione tra WEDM e componenti prodotti tramite Additive Manufacturing. Si è riscontrato però che esistono pochi lavori che vadano ad analizzare la combinazione dei due processi, tra questi il più significativo indaga le differenze rinvenute nel processare tramite WEDM un provino di SS 316 a seconda della tecnologia produttiva. Secondo lo studio, la lavorazione procede più celermente nel caso il provino sia stato prodotto tramite Additive Manufacturing piuttosto che con processi convenzionali. Mentre per rugosità e per durezza superficiale gli andamenti sono simili [72]. Nonostante queste evidenze non viene indagata in maniera approfondita l'influenza dei parametri di processo né la motivazione per cui la lavorazione sembra essere più rapida. La motivazione di questa diversità è stata attribuita ad una differente microstruttura ma essa non è stata analizzata e non sono stati comparati i due valori di conducibilità elettrica, fattore che avrebbe potuto contribuire ad avere una rapidità maggiore.

Per questi motivi, nel seguito di questo elaborato si andrà ad analizzare la combinazione dei due processi (WEDM e Additive Manufacturing) approfondendo l'influenza dei singoli parametri e delle eventuali interazioni sulla lavorazione. Nello specifico si andrà a studiare l'interazione tra il processo di WEDM e i due processi additivi di L-PBF (Laser Powder Bed Fusion) e EBM (Electron Beam Melting), per andare a determinare se ci sono differenze tra i due.

2 Processo Sperimentale

In questo capitolo si esporrà la procedura seguita per la realizzazione degli esperimenti che permetteranno poi l'analisi degli effetti dei parametri di processo. Per fornire un quadro completo della metodologia sperimentale seguita, si presenteranno il macchinario utilizzato, i test effettuati per individuare l'intervallo d'interesse dei parametri, i provini realizzati in Ti-6Al-4V, la realizzazione del piano sperimentale e le procedure di misurazione. La procedura sperimentale è la medesima sia per i componenti realizzati tramite L-PBF (Laser Powder Bed Fusione) che EBM (Electron Beam Melting). Infatti, oltre ad indagare l'effetto dei parametri di processo, si vuole studiare se la diversa tecnica utilizzata per produrre il provino abbia effetto sul processo di elettroerosione.

2.1 Materiali ed attrezzature

2.1.1 Materiale e descrizione del provino

Il materiale con cui è stato realizzato il provino è la lega Ti-6Al-4V, che è un materiale molto diffuso per la realizzazione di componenti mediante tecnologie additive grazie alle sue proprietà meccaniche specifiche. Offre infatti elevate proprietà meccaniche ma possiede una densità ridotta. Sebbene la lega sia la stessa possono esserci piccole differenze a livello di composizione chimica a seconda della tecnologia additiva e dal produttore. La geometria del provino è stata pensata per poter velocizzare la procedura sperimentale e minimizzare il numero il tempo dedicato al suo bloccaggio. La geometria prodotta infatti permette di realizzare all'interno della stessa prova i tagli su tre diversi valori di spessore in maniera sequenziale. Essi sono formati da un profilo a gradino generato dall'unione di tre parallelepipedi, di cui spessore e larghezza coincidono con il valore del livello di spessore del piano sperimentale mentre la lunghezza di ogni parallelepipedo è pari a 15 mm. Sono stati realizzati due tipologie di provino poiché nel piano sperimentale gli si erano originariamente associati due valori di spessore: Low e High. Il primo possiede gli spessori 10, 20 e 30 mm disposti in maniera crescente, il secondo tipo invece parte da uno spessore di 40 mm e arriva allo spessore massimo di 60 mm. In realtà queste due tipologie di provini sono state realizzate solamente tramite Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), poiché i provini realizzati tramite EBM sono stati prodotti dopo aver modificato il piano sperimentale per i motivi che verranno esposti successivamente. In Figura 20 vengono riportati i provini realizzati tramite Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), in Figura 21 si riporta un confronto i provini realizzati tramite Electron Beam Melting (EBM) e i precedenti.

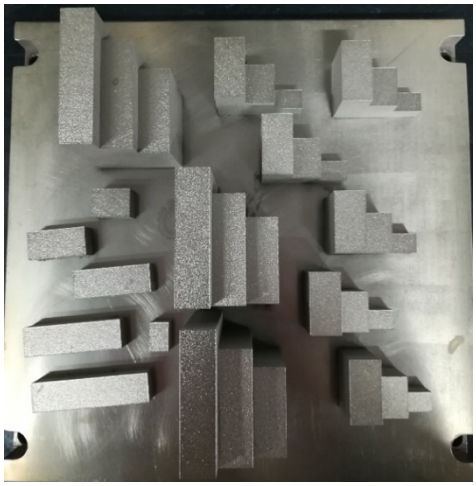

Figura 20 - Provini prodotti tramite L-PBF

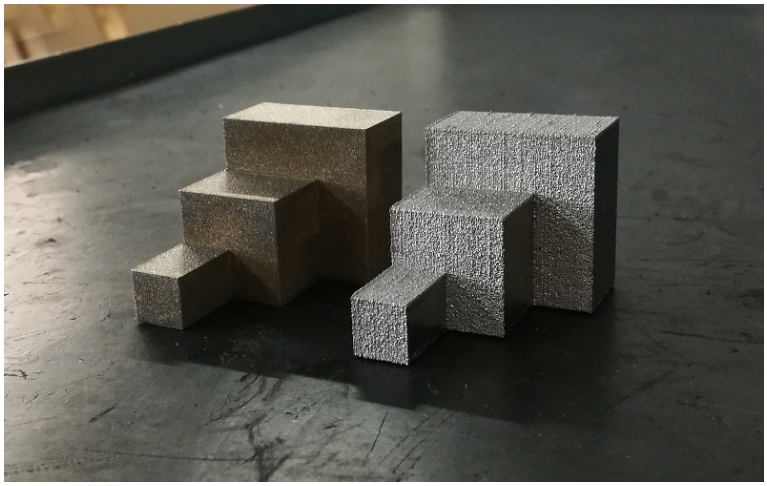

Figura 21 - Confronto provini L-PBF e EBM

2.1.2 WEDM

Il macchinario WEDM utilizzato è la BAOMA DK7732 prodotta dall'azienda cinese Suzhou Baoma Numerical Control Equipment Co. Ltd. La macchina fa parte di quelle che vengono definite *CNC high-speed feed wire cut machine.* Questa tipologia di macchine, a differenza di quelle più tradizionali, non ha un ricambio continuo del filo ma l'elettrodo utensile viene fatto passare più volte all'interno della zona di lavoro e per limitarne l'usura si adotta elevate velocità di alimentazione. Per la modalità con cui avviene la lavorazione non è possibile utilizzare filamenti di ottone o rivestiti con lo zinco dato che si consumano molto velocemente, al loro posto si utilizzano dei filamenti in molibdeno che minimizzano le rotture e hanno una maggiore durabilità. Il passaggio ripetuto del filo all'interno della zona di lavoro è conseguito per mezzo di un tamburo collegato ad un motore elettrico. Caricata una certa quantità di filo in macchina, il motore ruotando in un certo verso porterà il filo all'interno nella zona di lavoro. Arrivato al fine corsa, il motore invertirà il senso di rotazione e causerà il passaggio dello stesso filo all'interno della zona di lavoro ma in questo caso in verso opposto. Questo metodo dovrebbe limitare i costi operativi della macchina poiché si limita la quantità di filo utilizzato rispetto alla procedura tradizionale. In particolare, il costruttore riporta che la composizione del filo sia per il 99,5% Molibdeno e il rimanente lo 0,05% siano impurità dovute alla presenza di altri materiali. Le proprietà fisiche del materiale in questione sono le seguenti: temperatura di fusione circa pari a 2610 °C, resistenza elettrica pari a 52 nΩm, conducibilità termica pari a 135 $\frac{W}{mK}$ e una densità di 10,22 $\frac{g}{cm^2}$. La resistenza a trazione del materiale è superiore a quella dei filamenti in ottone e ottone rivestito di Zinco. Questa caratteristica, unita all'elevata temperatura di fusione del Molibdeno, permettono di avere un'usura limitata dell'elettrodo e quindi di riutilizzarlo più volte nel processo senza avere un rischio elevato di rottura.

La casa produttrice ha inserito la macchina nella categoria economica di *Stepper Control Wire Cut EDM.* Queste macchine offrono un compromesso tra prestazioni e costi, il controllo del processo per questo motivo è in anello aperto. Gli la movimentazione degli assi X-Y, posseduti dalla tavola di lavoro, è permessa da motori stepper. Inoltre, è possibile l'inclinazione degli assi U-V, tramite i quali è possibile modificare le angolazioni del filo. La movimentazione dell'asse Z è invece utile per allontanare o avvicinare gli ugelli di lavaggio, che introducono il fluido dielettrico all'interno della zona di lavoro.

I dati relativi alla macchina vengono riportati in Tabella 1.

Macchina	**DK7732**
Dimensione area di lavoro [mm²]	320x400 (X,Y)
Dimensione tavola di lavoro [mm²]	415x635 (X,Y)
Peso massimo caricabile [kg]	400
Peso della macchina [kg]	1700
Spessore massimo [mm]	500
Precisione dimensionale [mm]	≤0,015
Rugosità superficiale [µm]	Ra ≤ 2,5 (passata singola) Ra ≤ 1,5 (passata multipla)
Velocità massima di taglio	150 mm²/min
Dielettrico	Acqua deionizzata + BM2/BM4
Serbatoio del dielettrico [l]	100 l
Consumo di energia [KVA]	3
Diametro del filo [mm]	0.15-0.2

Tabella 1 – Dati macchina BAOMA DK7732; Fonte: [73]

Il macchinario, essendo ad architettura aperta, oltre alla struttura vera e propria possiede un controllore, denominato BMW-3000 e riportato in Figura 22. Quest'ultimo altro non è che un calcolatore separato dalla struttura della macchina munito di un'interfaccia utente, tramite quale è possibile il controllo della macchina e dei parametri di processo grazie il *BMXP Control System*. L'interfaccia utente è basata sul sistema operativo Windows XP dove sono installati un software di disegno Autocad, per permettere di disegnare i percorsi utensile più laboriosi, e ulteriore software chiamato Wire Cut EDM dove è possibile monitorare lo stato della lavorazione, inserire e/o modificare i parametri di processo e definire i percorsi utensile, che possono essere importati da CAD oppure si possono usare i template presenti sul software che permettono di realizzare percorsi più semplici come: linee, quadrati, rettangoli e profili a scalino. Tramite questo software è anche possibile consultare e utilizzare il database dei parametri di processo creato dal costruttore oppure creare il proprio.

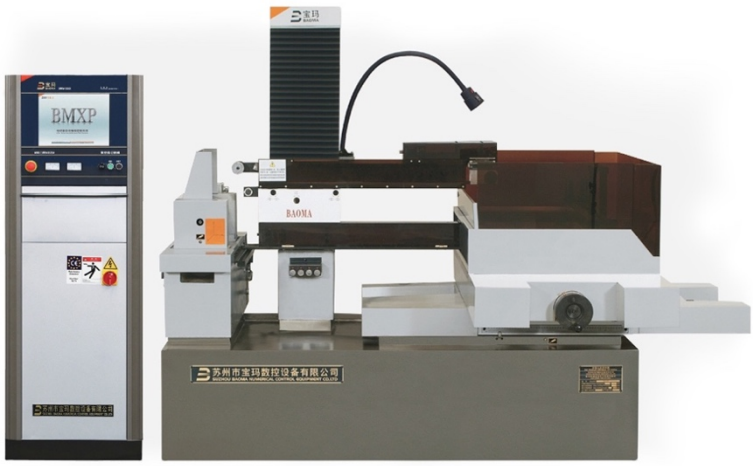

Figura 22 – Macchina BAOMA DK7732; Fonte: [73]

I parametri sui cui è possibile agire grazie al software di controllo del processo sono i seguenti:

- Cut Times: numero di passate del filo, può andare da 1 a 5.
- Allowance: distanza tra le varie passate, valore in millimetri.
- Pon: corrisponde al T_{on}, quindi regola la durata della scarica, si misura in microsecondi. Può variare da 0,5 a 250.
- Poff: corrisponde al T_{off}, e quindi all'intervallo di tempo tra le scariche. Ha una dipendenza moltiplicativa con il Pon e il suo valore dipende dalla costante impostata nel parametro, che può andare da 1 a 30. Il calcolo del Poff reale è quindi determinabile grazie all'equazione (10).

$$Poff_{reale} = Pon \cdot Poff + Pon \tag{10}$$

- GPon: gruppo di impulsi, da 1 a 30.
- GPoff: intervallo tra gruppi di impulsi, da 1 a 30.
- IP: intensità di corrente. Sono presenti sei livelli di intensità che dipendono dai sei transistor, ognuno dei quali permette il passaggio di 1 A di corrente. Perciò si può far variare l'intensità di corrente da 1 a 6 A.
- Wire: velocità del filo, organizzato su quattro livelli: 0,1,2 e 3. Dove 0 corrisponde alla velocità massima 11 m/min, mentre 3 alla velocità minima 5 m/min.
- Volt: valore di Open Circuit Voltage, può assumere due livelli: High (100 V) e Low (80 V).
- V-F: coefficiente di stabilità, aumentando il suo valore si va a limitare la velocità di avanzamento durante la lavorazione. Può variare da 0 a 250.
- Max speed: velocità di avanzamento massima che si può avere durante la lavorazione. Solitamente la velocità viene fatta variare in funzione del risultato di ogni scarica, se però il calcolo risulta errato e produce un valore di avanzamento così elevato da causare cortocircuito o instabilità, è possibile limitarne il valore con l'equazione (11).

$$\text{Asportazione in } \frac{\text{mm}^2}{\text{min}} = \frac{\text{K} \cdot 60}{1000 \cdot \text{Spessore}} \tag{11}$$

Dove K è la costante che si imposta in tale parametro, si possono immettere diversi valori ma se si imposta 0 o un valore eccessivamente elevato, ad esempio 300, la lavorazione procederà utilizzando la massima velocità di avanzamento per i parametri elettrici utilizzati.

- Offset: compensazione diametro filo, distanza tra filo e pezzo. Può variare da 0,05 a 0,15 millimetri.
- Workpiece Height: spessore del componente lavorato che può andare da 0,01 a 500 millimetri. In realtà questo non è un parametro regolabile in macchina ma è utile nel caso si volessero salvare i risultati all'interno della propria libreria dei parametri di processo.

Sebbene siano presenti diversi parametri, mancano alcuni di quelli riportati all'interno del capitolo 1. Nello specifico non è possibile controllare in maniera precisa la pressione e la portata del fluido dielettrico, poiché la regolazione avviene per mezzo di una valvola senza la possibilità di misurarne la portata, mentre la pressione rimane sempre nell'interno di 1 bar, senza poterla far variare in maniera sensibile. Oltre a ciò, non è possibile avere un controllo preciso della tensione del filo, infatti la quantità di filo caricato in macchina può influenzare tale grandezza. La macchina inoltre non possiede un sistema che permetta di misurare la tensione e quindi effettuare una regolazione precisa. In ultimo, la macchina non possiede il controllo adattativo del *gap*, perciò questa non opererà in maniera tale da mantenere il livello di tensione desiderato cioè il Servo Voltage (SV). La tensione che si avrà durante la lavorazione dipenderà dal livello di Open Circuit Voltage e dalla velocità di avanzamento, poiché da questa dipenderà la distanza tra filo e componente, quindi la resistenza del gap e come conseguenza anche il valore di intensità di corrente che si scaricherà sul componente.

2.1.3 Sistemi di AM per la produzione dei campioni

Come è stato anticipato in precedenza i provini necessari alla realizzazione del piano sperimentale vengono prodotti sia tramite le due tecnologie additive di L-PBF e EBM. In seguito, si presenteranno brevemente i processi produttivi e le macchine utilizzate per la realizzazione dei provini.

EBM

La costruzione del provino mediante EBM è stata affidato alla macchina A2X prodotta da Arcam. Questa presenta un volume di lavoro pari a 200 x 200 x 380 mm (x,y,z) e un fascio elettronico della potenza di 3kW. La struttura della macchina può essere divisa in due parti: superiormente si trova il cannone elettronico mentre inferiormente si trova la zona di lavoro. Gli elettroni vengono emessi da un filamento di tungsteno e vengono collimati ed accelerati fino a raggiungere velocità vanno da 0,1 a 0,4 volte la velocità della luce. Successivamente tramite due bobine, che hanno una funzione simile a delle lenti magnetiche, si controlla forma e dimensione del fascio elettronico. Si può controllare la dimensione del fascio fino ad una dimensione minima di 0,1 mm ed anche l'intensità di corrente. L'impatto degli elettroni sul letto di polvere sprigiona energia e calore utile a fondere insieme le particelle di polvere. Lo strato di polvere è controllato mediante una racla, la quale preleva la polvere dai contenitori e ne deposita la quantità corretta nella zona di lavoro. Lo spessore di strato può essere controllato attraverso la movimentazione verticale della piattaforma e può andare da 0,05 a 0,2 mm. Il processo avviene con la macchina in vuoto e i valori di pressione di gas residuo sono 10^{-3} Pa per la camera di lavoro e 10^{-5} Pa per il cannone elettronico. Questo evita che le molecole di gas vadano a deviare il fascio elettronico e la formazione di ossidi superficiali. Durante la lavorazione inoltre viene insufflato un gas inerte come Elio o Argon per prevenire la formazione di cariche elettrostatiche e garantire la stabilità termica del processo. Il fatto che il processo avvenga in vuoto rallenta notevolmente il processo di scambio termico e il tempo che è necessario attendere affinché si possa rimuovere del job dalla macchina. Il processo necessario ad ottenere la solidificazione di un singolo strato consiste di una fase di preriscaldamento dove si riscalda l'ambiente di costruzione e si determina la temperatura prima che il primo strato venga depositato. Dopodiché avviene la deposizione dello strato

di polvere e di effettua un ulteriore preriscaldamento che causa la sinterizzazione della polvere. In seguito, si ha la fase di fusione selettiva della sezione del componente da realizzare e infine, per limitare i gradienti termici e le tensioni residue, si effettua un post riscaldamento sulla sezione solidificata con fascio defocalizzato.

Figura 23 - Processo Electron Beam Melting (EBM): a) ARCAM A2X; b) Schema componenti e funzionamento del processo; Fonte: ARCAM

L-PBF

Il provino per lo studio della tecnologia L-PBF, nota anche come Selective Lase Melting (SLM), è stato realizzato mediante la macchina EOSINT M270 Dual Mode prodotta da EOS GmbH. È dotata di un volume di lavoro pari a 250 x 250 x 210 mm (x,y,z) e di un sistema ottico dotato di un laser Yb (Ytterbium) di potenza nominale pari a 200 W ed un sistema di lenti, tra cui le F-theta lens che impediscono la deformazione del raggio laser, che permettono al fascio di giungere in tutti i punti della zona di lavoro. La lavorazione avviene in ambiente inerte tramite il sufflaggio di Argon al fine di mantenere durante la costruzione livelli di ossigeno sotto lo 0,1% per evitare l'innesco di incendio durante l'utilizzo di polveri infiammabili e ridurre l'ossidazione della polvere. Il processo si basa sulla fusione e successiva solidificazione a partire da letto di polvere. Sono quindi presenti due contenitori: in uno viene caricata la polvere mentre nell'altro viene raccolta la polvere in eccesso durante la stratificazione dello strato. I contenitori e la piattaforma di costruzione sono movimentati da pistoni. Una lama distende la polvere sulla piattaforma di costruzione. A questo punto si verifica la fase di fusione selettiva, tramite il fascio laser e il sistema di specchi mobili si vanno a fondere selettivamente le sezioni dei componenti in produzione. Completata questa fase, la piattaforma di costruzione si abbassa mentre il contenitore della polvere si solleva di un uguale misura e la lama stende il nuovo strato. La piattaforma su cui avviene la costruzione può essere riscaldata fino ad una temperatura di 200°C al fine di ridurre le tensioni durante la costruzione essendo un processo a freddo al contrario del processo di EBM. A differenza del processo di EBM, infatti, non sono presenti fasi di preriscaldamento e postriscaldamento della polvere e quindi si registra la presenza di elevati gradienti termici ciclici, i quali introducono deformazioni e stress interni che in alcuni casi possono portare alla formazione di cricche all'interno del componente. Generalmente, in base al tipo di materiale utilizzato, si effettua un post-trattamento termico chiamato di stress-relieving atto a ridurre le tensioni interne prima del distacco del componente.

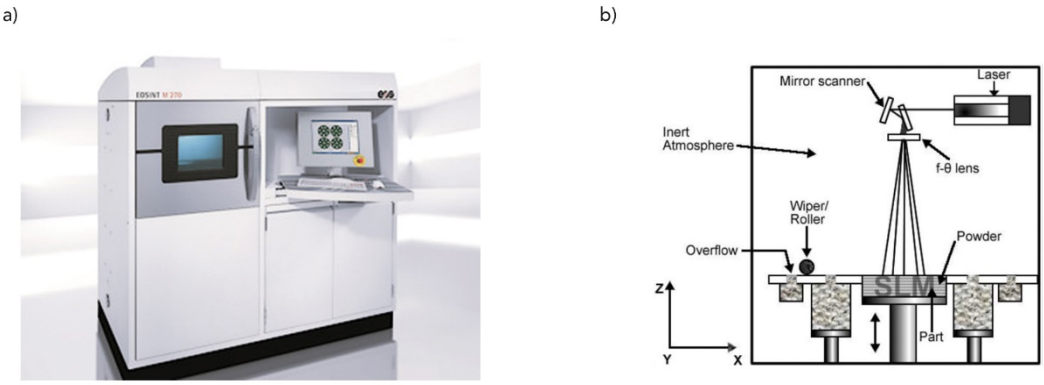

Figura 24 - Processo Laser Powder Bed Fusion (L-PBF): a) EOS M270; b) Schema componenti e funzionamento del processo; Fonte: EOS

2.1.4 Sistemi e procedura utilizzati per la misura

Il piano sperimentale che si vuole realizzare ha l'obiettivo di studiare l'influenza dei parametri di processo su due indici di performance, che sono rugosità superficiale (Ra) e velocità di taglio (V_t). Per fare questo è opportuno realizzare delle misurazioni delle grandezze in questione, in maniera tale da poterle analizzare insieme alle varie combinazioni dei parametri di processo e determinare quale sia l'effetto dei parametri selezionati.

Misurazione delle velocità di taglio V_t

Le misurazioni della velocità di taglio avvengono in maniera indiretta. Infatti, si misura il tempo necessario per completare la lavorazione e successivamente si determina la velocità di taglio per ogni determinato set di parametri di processo e spessore. Il tempo necessario al completamento della lavorazione viene riportato direttamente dalla macchina WEDM BAOMA DK7732 nell'interfaccia utente. Per il calcolo si utilizza l'equazione (6): si fa riferimento ad una lunghezza di taglio pari a 15 mm e i secondi vengono convertiti in minuti, dato che si vuole ottenere un valore la cui unità di misura sia espressa in $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$.

Misurazione della rugosità superficiale

Per rilevare il valore di rugosità superficiale prodotto dal processo nelle diverse condizioni operative è stato utilizzato un rugosimetro portatile (RTP 80 prodotta da Metrology Systems, dotato di drive unit TL90). Per effettuare la valutazione della rugosità superficiale del provino è stato necessario definire la cut-off length e la lunghezza di valutazione, ovvero il numero di cut-off length che si desidera considerare. La prima grandezza altro non è che la lunghezza per cui si valuta la rugosità superficiale e che può essere ritenuta indicativa per l'intera superficie considerata. Questa grandezza deve essere scelta accuratamente e ci sono normative che indicano quale valore sia consono adottare in funzione della rugosità che ci si aspetta, questa deve infatti essere sufficientemente lunga per fornire una rappresentazione statisticamente valida della superficie ma, allo stesso tempo, non deve essere eccessivamente lunga in maniera da evitare di misurare anche altri eventuali difetti superficiali. Solitamente per effettuare le misurazioni si sfruttano più cut-off e la lunghezza così generata viene detta lunghezza di valutazione. Nella procedura di misurazione utilizzata si è fatto riferimento ad una lunghezza di cut-off pari a 0,8 mm ed una lunghezza di valutazione o

campionamento pari a 5 cut-off, ovvero 4 mm. La norma di riferimento a cui si è fatto riferimento per la strumentazione e la procedura è la ISO 4288.

Le misurazioni sono state effettuate in due differenti direzioni, ovvero lungo la direzione di avanzamento del processo cioè l'asse x e la direzione ad esso ortogonale, l'asse y. Questo è stato fatto poiché nella direzione di avanzamento possono essere presenti dei rilievi causati all'avanzamento del filo e ai parametri di processo impostati. Le misurazioni sono state ripetute tre volte su ogni spessore del provino, per un totale di 486 valori di rugosità superficiale. In Figura 25 si riportano le direzioni lungo le quali sono state effettuate le misurazioni per lo spessore minimo ma sono state adottate le medesime direzioni e la medesima procedura per gli spessori più elevati.

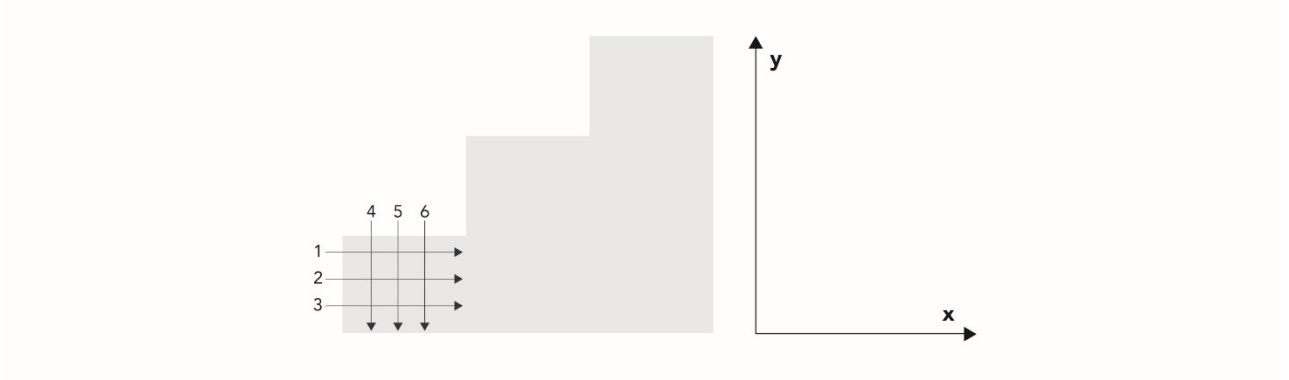

Figura 25 – Schema raffigurante la superficie ottenuta dopo il taglio del provino e le direzioni lungo le quali sono state effettuate le misurazioni di rugosità superficiale per lo spesso minimo

I dati di rugosità che verranno estratti dalla procedura di misurazione sono quelli riguardanti il valore di Ra, quindi la rugosità come il valore medio aritmetico degli scostamenti, presi in valore assoluto, del profilo reale rispetto alla linea media e il valore di Rz, ovvero la distanza tra due linee parallele alla linea media passanti mediamente fra i cinque picchi più alti e le cinque valli più basse, entro i limiti della lunghezza di base. Sebbene in fase di misurazione verranno estratti entrambi i valori, nella successiva fase di analisi si considererà solamente il valore di Ra. I dati di Rz avranno solo lo scopo di dare un'indicazione sull'irregolarità della superficie.

In Figura 26 si riporta un'immagine della strumentazione e della procedura usata durante l'acquisizione dei dati.

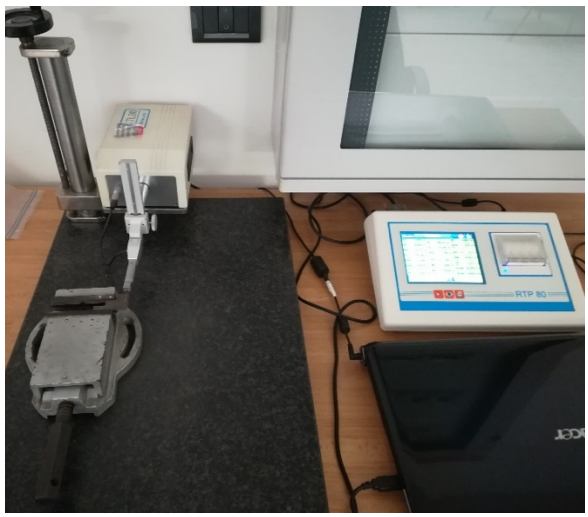

Figura 26 - Strumentazione di misura: Rugosimetro e sistema di bloccaggio del provino

Acquisizione delle immagini superficiali tramite stereomicroscopio

Oltre alle precedenti misurazioni, specialmente nella fase di determinazione del piano sperimentale, si è cercato di visualizzare la superficie ottenuta a fine della lavorazione tramite l'utilizzo di uno stereomicroscopio (S9i prodotto da Leica) collegato ad un PC, in maniera tale da poter acquisire e salvare le immagini. L'obiettivo di questa analisi è quella di ottenere delle immagini opportunamente ingrandite della superficie dei provini in maniera tale da poter evidenziare eventuali difetti e visualizzare le differenze superficiali presenti tra i diversi esperimenti. Per ottenere queste immagini è stato necessario porre il provino al di sotto dello strumento e regolare adeguatamente l'ingradimento e la messa a fuoco. A seconda della luce selezionata è possibile mettere in evidenza diverse imperfezioni o dettagli. Come è stato detto in precedenza, questa procedura è stata utile in fase di pianificazione del piano sperimentale soprattutto per identificare i livelli dei parametri da studiare e come questi andassero a modificare la topologia del provino.

In Figura 27 si riporta l'immagine riferita alla strumentazione utilizzate per effettuare le acquisizioni delle immagini.

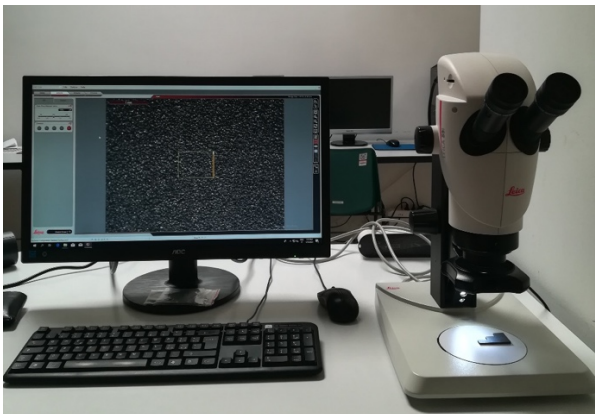

Figura 27 – Stereomicroscopio

2.2 Esperimenti preliminari

Prima di procedere con la realizzazione del piano sperimentale, è stato necessario scegliere i parametri di processo di cui studiare l'influenza e i relativi livelli. Per fare questo si è fatto riferimento ai lavori presenti in letteratura che hanno operato con Ti-6Al-4V o Titanio. Purtroppo, molti dei parametri riportati fanno riferimento a macchine che non prevedono il ricircolo del filo e quindi senza legame moltiplicativo tra T_{on} e T_{off}. Si è deciso quindi di effettuare dei test su componenti di scarto, prodotti sia tramite Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) ed Electron Beam Melting (EBM), per verificare che tali parametri siano di interesse anche per questo tipo di macchina ed eventualmente modificare l'intervallo di tali parametri, in maniera da renderli significativi o rendere la lavorazione stabile. Per fare questo si è anche fatto riferimento ai valori presenti in pubblicazioni che hanno utilizzato la macchina presentata nel paragrafo 2.1, sebbene in alcuni abbiano studiato l'influenza dei parametri su materiali diversi da quello di interesse [74], [75]. Questa procedura, oltre a permettere di selezionare i parametri di processo e i loro intervalli, permette anche di conoscere quale sia il funzionamento della macchina nel suo complesso.

Si procede innanzitutto ad individuare gli estremi inferiore e superiore dei parametri di processo. Per fare questo si va a selezionare il valore minimo di T_{on} che permette di far procedere la lavorazione e il limite superiore che permette che questa sia vantaggiosa e proceda in maniera stabile. Con la seguente combinazione di parametri di processo: T_{on}= 0,5 µs; T_{off} = 20; I = 2 A; V = Low, la lavorazione non procedeva ed è stato necessario aumentare il valore di durata del tempo di scarica fino ad un valore di 2 µs.

A questo punto si effettuano due tagli di prova per comparare i risultati che si ottengono utilizzando l'intervallo inferiore appena trovato e l'intervallo superiore, ricavato da letteratura. I due test e i relativi parametri sono i seguenti:

- TEST 01B: T_{on} = 2 µs; T_{off} = 10, I = 2 A, V = Low, Wire = 2

- TEST 02: T_{on} = 165 µs; T_{off} = 32, I = 6 A, V = Low, Wire = 2

I tagli vengono effettuati su un provino cilindrico realizzato mediante EBM di uno spessore pari a 7,26 mm e per una lunghezza di 10 mm. Oltre a valutare la rugosità superficiale e la velocità di taglio, si monitora anche il valore di tensione e di intensità di corrente media, utili per valutare l'efficienza e la stabilità della lavorazione come conseguenza dei parametri scelti. La corrente media viene valutata moltiplicando il valore di corrente scelto per un fattore correttivo, ovvero il duty cycle. In equazione (12) si riporta la modalità con cui si calcola il valore del duty cycle mentre in equazione (13) si riporta l'equazione per il calcolo della corrente media.

$$\text{Duty Cycle}\,(\%) = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \cdot 100 \tag{12}$$

$$\text{I Media}\,[\text{A}] = \frac{\text{Duty Cycle}\,(\%)}{100} \cdot \text{I}\,[\text{A}] \tag{13}$$

I valori di tensione di scarica e di intensità di corrente media vengono indicati dalla macchina per pezzo di due strumenti analogici, un voltmetro per la tensione e un amperometro per la rilevazione della corrente media. Nel caso del TEST 02 durante il processo si registrano delle oscillazioni molto evidenti di tensione e la corrente media risulta pari a 0,5 A, questo indica una stabilità della lavorazione abbastanza limitata. Questa condizione viene sottolineata anche analizzando la velocità di taglio e la rugosità superficiale, la procedura di misurazione di queste due grandezze verrà esposta in seguito.

Le velocità di taglio calcolate per i due esperimenti sono:

- TEST 01B: V_t=0,81 $\frac{mm}{min}$
- TEST 02: V_t=0,40 $\frac{mm}{min}$

Per il calcolo della velocità è stata utilizzata l'equazione (14)

$$\text{Velocità di taglio}\,\left[\frac{mm}{min}\right] = \frac{\text{Spessore} \cdot \text{Lunghezza di taglio}}{\text{Tempo impiegato}} \tag{14}$$

Sono state realizzate anche quattro misurazioni di rugosità per ogni esperimento lungo le direzioni riportate in Figura 28. Le linee rosse indicano le direzioni lungo le quali avvengono le acquisizioni dei dati.

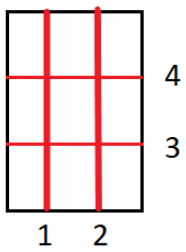

Figura 28 - Direzioni di misurazione della rugosità superficiale

Le medie delle misurazioni di rugosità superficiale eseguite sui provini per i due test valgono rispettivamente:

- TEST 01B: Ra=1,65 µm
- TEST 02: Ra = 17,67 µm

In Figura 29 si riporta un'immagine di confronto delle superfici ottenute con i diversi parametri di processo.

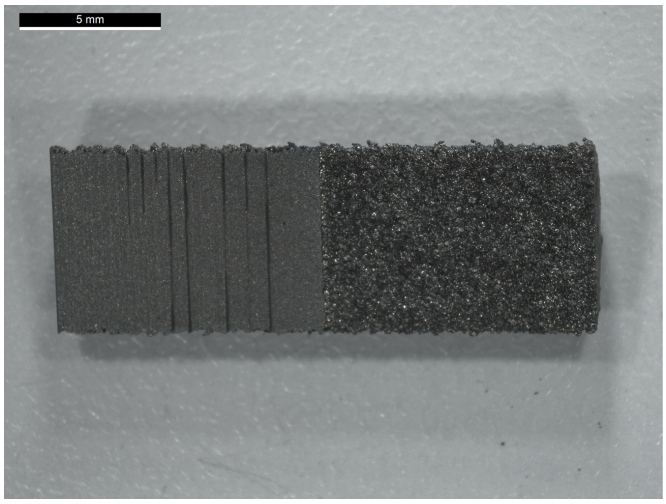

Figura 29 - Confronto tra TEST 01B e TEST 02 eseguito su un provino cilindrico di Ti6Al4V realizzato mediante processo EBM

Facendo attenzione all'immagine è possibile notare la presenza di striature di colore nero sulla superficie del pezzo, queste sono imputabili a problemi di scarica durante il processo dovuti all'avanzamento e all'inversione del senso di rotazione del filo. Se infatti l'avanzamento è eccessivamente ridotto per alcuni istanti di tempo, come quando si ha l'inversione del moto in cui si azzera l'avanzamento, si possono avere delle scariche anomale che producono delle incisioni sul componente lavorato. In Figura 30 si riporta un dettaglio delle striature appena discusse.

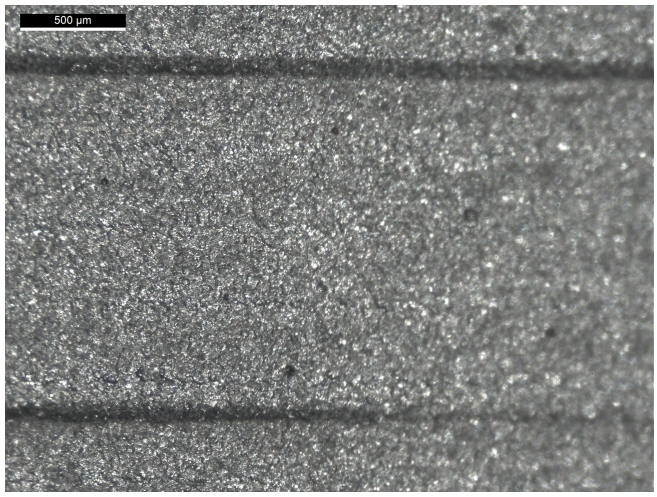

Figura 30 - Dettaglio delle striature superficiali rinvenute durante il TEST 01B

Analizzando i risultati degli indici di performance considerati è possibile notare che il TEST 02, che dovrebbe essere la combinazione di parametri più energetica, causa una rugosità maggiore ma a questo incremento non corrisponde un incremento di velocità di taglio. Questa tendenza può essere giustificata dal legame moltiplicativo tra i due fattori T_{on} e T_{off}, durate di scarica elevate causano quindi intervalli di tempo elevati tra le scariche e in questo caso accade anche se si riduce notevolmente il T_{off}. Per questo motivo si dovrà trovare un limite superiore che garantisca di avere una produttività ed una stabilità del processo adeguata.

Si effettuano quindi diverse prove atte a determinare la combinazione di parametri che funga da limite superiore. Grazie ai diversi esperimenti è stato possibile notare che la diminuzione del T_{off} rispetto al valore iniziale permette di aumentare la corrente media durante il processo, oltre che la sua produttività. Si è notato anche che la diminuzione del T_{on} permette di ottenere una maggiore stabilità del processo, questo prova ancora una volta quanto sia poco vantaggioso utilizzare elevati valori del parametro in questione. In particolare, è stato rinvenuto che utilizzare valori di durata di scarica maggiori di 40 µs vada a diminuire l'efficienza del processo nel caso del materiale in questione.

Dagli esperimenti è stato trovato che la condizione limite può essere identificata con la seguente combinazione di parametri di processo: T_{on} = 30 µs, T_{off} = 16 µs, I = 6 A, V = Low, Wire = 2. Per poter comparare i risultati ottenibili con il nuovo set di parametri con i test eseguiti in precedenza, si effettua un taglio di prova lungo 10 mm eseguito sul medesimo provino di spessore pari a 7,26 mm. Ci si riferisce a tale taglio di prova con il nome TEST 03.

Si riportano i risultati del test TEST 03 in termini di rugosità superficiale media, che è stata calcolata con il medesimo procedimento utilizzato per i TEST precedenti, e velocità di taglio:

- V_t =1,67 $\frac{mm}{min}$
- Ra = 14,27 µm

In Figura 31 si riporta la superficie ottenuta dopo il taglio, sulla quale è possibile distinguere delle linee riconducibili al filo e ad eventuali problemi di scarica e avanzamento riconducibili ad esso.

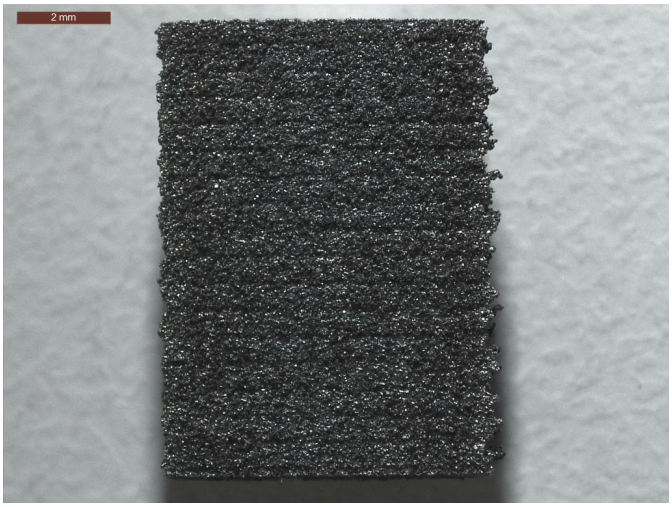

Figura 31 - Superficie TEST 03 eseguito su un provino cilindrico di Ti6Al4V realizzato mediante processo EBM

Per studiare l'effetto dello spessore del provino sulla lavorazione si effettua una prova con gli stessi parametri del TEST 03 ma su un provino di spessore maggiore, nello specifico 20 mm. Il taglio presenta sempre una lunghezza pari a 10 mm. I risultati sono quelli che ci si aspettava, ovvero una riduzione della velocità di taglio e della rugosità superficiale. Questo è giustificabile dal fatto che la stessa quantità di energia deve scaricarsi su una superficie maggiore e di conseguenza si eroderà meno materiale con una singola scarica. Questo test viene identificato con il nome TEST 04.

I risultati del test sono i seguenti:

- V_t = 0,90 $\frac{mm}{min}$
- Ra = 8,77 µm

In figura 25 si riporta la topografia dell'immagine e se comparata con la Figura 32 riferita al TEST 03 è possibile notare un'evidente differenza tra le due prove, soprattutto per la dimensione dei crateri.

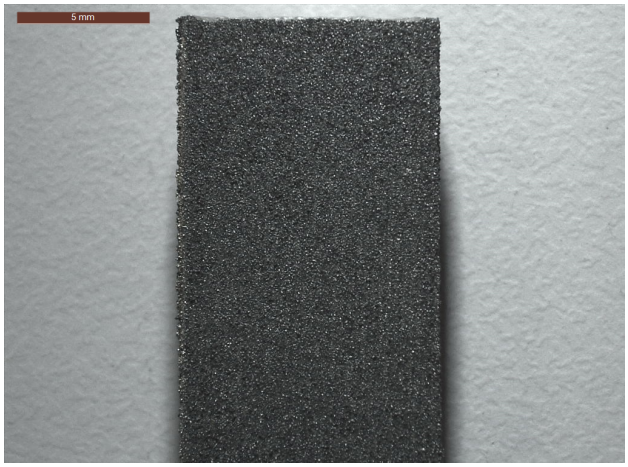

Figura 32 - Superficie TEST 04 eseguito su un provino cilindrico di Ti6Al4V realizzato mediante processo EBM

Tutti questi esperimenti sono stati effettuati utilizzando provini realizzati tramite la tecnologia di Electron Beam Melting (EBM) ma, dato che si vuole studiare se i diversi metodi di produzione hanno influenza sulla lavorazione di elettroerosione, si effettua un test con i medesimi parametri di processo utilizzati nel TEST 03 su un provino di spessore pari a 18,4 mm prodotto tramite Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). Il test così effettuato prende il nome di TEST 05.

I risultati di rugosità superficiale e velocità di taglio sono i seguenti:

- $V_t = 0{,}96\ \frac{mm}{min}$
- $Ra = 9{,}78\ \mu m$

La procedura utilizzata per effettuare le misurazioni e quindi la loro media, è identica a quella utilizzata nei test precedenti.

Osservando i risultati si può notare un aumento sia della rugosità superficiale sia della velocità di taglio, questo aumento però non è di grande entità e perciò risulta difficile poterlo attribuire unicamente al diverso processo additivo. Infatti, avrebbero potuto incidere il diverso spessore del provino oppure delle diverse condizioni durante la realizzazione dei due esperimenti. In ogni caso questa differenza non sembra essere sostanziale e così significativa e per questo motivo l'eventuale differenza dovrà essere indagata eseguendo un maggior numero di esperimenti.

In ultimo è stato indagato il legame tra le striature e/o incisioni superficiali presenti sui componenti e velocità di srotolamento del filo. La superficie ottenuta da TEST 01B e TEST 03 evidenziava la presenza delle incisioni in questione. Si è supposto che un modo possibile per eliminare la presenza di tali linee fosse quello di aumentare la velocità di rotazione del tamburo e di conseguenza la velocità posseduta dal filo. Per studiare la veridicità di tale affermazione sono stati effettuati dei test, dove per eliminare ogni fonte di variabilità di dovuti ad altri fattori, con i medesimi parametri di processo e spessori ma con diversa velocità del filo. Più precisamente, si è deciso di effettuare una prova con la velocità di taglio utilizzata nei precedenti esperimenti e per cui si è osservata la presenza di incisioni superficiali, cioè Wire = 2. L'altra prova invece utilizzerà la massima velocità del filo impostabile in macchina ovvero Wire = 0, che corrisponderebbe alla velocità di 11 m/min.

Per distinguere i due esperimenti si utilizzerà il nome di TEST 04 WF2 per il test a velocità più bassa, mentre di userà TEST 04 WF0 per quello che sfrutta una velocità elevata del filo.

I risultati di rugosità e velocità di taglio per il TEST 04 WF2 sono i seguenti:

- $V_t = 1\ \frac{mm}{min}$
- $Ra = 12{,}02\ \mu m$

I risultati per il TEST 04 WF0 sono invece i seguenti:

- $V_t = 0{,}86 \frac{mm}{min}$
- Ra = 11,79 µm

Osservando i risultati sembrerebbe che la condizione che garantisce una maggiore produttività è quella con una velocità del filo ridotta, in realtà non è così. Durante la lavorazione, per via della tecnologia utilizzata, si avranno diverse inversioni del senso di rotazioni del filo, il loro numero dipende non solo dalla velocità di rotazione del tamburo ma anche dalla lunghezza del filo. Ad ogni inversione però, a causa dell'inerzia dei motori, è necessario aspettare circa 2 s prima di poter l'instaurazione delle scariche elettriche e quindi dell'erosione del materiale. Per questo motivo i tempi improduttivi non dipendono più solo ed esclusivamente dal T_{off} ma anche dal tempo perso per le inversioni. Una relazione approssimata che possa quantificare i tempi improduttivi è quella riportata in equazione (15).

$$T_{improd} = n_{cicli\ di\ scarica} \cdot T_{off} + n_{inv} \cdot T_{inv} \tag{15}$$

Dove:

- $n_{cicli\ di\ scarica}$: numero di cicli di scarica effettuati durante la lavorazione
- n_{inv}: numero di inversioni del senso di rotazione del tamburo
- T_{inv}: tempo necessario per avere l'inversione del senso di rotazione

Poiché in questo caso il filo caricato in macchina non era sufficientemente lungo e la maggiore velocità del filo ha aumentato il numero di inversioni del senso di rotazione, causando un aumento dei tempi improduttivi e quindi del tempo necessario per effettuare la lavorazione. In realtà si è notato che se si adotta una velocità elevata si erode più materiale rispetto al caso di bassa velocità prima che si verifichi l'inversione del senso di rotazione. Installando quindi una quantità adeguata di filo in macchina si potrà utilizzare una velocità elevata e mantenere una produttività maggiore rispetto al caso di velocità ridotta, dato che durante il processo la macchina segnala un'efficienza di taglio maggiore.

Questi test hanno messo in luce un altro importante fattore, ovvero la lunghezza del filo. Infatti, soprattutto per lavorazioni molto lunghe che quindi presentano numerose inversioni del senso di rotazione del tamburo, utilizzando lunghezze diverse del filo alla medesima velocità portano a differenze di tempo considerevoli per la medesima lavorazione. La discrepanza tra i tempi può essere importante ed arrivare anche alla decina di minuti. Da queste osservazioni ne consegue che per mantenere stabili le performance dei tagli è necessario caricare sempre la stessa quantità del filo e mantenere invariata la posizione dei finecorsa della macchina.

Avendo ora una panoramica sul funzionamento della macchina e degli intervalli dei parametri di processo, è possibile procedere nella realizzazione del piano sperimentale.

2.3 Design of Experiment (DoE)

Il primo passo per poter realizzare un piano sperimentale valido e significativo, è necessario studiare il processo e averne una conoscenza adeguata. Questo permette di capire quali siano i parametri di processo che possono avere più impatto sul processo e allo stesso tempo, mediante prove preliminari come è stato fatto nel paragrafo 2.2, di determinare i livelli di interesse di questi. I processi infatti possono essere schematizzati come la trasformazione di una serie di ingressi (inputs) in uscite o risposte (outputs), dove gli ingressi possono essere rappresentati da parametri di processo, materiali, condizioni ambientali, macchine, etc., mentre le uscite o risposte del processo sono rappresentate da ciò che si ottiene a fine lavorazione o durante la lavorazione. In questo caso le risposte del sistema verranno fatte coincidere con gli indici di performance quindi: MRR, SR, TWR ed etc.

Durante la realizzazione di un piano sperimentale, quello che si fa è cambiare intenzionalmente il valore degli ingressi del processo in maniera tale da verificare le variazioni che essi introducono sulle risposte. Le informazioni così ottenute possono essere utilizzate per avere una maggiore comprensione egli effetti dei parametri di processo o per altri scopi, come l'ottimizzazione del processo.

In realtà mentre si realizzano le varie prove del piano sperimentale, le differenze non solo possono essere introdotte dai diversi valori dei parametri di processo ma anche da fattori esterni sui quali non si possiede il controllo. In questo caso risulta importante selezionare dei valori adeguati delle variabili controllabili, in maniera tale da andare a ridurre gli effetti delle variabili incontrollabili. In realtà risulta complicato identificare e misurare con precisione queste variabili su cui non è possibile avere il controllo. Solitamente ci si riferisce a tali variabili con il nome di fattori di disturbo. Dato che durante un processo si coinvolgono diverse strumentazioni o azioni che possono essere fattori di disturbo è necessario procedere in maniera tale da minimizzare l'effetto di tali disturbi. Nel processo di elettroerosione a filo gli eventuali fattori di disturbo possono essere identificati con: l'azione dell'operatore che può cambiare nel corso del tempo a causa della stanchezza, progressiva usura del filo, oscillazioni di velocità del filo, flusso del dielettrico non uniforme, arretramenti dell'elettrodo utensile rispetto al moto di avanzamento, eventuali cortocircuiti, cambiamento delle condizioni ambientali e variazioni del materiale. Questi costituiscono solo alcuni dei possibili fattori di disturbo e per andare a minimizzare il loro effetto la procedura più semplice è la randomizzazione dell'ordine di esecuzione delle prove. Se infatti se effettua correttamente questa operazione è possibile che i fattori di disturbo si compensino e riducano i loro effetti sulla lavorazione.

Il metodo utilizzato per la realizzazione del piano sperimentale è il piano o design fattoriale. Questo è uno dei metodi più semplici e largamente diffusi per la realizzazione di esperimenti, tramite il quale è possibile analizzare gli effetti che hanno i singoli parametri o le loro interazioni sulle risposte del processo. Esistono diverse varianti del piano sperimentale fattoriale, le più comuni sono: full factorial designs e fractional factorial design.

Un piano sperimentale realizzato tramite full factorial design ha l'obiettivo di testare nella creazione di una serie di esperimenti che coinvolga e permetta lo studio di tutte le possibili combinazioni dei livelli per tutti i fattori considerati. Solitamente il numero di livelli considerati sono due o tre. Indicando con la lettera L il numero di livelli considerati per ogni parametro, il totale di prove che è necessario effettuare per studiare l'effetto degli k parametri di processo considerati si calcola come L^k. Quindi a seconda che i livelli siano due o tre la relazione diventa rispettivamente 2^k o 3^k. Viene da sé che il numero delle prove può risultare molto elevato a seconda del numero di parametri di processo considerati. Per questo motivo si preferisce utilizzare questo tipo di piano sperimentale quando si vuole conoscere nel dettaglio e il numero dei fattori è ridotto, anche perché condurre un elevato numero di prove richiede tempi abbastanza lunghi e, a seconda del processo, può richiedere costi di realizzazioni elevati. Per limitare il numero di prove ma utilizzare comunque un piano fattoriale si può far ricorso alla seconda tipologia riportata, ovvero il fractional factorial design. Per risparmiare tempo, risorse e denaro, si assume quindi che alcune delle interazioni tra i fattori considerati oltre ad un determinato ordine siano poco significative. Questa assunzione permette di studiare l'effetto dei parametri di processo e delle interazioni fino all'ordine in cui si ritiene che esse siano significative eseguendo solamente una frazione del piano sperimentale completo generato per il dato numero di parametri e livelli. Per il calcolo del numero di prove che è necessario effettuare, non solo bisogna considerare il numero di livelli L e il numero di parametri k ma anche la frazione del piano completo che si vuole considerare. La relazione che si deve utilizzare è la seguente: $L^{(k-p)}$, dove $(\frac{1}{2})^p$ rappresenta la frazione di piano sperimentale che è necessario realizzare [76].

Dato che alcuni dei parametri di processo possono assumere solamente due livelli mentre altri possono assumere un numero arbitrario di livelli, si è proceduto in maniera differente poiché si vuole avere una buona comprensione degli effetti dei parametri di processo. Infatti, se si adottasse un piano sperimentale a due livelli per tutti i fattori, non saremmo in grado di trovare legami tra risposta ed ingresso di ordine maggiore rispetto a quello lineare. Per questo motivo si utilizza il software statistico Minitab (17.1), il quale permette di creare un piano sperimentale fattoriale nel quale i parametri possono avere tra loro un diverso numero di livelli, grazie alla funzione *General full factorial design.*

In Tabella 2 vengono riportati i parametri di processo considerati con il relativo numero di livelli e il loro valore.

Level:	Low	Mid	High
I [A]	2	4	6
Ton [µs]	10	20	30
Toff [µs]	5	10	15
Spessore[mm]	10 20 30		40 50 60
Voltage [V]	80		100

Tabella 2 – Parametri di processo e livelli

I parametri che invece vengono mantenuti invariati durante la lavorazione sono riportati in Tabella 3 e se ne riporta anche il rispettivo valore.

Fixed Parameters:	
Wire Feed Rate:	0
Max Speed:	0
Gon:	1
Goff:	0
VF:	10

Tabella 3- Parametri di processo fissi

Il Voltage non costituisce un vero e proprio parametro di processo ma si associa il valore minore quando si tagliano provini di spessore ridotto e il valore alto quando si lavora su provini di spessore maggiore. Questo perché si vuole andare a favorire la stabilità della lavorazione, cosa che potrebbe venire meno se il valore di tensione fosse troppo ridotto. Lo spessore presenta sei livelli poiché, come si può vedere anche in Tabella 2, ogni livello possiede tre livelli di spessore e ciò è dovuto alla geometria che è stata pensata per il provino, così da poter velocizzare la realizzazione degli esperimenti. Perciò ogni prova non consiste in un singolo taglio su un determinato spessore ma è composta da ben tre tagli, ognuno dei quali è realizzato su uno spessore diverso. Inoltre, dato l'elettroerosione in campo di Additive Manufacturing è utilizzata principalmente per il distacco dei componenti dalla piattaforma, si sono scelti valori di T_{on} e corrente che andassero a premiare la produttività piuttosto che la finitura superficiale. Si è scelto di mantenere la massima velocità del filo per evitare problemi di striature superficiali, per la maggiore efficienza di taglio e perché si facilità l'espulsione dei detriti dalla zona di lavoro, data la possibile presenza particelle di polvere aggiuntive dovute al processo produttivo.

Il piano sperimentale così generato possiede 54 esperimenti e lo stesso verrà utilizzato per i provini prodotti con le due diverse tecnologie additive.

Durante la realizzazione degli esperimenti si è notato che per spessori elevati e per combinazioni di parametri più energetici la lavorazione veniva interrotta e non era possibile farla proseguire in alcun modo. Dove ciò non accadeva, si osservava che il filo non avanzava in maniera continua bensì durante la lavorazione avvenivano diversi arretramenti dell'elettrodo. Questo rende il processo instabile e ne altera i risultati in termini di rugosità superficiale e velocità di taglio, dato che si verificano scariche elettriche su zone che sono state già lavorate. Dopo diverse ipotesi e prove è stato rinvenuto che la possibile causa dell'interruzione della lavorazione poteva essere la velocità di avanzamento calcolata dalla macchina. Si è notato infatti che per parametri più produttivi la velocità di avanzamento calcolata dalla macchina fosse troppo elevata per gli spessori in questione, tanto da causare l'affievolimento complessivo delle scariche elettriche e il cortocircuito tra filo e componente in lavorazione. Una velocità di avanzamento troppo elevata non permette di mantenere la distanza ottimale tra i due elettrodi, portando così il processo in condizioni di instabilità. Questo è dovuto dal fatto che si va ad alterare il tempo di ionizzazione, le scariche avvengono in modo instabile e non si erode una quantità sufficiente di materiale che porta poi al contatto tra i due elettrodi. Il costruttore riporta che la velocità di taglio venga calcolata dopo ogni scarica in base ai parametri immessi, al risultato ottenuto e alle condizioni del *gap* ma

tale calcolo può essere molto impreciso nel caso di condizioni molto instabili o di cattivo stato del *gap*. L'unico modo per far procedere la lavorazione è quello di andare a limitare la velocità di avanzamento della tavola, per fare questo si agisce sul parametro VF. Agendo su questo parametro la lavorazione è in grado di procedere anche per spessori molto elevati e con parametri molto energetici. Nasce però un problema, modificando VF si va ad introdurre una nuova variabile che non è possibile introdurre nel piano sperimentale. Infatti, nel caso della lega di Titanio utilizzata per un dato spessore e per una data combinazione dei parametri di processo esiste un valore limite al di sotto del quale la lavorazione non avviene. Se a parità di parametri di processo, si utilizzasse il valore di VF trovato per uno spessore maggiore su uno spessore minore si andrebbe ad alterare l'esito della lavorazione in termini di velocità del processo, rugosità superficiale e anche per la zona termicamente alterata, dato che l'elettrodo si muoverebbe più lentamente anche se in realtà la lavorazione potrebbe procedere più celermente. Il DoE originale viene per questo motivo modificato: si utilizzerà solamente il provino di valore Low, la tensione rimarrà fissata al valore di 80 V e i valori di corrente verranno modificati a causa in maniera tale da poter utilizzare un valore di VF pari a 10 senza che insorgano arretramenti evidenti dell'elettrodo o si interrompa la lavorazione. I parametri variabili dell'esperimento con i relativi livelli e valori sono riportati in Tabella 4. In Tabella 5 si riportano invece i parametri fissi.

Level:	Low	Mid	High
I [A]	2	3	4
Ton [µs]	10	20	30
Toff [µs]	5	10	15
Spessore[mm]	10	20	30

Tabella 4 – Parametri di processo e livelli

Fixed Parameters:	
Wire Feed Rate:	0
Max Speed:	0
Gon:	1
Goff:	0
VF:	10
Voltage [V]:	80

Tabella 5 – Parametri di processo fissi

Il DoE così generato comprende 27 esperimenti, il numero risulta ridotto poiché in ogni esperimento e quindi per ogni set di parametri di processo si effettuano tre tagli sequenziali dovuti alla geometria del provino. Il piano sperimentale è il medesimo per entrambe le tecnologie, per distinguerli le prove realizzate tramite Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) verranno precedute dalla lettera 'D', mentre le prove prodotte tramite Electron Beam Melting (EBM) verranno precedute dalla lettera 'E'.

2.5 Realizzazione degli esperimenti

La metodologia con la quale sono stati effettuati gli esperimenti è stata la medesima sia per quanto riguarda le due diverse tecnologie considerate sia per i diversi provini prodotti. La procedura utilizzata per una singola prova può essere riassunta schematicamente dalle seguenti operazioni:

- Caricamento e bloccaggio del componente in macchina sulle apposite guide
- Verifica del parallelismo guida-provino e filo-provino
- Impostare spessore desiderato movimentando la piattaforma lungo X
- Azzeramento degli assi X e Y
- Impostare il percorso utensile, in questo caso una retta di 15 mm
- Impostare i parametri di processo
- Esecuzione del taglio, riportato in Figura 33
- Memorizzazione del tempo della lavorazione
- Esecuzione del secondo taglio
- Memorizzazione del tempo della lavorazione
- Esecuzione del terzo taglio
- Memorizzazione del tempo della lavorazione

In ogni prova si effettuano quindi i tagli sui tre diversi livelli di spessore che vengono sempre effettuati nello stesso verso, ovvero dallo spessore minore a quello maggiore.

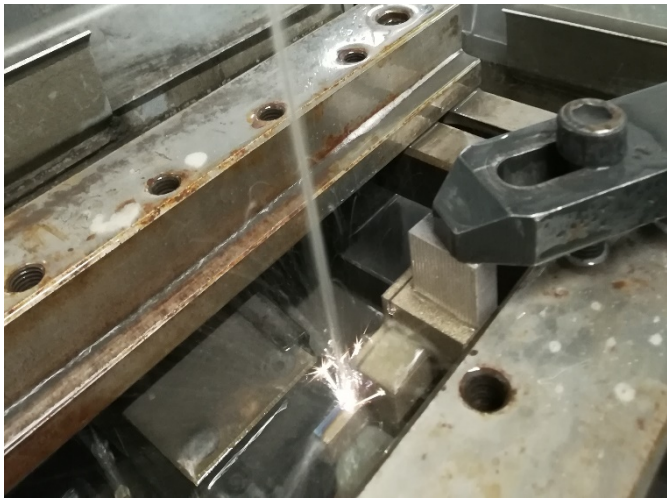

Figura 33 - Realizzazione dei tagli sperimentali

3 Analisi Statistica

L'obbiettivo della procedura di analisi dei dati, che si adotterà nel seguito del capitolo, è quello di determinare come agiscano e quanto siano significativi i parametri di processo sui dati raccolti sperimentalmente. In questo caso si considerano le misurazioni di rugosità superficiale (Ra) e velocità di taglio (V_t). Per rendere più chiaro il procedimento utilizzato, prima di esporre le operazioni sui dati e i risultati, si descriveranno tutti gli strumenti di statistica descrittiva ed inferenziale utili ad estrapolare informazioni e giudizi. Dopodiché, si procederà con l'analisi delle misurazioni e la presentazione dei risultati.

3.1 Procedura ed Elementi di Statistica descrittiva ed inferenziale[1]

La statistica descrittiva si occupa di studiare i criteri di rilevazione, classificazione, sintesi e rappresentazione dei dati ottenuti dallo studio di una popolazione o di un campione. L'inferenza statistica o statistica inferenziale è il processo che, tramite un insieme di metodi, permette di trarre delle conclusioni riguardo alla popolazione o al campione osservati sulla base dei dati e informazioni raccolte. Sulla base di quanto appena detto risulta chiaro che, avendo scopi differenti, questa debbano essere utilizzate sinergicamente così da poter ottenere un'analisi più completa ed efficace.

3.1.1 Analisi preliminare dei dati sperimentali

Una volta raccolti i dati sperimentali questi devono essere organizzati in una maniera tale per cui risultino di facile interpretabilità e siano facilmente processabili dagli strumenti di analisi. La struttura adottata dipende anche dall'indice di performance analizzato poiché variano il numero di misurazioni disponibili per ogni prova. Infatti, mentre per la velocità di taglio si dispone di una sola misura per ogni set di parametri di processo, per la rugosità superficiale invece se ne possiedono sei. Per poter procedere si decide di utilizzare uno strumento della statistica descrittiva ovvero gli istogrammi o grafici a colonna. I grafici a colonna sono costituiti da una serie di rettangoli affiancati, la cui ampiezza di base è determinata dall'ampiezza della classe mentre la loro altezza dipende dal numero di volte in cui i dati ricadono nella classe considerata, comunemente detta frequenza assoluta. Da questa definizione, risulta chiaro che il primo passo per la realizzazione dell'istogramma sia quello di definire il numero di classi che si andrà a considerare. Per ottenerne un'indicazione approssimata a partire dal numero di rilevazioni sperimentali si fa ricorso all'equazione (16).

$$n_c = \sqrt{n} \tag{16}$$

Dove:

- n_c: numero di classi
- n: numero di misurazioni effettuate

In questa maniera si genereranno un numero di rettangoli pari al numero di classi con un'altezza pari alla frequenza assoluta di tale classe. Tuttavia, un grafico così generato non permette la comparazione del diagramma a colonne con le distribuzioni di probabilità. Questo confronto in realtà è uno degli obbiettivi di questa analisi, si vuole infatti confrontare l'istogramma generato sulla base dei dati sperimentali con la distribuzione normale o gaussiana, mettendo così in luce l'andamento posseduto dai dati raccolti rispetto a quello che dovrebbero teoricamente avere.

[1] Per la stesura del seguente capitolo si fa riferimento a [78] e [79]

Per poter realizzare questa operazione è necessario modificare la metodologia con cui si genera il grafico a colonne, non si utilizzerà più la frequenza assoluta dei valori bensì la frequenza relativa che si calcola tramite l'equazione (17).

$$f_r = \frac{f_a}{n} \tag{17}$$

Dove:

- f_r: frequenza relativa
- f_a: frequenza assoluta
- n: numero di misurazioni

In questo tipo di diagramma, la frequenza relativa rappresenta l'area delle colonne generate. Essendo quindi nota l'ampiezza delle base che corrisponde all'ampiezza delle classi e l'area dei rettangoli, va determinata quale sia l'altezza del rettangolo che è rappresentata dalla densità della frequenza ρ_f, calcolabile tramite l'equazione (18).

$$\rho_f = \frac{f_r}{A} \tag{18}$$

Dove:

- ρ_f: densità di frequenza
- f_r: frequenza relativa
- A: ampiezza della classe

Generando un istogramma con la seguente procedura è possibile sovrapporgli la curva della distribuzione normale, calcolando prima media e varianza delle osservazioni sperimentali. Ovviamente non ci si può aspettare che tra la distribuzione teorica e l'istogramma della frequenza relativa ci sia una perfetta sovrapposizione o accordo. I due andamenti possono discostarsi anche di parecchio e le cause possono essere molteplici. Dall'istogramma però non si può affermare con sicurezza se questo segua l'andamento della curva normale e sono quindi necessarie ulteriori analisi per verificare la normalità della distribuzione sperimentale. Prima di queste possono essere effettuate delle verifiche per individuare di eventuali errori di misura ed errori sistematici.

3.1.2 Principi di Esclusione

Lo scopo di questa analisi è quello di individuare la presenza di eventuali errori di misurazione che quindi andrebbero a falsare l'analisi dei dati. Per trovare questi valori si utilizza una metodologia grafica chiamata box-plot che consiste nell'individuazione dei limiti di accettabilità e dei valori che sono da considerarsi frutto di errori di misura.

Il grafico box-plot individua una regione rettangolare delimitata dal valore superiore del primo e del terzo quartile, rispettivamente la zona contenente il venticinque e il settantacinque percento dei dati a partire dal limite inferiore. All'interno della zona appena individuata si traccia una linea retta corrispondente alla mediana, questa lunghezza viene definita distanza interquartile e si indica con IQR. A partire dalla zona individuata si tracciano poi due rette, una che raggiunge il valore massimo e una che raggiunge il valore minimo. Si possono utilizzare gli estremi dei dati sperimentali e poi confrontarli con i valori limite calcolati, oppure si possono tracciare le due rette utilizzando direttamente i valori calcolati. Il limite di accettabilità massimo viene identificato con la quantità $1{,}5 \cdot \text{IQR}$ oltre il terzo quartile, mentre il limite minimo si identifica con la quantità che si trova $1{,}5 \cdot \text{IQR}$ al di sotto del primo quartile. Individuati i limiti di accettabilità se una misurazione eccede questa una di queste due quantità allora è sicuramente un errore di misura e pertanto va scartato per evitare che vada a viziare le analisi dei dati.

In realtà le quantità limite indentificate in precedenza valgono soltanto per un numero limitato di prove. Nel caso si superino le cinquanta misurazioni, la relazione a cui si deve fare riferimento è l'equazione (19).

$$1{,}5 \cdot \mathrm{IQR} \cdot [\ 1{+}0{,}1 \cdot \ \log\left(\frac{n}{10}\right)\ ] \tag{19}$$

Conseguentemente, i valori limite massimo e minimo si troveranno rispettivamente sopra il terzo quartile e sotto il primo quartile della quantità appena calcolata con la relazione riportata in precedenza.

I valori che ricadono fuori dai limiti calcolati vengono definiti errori di misura oppure *outliers*. Dato che non si ha la completa sicurezza e per evitare di escludere troppi dati dalle analisi, si definiscono *outliers* possibili quei valori che ricadono sia superiormente nella zona $3 \cdot \mathrm{IQR}$, mentre vengono definiti *outliers* probabili o altamente sospetti quei valori che si trovano al di fuori di tale limite.

In realtà, oltre ai due metodi appena presentati, esiste un metodo ulteriore che permette di determinare la presenza di eventuali errori di misura e quindi rimuoverli dai dati sperimentali. Questo metodo è noto come principio di esclusione di Chauvenet, che a differenza dei metodi precedenti, non attribuisce una probabilità prefissata alla definizione di incidente di misura ma collega la probabilità di errore direttamente al numero di misurazioni effettuate. Infatti, si applica come limite una probabilità del 50% al fatto che si possa verificare un valore che si discosta notevolmente da quello che ci si attende, nel corso dell'analisi di tutte le misurazioni effettuate.

Per poter procedere con questa verifica è innanzitutto necessario calcolare la media (x_m) e la varianza (s) dei dati, poiché per procedere con questo metodo si farà riferimento ad una distribuzione normale caratterizzata dalla media e varianza calcolate. Poiché la probabilità di trovare incidenti di misura considerando tutti i dati sperimentali è pari al 50% e che la distribuzione normale è simmetrica, è possibile determinare la probabilità di incidente connessa alla singola misurazione tramite l'equazione (20).

$$P(x < x_{li}) = P(x > x_{ls}) = \frac{50\%}{2n} \tag{20}$$

Nell'equazione (20) si afferma che la probabilità di trovare un valore al di sotto del limite inferiore x_{li} e al di sopra del limite superiore x_{ls} è la medesima, ciò è conseguenza della simmetria della distribuzione normale. Bisogna infine definire l'intervallo fiduciario per determinare definire i valori limite inferiore e superiore di accettabilità delle misure. Per fare questo si applica la convenzione di Chauvenet e si calcola la cumulata della probabilità della distribuzione normale fino al limite superiore con l'equazione (21).

$$P_{ls} = 1 - P(x > x_{ls}) \tag{21}$$

In questo modo è possibile determinare i valori limite della distribuzione normale, il limite inferiore z_{li} e il limite superiore z_{ls} che corrisponderanno rispettivamente ai limiti inferiore x_{li} e superiore x_{ls} di accettabilità della misura. Perciò tutti i valori che si trovano compresi tra gli estremi possono essere considerati perché non affetti da incidenti di misura, nel caso contrario i dati devono essere scartati poiché si è in presenza di un errore di misurazione.

Bisogna però precisare che la tecnica dei box-plot, oltre a permettere di determinare la presenza di *outliers*, permette anche il confronto della regione rettangolare individuata da diversi livelli di uno dei parametri di processo. Se infatti si realizzano all'interno dello stesso grafico un box plot per ogni livello che un parametro di processo può assumere, per esempio la corrente, è possibile vedere se tali livelli hanno effetto sull'indice di performance. Questo può essere fatto confrontando le regioni rettangolari individuate dai quartili, se i rettangoli risultano allineati e quindi i quartili presentano una differenza ridotta è probabile che tale parametro non abbia molta influenza su tale indice. Al contrario, se i box-plot presentano differenze marcate tra i quartili e le zone individuate non risultano sovrapposte, è possibile ipotizzare che facendo variare tale parametro si possono avere effetti significativi sull'indice di performance considerato.

3.1.3 Verifica di normalità

Dopo aver verificato un'eventuale presenza di errori di misura e averli rimossi dalle misurazioni significative per l'analisi dei dati, è possibile ed importante verificare se la distribuzione dei dati segua quella normale. Nel paragrafo 3.1.1 si era cercato di comparare la curva della distribuzione normale con l'istogramma della frequenza relativa dei dati, ovviamente questa tecnica non permette di avere una quantificazione di quanto queste due distribuzioni si discostino. Perciò in questo paragrafo si adotteranno delle ulteriori metodologie di verifica per avere un'indicazione più precisa di questa possibile differenza.

Una delle possibili cause della differenza tra le due distribuzioni potrebbe essere la presenza di errori o effetti sistematici. Infatti, se la distribuzione dei dati sperimentali fosse soggetta solamente a piccoli e molteplici effetti casuali che producono variazioni sia in verso positivo che in verso negativo, allora ci si troverebbe nel caso di una distribuzione normale. Nel caso in cui non fosse così, si evidenzia la presenza di effetti sistematici sui dati che vanno quindi individuati e corretti. Le metodologie a cui si accennava in precedenza per verificare che l'ipotesi di normalità dei dati sono due e sono le seguenti:

- Test del χ^2
- Grafico di Probabilità Normale (G.P.N)

Il primo metodo è un metodo numerico e permette di rifiutare l'ipotesi di normalità dei dati con un ben determinato intervallo di fiducia. Ciò è possibile poiché si vanno a confrontare le differenze rinvenute tra la distribuzione normale e ogni classe in cui è stato suddiviso l'insieme dei dati sperimentali.

Per operare questo confronto è necessaria la creazione di un variabile aleatoria W utilizzando la frequenza assoluta e la frequenza assoluta teorica, secondo l'equazione (22).

$$W = \sum_{j=1}^{n} \frac{(f_{aj} - f_{atj})^2}{f_{atj}} \tag{22}$$

Dove:

- f_{aj}: frequenza assoluta della j-esima classe
- f_{atj}: frequenza assoluta teorica associata alla j-esima classe

La frequenza assoluta f_a è già stata calcolata in precedenza ed equivale alla frequenza con cui i dati ricadono in una determinata classe. La frequenza assoluta teorica f_{at} invece si calcola moltiplicando il numero totale dei dati e la frequenza relativa teorica, che si calcola come differenza della distribuzione normale cumulata agli estremi di classe, secondo l'equazione (23).

$$f_{rt} = F(z_{ls}) - F(z_{li}) \tag{23}$$

Dove:

- z_{ls}: estremo superiore della classe
- z_{li}: estremo inferiore della classe

A questo punto la variabile aleatoria W, definita χ^2 sperimentale, deve essere comparata con i valori della distribuzione χ^2 teorica ottenuti per un determinato intervallo di confidenza, in maniera tale da poter verificare se le due distribuzioni sono differenti e nel caso quantificare questa differenza. Prima di poter effettuare la verifica è necessario calcolare i valori limite della distribuzione χ^2 teorica. Per farlo, oltre al valore dell'intervallo di confidenza, occorre tenere anche

in conto il numero di gradi di libertà che corrisponde al numero di classi utilizzate a cui si sottrae il numero di vincoli, che in questo caso sono tre: uguaglianza della media, dello scarto tipo e dell'area totale. Una volta che sono stati calcolati entrambi, è possibile procedere con il paragone. Dal calcolo teorico si otterranno un valore minimo e un valore massimo di χ^2. Bisogna prima precisare che questo tipo di test presuppone un assunto iniziale, ovvero che la distribuzione dei dati sperimentali segua la distribuzione normale. Chiarito questo punto e avendo sia i limiti teorici che il valore sperimentale, è possibile procedere con la verifica. Se il valore sperimentale di χ^2 ricade all'interno dei limiti individuati, il test non fornisce nessuna informazione, perciò non vi è motivo di rifiutare l'assunzione che i dati sperimentali si dispongano secondo una distribuzione normale o gaussiana. Essendo un metodo numerico, è possibile vedere anche quanto il valore sperimentale si discosti dal limite superiore e inferiore di accettabilità.

Il secondo metodo, ovvero il Grafico di Probabilità Normale, è invece un metodo grafico che permette di ottenere informazioni sulle cause della possibile non normalità dei dati sperimentali. Non essendo però un metodo numerico, non permette di rigettare o di accettare con lo stesso rigore l'ipotesi che la distribuzione dei dati segua un andamento normale. In questo tipo di test i dati riguardanti i dati sperimentali sono raccolti in una determinata forma grafica, in maniera tale da permettere di individuare immediatamente se i dati si dispongono secondo una distribuzione normale.

Dal grafico si può quindi vedere se le misurazioni si dispongono lungo la retta della distribuzione normale oppure se presentano deviazioni di qualunque tipo e ottenere informazioni riguardo a queste. Da questo si evince che se i dati si distribuiscono sulla retta, allora non è possibile dire che questi non seguano la distribuzione normale. Il problema di questo metodo è che la valutazione della rettilineità è puramente soggettiva, quindi non è possibile attribuire un intervallo di fiducia né quantificare l'eventuale scostamento dei dati. Perciò si ottengono molte più informazioni riguardo alla distribuzione se i due metodi, χ^2 e G.P.N, vengono utilizzati insieme dati loro differenti scopi e la loro complementarietà.

Il procedimento per poter realizzare il G.P.N è il seguente:

Bisogna riordinare i dati in ordine crescente all'interno di un'unica colonna, dopodiché si calcola la frequenza relativa cumulate utilizzando la posizione relativa dei dati secondo l'equazione (24).

$$f_{rc} = \frac{i - 0{,}5}{n} \tag{24}$$

Dove:

- i: posizione relativa dei dati
- n: numero di misurazioni

I valori di frequenza relativa cumulativa costituiscono i valori presenti sull'asse delle ordinate. Bisogna poi calcolare l'inverso delle probabilità normale standard cumulativa per avere il valore sulle ascisse del grafico. In questo modo si rende possibile la rappresentazione dei dati sottoforma di Grafico della Probabilità Normale.

3.1.4 Test d'ipotesi

Sebbene si sia detto che il box-plot potesse dare un'idea dell'influenza di un determinato parametro e della variazione dei suoi livelli sull'indice di performance considerato, essendo uno strumento grafico e descrittivo non ne permette una quantificazione accurata. Per questo motivo, si ricorre ai test d'ipotesi. Queste analisi hanno lo scopo di determinare se le differenze che si rinvengono nei dati sperimentali siano dovute solamente al caso oppure alla presenza di effetti sistematici, come la variazione dei parametri di processo. Come conseguenza, è possibile vedere se una variazione del

livello del parametro di processo considerato ha rilevanza sui risultati ottenuti oppure se questa differenza è legata solo al caso.

Per poter effettuare questi test è necessario formulare una ipotesi iniziale, detta ipotesi nulla H_0, riguardo al piano sperimentale analizzato e successivamente si effettuano delle verifiche con lo scopo di smentire o confermare l'ipotesi inziale. Questo metodo è del tutto simile a quello che si è adottato durante il test del χ^2.

Dato che con gli strumenti statistici a disposizione non è possibile giungere all'accettazione di un'ipotesi, si cerca quindi la sua negazione, il rischio di errore che si corre dipende dall'intervallo di confidenza scelto. Perciò il metodo, tramite le apposite verifiche, procederà nel senso di cercare la negazione dell'ipotesi nulla poiché in caso contrario non si può concludere nulla riguardo agli eventuali effetti sistematici presenti.

I passi principali per poter procedere con la verifica e la negazione dell'ipotesi nulla sono i seguenti:

- Organizzare i dati sperimentali in una forma consona alla verifica ed individuare quelli significativi per la determinazione del fattore di influenza;
- Scegliere una distribuzione statistica rappresentativa dell'andamento dei dati sperimentali;
- Scegliere l'intervallo di confidenza e di conseguenza l'errore che si è disposti a correre;
- Determinare i limiti di accettazione o rifiuto dell'ipotesi, cosa che può essere fatta una volta che sono note la distribuzione sperimentale e l'intervallo di confidenza.

Fatto questo sarà possibile avere un responso e quindi accettare o rifiutare l'ipotesi nulla iniziale.

In questo caso si effettueranno due test d'ipotesi:

- Il test d'ipotesi eseguito sulla media delle colonne, con riferimento alla distribuzione normale;
- Il test d'ipotesi eseguito sulla varianza delle colonne, con riferimento alla distribuzione χ^2.

Per entrambi i test l'intervallo di confidenza scelto è pari al 95% e di conseguenza l'errore che si corre è pari al 5%.

3.1.5 Analisi della Varianza

L'analisi della varianza detta ANOVA (**AN**alysis **O**f **VA**riance) è uno strumento della statistica inferenziale che permette di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi per poterne verificare le differenze. Costituisce quindi un ulteriore strumento utile per smentire l'ipotesi nulla iniziale.

In questo test si assume che la distribuzione dei dati sia normale con la medesima varianza s^2, che non si suppone nota. Per verificare una ipotesi nulla H_0 riguardante dei parametri legati alle medie delle popolazioni, l'approccio dell'analisi della varianza si basa su due stimatori di s^2. Il primo che è valido indipendentemente dalla correttezza di H_0, mentre il secondo ha un andamento corretto solamente se H_0 è vera, altrimenti tende ad errare per eccesso.

La prima analisi che si va ad effettuare è quella che tiene conto della variazione introdotta da un solo parametro. Per effettuare questa analisi bisogna innanzitutto organizzare i dati in maniera tale che questi possano essere facilmente processati. Solitamente vengono divisi in gruppi in colonne e ognuno di questi contiene un determinato numero di valori, detto situazioni. Una struttura tipo è quella riportata in Tabella 6.

Situazioni	Gruppo 1	...	Gruppo j	...	Gruppo k	Media globale
1	x_{11}	...	x_{1j}	...	x_{1k}	
...		...		...	...	
i	x_{i1}	...	x_{ij}	...	x_{ik}	
...	...	...		...	...	
n	x_{n1}	...	x_{nj}	...	x_{nk}	
Media colonne	$\bar{x}_{\bullet 1}$	...	$\bar{x}_{\bullet j}$	...	$\bar{x}_{\bullet k}$	$\bar{x}_{\bullet\bullet}$

Tabella 6 – Organizzazione dei dati per effettuate l'analisi della varianza per un parametro controllato

Dove:

- x_{ij}: misurazione i-esima della j-esima prova
- $\bar{x}_{\cdot j}$: media del j-esimo gruppo
- $\bar{x}_{\cdot\cdot}$: media globale dei dati

Si calcola quindi la media complessiva dei dati e la media dei singoli gruppi, ovvero le colonne. Risulta logico pensare che le eventuali differenze presenti tra i vari gruppi siano contenute nei valori medi delle colonne. Come è stato detto in precedenza questa tecnica si basa su due stimatori, il primo stimatore che può essere realizzato è quello che tiene conto della varianza presente tra le medie dei vari gruppi, quindi delle colonne. Questo stimatore corrisponde a quello che deve essere corretto solo se l'ipotesi nulla risulta vera, perciò la sua forma sarà quella riportata nell'equazione (25).

$$s_B^2 = n \cdot s_m^2 = n \cdot \frac{\sum_{j=1}^{k} \left(\bar{x}_{\cdot j} - \bar{x}_{\cdot\cdot}\right)^2}{k-1} = \frac{SS_B}{k-1} \tag{25}$$

Dove:

- SS_B: corrisponde alla somma degli scarti quadratici tra i valori medi di ogni gruppo e la media globale dei dati
- k: numero di gruppi

A tale stimatore viene dato il di varianza *between groups*, perché contiene la differenza tra i vari gruppi. Si rende ora necessario il calcolo del secondo stimatore della varianza, il quale non deve contenere la differenza tra i vari gruppi e deve essere sempre valido. Per fare questo è possibile calcolare la varianza dei dati contenuti all'interno di un singolo gruppo, infatti una grandezza così determinata non contiene le variazioni dovute alle differenze presenti tra i vari gruppi. Questo tipo di stimatore viene chiamato varianza del gruppo o *within the group*. Per rendere però questa operazione più stabile e robusta, l'operazione di calcolo della varianza del gruppo viene ripetuta per ogni gruppo e successivamente si esegue un'operazione di media delle stime ottenute per ciascun gruppo. Il secondo stimatore della varianza si calcola quindi tramite l'equazione (26).

$$s_W^2 = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(x_{ij} - \bar{x}_{\cdot j}\right)^2}{n-1} = \frac{SS_W}{k(n-1)} \tag{26}$$

Dove:

- SS_W: somma degli scarti quadratici entro i gruppi
- k: numero di gruppi
- n: numero di situazioni (numero di elementi delle colonne)

Per una maggiore chiarezza si riporta in equazione (27) la relazione per il calcolo della SS_W.

$$SS_W = \sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n}\left(x_{ij}-\bar{x}_{.j}\right)^2 \quad (27)$$

La valutazione degli effetti sistematici presenti tra i vari gruppi avviene facendo il rapporto tra lo stimatore di varianza che contiene le possibili differenze dovuto al fattore stimato e lo stimatore che invece non lo contiene, ovvero la varianza entro i gruppi. Il risultato di questo rapporto viene confrontato con il valore del limite superiore della distribuzione di Fisher, per l'intervallo di confidenza scelto e il numero di gradi di libertà, calcolato come (kn-1).

Il procedimento appena esposto può essere riassunto in una tabella, nota come tabella ANOVA.

Origine variazione	Gradi di libertà	Somme dei quadrati	Varianze	Rapporto di varianze	F
Dovuta al fattore esaminato	$k-1$	$SS_B = n\sum_{j=1}^{k}(\bar{x}_{\bullet j}-\bar{x}_{\bullet\bullet})^2$	$s_B^2 = n\frac{\sum_{j=1}^{k}(\bar{x}_{\bullet j}-\bar{x}_{\bullet\bullet})^2}{k-1}$	$F_{calc}=\frac{s_B^2}{s_W^2}$	F_U
Dovuta agli errori casuali	$k(n-1)$	$SS_W = \sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_{\bullet j})^2$	$s_W^2 = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_{\bullet j})^2}{n-1}$		
Totale	$kn-1$	$SS_{TC} = \sum_{j=1}^{k}\sum_{i=1}^{n}(x_{ij}-\bar{x}_{\bullet\bullet})^2$			

Tabella 7 – Tabella ANOVA per un parametro sotto controllo

Nel caso in cui il rapporto tra gli stimatori di varianza, in tabella F_{calc}, sia superiore al valore determinato tramite la distribuzione di Fisher per il dato intervallo di confidenza, in tabella F_U, allora non è possibile smentire l'ipotesi nulla, quindi non è possibile smentire la presenza di effetti sistematici. In caso contrario, ovvero il valore calcolato è inferiore a quello della distribuzione di Fisher, è possibile smentire l'ipotesi nulla.

In entrambi questi casi però nulla si può dire riguardo le righe e l'eventuale presenza di effetti sistematici sulle righe. Qualora si pensi che, oltre ad una variazione dovuta ad effetti sistematici tra i gruppi, siano anche presenti degli effetti sistematici sulle righe, è necessario utilizzare un diverso approccio di analisi della varianza che tiene sotto controllo due parametri contemporaneamente.

3.1.6 La Regressione

Le analisi svolte in precedenza (metodo χ^2, G.N.P e ANOVA) permettono di individuare la possibile presenza di effetti sistematici nella rilevazione dei dati oppure dovuti alla variazione di determinati parametri. La conoscenza di tali effetti è possibile solo dopo l'analisi globale dei dati sperimentali, dai quali è possibile rintracciare che la presenza di un fattore sistematico che possa portare alla deriva di tutti i dati. Lo strumento tramite il quale è possibile eseguire questa analisi è la regressione dei dati.

In questo caso specifico, si è intenzionati a studiare il processo produttivo di WEDM che, come è stato detto in precedenza, possiede un determinato numero di parametri di processo. Come conseguenza di questo, il risultato o risposta che è possibile ottenere da questo processo dipende dalle relazioni che sono presenti tra due o più insiemi di variabili, in questo caso saranno pari al numero di parametri di processo considerati. La conoscenza di queste relazioni

permette di predire quale sarebbe il risultato o come varierebbe al variare dei livelli o valori dei parametri di processo considerati.

Le situazioni più comuni prevedono la presenza di una singola variabile di risposta Y, i cui valori assunti dipendono da un certo numero di variabili di ingresso $x_1,x_2,\dots,x_n$ indipendenti tra loro. Il modello suppone che la risposta sia funzione degli ingressi, cioè che la Y sia la variabile dipendente mentre le x_i siano le variabili indipendenti. La relazione più semplice con cui si possono andare a legare risposta e parametri è quella lineare e perciò prenderà il nome di regressione lineare, nell' equazione (28) si riporta un semplice modello di regressione lineare.

$$Y= \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \dots + \beta_n \cdot x_n + \varepsilon \tag{28}$$

Dove ε rappresenta l'errore casuale poiché non è possibile predire esattamente la risposta del processo per qualunque combinazione di variabili di ingresso. Perciò il massimo che è possibile ottenere è un'equazione che sia valida a meno di un errore casuale ε. L'equazione riportata sopra, oltre ad essere un modello di regressione lineare, viene definita regressione multipla poiché si considerano più variabili indipendenti all'interno del modello.

Oltre al modello lineare, esistono anche altri tipi di regressione che presentano quindi modelli diversi. Questi sono: la regressione quadratica e la regressione polinomiale. In questo caso la relazione tra risposta Y e la variabile o le variabili indipendenti $x_1,x_2,\dots x_n$ non è più di tipo lineare, bensì sarà quadratica nel primo caso oppure sarà espressa da un polinomio di un determinato grado. Ovviamente la regressione quadratica può essere considerata un caso degenere del modello polinomiale, ottenuta utilizzando un polinomio di secondo grado. Per semplicità si riporta in equazione (29) un modello di regressione polinomiale considerando solamente una sola variabile indipendente, da questo potrà essere ricavato il modello quadratico.

$$Y= \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \dots + \beta_r \cdot x^r + \varepsilon \tag{29}$$

In entrambi i casi i vari β_i corrispondono ai coefficienti di regressione che è necessario stimare.

La scelta di un modello piuttosto che di un altro dipende dalla capacità del modello più semplice di poter descrivere propriamente le relazioni che intercorrono tra risposta e variabili indipendenti, se infatti ciò non è possibile è necessario complicare il modello e utilizzare uno degli altri due metodi esposti.

La procedura che in genere viene seguita per realizzare questo tipo di analisi è la seguente:

I dati vengono raccolti e disposti in una maniera tale da poter essere facilmente analizzati e rappresentati in forma grafica. A questo punto, guardando l'andamento del grafico dei dati e sulla base dell'esperienza, è possibile effettuare delle ipotesi riguardo a quale modello di regressione potrebbe meglio descrivere i dati sperimentali senza complicare eccessivamente il modello. Una volta individuata la relazione matematica che si intende utilizzare, è necessario stimare i coefficienti dell'equazione di regressione. Per fare ciò si utilizza il metodo dei minimi quadrati che verrà qui di seguito esposto in maniera semplificata, con lo scopo di rendere più chiaro il procedimento seguito.

Si supponga di voler osservare le risposte Y_i corrispondenti a certi valori d'ingresso x_i, con i = 1, ..., n, e di volerli utilizzare per stimare i coefficienti di una relazione di regressione lineare. Si introducono A e B che corrispondo agli stimatori di β_0 e β_1, perciò la relazione che descriverà la risposta dovuta al parametro x_i sarà $A + Bx_i$. Ora che si hanno le risposte reali Y_i e le risposte stimate tramite $A + Bx_i$ è possibile il calcolo della differenza tra i due valori e definire la somma dei quadrati degli scarti tra le risposte stimate e reali, tramite l'equazione (30).

$$SS = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - A - Bx_i)^2 \tag{30}$$

Arrivati a questo punto, è possibile esporre l'obbiettivo del metodo dei minimi quadrati, ovvero andare determinare come stimatori dei coefficienti dell'equazione di regressione due stimatori A e B che minimizzino SS. Per fare questo è

necessario derivare l'equazione (30) prima rispetto A e poi rispetto a B, successivamente è necessario eguagliare a zero le equazioni così ottenute e risolvere il sistema di equazioni tramite sostituzione. Ora che è stato determinato il modello della regressione è possibile utilizzare la relazione calcolata per fare previsioni sul valore della risposta al variare delle variabili indipendenti oppure per vedere quali di queste variabili causano una maggiore variazione della risposta. Prima di procedere con questo, è necessario verificare e stimare la bontà e l'adeguatezza del modello utilizzato per descrivere i dati sperimentali.

Per fare questo è possibile utilizzare il coefficiente di determinazione R^2 che rappresenta la proporzione di variabilità della Y spiegata dalle variabili indipendenti considerate. Questo coefficiente è calcolabile tramite l'equazione (31).

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \tag{31}$$

Dove:

- $SQR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ (Somma dei Quadrati della Regressione)
- $SQT = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$ (Somma dei Quadrati Totale)

Il coefficiente così ottenuto sarà sempre minore o al massimo uguale al valore unitario e permette di definire in percentuale quanta della variabilità della risposta Y risulta spiegato dal modello di regressione utilizzato con le date variabili indipendenti. Nel caso di regressione multipla è però necessario utilizzare un indice che tenga conto non solo delle variabili indipendenti incluse nel modello ma anche dell'ampiezza del campione, si fa quindi riferimento ad un nuovo indice, con il medesimo scopo del precedente, detto coefficiente di determinazione aggiustato R^2_{adj}, calcolabile con l'equazione (32).

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{n-1}{n-k-1} \cdot \frac{SQT}{SQR} \tag{32}$$

Dove:

- n: numero di osservazioni
- k: numero di variabili indipendenti considerate
- SQT: Somma dei Quadrati Totale, calcolata come per l'equazione (31)
- $SQR = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$ (Somma dei Quadrati dei Residui)

Oltre al calcolo di questi due indici per verificare il modello è necessario controllare anche l'andamento dei residui. Solitamente se il modello descrive in maniera corretta e totale i dati sperimentali, i residui tenderanno a disporsi in maniera casuale attorno al valor medio. Se invece fosse presente un ulteriore effetto sistematico non considerato, allora la loro disposizione presenterebbe una tendenza ad assumere determinati valori. Il metodo più semplice per identificare questa situazione è quello di controllare il segno dei residui, se la loro disposizione fosse completamente casuale allora non si osserverebbe la tendenza ad assumere valori positivi piuttosto che negativi, cosa che invece accadrebbe nel caso i cui fossero presenti degli effetti sistematici e quindi la loro distribuzione non fosse più casuale.

3.2 Analisi dei dati della rugosità superficiale (Ra) per il processo di L-PBF

In questo paragrafo si studieranno gli effetti che i parametri di processo considerati nel piano sperimentale hanno sulla rugosità superficiale, analizzandoli prima separatamente per determinare la loro significatività e successivamente analizzando interamente il DoE per determinare il modello di regressione e gli effetti che i parametri rinvenuti significativi hanno sulla lavorazione.

3.2.1 Distribuzione dei dati sperimentali

Una volta raccolti dati si vuole vedere come questi siano distribuiti e si vuole vedere se questi seguano una distribuzione normale. La verifica della normalità dei dati avverrà tramite gli strumenti esposti nel paragrafo precedente e verranno eseguiti una volta soltanto poiché, sebbene si vadano a studiare parametri di processo differenti, i valori delle misurazioni di rugosità sono sempre i medesimi e vengono considerati nella loro totalità, indipendentemente dal parametro studiato. Si procederà realizzando l'istogramma della frequenza relativa. Utilizzando l'equazione (16), il numero di classi utili per una rappresentazione adeguata del campione risulta pari a 22. A questo punto per poter generare all'interno dello stesso grafico la curva di probabilità normale associata, è necessario calcolare le principali grandezze, i cui valori sono stati riassunti in Tabella 8.

Data Number	**486**	
Mean value	0,0093	mm
Standard deviation	0,0028	mm
Maximum	0,0168	mm
Minimum	0,0043	mm

Tabella 8 – Dati principali relativi alle misurazioni di rugosità per L-PBF

Volendo procedere e volendo realizzare in seguito il test χ^2, i dati sono stati disposti in maniera adeguata così da poter permettere: la suddivisione in classi per determinarne l'ampiezza, il calcolo della frequenza assoluta, relativa e della frequenza associata alla distribuzione normale associata per valore di media e deviazione standard calcolata in Tabella 9.

	From [mm]	**To [mm]**	**Mean value [mm]**	**f_a**	**f_r**	**Fr. Density [mm^{-1}]**	**Normal distr. [mm^{-1}]**
1	-0,00182	-0,00082	-0,00132	0	0,000	0,00	0,10
2	-0,00082	0,00019	-0,00031	0	0,000	0,00	0,37
3	0,00019	0,00120	0,00070	0	0,000	0,00	1,21
4	0,00120	0,00221	0,00171	0	0,000	0,00	3,49
5	0,00221	0,00322	0,00272	0	0,000	0,00	8,80
6	0,00322	0,00423	0,00372	0	0,000	0,00	19,46
7	0,00423	0,00524	0,00473	20	0,041	40,80	37,70
8	0,00524	0,00625	0,00574	56	0,115	114,24	63,99
9	0,00625	0,00725	0,00675	51	0,105	104,04	95,14
10	0,00725	0,00826	0,00776	69	0,142	140,75	123,94
11	0,00826	0,00927	0,00877	66	0,136	134,63	141,46
12	0,00927	0,01028	0,00978	70,000	0,144	142,79	141,46
13	0,01028	0,01129	0,01078	46,000	0,095	93,84	123,94
14	0,01129	0,01230	0,01179	34,000	0,070	69,36	95,14
15	0,01230	0,01331	0,01280	24,000	0,049	48,96	63,99
16	0,01331	0,01431	0,01381	21,000	0,043	42,84	37,70
17	0,01431	0,01532	0,01482	16,000	0,033	32,64	19,46
18	0,01532	0,01633	0,01583	7,000	0,014	14,28	8,80
19	0,01633	0,01734	0,01684	6,000	0,012	12,24	3,49
20	0,01734	0,01835	0,01785	0,000	0,000	0,00	1,21
21	0,01835	0,01936	0,01885	0,000	0,000	0,00	0,37
22	0,01936	0,02037	0,01986	0,000	0,000	0,00	0,10

Tabella 9 – Suddivisione in classi dei dati sperimentali di rugosità superficiale di L-PBF e calcolo delle frequenze relative

L'istogramma ottenuto grazie ai dati raccolti e calcolati in tabella è visibile in Figura 34.

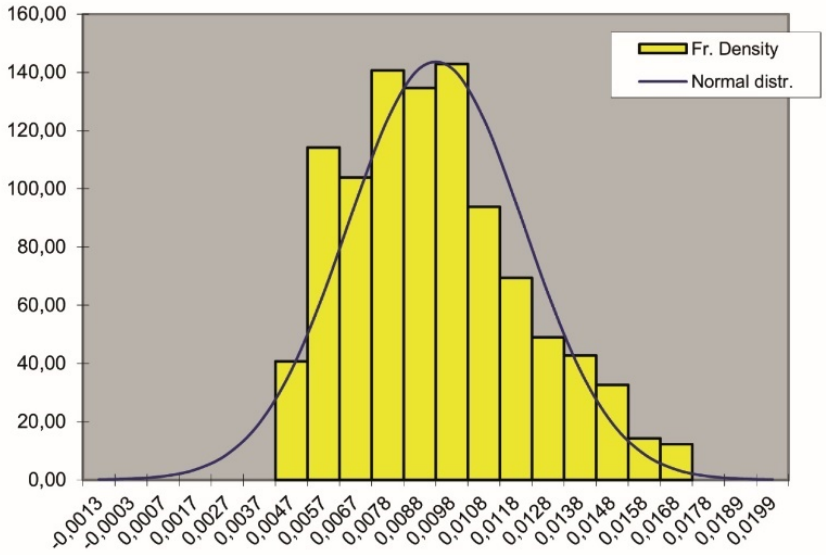

Figura 34 – Istogramma della frequenza relativa dei dati di rugosità di L-PBF e curva di probabilità normale associata

L'analisi evidenzia una tendenza dei dati in questo caso è quella di spostarsi verso sinistra, detta asimmetria o skewness e quindi una deviazione della distribuzione sperimentale rispetto a quella teorica e simmetrica della gaussiana. L'asimmetria evidenziata è positiva (o positive skewness) e il suo valore è di 0,54, che è stato calcolato per mezzo dell'equazione (33).

$$\text{Skewness} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^3}{(N-1) \cdot \sigma^3} \tag{33}$$

Dove:

- x_i: misurazioni di rugosità
- $\bar{x}$: media totale dei dati
- N: numero totale dei dati
- σ: deviazione standard

La distribuzione dei dati in maniera asimmetrica è causata dal limite tecnologico di ottenere valori di rugosità pari a zero o negativi. Di fatti, ogni processo produttivo, anche a seconda dei parametri utilizzati, è caratterizzato da un limite inferiore di valore di rugosità. In particolare, la letteratura in merito al processo di l'elettroerosione a filo ha messo in luce che il valore di asimmetria dipende anche dal materiale lavorato [47].

Volendo ora quantificare la differenza che intercorre tra la distribuzione sperimentale e la distribuzione gaussiana teorica, si procede quindi al calcolo della frequenza relativa teorica, della frequenza assoluta teorica e della variabile aleatoria W, calcolata secondo l'equazione (22).
Si calcola il valore χ^2 sperimentale, ottenuto sommando il valore della variabile aleatoria W di ogni classe. I risultati di questo calcolo vengono riassunti in Tabella 10.

Evaluation of χ^2

From [mm]	To [mm]	f_{rt}	f_{at}	f_a	$(f_a - f_{at})^2/f_{at}$
-0,00182	-0,00082	0,0001	0,1	0	0,05
-0,00082	0,00019	0,0004	0,2	0	0,19
0,00019	0,00120	0,0013	0,6	0	0,62
0,00120	0,00221	0,0036	1,8	0	1,77
0,00221	0,00322	0,0091	4,4	0	4,42
0,00322	0,00423	0,0200	9,7	0	9,70
0,00423	0,00524	0,0384	18,7	20	0,10
0,00524	0,00625	0,0648	31,5	56	19,11
0,00625	0,00725	0,0959	46,6	51	0,42
0,00725	0,00826	0,1245	60,5	69	1,19
0,00826	0,00927	0,1419	69,0	66	0,13
0,00927	0,01028	0,1419	69,0	70	0,02
0,01028	0,01129	0,1245	60,5	46	3,49
0,01129	0,01230	0,0959	46,6	34	3,40
0,01230	0,01331	0,0648	31,5	24	1,77
0,01331	0,01431	0,0384	18,7	21	0,30
0,01431	0,01532	0,0200	9,7	16	4,09
0,01532	0,01633	0,0091	4,4	7	1,50
0,01633	0,01734	0,0036	1,8	6	10,10
0,01734	0,01835	0,0013	0,6	0	0,62
0,01835	0,01936	0,0004	0,2	0	0,19
0,01936	0,02037	0,0001	0,1	0	0,05
			Experimental χ^2		63,23

Tabella 10 – Valutazione χ^2 sperimentale

Il valore sperimentale deve essere confrontato con i limiti teorici per poter determinare la normalità della distribuzione dei dati. I limiti teorici vengono calcolati considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e 19 gradi di libertà, calcolati sottraendo al numero delle classi il numero di vincoli che, come si era detto nel paragrafo precedente, sono 3. I limiti sperimentali calcolati con i dati valori valgono:

- Limite inferiore χ^2: 8,91
- Limite superiore χ^2: 32,85

Confrontando i valori così ottenuti si può notare come i due valori differiscano in maniera consistente, perciò l'ipotesi nulla di uguaglianza tra la distribuzione sperimentale e quella gaussiana può essere rigettata.
In Figura 35 viene riportato anche il grafico di probabilità normale (G.P.N), in cui si può notare come i dati tendano a disporsi lungo la linea retta di disposizione normale ma agli estremi i valori si allontanano progressivamente. Anche in questo caso si può constatare che la distribuzione dei dati sperimentali non segua o si discosti la distribuzione gaussiana.

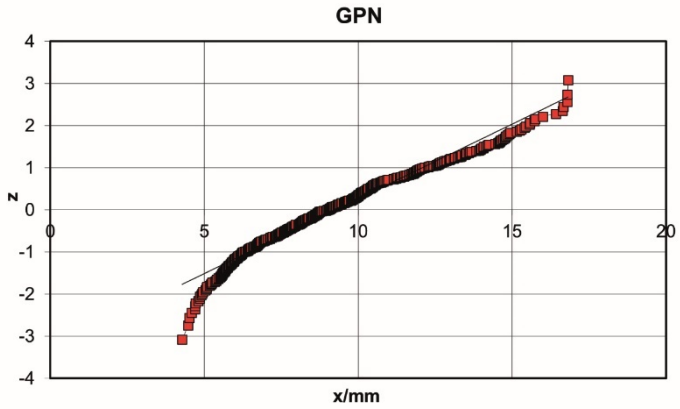

Figura 35 – Grafico di Probabilità Normale dei dati sperimentali di rugosità superficiale per L-PBF

Prima di effettuare questa analisi è stata verificata la presenza di *outliers* nell'analisi di ogni singolo parametro di processo sia tramite l'equazione (19) sia tramite il metodo di Chauvenet. Entrambe le analisi hanno sottolineato l'assenza di errori di misura, quindi non è stato escluso alcun dato dalle rilevazioni sperimentali di rugosità.

3.2.2 Effetto Corrente

Si vuole ora verificare se la corrente abbia effetto sui valori di rugosità superficiale. Per fare questo, i dati di rugosità vengono divisi in tre gruppi distinti a seconda del valore di corrente utilizzato durante la prova sperimentale, in questo caso 2, 3 e 4 A. I dati vengono opportunamente organizzati per poter essere maneggiate e generare i box-plot. Le verifiche effettuate per il calcolo dei limiti di accettabilità utilizzando la seguente relazione $1.5 \cdot IQR \cdot [1+0.1 \cdot \log(n/10)]$ e il criterio di Chauvenet non hanno evidenziato la presenza di *outliers*, di conseguenza nessun valore è stato escluso per i calcoli.
Si calcolano quindi i quartili, i massimi e i minimi per ogni gruppo, la mediana e IQR. I risultati vengono riassunti in Tabella 11.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Quart 3	0,0097	0,0135	0,0101
Max	0,0148	0,0168	0,0153
Min	0,0045	0,0043	0,0047
Quart 1	0,0065	0,0088	0,0069
Median	0,0082	0,0111	0,0084
IQR	0,0033	0,0047	0,0032
Max IQR	0,0152	0,0214	0,0154
Min IQR	0,0010	0,0009	0,0015

Tabella 11 – Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot della corrente per L-PBF

Con i seguenti valori è stato possibile calcolare i box-plot relativi ai tre livelli di corrente per poterli comparare tra loro, riportati in Figura 36.

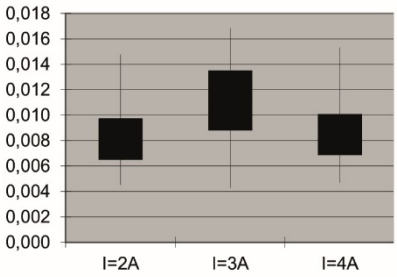

Figura 36 - Box-plot corrente e rugosità superficiale per L-PBF

Un'analisi importante che è possibile fare mediante il grafico dei box-plot è la verifica della distanza tra quartili ed un eventuale allineamento tra i tre casi sperimentali. Infatti, se i quartili risultassero allineati o se differissero di poco oppure se le aree rettangolari individuate dai quartili di un determinato livello includessero le aree delimitate dai quartili di altri livelli del parametro considerato, è possibile ipotizzare che non siano presenti effetti sistematici tra i vari casi. Di conseguenza, il parametro considerato potrebbe essere poco significativo in termini di variabilità dei dati sperimentali. In questo caso specifico, sebbene i quartili nel caso di corrente a 2 A e 4 A siano allineati, lo stesso non si può dire nel caso dei 3 A, che ragionevolmente dovrebbe essere il caso in cui si introduce una maggiore variabilità in termini di rugosità superficiale. Dal momento che questo è un metodo grafico non si è in grado di quantificare un'eventuale influenza del parametro ma è possibile solamente fare congetture. L'influenza del parametro può essere verificata, in maniera più specifica, utilizzando i test d'ipotesi e il metodo ANOVA. Per procedere con i test d'ipotesi è necessario formulare un'ipotesi nulla, poiché tramite le verifiche di questo strumento statistico sarà possibile rifiutare o accettare l'affermazione iniziale. L'ipotesi nulla è la seguente:

H_0 : La corrente ha influenza sulla rugosità superficiale

Il primo test che viene effettuato è il test sulla media delle colonne, perciò si calcola la media di ogni gruppo e la si compara con i valori limite che vengono determinati con un intervallo di confidenza pari al 95% e come cumulata della distribuzione normale avente la media e deviazione standard. Le medie delle colonne, sono presentate in Tabella 12, e vengono confrontate con i limiti teorici riportati in Tabella 13.

	I = 2 A	**I = 3 A**	**I = 4 A**
Mean	0,0082	0,0110	0,0086

Tabella 12 – Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di corrente

Number of samples averaged	**162**
Average	0,0093
Average Standard deviation	0,0002
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0088
Upper boundary	0,0097

Tabella 13 – Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori rugosità superficiale e corrente

Confrontando i valori calcolati con i limiti teorici associati, è possibile notare che nessuno dei valori calcolati si trova all'interno dell'intervallo che permette di rigettare l'ipotesi nulla. Di conseguenza, non è possibile smentire l'ipotesi nulla e perciò non si è in grado di asserire che la corrente non abbia influenza sulla rugosità ottenibile dal processo, ma si può quindi pensare che essa produca un effetto sistematico e quindi influisca sul processo.

Un ulteriore test di ipotesi che viene effettuato è quello sulla varianza delle colonne e quindi dei tre gruppi. Il procedimento e l'organizzazione dei dati è la medesima, i limiti teorici sono però calcolati come cumulata della distribuzione χ^2. Si utilizza sempre un intervallo di confidenza pari al 95%.

Le varianze delle colonne e i relativi limiti teorici sono stati riportati rispettivamente in Tabella 14 e Tabella 15.

	I = 2 A	I = 3 A	I = 4 A
Variance	4,1E-06	9,7E-06	4,6E-06

Tabella 14 – Test ipotesi II (L-PBF): Varianza delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di corrente

Number of samples for variances	162
Expected variance	6,2E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	4,9E-06
Upper boundary of s^2	7,6E-06

Tabella 15 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e corrente

Anche in questo caso confrontando i valori limite con quelli calcolati è possibile notare che questi si trovano al di fuori dell'intervallo in cui risulta possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Perciò, il responso di questo test d'ipotesi è il mediamo di quello in precedenza: non è possibile rifiutare l'ipotesi che la corrente non abbia effetto sulla rugosità superficiale e perciò si può pensare che abbia effettivamente influenza nel processo. Volendo approfondire la questione, per poter determinare se la corrente elettrica influenzi la rugosità superficiale si effettua un'ulteriore verifica: l'analisi della varianza. Si calcolano poi la varianza tra i gruppi e la varianza dovuta agli errori casuali o varianza entro il gruppo e se ne fa il rapporto, in maniera tale da poter costruire la tabella ANOVA. Oltre a ciò, è necessario determinare il valore limite associato della distribuzione di Fisher per un intervallo di confidenza pari al 95%. I risultati dei calcoli vengono riassunti in Tabella 16.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	3,77E-04	61,07	3,01
Random errors	483	6,17E-06		
Total	485			

Tabella 16 - ANOVA corrente L-PBF: Risultati

Il rapporto tra le varianze in questo caso è ben superiore al valore limite di Fisher, quindi si può dire con un rischio del 5% che sono presenti delle differenze sistematiche tra le colonne e che sia la corrente ad introdurre questi effetti sistematici sulla variabilità dei valori di rugosità.

3.2.3 Effetto T_{on}

In questo paragrafo si vuole indagare se la durata del tempo di scarica T_{on} sia un parametro significativo ed abbia effetto sulla rugosità superficiale. Per fare questo, si procede alla verifica dei possibili *outliers* con la stessa metodologia utilizzata per lo studio dell'effetto della corrente di scarica. Anche in questo caso non stati rinvenuti errori di misura, perciò nessuna misurazione di rugosità superficiale è stata esclusa dall'analisi. Si procede quindi alla realizzazione dei

box-plot e per fare ciò si calcolano le grandezze necessarie per la loro rappresentazione che sono state riassunta in Tabella 17.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Quart 3	0,0077	0,0107	0,0126
Max	0,0138	0,0168	0,0168
Min	0,0043	0,0056	0,0067
Quart 1	0,0058	0,0083	0,0092
Median	0,0065	0,0093	0,0105
IQR	0,0019	0,0025	0,0034
Max IQR	0,0110	0,0149	0,0184
Min IQR	0,0025	0,0041	0,0034

Tabella 17 - Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot del T_{on} *per L-PBF*

I dati calcolati ha permesso la realizzazione dei box-plot che vengono riportati in Figura 37. L'andamento delle aree rettangolari individuate dai quartili è profondamente diverso rispetto a quello rinvenuto nel caso della corrente. In questo caso le aree dei rettangoli non risultano sovrapposte o coincidenti. Questa tendenza è molto evidente tra i primi due livelli di durata della scarica elettrica, infatti il primo quartile del caso $T_{on} = 20$ µs si trova ben sopra il terzo quartile del caso $T_{on} = 10$ µs. Una tendenza simile può essere rinvenuta anche tra secondo e terzo livello del parametro considerato, in questo caso però è presente una parziale sovrapposizione. Queste evidenze possono far presupporre che siano presenti effetti sistematici tra i vari livelli e che questi siano più marcati tra primo e secondo livello, piuttosto che tra secondo e terzo.

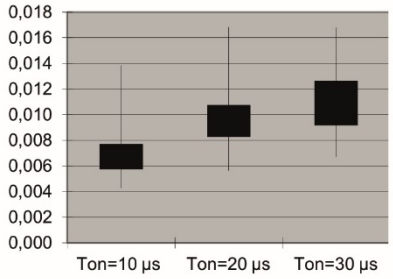

Figura 37 - Box-plot T_{on} *e rugosità superficiale per L-PBF*

Similmente a quanto fatto in precedenza, per verificare l'influenza della durata della scarica elettrica sulla rugosità ottenibile dal processo, si ricorre ai due test d'ipotesi. Viene quindi definita la seguente ipotesi nulla:

$$H_0 : \text{Il } T_{on} \text{ ha influenza sulla rugosità superficiale}$$

Si procede quindi con il primo test, quindi vengono calcolate le medie delle colonne e i rispettivi valori limite, considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e calcolando la probabilità cumulata della distribuzione normale di media pari alla media globale dei dati e deviazione standard media, ottenuta dividendo il valore di deviazione standard per il numero di dati contenuti in colonna.

In Tabella 18 sono riportati i valori di medi delle colonne per i vari livelli del parametro considerato.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Mean	0,0070	0,0098	0,0109

Tabella 18 - Test Ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{on}

In Tabella 19 sono invece riportato i limiti teorici calcolati con i criteri esposti in precedenza.

Number of samples averaged	162
Average	0,0093
Average Standard deviation	0,0002
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0088
Upper boundary	0,0097

Tabella 19 - Test Ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e T_{on}

Facendo il confronto tra i dati è possibile notare che tutti i valori medi delle colonne si trovano al di fuori dell'intervallo di accettabilità, perciò non è possibile rigettare l'ipotesi nulla e quindi non è possibile dire che la durata della scarica elettrica non abbia effetto sul valore di rugosità superficiale ma anzi è ragionevole suppore che sia esattamente l'opposto.

Si realizza ora il test d'ipotesi sulla varianza delle colonne per ottenere un'ulteriore conferma o un'eventuale smentita del risultato conseguito precedentemente. Vengono quindi calcolate le varianze di ogni gruppo e i risultati vengono raccolti in Tabella 20.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Variance	3,9E-06	5,7E-06	5,5E-06

Tabella 20 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianza delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{on}

I limiti teorici vengono calcolati con la medesima modalità utilizzata per la corrente e considerando sempre un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 21 vengono riportati i limiti teorici e i dati utili al loro calcolo.

Number of samples for variances	162
Expected variance	5,0E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	4,0E-06
Upper boundary of s^2	6,2E-06

Tabella 21 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici per i dati valori di rugosità superficiale e T_{on}

Anche in questo caso dal confronto tra limiti teorici e varianze delle colonne, è possibile confermare l'esito del test precedente poiché il valore di varianza del primo livello del parametro considerato non si trova all'interno dell'intervallo di rigetto dell'ipotesi nulla. Perciò, anche in questo caso, si può ritenere che la durata della scarica elettrica abbia effetto sul valore di rugosità superficiale.

Un'ulteriore e più precisa analisi che si può andare ad effettuare sui dati sperimentali per andare ad accettare o rifiutare l'ipotesi nulla, è l'analisi della varianza o ANOVA. I dati vengono riorganizzati in maniera tale da poter permettere il calcolo della tabella ANOVA che viene riportata in Tabella 22. Come evidenziano i risultati, il rapporto tra le varianze risulta notevolmente superiore al valore di Fisher calcolato con un intervallo di confidenza pari al 95%. Per questo motivo è possibile sostenere, con un rischio di errore pari al 5%, che siano presenti effetti sistematici tra le colonne e che quindi il T_{on} sia un parametro il cui variare introduca una certa variabilità in termini di rugosità superficiale ottenibile dal processo.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	6,54E-04	130,20	3,01
Random errors	483	5,02E-06		
Total	485			

Tabella 22 – ANOVA T_{on} L-PBF: Risultati

3.2.4 Effetto T_{off}

L'analisi sul potenziale effetto di questo parametro procede in maniera del tutto analoga a quella vista per lo studio dei parametri precedenti. Si verifica quindi la presenza di eventuali errori di misura. Si procede quindi a considerare tutti i dati sperimentali nelle analisi e si calcolano i valori necessari per la realizzazione dei grafici box-plot. I risultati dei calcoli vengono riportati in Tabella 23.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Quart 3	0,0101	0,0104	0,0119
Max	0,0157	0,0168	0,0168
Min	0,0045	0,0043	0,0047
Quart 1	0,0066	0,0074	0,0075
Median	0,0082	0,0088	0,0100
IQR	0,0034	0,0030	0,0044
Max IQR	0,0159	0,0154	0,0192
Min IQR	0,0008	0,0024	0,0002

Tabella 23 - Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot del T_{off} per L-PBF

In Figura 38, si riportano i grafici box-plot per i differenti valori assunti dal T_{off}. L'analisi del grafico suggerisce che le variazioni di questo parametro potrebbero risultare meno significative rispetto ai parametri analizzati in precedenza, poiché i dati sperimentali sembrano avere la stessa concentrazione in tutti i casi considerati, infatti le aree rettangolari risultano quasi totalmente contenute nell' area individuata dai quartili del caso T_{off} = 15 µs. Ma in ogni caso per poter determinare se questo parametro sia significativo, è necessario procedere con le altre analisi.

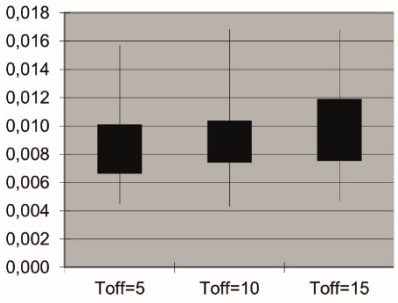

Figura 38 - Box plot T_{off} e rugosità superficiale per L-PBF

Si procede quindi realizzando i test d'ipotesi, sia quello sulla media che quello sulla varianza, con l'obbiettivo di verificare o smentire la seguente ipotesi nulla:

$$H_0 : \text{Il } T_{off} \text{ ha influenza sulla rugosità superficiale}$$

Per effettuare il primo test vengono calcolate le medie delle colonne e si comparano con i limiti teorici ricavati dalla distribuzione normale con un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 24 si riportano le medie delle colonne.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Mean	0,0086	0,0093	0,0099

Tabella 24 - Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{off}

In Tabella 25 si riportano invece i limiti teorici rinvenuti con la metodologia esposta sopra.

Number of samples averaged	162
Average	0,0093
Average Standard deviation	0,0002
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0088
Upper boundary	0,0097

Tabella 25 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e T_{off}

Dal loro confronto si nota che non ci si trova all'interno dell'intervallo che permette di smentire l'ipotesi nulla, perciò si può presuppore che il parametro considerato abbia effetto sulla rugosità superficiale ottenibile dal processo. Si procede ora con il secondo test d'ipotesi, quello effettuato sulla varianza delle colonne, per poter confermare il risultato ottenuto in precedenza. Vengono quindi calcolate le varianze dei gruppi contenenti i diversi valori di T_{off} e i risultati sono stati riportati in Tabella 26.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Variance	6,5E-06	7,7E-06	8,0E-06

Tabella 26 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{off}

I valori limite in questo caso vengono definiti come cumulata della distribuzione χ^2 per un intervallo di fiducia pari al 95%. I limiti e i valori necessari al loro calcolo vengono riportati in Tabella 27.

Number of samples for variances	162
Expected variance	7,4E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	5,9E-06
Upper boundary of s^2	9,1E-06

Tabella 27 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità e T_{off}

In questo caso i valori calcolati ricadono all'interno dell'intervallo per cui è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e quindi dire che il parametro non ha effetto sulla rugosità superficiale. Si ottengono quindi due risultati contrastanti. Va precisato però che questi due test d'ipotesi presuppongono che la distribuzione dei dati sperimentali segua la

distribuzione gaussiana e χ^2, il test di normalità però aveva già dimostrato però che i dati non si discostavano da tale andamento probabilistico. Quindi, per verificare l'efficacia del T_{off} sulla rugosità superficiale e per superare questa apparente contraddizione, si ricorre all'analisi della varianza. Per effettuare questa analisi si procede in maniera analoga a quanto fatto per gli altri parametri di processo. A partire da questi dati vengono calcolati sia la varianza tra i gruppi che la varianza entro i gruppi o dovuta ad errori casuali, in maniera tale da farne il rapporto e poterlo comparare con il valore limite della distribuzione di Fisher determinato considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. I risultati vengono riassunti in Tabella 28.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	7,21E-05	9,71	3,01
Random errors	483	7,43E-06		
Total	485			

Tabella 28 - ANOVA T_{off} L-PBF: Risultati

Dato che il rapporto delle varianze risulta superiore al valore limite di Fisher, si può dire, commettendo al massimo un errore del 5%, che la variazione dei livelli di T_{off} produce effetti sistematici che portano a variazione dei valori sperimentali di rugosità superficiale.

3.2.5 Effetto Spessore

Si vuole analizzare l'eventuale influenza dell'ultimo parametro di processo considerato all'interno del piano sperimentale, lo spessore. La metodologia per eseguire questo tipo di analisi è identica a quella utilizzate in precedenza, quindi dopo aver verificato l'eventuale presenza di *outliers*, si realizzano i grafici box-plot per i diversi livelli scelti del parametro di processo in questione. Per fare questo sono state calcolate le grandezze necessarie alla realizzazione di tale grafico, che sono state riportate in Tabella 29.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Quart 3	0,0115	0,0108	0,0104
Max	0,0168	0,0168	0,0157
Min	0,0047	0,0050	0,0043
Quart 1	0,0077	0,0071	0,0063
Median	0,0096	0,0087	0,0085
IQR	0,0038	0,0036	0,0042
Max IQR	0,0179	0,0169	0,0174
Min IQR	0,0012	0,0010	-0,0008

Tabella 29 - Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot dello spessore per L-PBF

Il grafico ricavato dai dati in Tabella 29 è riportato in Figura 39. L'andamento del box plot ottenuto è molto simile, anche se con tendenza opposta, a quello ottenuto per il T_{off}. Il primo quartile degli intervalli dei casi in cui lo spessore è pari a 10 mm e 20 mm sono contenuti dai quartili estremi del caso a 30 mm di spessore. Lo stesso non accade per i terzi quartili, anche se essi differiscono di poco. Si può concludere quindi che le regioni in cui sono contenute la maggior parte dei dati non sono così differenti e questo potrebbe far pensare che gli effetti sistematici siano deboli e quindi che il parametro non sia così significativo.

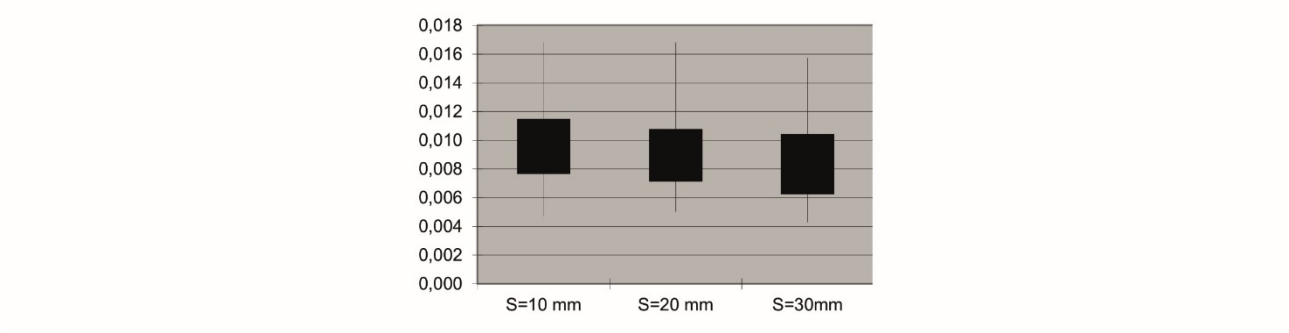

Figura 39 – Box plot spessore e rugosità superficiale per L-PBF

Per poter procedere con i successivi test è necessario formulare l'ipotesi nulla, che in questo caso è:

H_0 : Lo spessore del provino ha effetto sulla rugosità superficiale

Si effettua il primo test d'ipotesi considerando la media delle colonne contenti i differenti livelli del parametro considerato. I loro valori sono stati riportati in Tabella 30.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Mean	0,0097	0,0094	0,0087

Tabella 30 - Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei livelli di spessore

Il valore dei limiti teorici, definiti con il medesimo procedimento utilizzato per gli altri parametri, sono stati riportati in Tabella 31.

Number of samples averaged	**162**
Average	0,0093
Average Standard deviation	0,0002
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0088
Upper boundary	0,0097

Tabella 31 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e spessore

Confrontando i limiti dell'intervallo che permette di rifiutare l'ipotesi con i valori medi calcolati, si può notare che alcuni dei valori calcolati ricadono al di fuori dell'intervallo, perciò non si può scartare l'ipotesi nulla e quindi è possibile che lo spessore abbia effetto sui valori di rugosità superficiale. Come nei casi precedenti si effettua il test d'ipotesi considerando la varianza delle colonne, i valori necessari vengono riportati in Tabella 32 e in Tabella 33.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Variance	6,8E-06	8,1E-06	7,8E-06

Tabella 32 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne di rugosità superficiale relativi ai livelli di spessore

Number of samples for variances	162
Expected variance	7,6E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	6,0E-06
Upper boundary of s^2	9,3E-06

Tabella 33 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e spessore

Anche in questo caso il test d'ipotesi effettuato sulla media delle colonne e quello effettuato sulla loro varianza restituiscono due risultati contradditori. Infatti, le varianze delle colonne calcolate si trovano all'interno dell'intervallo di valori per cui è possibile rigettare l'ipotesi nulla. La motivazione, come nel caso precedente, può essere attribuita all'assunzione che i dati seguano la distribuzione normale e ciò fa sì che il test, in caso di discostamenti da questa, non sia sempre valido. Per eliminare questa contraddizione si utilizza nuovamente l'analisi della varianza tenendo sotto controllo solamente solo un fattore che in questo caso è lo spessore. La procedura seguita per l'analisi in questione è la medesima dei casi precedenti, perciò si riporta direttamente in Tabella 34 dove è possibile determinare se il parametro è significativo o meno. Dai risultati si evince che lo spessore lo spessore ha effetto sul valore di rugosità ottenibile dalla lavorazione poiché il valore del rapporto tra le varianze è maggiore dell'indice di Fisher calcolato per un intervallo di confidenza pari al 95%.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	3,94E-05	5,20	3,01
Random errors	483	7,56E-06		
Total	485			

Tabella 34 – ANOVA spessore L-PBF: Risultati

3.2.6 Modello di Regressione

In questo paragrafo si andrà ad analizzare il piano sperimentale nella sua interezza, considerando tutti i parametri di processo e le eventuali interazioni significative. In questo modo sarà poi possibile poter risalire al modello di regressione e andare a tracciare il grafico degli effetti dei parametri di processo e delle interazioni. Si precisa che in questa analisi non solo si andrà a determinare un modello di regressione ma si cercherà di utilizzare la relazione matematica che spieghi in maniera precisa l'andamento dei dati sperimentali, senza però complicare troppo il modello a causa della presenza di termini poco significativi. Dato l'elevato numero di dati e la complessità delle operazioni, per svolgere tali analisi si ricorrerà al software statistico Minitab (R 17.1 Minitab) tramite il quale è possibile l'analisi diretta del DoE. L'obiettivo che in realtà si vuole conseguire è quello di trovare un'equazione di regressione che leghi direttamente i parametri con la risposta, in questo caso la rugosità superficiale, senza considerare i livelli assunti dalla variabile. Al contrario di quanto fatto in precedenza, non vengono considerati tutte le misurazioni di rugosità per ogni singolo spessore di ogni provino, si considera invece la media delle misure eseguite sul dato spessore. Il motivo di questa scelta è che la definizione di replica di un esperimento presuppone che la prova in questione debba essere ripetuta una o più volte, previo azzeramento e reimpostazione dei parametri di processo da utilizzare. Per questo motivo, ad ogni prova è

stato associato il valore medio delle misurazioni di rugosità superficiale eseguite per un determinato set di parametri di processo e spessore del provino.

La prima operazione effettuata è l'analisi della varianza che anche in questo caso restituisce i risultati riportati in Tabella 35.

Analysis of Variance

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	56,19%	244,20	61,05	24,37	0,000
I	1	0,45%	1,94	1,94	0,78	0,381
Ton	1	47,30%	205,58	205,58	82,05	0,000
Toff	1	5,53%	24,03	24,03	9,59	0,003
Spessore	1	2,91%	12,64	12,64	5,05	0,028
Error	76	43,81%	190,42	2,50		
Total	80	100,00%				

Tabella 35 - ANOVA del Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando solo i parametri di processo

In questo caso dall'analisi si evince che la corrente non sia un parametro significativo dato che il P-Value risulta superiore a 0,05. L'equazione di regressione individuata è quella riportata in equazione (34):

$$Ra = 4{,}43 + 0{,}190 \cdot I + 0{,}1334 \cdot T_{on} - 0{,}0484 \cdot Spessore \quad (34)$$

I dati riguardanti la precisione del modello vengono riportati in Tabella 36, i termini riportati hanno il medesimo significato di quelli esposti nella precedente analisi.

Model Summary

S	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}
1,58	56,19%	53,88%	51,05%

Tabella 36 – Precisione Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando solo i parametri di processo

La precisione del modello risulta limitata e sarà quindi necessario indagare il motivo per cui si verifica questa mancanza di precisione oltre che trovare una motivazione al fatto che la corrente non risulti più un parametro significativo per descrivere la risposta, cosa che invece non accadeva nelle analisi preliminari eseguite sui singoli parametri. Controllando l'andamento dei residui però non si rinviene alcuna anomalia, infatti questi sembrano avere una disposizione casuale. Quello che però è facilmente osservabile è che i dati riguardanti i residui si discostano maggiormente dalla distribuzione normale rispetto all'analisi precedente. In Figura 40 si riportano i grafici dei residui.

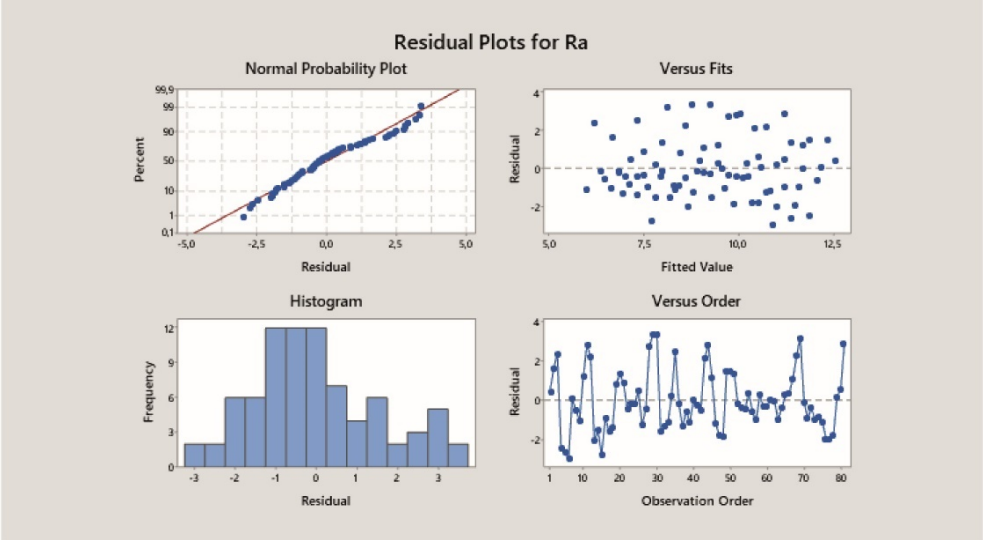

Figura 40 - Grafico dei residui del Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando solo i parametri di processo

Il motivo di questa perdita di precisione del modello poterebbe essere dovuta dal fatto che è stato utilizzato un modello lineare per descrivere l'effetto dei parametri sulla risposta. Se infatti qualche parametro presentasse una relazione quadratica o polinomiale e la si andasse ad approssimare con una relazione lineare, si avrebbe una perdita di informazioni che portano quindi ad una minore precisione del modello. Per risolvere questo problema si cerca se esistono uno o più parametri che presentano una relazione quadratica o polinomiale con la rugosità superficiale e si verifica la disposizione dei residui. In realtà controllando il grafico box-plot della corrente in Figura 36 e il grafico relativo agli effetti dei parametri di processo, si può vedere intravedere che la relazione tra corrente e rugosità superficiale non era di tipo lineare, bensì di tipo quadratico. Per questo motivo si andrà verificare se una relazione quadratica migliora la precisione del modello nel descrivere l'effetto della corrente sulla rugosità superficiale, come nel caso precedente si utilizzerà Minitab. Il modello quadratico generato per regressione è quello espresso in equazione (35).

$$Ra = -13{,}13 + 15{,}91 \cdot I - 2{,}62 \cdot I^2 \tag{35}$$

Il risultato del modello è riportato in Figura 41.

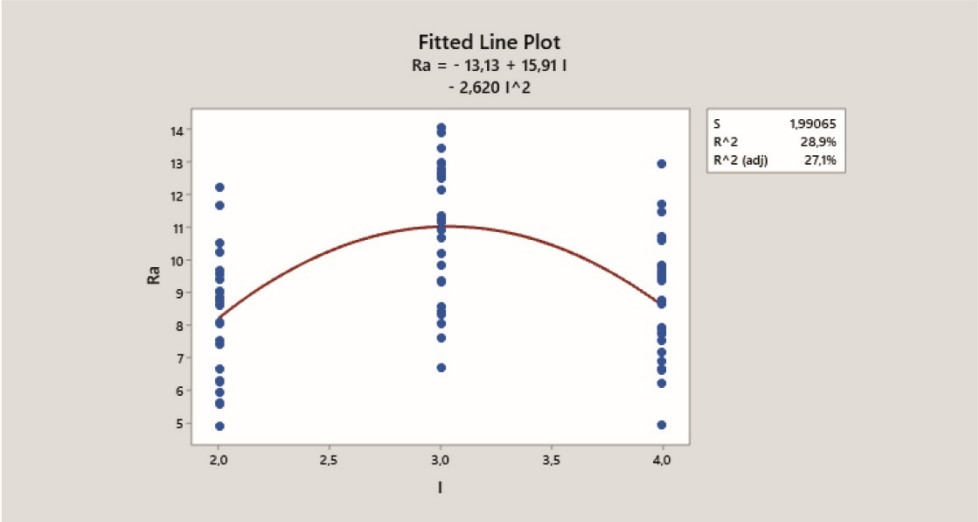

Figura 41 - Regressione quadratica Ra vs I

L'R^2 pari al 28,9% è sufficientemente alto, anche perché la corrente non è il solo parametro che fa variare la rugosità superficiale per cui ottenere valori più elevati risulterebbe difficile. Inserendo quindi nel modello la dipendenza quadratica della corrente si ottengono i risultati riassunti Tabella 37.

Analysis of Variance

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	84,62%	367,80	73,56	82,56	0,000
I	1	0,45%	125,44	125,44	140,78	0,000
Ton	1	47,30%	205,58	205,58	230,73	0,000
Toff	1	5,53%	24,04	24,04	26,98	0,000
Spessore	1	2,91%	12,64	12,64	14,19	0,000
I*I	1	28,44%	123,60	123,60	138,72	0,000
Error	75	15,38%	66,83	0,89		
Total	80	100,00%				

Tabella 37 - ANOVA del Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando i parametri di processo e il termine quadratico di corrente

Analizzando la tabella si può vedere che ora tutti i parametri di processo risultano significativi. A sottolineare il fatto che la relazione che intercorre tra corrente e rugosità superficiale sia quadratica, si può notare come l'influenza del termine lineare risulti molto ridotta, pari allo 0,45%, mentre il termine quadratico della corrente è quello che ha maggiore influenza e spiega meglio il modello. Si evidenzia anche una notevole riduzione dell'errore. In equazione (36) viene riportato modello ottenuto considerando tutti i parametri di processo e il termine quadratico della corrente.

$$Ra = -17{,}40 + 15{,}91 \cdot I + 0{,}1951 \cdot Ton + 0{,}1334 \cdot Toff - 0{,}0484 \cdot Spessore - 2{,}62 \cdot I^2 \quad (36)$$

I dati riguardanti la precisione del modello vengo riportati in Tabella 38.

Model Summary

S	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}
0,943937	84,62%	83,60%	82,10%

Tabella 38 – Precisione del Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando i parametri di processo e il termine quadratico di corrente

I grafici dei residui del modello appena ottenuto vengono riassunti in Figura 42.

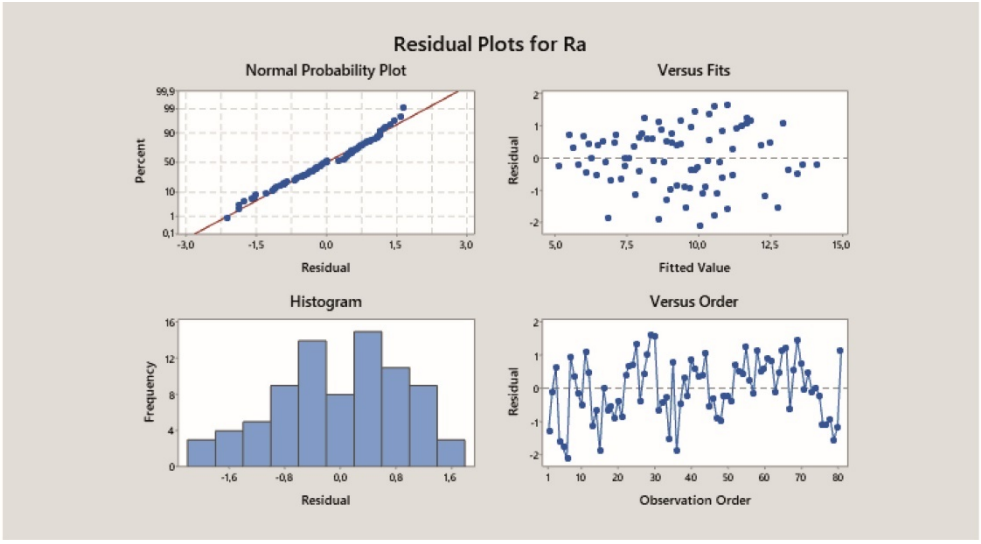

Figura 42 – Grafico dei residui Modello di Regressione per i dati di rugosità di L-PBF considerando i parametri di processo e il termine quadratico di corrente

Analizzando il segno dei residui è possibile notare che questi siano ben dispersi e si dispongano casualmente, questo è sottolineato anche dal fatto che nel Normal Probabilty Plot i residui tendono a disporsi lungo la retta che rappresenterebbe la distribuzione normale.

Vengono svolte delle ulteriori analisi per verificare la presenza di alcune interazioni significative. In realtà i risultati delle analisi dimostrano che nessuna delle interazioni si dimostra significativa oppure se possiede un P-Value maggiore di 0,05, che costituisce il valore di soglia, ha un apporto inferiore all'1% nello spiegare la variabilità dei dati sperimentali. Per questo motivo il modello definitivo è quello riportato in precedenza in equazione (35).

3.2.7 Effetti dei Parametri di Processo

Una volta effettuato lo studio del DoE, è possibile determinare quale siano gli effetti dei parametri di processo sul valore di rugosità superficiale ottenibile e tracciare l'andamento della rugosità al variare dei livelli di ciascuno dei parametri. Figura 43 si riportano i grafici riferiti all'effetto dei parametri.

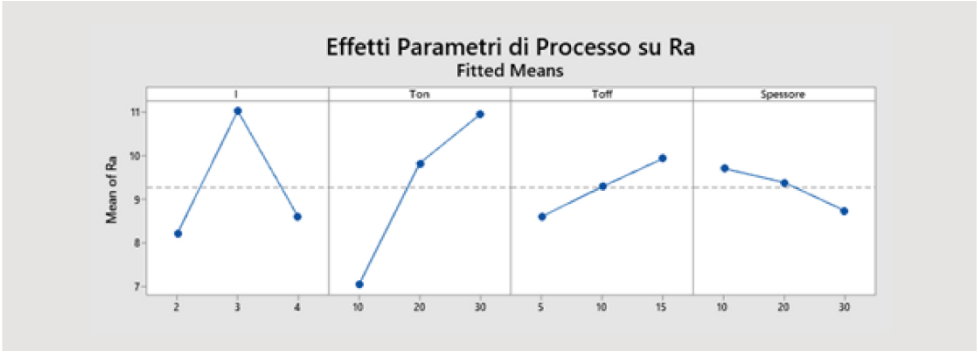

Figura 43 - Effetto dei livelli dei parametri di processo sulla rugosità superficiale per L-PBF

Gli andamenti registrati ricalcano alcuni degli andamenti ritrovati in letteratura e tendenzialmente rispettano i risultati che ci si aspettava durante la realizzazione del piano sperimentale.

Aumentando il T_{on} si verifica un aumento della rugosità superficiale, ciò è in linea con i risultati riportati in letteratura. Infatti, la durata della scarica elettrica è uno di quei parametri che permette di aumentare l'energia che si va a scaricare sul componente durante la lavorazione. Questo permette di erodere più materiale ma allo stesso tempo causa un aumento di dimensione dei crateri, come conseguenza si ottiene un valore di rugosità superficiale maggiore.

L'effetto dovuto alla variazione del T_{off} è il medesimo rivenuto nelle fonti. In tali casi si verificava un aumento della rugosità superficiale dovuto ad un aumento del valore di T_{off}. La motivazione di questo andamento in letteratura viene giustificato dal fatto che valori elevati di questo fattore possono avere un effetto negativo non solo sulla produttività ma anche sulla rugosità superficiale. Il motivo risiede nel fatto che si potrebbe verificare un eccessivo effetto raffreddante del dielettrico e allo stesso tempo si potrebbe avere un aumento di energia necessaria per la formazione del canale di plasma, ciò comporta una maggiore usura dell'elettrodo e l'aumento della rugosità superficiale. Questo potrebbe essere possibile considerando anche che il T_{off} si ricava moltiplicando il T_{on} per il fattore costante che viene deciso a priori, in questo caso 5,10 e 15.

Anche l'effetto dello spessore sulla rugosità superficiale non è anomalo ed in linea con quanto rinvenuto in letteratura. Aumentando lo spessore e lasciando invariati gli altri parametri, la medesima quantità di energia si scarica su uno spessore maggiore e quindi su una superficie maggiore. In questo modo la quantità di materiale eroso e quindi la dimensione dei crateri diminuisce poiché l'energia o la potenza di ogni singola scarica elettrica è minore. Nello specifico si va a ridurre la dispersione di energia di scarica, questa riduzione genera crateri minori e scariche elettriche maggiori in numero ma con minore energia specifica che portano a valori di rugosità superficiale minori [77]. La corrente invece causa un aumento della rugosità superficiale quando si passa da 2 a 3 A, mentre decresce quando si impostano 4 A. Andamenti simili sono stati rinvenuti in letteratura e potrebbe essere dovuto dal materiale che si sta processando oppure dalle condizioni in cui opera la macchina [43].

3.3 Analisi dei dati della velocità di taglio (V_t) per il processo di L-PBF

Si procede in questo capitolo con un'analisi simile a quella fatta in precedenza per determinare quali parametri sono significativi e quale sia il loro effetto. Si studieranno prima i parametri separatamente e successivamente si analizzerà l'intero piano sperimentale per definire un modello di regressione adeguato e per definire anche quali siano gli effetti dei parametri sul processo e quindi sulla velocità di taglio.

3.3.1 Distribuzione dei dati sperimentali

Ricalcando la procedura eseguita in precedenza per l'analisi dei dati della rugosità superficiale, si vuole andare a verificare quale sia la distribuzione dei dati sperimentali e se questa possa essere assimilata ad una distribuzione normale. Per poter paragonare qualitativamente la distribuzione teorica e la distribuzione sperimentale si va a realizzare l'istogramma della frequenza relativa. Utilizzando l'equazione 22, il numero di classi necessario è pari a 9. A questo punto per poter generare all'interno dello stesso grafico la curva di probabilità normale associata, è necessario calcolare le principali grandezze, i cui valori sono stati riassunti in Tabella 39.

Data Number	81	
Mean value	1,3189	mm/min
Standard deviation	0,7633	mm/min
Maximum	3,6300	mm/min
Minimum	0,3700	mm/min

Tabella 39 – Dati principali relativi alle misurazioni di velocità di taglio per L-PBF

Determinato il numero di classi, è possibile la realizzazione della tabella per il calcolo della frequenza relativa e delle altre grandezze che verranno poi utilizzate anche dal test χ^2.

Class	From	To	Mean value	f_a	f_r	Fr. Density	Normal distr.
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm^{-1}]	[mm^{-1}]
1	-1,73412	-1,05567	-1,39489	0	0,000	0,0	0,00
2	-1,05567	-0,37723	-0,71645	0	0,000	0,0	0,01
3	-0,37723	0,30122	-0,03800	0	0,000	0,0	0,11
4	0,30122	0,97967	0,64044	32	0,395	0,6	0,35
5	0,97967	1,65811	1,31889	28	0,346	0,5	0,52
6	1,65811	2,33656	1,99733	14	0,173	0,3	0,35
7	2,33656	3,01500	2,67578	2	0,025	0,0	0,11
8	3,01500	3,69345	3,35423	5	0,062	0,1	0,01
9	3,69345	4,37189	4,03267	0	0,000	0,0	0,00

Tabella 40 – Suddivisione in classi dei dati sperimentali di velocità di taglio di L-PBF e calcolo delle frequenze relative

Dalla Tabella 40 è quindi possibile realizzare l'istogramma riportato in Figura 44. L'analisi del quale non permette di affermare con certezza che i dati siano distribuiti secondo una distribuzione normale ma ci permette di osservare che i dati tendono a disporsi in una maniera particolare. La tendenza dei dati in questo caso è quella di spostarsi verso sinistra, come nel caso dei dati riguardanti la rugosità. Si avrà ancora un'asimmetria negativa o negative skewness ma questa volta il suo valore è ben più alto e vale 1,25. Per effettuare il calcolo è stata utilizzata l'equazione (33).

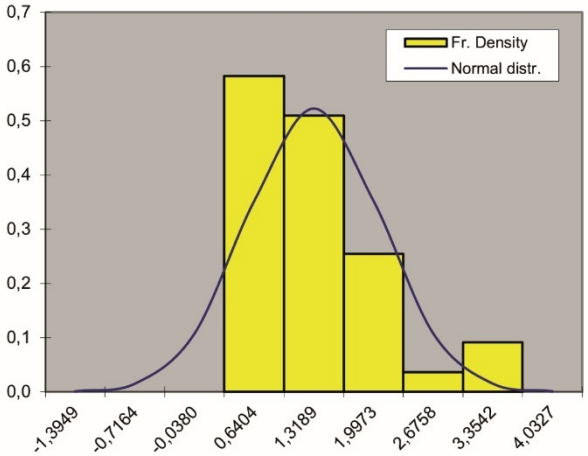

Figura 44 – Istogramma della frequenza relativa dei dati di velocità di taglio di L-PBF e curva di probabilità normale associata

Volendo ora quantificare la differenza che intercorre tra la distribuzione sperimentale e la distribuzione gaussiana teorica, si procede quindi al calcolo della frequenza relativa teorica, della frequenza assoluta teorica e della variabile aleatoria W, calcolata come per il caso precedente.
Si calcola il valore χ^2 sperimentale, ottenuto sommando il valore della variabile aleatoria W di ogni classe. I risultati di questo calcolo vengono riassunti in Tabella 41.

Evaluation of χ^2

From [mm]	To [mm]	f_{rt}	f_{at}	f_a	$(f_a - f_{at})^2/f_{at}$
-1,73412	-1,05567	0,0009	0,1	0	0,07
-1,05567	-0,37723	0,0122	1,0	0	0,99
-0,37723	0,30122	0,0781	6,3	0	6,32
0,30122	0,97967	0,2371	19,2	32	8,52
0,97967	1,65811	0,3433	27,8	28	0,00
1,65811	2,33656	0,2371	19,2	14	1,41
2,33656	3,01500	0,0781	6,3	2	2,96
3,01500	3,69345	0,0122	1,0	5	16,28
3,69345	4,37189	0,0009	0,1	0	0,07
			Experimental χ^2		36,63

Tabella 41 – Valutazione χ^2 sperimentale

Il valore sperimentale deve essere confrontato con i limiti teorici per poter determinare la normalità della distribuzione dei dati. I limiti teorici vengono calcolati considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e 6 gradi di libertà, calcolati sottraendo al numero delle classi il numero di vincoli che, come si era detto nel paragrafo precedente, sono 3. I limiti sperimentali calcolati con i dati valori valgono:

- Limite inferiore χ^2 : 1,24
- Limite superiore χ^2: 14,45

Dato che il χ^2 calcolato è maggiore del limite superiore teorico, si può affermare che la distribuzione dei dati sperimentali non segue la distribuzione normale.
In Figura 45 viene riportato il grafico di probabilità normale per visualizzare graficamente la differenza tra la distribuzione teorica e quella sperimentale.

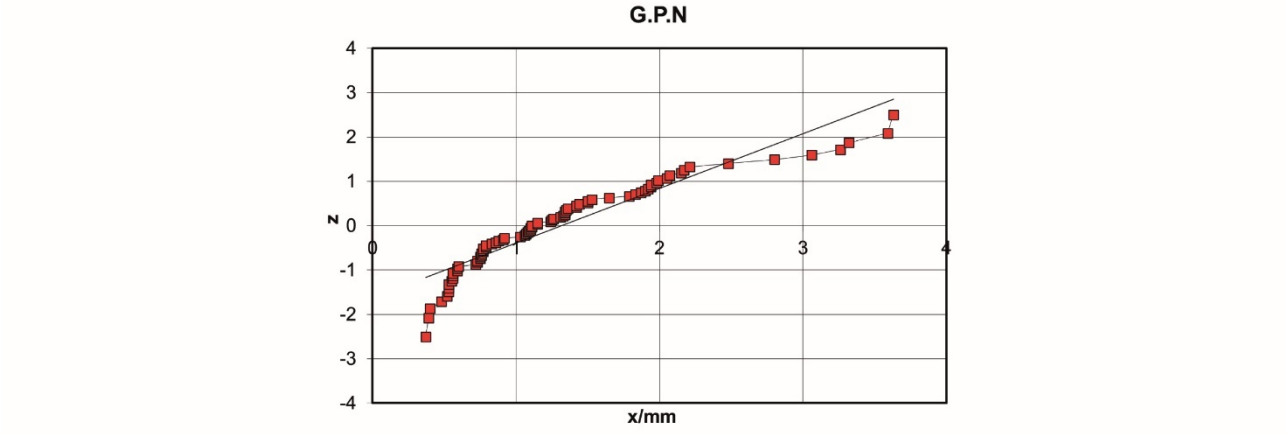

Figura 45 – Grafico di Probabilità Normale dei dati sperimentali di velocità di taglio per L-PBF

A differenza di quanto accade per i dati della rugosità superficiale, i valori di velocità di taglio non si dispongono lungo la retta che rappresenta la distribuzione normale.

Questa disposizione dei valori di velocità di taglio potrebbe far pensare alla presenza di eventuali errori nella procedura di misurazione. In realtà, i valori del tempo impiegato per effettuare il taglio per un dato set di parametri di processo e spessore del provino vengono forniti direttamente dalla macchina.
Per scongiurare l'ipotesi di errore della macchina nella misurazione dei tempi, durante le prove la durata dell'esperimento è stata misurata da un cronometro esterno e si è verificato che, dove c'era discrepanza, questa era solo imputabile alla reattività di chi effettuava le misurazioni.

Per questi motivi la non normalità della distribuzione dei dati potrebbe essere imputata a condizioni che si verificano durante il processo. Infatti, alcune combinazioni dei parametri di processo e di spessore permettono una maggiore stabilità del processo, altre invece causano delle oscillazioni di tensione e corrente più evidenti. In alcuni casi si potrebbe anche verificare che per evitare cortocircuiti si abbia un arretramento dell'elettrodo a causa dell'instabilità del processo. Questi fattori possono influenzare il tempo di lavorazione e potrebbero essere la causa di non normalità di alcuni dati. Altre cause potrebbero essere ritrovate nell'usura progressiva del filo che ne altera le proprietà e quindi potrebbe essere un fattore che causi variazioni delle prestazioni della macchina, oppure nella metodologia con cui viene effettuato l'esperimento. Infatti, per un dato set di parametri si tagliano sequenzialmente tutti gli spessori a partire dal più sottile al più spesso, questo potrebbe avere una certa influenza sulle misurazioni del tempo necessario ad effettuate il taglio. Nei seguenti paragrafi si effettueranno ulteriori analisi per determinare se i parametri considerati hanno effetto sulla produttività della macchina.

3.3.2 Effetto della Corrente

Similmente a quanto è stato fatto per la rugosità superficiale, si vuole indagare quale sia l'effetto della corrente sulla velocità di taglio e quindi sulla produttività della lavorazione. Per fare questo viene utilizzata la metodologia esposta nel paragrafo 3.1 che è anche stata utilizzata nelle analisi precedenti.
I dati vengono quindi divisi secondo i tre livelli assumibili dal parametro e si vanno a calcolare le grandezze necessarie alla determinazione dei grafici box-plot.

	I = 2A	**I = 3A**	**I = 4A**
Quart 3	1,42	1,88	1,95
Max	2,80	3,59	3,63
Min	0,37	0,48	0,53
Quart 1	0,57	0,75	0,77
Median	0,92	1,26	1,33
IQR	0,84	1,13	1,18
Max IQR	2,74	3,65	3,79
Min IQR	-0,74	-1,01	-1,07

Tabella 42 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot della corrente per L-PBF

Il grafico ricavato dai dati della Tabella 42 è stato riportato in Figura 46.

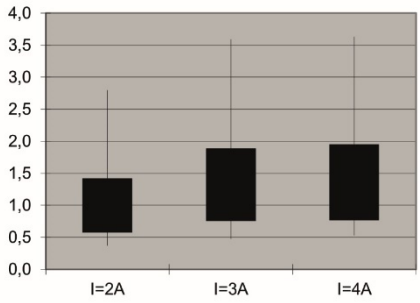

Figura 46 – Box-plot corrente e velocità di taglio per L-PBF

Analizzando il grafico si può notare come i quartili dei casi in cui la corrente assume i valori di 3 e 4 A siano quasi allineate e di conseguenza anche le aree rettangolari risultano sovrapposte. Questo dice che in questi due casi la concentrazione dei valori è più o meno la medesima e che quindi gli eventuali effetti sistematici dovuti alla variazione di corrente non sono così evidenti. Nel caso di minore intensità della corrente si osserva che il primo quartile non è contenuto dalle aree degli altri casi ma per la restante parte l'area rettangolare individuata risulta contenuta in quella dei due casi analizzati in precedenza. Questo sottolinea forse una bassa influenza del parametro sul processo. In realtà per poter sostenere questa affermazione è necessario svolgere ulteriori verifiche come i test d'ipotesi e l'analisi della varianza.

Per procedere è necessario formulare l'ipotesi nulla che verrà poi smentita o confermata dai test, in questo caso l'ipotesi che si vuole verificare è la seguente:

H_0 : La corrente ha influenza sulla velocità di taglio.

Si procederà a verificare tale affermazione mediante i test d'ipotesi eseguiti su media e varianza.
Per effettuare il primo test si calcolano le medie delle colonne, ovvero le medie dei valori di velocità di taglio per un determinato valore di corrente.
I risultati dei calcoli sono riportati in Tabella 43.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Mean	1,09	1,39	1,47

Tabella 43 – Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di corrente

I risultati ottenuti dai calcoli vanno confrontati con i limiti teorici che vengono determinati con un intervallo di confidenza pari al 95% e come cumulata della distribuzione normale. I limiti teorici e le grandezze necessarie al calcolo vengono riportate in Tabella 44.

Number of samples averaged	**27**
Average	1,32
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,03
Upper boundary	1,60

Tabella 44 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e corrente

Dato che i valori calcolati ricadano all'interno dei limiti dell'intervallo teorico, è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e dire che la corrente non ha effetto sulla velocità di taglio. Per confermare il risultato ottenuto si effettua anche il secondo

test d'ipotesi che è eseguito sulla varianza delle colonne, pertanto si calcolano le varianze delle colonne per ogni livello di corrente. I risultati dei calcoli vengono riportati in Tabella 45.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Variance	4,0E-01	5,7E-01	7,3E-01

Tabella 45 – Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di corrente

Come nel caso precedente, i valori calcolati vanno confrontati con i relativi limiti teorici calcolati come cumulata della distribuzione χ^2, utilizzando sempre un intervallo di confidenza pari al 95%. I valori dei limiti teorici e le grandezze utilizzate per il loro calcolo vengono riportati in Tabella 46.

Number of samples for variances	**27**
Expected variance	5,7E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	3,0E-01
Upper boundary of s^2	9,2E-01

Tabella 46 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e corrente

In questo caso il test sulla varianza conferma l'esito del precedente test effettuato sulla media, infatti anche in questo caso i valori calcolati si trovano all'interno dell'intervallo individuato dai limiti teorici, perciò è possibile rifiutare l'ipotesi nulla.

Come ultimo test si effettua l'analisi della varianza (ANOVA), si procede quindi al calcolo delle medie e delle varianze delle colonne che sono le grandezze necessarie al calcolo della varianza tra i gruppi e la varianza dovuta ad errori causali o varianza entro il gruppo. Ottenuti questi due valori è possibile farne il rapporto e confrontarlo con il valore limite associato della distribuzione di Fisher, considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 47 vengono si riportano i risultati ottenuti. Come si può notare il rapporto tra le varianze è inferiore al valore limite di Fisher e quindi si può rifiutare l'ipotesi iniziale. In questo caso l'analisi della varianza mette in luce quello che era stato già osservato mediante il test d'ipotesi, ovvero che il valore della corrente non influenza la velocità di taglio.

Variation cause	**Degrees of Freedom**	**Variance**	**Variance ratio**	**F Max**
Examined factor	2	1,11E+00	1,95	3,11
Random errors	78	5,69E-01		
Total	80			

Tabella 47 – ANOVA corrente L-PBF: Risultati

Sebbene si sia trovato questo risultato, prima di eliminare la corrente dagli studi che verranno fatti in seguito, si ne studierà l'influenza anche sul software statistico Minitab (R 17.1 Minitab), per vedere se considerando i P-Value questo parametro risulti non significativo oppure se guadagna significatività a causa delle interazioni che potrebbe avere con qualche altro parametro di processo.

3.3.3 Effetto T_{on}

Si vuole indagare ora l'eventuale influenza della durata del tempo di scarica velocità di taglio della lavorazione. Per effettuare questa indagine si procede con la medesima modalità utilizzata per il caso della corrente. Vengono perciò calcolati i valori necessari alla realizzazione del grafico box-plot, riportati in Tabella 48.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Quart 3	1,85	1,68	1,64
Max	3,63	3,32	3,26
Min	0,39	0,37	0,40
Quart 1	0,75	0,74	0,78
Median	1,15	1,10	1,11
IQR	1,09	0,94	0,86
Max IQR	3,49	3,10	2,94
Min IQR	-0,88	-0,67	-0,52

Tabella 48 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot del T_{on} *per L-PBF*

Sebbene sia in questo caso che nel caso della corrente siano stati rinvenuti degli *outliers*, non si è provveduto alla loro rimozione poiché, avendo una sola misurazione per esperimento e a causa dei fattori esposti nel paragrafo 1.3.1 che potrebbero influenzare l'acquisizione, si eliminerebbero dati che non permetterebbero lo studio di numerose prove. Questa procedura verrà adottata anche lo studio dell'influenza degli ulteriori parametri di processo.

Dallo studio del grafico riportato in Figura 47 è possibile ipotizzare che anche in questo caso il T_{on} non sia un parametro che vada ad influenzare in maniera preponderante la velocità della lavorazione. Questo viene suggerito dal fatto che le aree individuate dai quartili nei tre casi risultino quasi totalmente sovrapposte.

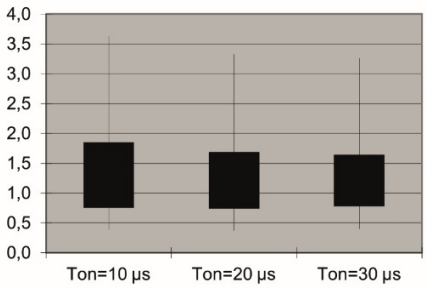

Figura 47 – Box-plot T_{on} *e velocità di taglio per L-PBF*

Si procede con la verifica dell'ipotesi nulla tramite i due test d'ipotesi. In questo caso l'affermazione che si cercherà di smentire è la seguente:

$$H_0: Il\ T_{on}\ ha\ influenza\ sulla\ velocità\ di\ taglio.$$

Vengono quindi calcolate le medie delle colonne e vengono confrontate con i limiti teorici, calcolati facendo ricorso alla distribuzione normale avente media e deviazione standard riferite alla globalità delle acquisizioni. Si è considerato inoltre un intervallo di confidenza pari al 95%. I valori delle medie delle colonne sono riportati in Tabella 49.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Mean	1,40	1,26	1,29

Tabella 49 - Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{on}

I limiti teorici calcolati con la procedura esposta in precedenza sono riportati in Tabella 50.

Number of samples averaged	27
Average	1,32
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,03
Upper boundary	1,60

Tabella 50 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e T_{on}

I valori calcolati ricadono all'interno dell'intervallo teorico, per questo motivo è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e dire che la durata della scarica elettrica non ha influenza sulla velocità di taglio della macchina. Il test d'ipotesi effettuato sulla varianza delle colonne restituisce il medesimo risultato, infatti dato che i valori calcolati ricadono all'interno dei valori limite teorici è possibile negare l'ipotesi nulla. In Tabella 51 si riportano i valori calcolati, mentre in Tabella 52 riportano i limiti teorici che sono stati determinati facendo riferimento alla distribuzione χ^2. Si è sempre considerato un intervallo di confidenza pari al 95%.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Variance	7,8E-01	4,8E-01	5,2E-01

Tabella 51 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{on}

Number of samples for variances	27
Expected variance	5,9E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	3,2E-01
Upper boundary of s^2	9,6E-01

Tabella 52 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e T_{on}

In ultima battuta si effettua l'analisi della varianza (ANOVA) per avere conferma dei risultati ottenuti con i test d'ipotesi, dato che quest'ultimo strumento risulta più preciso e rigoroso rispetto ai precedenti.

Si calcolano quindi le varianze tra i gruppi e la varianza all'interno del gruppo, detta varianza dovuta ad errori casuali, in maniera tale da poter costruire la tabella ANOVA. Il rapporto tra le due grandezze calcolate viene paragonato ad un valore limite calcolato considerando un intervallo di confidenza pari al 95% della distribuzione di Fisher. Dai risultati riportati in Tabella 53 si evince che il rapporto tra le due grandezze è minore del valore limite, pertanto si può dire che la durata della scarica non abbia effetto sul valore di velocità di taglio. Prima di escludere totalmente il parametro, si effettueranno delle analisi sul DoE con Minitab.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	1,44E-01	0,24	3,11
Random errors	78	5,94E-01		
Total	80			

Tabella 53 – ANOVA T_{on} L-PBF: Risultati

3.3.4 Effetto T_{off}

Si vuole analizzare l'influenza del T_{off} sulla lavorazione e per questo si procede anche in questo caso alla realizzazione del box-plot, in Tabella 54 si riportano i valori calcolati necessari alla sua realizzazione.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Quart 3	2,34	1,57	1,11
Max	3,63	2,15	1,44
Min	0,91	0,53	0,37
Quart 1	1,29	0,76	0,54
Median	1,87	1,09	0,75
IQR	1,05	0,81	0,57
Max IQR	3,98	2,84	2,01
Min IQR	-0,34	-0,50	-0,36

Tabella 54 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot del T_{off} per L-PBF

In questo caso non si verifica la presenza di *outliers* e si procede con la realizzazione del grafico, riportato in Figura 48.

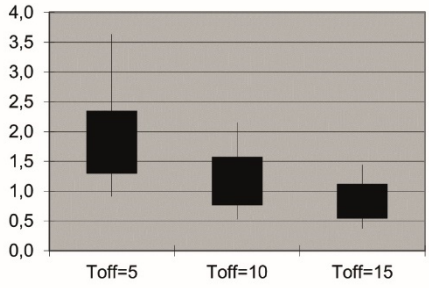

Figura 48 - Box-plot T_{off} e velocità di taglio L-PBF

Analizzando il grafico è possibile vedere una chiara presenza di effetti sistematici tra i diversi casi che determinano una certa relazione tra il parametro considerato e la velocità di taglio. Si può notare che aumentando la durata dell'intervallo che intercorre tra due scariche consecutive, la velocità di taglio decresce. Questa tendenza è messa in luce dal fatto che le aree rettangolari individuate dai quartili non risultano allineate se non per piccole porzioni dell'area e che i quartili, al variare del livello del parametro, riducano sempre più il loro valore.

Per verificare quanto appena riportato si proseguirà effettuando i test d'ipotesi e l'analisi della varianza. Si formula quindi l'ipotesi nulla, che in questo caso è la seguente:

H_0 : Il T_{off} ha influenza sulla velocità di taglio

Procedendo con ordine, si effettua per primo il test d'ipotesi sulla media delle colonne. Vengono calcolati quindi tali valori e si confrontano con i limiti teorici della distribuzione normale, considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 55 vengono riportati i valori delle medie, mentre in Tabella 56 si riportano i limiti teorici. Confrontando questi valori si può facilmente evincere che il parametro considerato abbia effetto sulla velocità di taglio, dato che alcune delle medie calcolate si trovano al di fuori dell'intervallo teorico e quindi non è possibile negare l'affermazione fatta in principio.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Mean	1,95	1,17	0,82

Tabella 55 - Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{off}

Number of samples averaged	27
Average	1,3189
Average Standard deviation	0,1469
Confidence level	95%
Lower boundary	1,0310
Upper boundary	1,6068

Tabella 56 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e T_{off}

Fatto questo si realizza invece il secondo test d'ipotesi, dove si va a considerare la varianza delle colonne. In questo caso i limiti teorici vengono calcolati con la medesima procedura utilizzata in precedenza per questo test, facendo riferimento alla distribuzione χ^2 e con un intervallo di fiducia pari al 95%. In Tabella 57 si riportano i valori della varianza delle colonne, in Tabella 58 si riportano invece i valori dei limiti teorici.

	Toff=5	Toff=10	Toff=15
Mean	7,0E-01	2,7E-01	1,3E-01

Tabella 57 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{off}

Number of samples for variances	27
Expected variance	3,7E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	1,9E-01
Upper boundary of s^2	5,9E-01

Tabella 58 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e T_{off}

Confrontando i valoro calcolati con i limiti teorici, il test restituisce il medesimo risultato esposto in precedenza. Alcuni valori delle varianze delle colonne non si trovano all'interno dell'intervallo per il quale è possibile rifiutare l'ipotesi nulla, quindi anche in questo caso è possibile sostenere che il parametro studiato abbia effetto sulla velocità di taglio e quindi sulla produttività della lavorazione.

Per avere un'ulteriore conferma o rifiuto dell'ipotesi nulla, si effettua infine l'analisi della varianza. Vengono per questo motivo calcolate le grandezze di interesse, come la varianza tra i gruppi, la varianza entro il gruppo o dovuta ad errori casuale ed infine il valore limite della distribuzione di Fisher, calcolato come negli altri casi con un intervallo di

confidenza pari al 95%. Si riporta in Tabella 59 la tabella del calcolo della varianza. Analizzando i risultati, dato che il rapporto tra le varianze risulta ben maggiore del valore limite di Fisher, è possibile accettare l'ipotesi nulla e quindi dire che il T_{off} ha effetto sul valore della velocità di taglio.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	9,05E+00	24,75	3,11
Random errors	78	3,66E-01		
Total	80			

Tabella 59 – ANOVA T_{off} L-PBF: Risultati

3.3.5 Effetto Spessore

La procedura per studiare l'influenza dello spessore sulla velocità di taglio è uguale a quella adottata in precedenza. Si calcolano i valori necessari alla rappresentazione del grafico box-plot, in Tabella 60 si riportano le grandezze calcolate per la realizzazione del grafico.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Quart 3	2,34	1,43	0,97
Max	3,62	2,17	1,41
Min	1,06	0,55	0,37
Quart 1	1,38	0,77	0,53
Median	1,90	1,08	0,72
IQR	0,95	0,65	0,44
Max IQR	3,84	2,46	1,66
Min IQR	-0,11	-0,24	-0,15

Tabella 60 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot dello spessore per L-PBF

In Figura 49 si riporta il grafico realizzato utilizzando i dati della Tabella 61. Analizzando il grafico è possibile trovare delle analogie con il box-plot del T_{off}. Si può rintracciare la stessa tendenza e relazione che intercorre tra T_{off} e velocità di taglio, infatti all'aumentare dello spessore diminuisce la velocità del processo per effettuare un taglio di una data lunghezza. Tale tendenza è suggerita dalle aree rettangolari individuate dai quartili di ogni livello, poiché i terzi quartili ed anche i primi quartili diminuiscono progressivamente all'aumentare dello spessore. Le aree, a differenza di quello che accadeva per la corrente e per la durata della scarica elettrica, non risultano sovrapposte se non per qualche piccola frazione. Queste differenze presenti tra i box-plot dei vari livelli del parametro mettono in evidenza che potrebbe essere presente un effetto sistematico dovuto allo spessore.

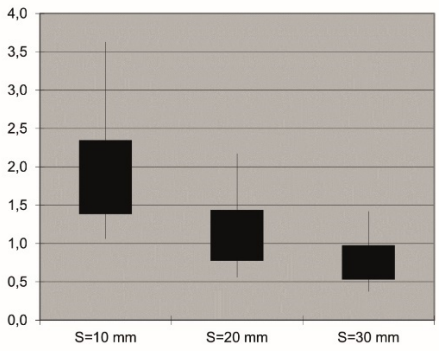

Figura 49 – Box-plot spessore e velocità di taglio per L-PBF

Per verificare la presenza di effetti sistematici si effettuato prima i test d'ipotesi e successivamente l'analisi della varianza. Prima di poter procedere è necessario formulare l'ipotesi nulla, che verrà poi confermata o rifiutata dei test. In questo caso l'ipotesi nulla è la seguente:

H_0 : Lo spessore ha influenza sulla velocità di taglio

Si calcolano quindi le medie delle colonne e i rispettivi limiti teorici per poter eseguire il primo test. Tali limiti sono stati calcolati come in precedenza, ovvero tramite la distribuzione normale considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 61 si riportano i valori delle medie delle colonne, mentre in Tabella 62 vengono riportati i valori dei limiti teorici.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Mean	2,00	1,16	0,78

Tabella 61 - Test ipotesi I (L-PBF): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di spessore

Number of samples averaged	**27**
Average	1,31
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,03
Upper boundary	1,60

Tabella 62 - Test ipotesi I (L-PBF): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e spessore

Dal confronto delle due tabelle non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla poiché i valori calcolati non ricadono all'interno dell'intervallo individuato dai limiti teorici. Perciò non è possibili escludere che lo spessore abbia effetto sulla velocità di taglio. Si effettua il secondo test d'ipotesi, in questo caso la verifica si effettua sulla varianza delle colonne. Vengono pertanto calcolati i valori delle varianze delle colonne e vengono comparati con i valori limite, questa volta vengono definiti utilizzando la distribuzione χ^2 e un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 63 vengono riportati i valori delle varianze delle colonne riferite ai vari livelli del parametro considerato, mentre in Tabella 64 si riportano i valori dei limiti teorici.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Variance	6,2E-01	2,5E-01	1,0E-01

Tabella 63 - Test ipotesi II (L-PBF): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di spessore

Number of samples for variances	27
Expected variance	3,2E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	1,7E-01
Upper boundary of s^2	5,2E-01

Tabella 64 - Test ipotesi II (L-PBF): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e spessore

L'esito del secondo test d'ipotesi conferma quanto si era ottenuto in precedenza, infatti i valori di varianza calcolati non rientrano negli estremi teorici e per questo motivo non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Perciò anche in questo caso il risultato è che lo spessore ha effetto sulla velocità di taglio.

L'ultimo test che rimane da effettuare è l'analisi della varianza. Per fare questo si utilizza la solita procedura: si calcola la varianza tra i gruppi e la varianza entro i gruppi o dovuta ad errori casuali. Fatto questo è possibile farne il rapporto e compararlo con valore limite, calcolato dalla distribuzione di Fisher per un intervallo di confidenza pari al 95%. Dato che il rapporto tra le varianze è maggiore del valore limite della distribuzione di Fisher è possibile dire che il fattore considerato abbia effetto sulla velocità di taglio, dato che non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. In Tabella 65 per completezza si riporta la tabella ANOVA dove sono presenti tutti i risultati dei calcoli.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	1,06E+01	32,73	3,11
Random errors	78	3,25E-01		
Total	80			

Tabella 65 – ANOVA spessore L-PBF: Risultati

3.3.6 Modello di Regressione

In questo paragrafo si andrà a studiare l'intero piano sperimentale (DoE) per determinare e quantificare quale sia l'effetto dei vari parametri di processo sul processo, oltre che determinare un modello di regressione che sia in grado di descrivere adeguatamente i dati sperimentali. Il modello di regressione che si andrà a determinare terrà conto solo dei parametri di processo e delle loro eventuali interazioni che risultano significative, in maniera tale da non complicare inutilmente il modello. La procedura utilizzata è analoga a quella utilizzata in precedenza, si utilizzerà il software statistico Minitab (R 17.1 Minitab) per l'analisi dei dati, la determinazione degli effetti e della generazione dei grafici degli effetti dei parametri di processo. I dati sono stati organizzata in maniera differente rispetto a prima. I dati sono molto meno numerosi rispetto alle misurazioni di rugosità, si dispone infatti solamente di una misurazione per esperimento e di conseguenza, dopo aver generato un DoE o aver riportato le varie combinazioni dei parametri, si riporta il valore di velocità di taglio misurato per la data prova.
Le analisi svolte in precedenza sui singoli parametri hanno messo in luce che la corrente e il T_{on} non influiscono sulla lavorazione in termini di velocità di taglio.
Successive analisi mediante il software Minitab hanno evidenziato la significatività della corrente e che non vi siano interazioni significative, se non quella presente tra T_{off} e spessore.
Si riporta quindi il modello di regressione considerando solamente i parametri di processo e le interazioni significative quindi P-Value $< 0,05$ e una contribuzione significativa nella precisione del modello di regressione.

Il modello individuato è riportato in equazione (37).

$$V_t = 4{,}051 + 0{,}1931 \cdot I - 0{,}2086 \cdot T_{off} - 0{,}10901 \cdot Spessore + 0{,}004771 \cdot T_{off} * Spessore \quad (37)$$

In Tabella 66 e in Tabella 67 si riportano rispettivamente i dati della precisione del modello e dell'analisi della varianza.

Model Summary

S	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}
0,254949	89,40%	88,84%	87,78%

Tabella 66 – Precisione del Modello di Regressione considerando solo parametri di processo e le interazioni significative

Analysis of Variance

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	89,40%	41,66	10,41	160,23	0,000
I	1	4,32%	2,01	2,01	30,96	0,000
Toff	1	37,10%	8,39	8,38	129,07	0,000
Spessore	1	43,59%	9,17	9,17	141,10	0,000
Toff*Spessore	1	4,40%	2,04	2,04	31,51	0,000
Error	76	10,60%	4,94	0,06		
Total	80	100,00%				

Tabella 67 – ANOVA del Modello di Regressione considerando solo parametri di processo e le interazioni significative

Come si può vedere in Tabella 67, all'interno del modello sono stati inclusi solo i parametri significativi. Si analizza poi il segno dei residui. I grafici vengono riportati in Figura 50 e si può vedere che sebbene i residui sembrino attenersi alla distribuzione normale, dato che si dispongono sulla retta ad eccezione di alcuni punti, analizzando il segno dei residui sembra esserci una certa tendenza nell'assunzione del segno. Questo potrebbe significare che all'interno dei modelli non si sono considerati altri fattori che potrebbero produrre effetti sistematici, le cui cause potrebbero essere rintracciate 3.3.1.

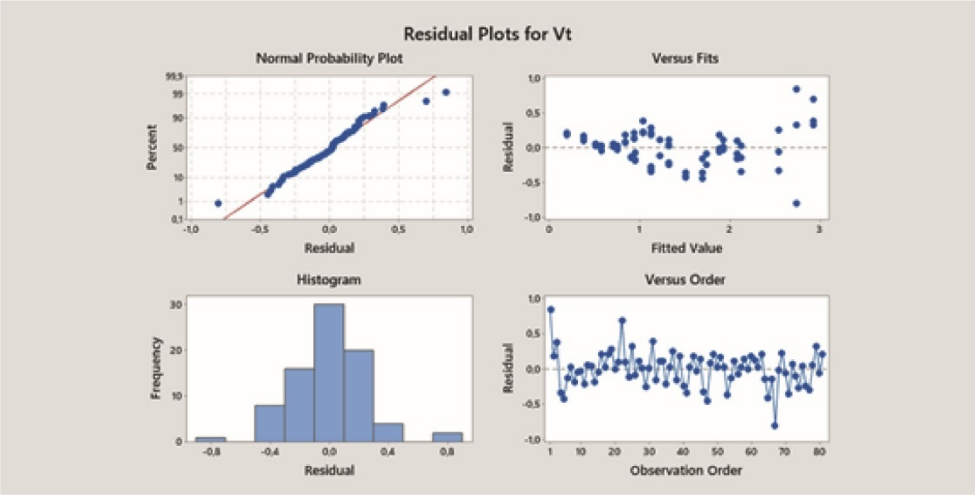

Figura 50 - Residui del Modello di Regressione considerando solo parametri di processo e le interazioni significative

3.3.7 Effetto dei parametri di processo

Poiché si sono studiati tutti i parametri di processo è possibile tracciare il grafico dell'effetto che questi hanno sul valore di velocità di taglio ottenibile dalla lavorazione. I risultati sono riportati in Figura 51.

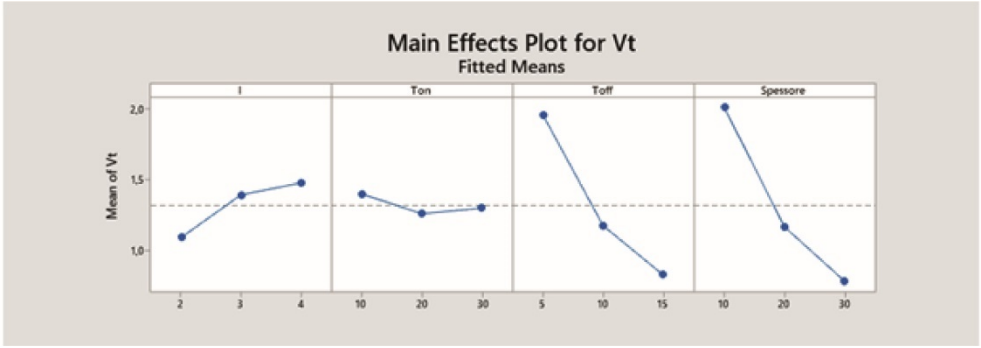

Figura 51 – Effetto dei livelli parametri di processo sulla velocità di taglio per L-PBF

Anche in questo caso i risultati rinvenuti sperimentalmente sono in linea a quelli rinvenuti in letteratura e per questo si può dire che non siano anomali. L'unico parametro che invece sembra avere una tendenza differente da quella trovata in letteratura è il T_{on}. Infatti, quello che le fonti riportano è che a fronte dell'aumento di questo parametro si verifica un aumento della velocità di taglio o del MRR. Questo accade perché il T_{on} è legato all'energia di scarica e quindi aumentandolo, aumenta anche l'energia sprigionata durante la scarica elettrica. I risultati riguardanti la rugosità superficiale, riportati al paragrafo 3.2.7, dimostrano che l'aumento del T_{on} provochi un aumento dell'energia che si traduce in una peggiore finitura superficiale dovuta ad una maggiore dimensione dei crateri. Per questo motivo, le cause del particolare legame che intercorre tra la durata della scarica elettrica e la velocità di taglio sono da rintracciare all'interno delle soluzioni costruttive della macchina. Come è già stato detto in precedenza, il calcolo del T_{off} avviene moltiplicando il valore di T_{on} per una costante impostata dall'operatore e per questo motivo i tempi non produttivi saranno sempre maggiori rispetto a quelli produttivi. Perciò all'aumentare del parametro, tenendo fissa la costante moltiplicativa, si verifica un progressivo aumento dei tempi improduttivi che se non vengono compensati da una maggiore erosione durante il tempo di scarica, diventano il fattore principale che determina la produttività della macchina, come si verifica in questo caso. Quindi si può dire che a causa del legame moltiplicativo che intercorre tra i due parametri temporali e forse anche per l'intervallo scelto di questi, il T_{off} abbia un effetto preponderante sulla produttività della macchina. La corrente e lo spessore invece presentano l'andamento che ci si aspettava durante la pianificazione del piano sperimentale. Il primo fattore, infatti è un parametro elettrico che è direttamente proporzionale all'energia di scarica, aumentando la corrente si va ad aumentare l'energia e quindi la velocità di taglio a causa di una maggiore capacità di erodere materiale. Lo spessore invece, come riportato delle fonti, riduce significativamente la produttività del processo a causa della riduzione della dispersione energetica. A parità di energia su uno spessore maggiore si vanno a formare un numero maggiore di scariche ma con un'intensità ridotta, questo provoca dei crateri di piccole dimensioni che di conseguenza erodono una minore quantità di materiale e come conseguenza di questo, la velocità di taglio si riduce più aumenta lo spessore. Nel modello è stata anche inclusa l'interazione presente tra spessore e T_{off}, questa contribuisce a spiegare la variabilità dei dati all'interno del modello e comporta che oltre alla diminuzione progressiva della velocità dovuta dall'aumento del tempo improduttivo, si aggiunga la diminuzione introdotta dall'aumento di spessore.

3.4 Analisi dei dati della rugosità superficiale (Ra) per il processo di EBM

Si vuole ora analizzare l'effetto dei parametri di processo sulla rugosità superficiale, in questo caso lo studio è stato effettuato su provini prodotti tramite il processo di Electron Beam Melting (EBM). La modalità con cui si svolgerà questo studio è la medesima di quella utilizzata per i provini di Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF). Si verificherà prima la distribuzione dei dati sperimentali, in maniera da individuare eventuali errori di misura, e successivamente si studierà la significatività e quindi l'effetto dei singoli parametri sul valore di rugosità superficiale ottenibile, per arrivare infine a determinare un modello di regressione dei dati in cui vengano considerati solamente i parametri significativi. In questo modo si cerca di ottenere un modello semplice, composto da pochi termini ma che spieghi adeguatamente i dati sperimentali.

3.4.1 Distribuzione dei dati sperimentali per il processo di EBM

Anche in questo caso si vuole vedere come siano distribuiti i valori delle misurazioni e se questi seguano una distribuzione normale. La verifica della normalità dei dati avverrà tramite gli strumenti utilizzati al paragrafo 3.2.1. Si procederà realizzando l'istogramma della frequenza relativa. Dato che si sono effettuate il medesimo numero di misurazioni, il numero di classi utili per una rappresentazione adeguata del campione risulta ancora pari a 22. A questo punto per poter generare all'interno dello stesso grafico la curva di probabilità normale associata, è necessario calcolare le principali grandezze, i cui valori sono stati riassunti in Tabella 68.

Data Number	**486**	
Mean value	0,0083	mm
Standard deviation	0,0019	mm
Maximum	0,0138	mm
Minimum	0,0041	mm

Tabella 68 – Dati principali relativi alle misurazioni di rugosità superficiale per EBM

Volendo procedere e volendo realizzare in seguito il test χ^2, i dati sono stati elaborati così da poter permettere: la suddivisione in classi per determinarne l'ampiezza, il calcolo della frequenza assoluta, relativa e della frequenza associata alla distribuzione normale per valore di media e deviazione standard sperimentali. I risultati vengono riportati in Tabella 69.

Class	From	To	Mean value	f_a	f_r	Fr. Density	Normal distr.
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm^{-1}]	[mm^{-1}]
1	0,00078	0,00146	0,00112	0	0,000	0,00	0,15
2	0,00146	0,00214	0,00180	0	0,000	0,00	0,55
3	0,00214	0,00283	0,00248	0	0,000	0,00	1,79
4	0,00283	0,00351	0,00317	0	0,000	0,00	5,16
5	0,00351	0,00419	0,00385	1	0,002	3,02	13,02
6	0,00419	0,00487	0,00453	3	0,006	9,05	28,79
7	0,00487	0,00555	0,00521	20	0,041	60,35	55,77
8	0,00555	0,00623	0,00589	37	0,076	111,65	94,65
9	0,00623	0,00692	0,00658	74	0,152	223,29	140,73
10	0,00692	0,00760	0,00726	67	0,138	202,17	183,34
11	0,00760	0,00828	0,00794	65	0,134	196,13	209,26
12	0,00828	0,00896	0,00862	49,000	0,101	147,86	209,26
13	0,00896	0,00964	0,00930	48,000	0,099	144,84	183,34
14	0,00964	0,01033	0,00999	40,000	0,082	120,70	140,73
15	0,01033	0,01101	0,01067	36,000	0,074	108,63	94,65
16	0,01101	0,01169	0,01135	25,000	0,051	75,44	55,77
17	0,01169	0,01237	0,01203	14,000	0,029	42,24	28,79
18	0,01237	0,01305	0,01271	4,000	0,008	12,07	13,02
19	0,01305	0,01374	0,01339	2,000	0,004	6,03	5,16
20	0,01374	0,01442	0,01408	1,000	0,002	3,02	1,79
21	0,01442	0,01510	0,01476	0,000	0,000	0,00	0,55
22	0,01510	0,01578	0,01544	0,000	0,000	0,00	0,15

Tabella 69 – Suddivisione in classi dei dati sperimentali di velocità di taglio di L-PBF e calcolo delle frequenze relative

In Figura 52 si riporta l'istogramma ottenuto grazie ai valori riportati nella tabella precedente.

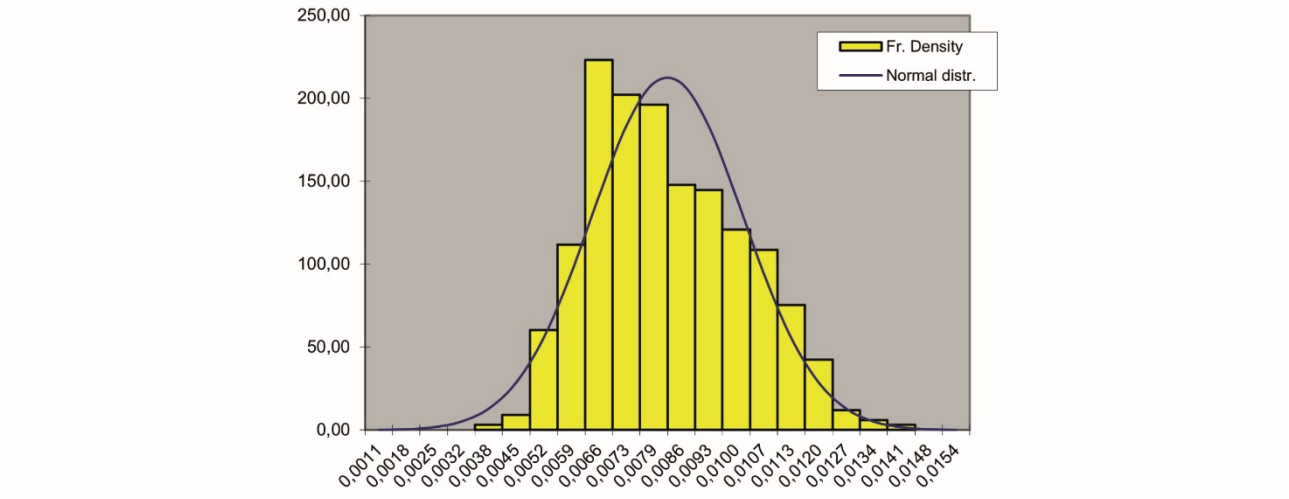

Figura 52 - Istogramma della frequenza relativa dei dati di rugosità di EBM e curva di probabilità normale associata

L'analisi dell'istogramma non permette di affermare con certezza che i dati siano distribuiti secondo una distribuzione normale ma ci permette di osservare che i dati tendono a disporsi in maniera analoga a quanto accadeva per gli esperimenti effettuati su provini prodotti tramite L-PBF, infatti si nota una tendenza di avere una asimmetria dei dati che tendono a spostarsi verso sinistra. Dato che la distribuzione dei dati differisce dalla precedente, si procede a quantificare l'asimmetria o skewness tramite l'equazione (33). In questo caso il valore calcolato è pari a 0,38 che è inferiore a 0,54, ovvero il valore calcolato in precedenza. Le motivazioni della discrepanza tra la distribuzione sperimentale e quella teorica sono quelle che sono state già riportate nel paragrafo 3.2.1 ma qui si può osservare quindi una possibile influenza dei dati dovuta alla diversa tecnologia additiva utilizzata, dato che si va a modificare il valore dell'asimmetria. L'eventuale influenza del processo verrà approfondita nel seguito dell'elaborato tramite ulteriori analisi.

Volendo ora quantificare la differenza che intercorre tra la distribuzione sperimentale e la distribuzione gaussiana teorica, si procede quindi al calcolo della frequenza relativa teorica, della frequenza assoluta teorica e della variabile aleatoria W. Si calcola il valore χ^2 sperimentale, ottenuto sommando il valore della variabile aleatoria W di ogni classe. I risultati di questo calcolo vengono riassunti in Tabella 70.

Evaluation of χ^2

From [mm]	To [mm]	f_{rt}	f_{at}	f_a	$(f_a - f_{at})^2/f_{at}$
0,00078	0,00146	0,0001	0,1	0	0,05
0,00146	0,00214	0,0004	0,2	0	0,19
0,00214	0,00283	0,0013	0,6	0	0,62
0,00283	0,00351	0,0036	1,8	0	1,77
0,00351	0,00419	0,0091	4,4	1	2,65
0,00419	0,00487	0,0200	9,7	3	4,63
0,00487	0,00555	0,0384	18,7	20	0,10
0,00555	0,00623	0,0648	31,5	37	0,97
0,00623	0,00692	0,0959	46,6	74	16,12
0,00692	0,00760	0,1245	60,5	67	0,69
0,00760	0,00828	0,1419	69,0	65	0,23
0,00828	0,00896	0,1419	69,0	49	5,79
0,00896	0,00964	0,1245	60,5	48	2,59
0,00964	0,01033	0,0959	46,6	40	0,93
0,01033	0,01101	0,0648	31,5	36	0,65
0,01101	0,01169	0,0384	18,7	25	2,16
0,01169	0,01237	0,0200	9,7	14	1,91
0,01237	0,01305	0,0091	4,4	4	0,04
0,01305	0,01374	0,0036	1,8	2	0,03
0,01374	0,01442	0,0013	0,6	1	0,23
0,01442	0,01510	0,0004	0,2	0	0,19
0,01510	0,01578	0,0001	0,1	0	0,05
			Experimental χ^2		42,60

Tabella 70 - Valutazione χ^2 Sperimentale

Il valore sperimentale deve essere confrontato con i limiti teorici per poter determinare la normalità della distribuzione dei dati. I limiti teorici vengono calcolati considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e 19 gradi di libertà, calcolati sottraendo al numero delle classi il numero di vincoli che, come si era detto nel paragrafo precedente, sono 3. I limiti sperimentali calcolati con i dati valori valgono:

- Limite inferiore χ^2: 8,91
- Limite superiore χ^2: 32,85

Confrontando i valori così ottenuti si può notare come i due valori differiscano in maniera consistente, perciò è da rifiutare che i dati sperimentali seguano una distribuzione normale.
In Figura 53 viene riportato anche il grafico di probabilità normale (G.P.N), in cui si può notare come i dati tendano a disporsi lungo la linea retta di disposizione normale ma agli estremi i valori si allontanano progressivamente. Anche in questo caso si può constatare che la distribuzione dei dati sperimentali non segua o si discosti la distribuzione gaussiana.

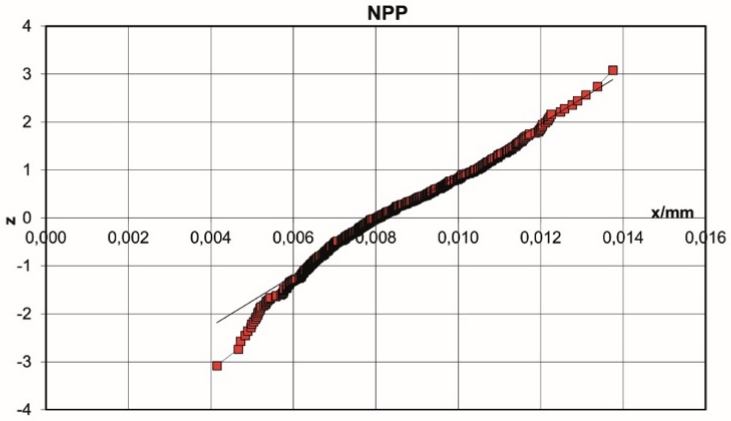

Figura 53 - Grafico di Probabilità Normale dei dati sperimentali di rugosità superficiale per EBM

3.4.2 Effetto Corrente

Si vuole ora verificare se la corrente abbia effetto sui valori di rugosità superficiale. Per fare questo, i dati di rugosità vengono divisi in tre gruppi distinti a seconda del livello di corrente utilizzato durante la prova sperimentale. I dati vengono opportunamente organizzati per poter essere maneggiati e generare i box-plot. Le verifiche effettuate per il calcolo dei limiti di accettabilità utilizzando la seguente relazione $1.5 \cdot IQR \cdot [1+0.1 \cdot \log(n/10)]$ e il criterio di Chauvenet non hanno evidenziato la presenza di *outliers*, di conseguenza nessun valore è stato escluso per i calcoli.
Si calcolano quindi i quartili, i massimi e i minimi per ogni gruppo, la mediana e IQR. I risultati vengono riassunti in Tabella 71.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Quart 3	0,0087	0,0101	0,0099
Max	0,0122	0,0138	0,0134
Min	0,0041	0,0050	0,0048
Quart 1	0,0063	0,0070	0,0069
Median	0,0077	0,0083	0,0085
IQR	0,0024	0,0031	0,0030
Max IQR	0,0093	0,0130	0,0149
Min IQR	0,0041	0,0037	0,0045

Tabella 71 - Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot della corrente per EBM

Con i seguenti valori è stato possibile calcolare i box-plot relativi ai tre livelli di corrente per poterli comparare tra loro, riportati in Figura 54.

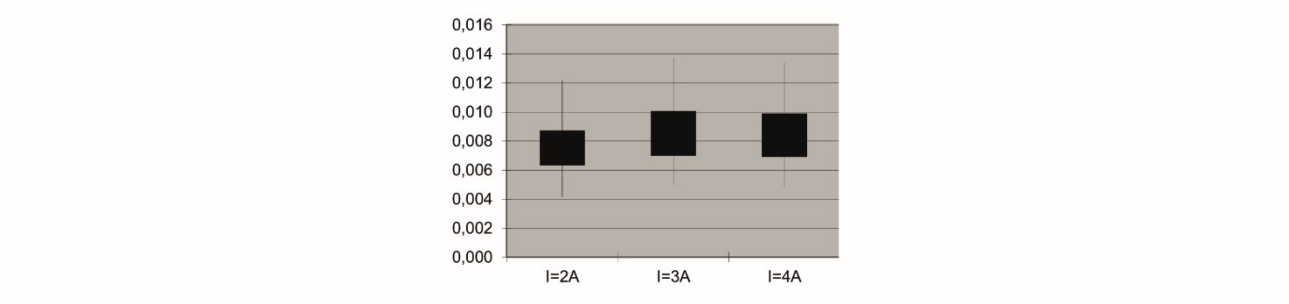

Figura 54 - Box-plot corrente e rugosità superficiale per EBM

Analizzando i box-plot in Figura 54, si può notare che è presente una marcata differenza tra i quartili del caso in cui la corrente vale 2 A e gli altri livelli. Questo significa che gli effetti sistematici dovuti ai diversi livelli di corrente sono più significativi tra i primi due, mentre diventano via via meno significativi dato che le aree dei casi 3 e 4 A risultano quasi totalmente sovrapposte. Questa analisi mette in luce che la corrente potrebbe avere un effetto significativo sul valore di rugosità superficiale, per poter quantificare o poterlo affermare con certezza è necessario però svolgere ulteriori verifiche. L'influenza del parametro può essere verificata, in maniera più specifica, utilizzando i test d'ipotesi e il metodo ANOVA. Per procedere con i test d'ipotesi è necessario formulare un'ipotesi nulla, poiché tramite le verifiche di questo strumento statistico sarà possibile rifiutare o accettare l'affermazione iniziale. L'ipotesi nulla è la seguente:

H_0 : La corrente ha influenza sulla rugosità superficiale

Il primo test che viene effettuato è il test sulla media delle colonne, perciò si calcola la media di ogni gruppo e la si compara con i valori limite che vengono determinati con un intervallo di confidenza pari al 95% e come cumulata della distribuzione normale avente la media e deviazione standard. Le medie delle colonne, sono presentate in Tabella 72, e vengono confrontate con i limiti teorici riportati in Tabella 73.

	I = 2 A	I = 3 A	I = 4 A
Mean	0,0077	0,0086	0,0086

Tabella 72 – Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di corrente

Number of samples averaged	**162**
Average	0,0083
Average Standard deviation	0,0001
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0080
Upper boundary	0,0086

Tabella 73 – Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e corrente

Confrontando i valori calcolati con i limiti teorici associati, è possibile notare che nessuno dei valori calcolati si trova all'interno dell'intervallo che permette di rigettare l'ipotesi nulla. Di conseguenza, non è possibile smentire l'ipotesi nulla e perciò non si è in grado di asserire che la corrente non abbia influenza sulla rugosità ottenibile dal processo, ma si può quindi pensare che essa produca un effetto sistematico e quindi influisca sul processo.

Un ulteriore test di ipotesi che viene effettuato è quello sulla varianza delle colonne e quindi dei tre gruppi. Il procedimento e l'organizzazione dei dati è la medesima, i limiti teorici sono però calcolati come cumulata della distribuzione χ^2. Si utilizza sempre un intervallo di confidenza pari al 95%. Le varianze delle colonne e i relativi limiti teorici sono stati riportati rispettivamente in Tabella 74 e Tabella 75.

	I = 2 A	I = 3 A	I = 4 A
Variance	2,9E-06	3,6E-06	3,6E-06

Tabella 74 – Test ipotesi II (EBM): Varianza delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di corrente

Number of samples for variances	162
Expected variance	3,4E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	2,7E-06
Upper boundary of s^2	4,1E-06

Tabella 75 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e corrente

In questo caso confrontando i valori limite con quelli calcolati è possibile notare che questi si trovano all'interno dell'intervallo, per questo motivo è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Si hanno quindi due risultati contrastanti, la prima analisi permette di rifiutare l'ipotesi nulla mentre la seconda no. Per approfondire la questione e provare ad eliminare questa contraddizione, si effettua l'analisi della varianza che essendo un test più rigoroso permette di definire con chiarezza se il parametro ha effetto o meno sul valore di rugosità superficiale. Per eseguire questa analisi, si prendono i dati organizzati e si calcola la media e la varianza delle colonne che contengono i diversi livelli della corrente, ovvero dei gruppi. Successivamente si calcolano la varianza tra i gruppi e la varianza dovuta agli errori casuali o varianza entro il gruppo e se ne fa il rapporto, in maniera tale da poter costruire la tabella ANOVA. Oltre a ciò, è necessario determinare il valore limite associato della distribuzione di Fisher per un intervallo di confidenza pari al 95% per poter determinare la significatività del parametro. I risultati dei calcoli vengono riassunti in Tabella 76.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	4,17E-05	12,41	3,01
Random errors	483	3,36E-06		
Total	485			

Tabella 76 - ANOVA corrente EBM: Risultati

Il rapporto tra le varianze in questo caso è ben superiore al valore limite di Fisher, quindi si può dire con un rischio del 5% che sono presenti delle differenze sistematiche tra le colonne e che sia la corrente ad introdurre questi effetti sistematici. Si può quindi asserire che la corrente ha effettivamente influenza sulla rugosità superficiale.

3.4.3 Effetto T_{on}

Si procede nelle analisi verificando se la durata del tempo di scarica abbia effetto sul valore di rugosità ottenibile dal processo. Per fare questo si procede in maniera del tutto analoga a quanto fatto in precedenza. Si procede alla verifica dei possibili *outliers* con la stessa metodologia utilizzata per lo studio dell'effetto della corrente di scarica. Anche in questo caso non stati rinvenuti errori di misura, perciò nessuna misurazione di rugosità superficiale è stata esclusa dall'analisi. Si procede quindi alla realizzazione dei box-plot e per fare ciò si calcolano le grandezze necessarie per la loro rappresentazione che sono state riassunta in Tabella 77.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Quart 3	0,0073	0,0094	0,0109
Max	0,0106	0,0128	0,0138
Min	0,0041	0,0050	0,0058
Quart 1	0,0061	0,0073	0,0085
Median	0,0067	0,0083	0,0097
IQR	0,0012	0,0021	0,0024
Max IQR	0,0093	0,0130	0,0149
Min IQR	0,0041	0,0037	0,0045

Tabella 77 – Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot del T_{on} per EBM

I dati calcolati ha permesso la realizzazione dei box-plot che vengono riportati in Figura 55. L'andamento delle aree rettangolari individuate dai quartili dei diversi livelli fa emergere una relazione tra T_{on} e rugosità superficiale, infatti si vede che al crescere del primo si va ad aumentare il valore del secondo. Questa tendenza è messa in luce dal fatto che le aree individuate dai quartili non risultano sovrapposte tra loro ma presentano un andamento a gradino, questo è molto evidente tra i primi due livelli di durata della scarica elettrica, infatti il primo quartile del caso T_{on} = 20 µs si trova ben sopra il terzo quartile del caso T_{on} = 10 µs. Una tendenza simile può essere rinvenuta anche tra secondo e terzo livello del parametro, in questo caso però è presente una parziale sovrapposizione. Queste evidenze possono far presupporre che siano presenti effetti sistematici tra i vari livelli e che questi siano più marcati tra primo e secondo livello, piuttosto che tra secondo e terzo.

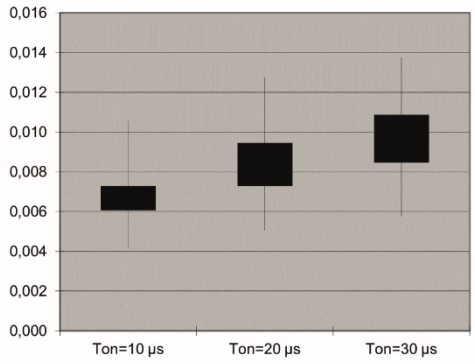

Figura 55 - Box-plot T_{on} e rugosità superficiale per EBM

Similmente a quanto fatto in precedenza, per verificare l'influenza della durata della scarica elettrica sulla rugosità ottenibile dal processo, si ricorre ai due test d'ipotesi. Viene quindi definita la seguente ipotesi nulla:

H_0 : Il T_{on} ha influenza sulla rugosità superficiale

Si procede quindi con il primo test, quindi vengono calcolate le medie delle colonne e i rispettivi valori limite, considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e calcolando la probabilità cumulata della distribuzione normale di media pari alla media globale dei dati e deviazione standard media, ottenuta dividendo il valore di deviazione standard per il numero di dati contenuti in colonna.

In Tabella 78 sono riportati i valori di medi delle colonne per i vari livelli del parametro considerato.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Mean	0,0067	0,0084	0,0097

Tabella 78 - Test Ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{on}

In Tabella 79 sono invece riportato i limiti teorici calcolati con i criteri esposti in precedenza.

Number of samples averaged	162
Average	0,0083
Average Standard deviation	0,0001
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0080
Upper boundary	0,0086

Tabella 79 - Test Ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e T_{on}

Facendo il confronto tra i dati è possibile notare che alcuni dei valori medi delle colonne si trovano al di fuori dell'intervallo di accettabilità, perciò non è possibile rigettare l'ipotesi nulla e quindi non è possibile dire che la durata della scarica elettrica non abbia effetto sul valore di rugosità superficiale ma anzi è ragionevole suppore che sia esattamente l'opposto. Si realizza ora il test d'ipotesi sulla varianza delle colonne per ottenere un'ulteriore conferma o un'eventuale smentita del risultato conseguito precedentemente. Vengono quindi calcolate le varianze di ogni gruppo e i risultati vengono raccolti in Tabella 80.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Variance	1,1E-06	2,4E-06	2,5E-06

Tabella 80 - Test ipotesi II (EBM): Varianza delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{on}

I limiti teorici vengono calcolati con la medesima modalità utilizzata per la corrente e considerando sempre un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 81 vengono riportati i limiti teorici e i dati utili al loro calcolo.

Number of samples for variances	162
Expected variance	2,0E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	1,6E-06
Upper boundary of s^2	2,5E-06

Tabella 81 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e T_{on}

Anche in questo caso dal confronto tra limiti teorici e varianze delle colonne, è possibile confermare l'esito del test precedente poiché il valore di varianza del primo e del terzo livello del parametro considerato non si trovano all'interno dell'intervallo di rigetto dell'ipotesi nulla. Perciò, anche in questo caso, si può ritenere che la durata della scarica elettrica abbia effetto sul valore di rugosità superficiale. Un'ulteriore e più precisa analisi che si può andare ad effettuare sui dati sperimentali per andare ad accettare o rifiutare l'ipotesi nulla, è l'analisi della varianza o ANOVA. I dati vengono riorganizzati in maniera tale da poter permettere il calcolo della tabella ANOVA che viene riportata in Tabella 82. Come evidenziano i risultati, il rapporto tra le varianze risulta notevolmente superiore al valore di Fisher calcolato con un intervallo di confidenza pari al 95%. Per questo motivo è possibile sostenere, con un rischio di errore pari al 5%, che siano presenti effetti sistematici tra le colonne e che quindi il T_{on} sia un parametro il cui variare introduca una certa variabilità in termini di rugosità superficiale ottenibile dal processo.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	3,68E-04	183,75	3,01
Random errors	483	2,01E-06		
Total	485			

Tabella 82 – ANOVA T_{on} EBM: Risultati

3.4.4 Effetto T_{off}

In maniera analoga ai parametri precedenti si va ad analizzare l'influenza che l'intervallo di tempo che intercorre tra due scariche successive ha sul processo, quindi in questo caso sulla rugosità superficiale. Si verifica quindi la presenza di eventuali errori di misura. Si procede quindi a considerare tutti i dati sperimentali nelle analisi e si calcolano i valori necessari per la realizzazione dei grafici box-plot. I risultati dei calcoli vengono riportati in Tabella 83.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Quart 3	0,0101	0,0098	0,0089
Max	0,0126	0,0138	0,0128
Min	0,0051	0,0047	0,0041
Quart 1	0,0069	0,0070	0,0066
Median	0,0082	0,0082	0,0077
IQR	0,0031	0,0029	0,0024
Max IQR	0,0153	0,0146	0,0129
Min IQR	0,0016	0,0022	0,0026

Tabella 83 – Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot del T_{off} per EBM

In Figura 56 si riportano i grafici box-plot per i differenti valori assunti dal T_{off}. L'analisi del grafico suggerisce che le variazioni di questo parametro potrebbero risultare meno significative rispetto ai parametri analizzati in precedenza, poiché i dati sperimentali sembrano avere più o meno la stessa concentrazione in tutti i casi considerati. Le aree rettangolari risultano quasi totalmente contenute nell' area individuata dai quartili del caso $T_{off} = 5$, ma è possibile rinvenire una leggera tendenza nella disposizione dei dati. Infatti, è possibile notare che all'aumentare del T_{off} si ha una riduzione del valore di rugosità superficiale. Questa relazione ha un andamento opposto rispetto a quella rinvenuta nel caso della tecnologia L-PBF, sarà però necessario verificarla in seguito nell'analisi dell'effetto dei parametri.

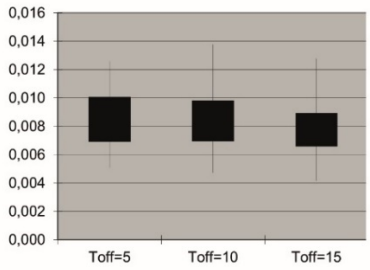

Figura 56 - Box-plot T_{off} e rugosità superficiale per EBM

Si procede quindi realizzando i test d'ipotesi, sia quello sulla media che quello sulla varianza, con l'obbiettivo di verificare o smentire la seguente ipotesi nulla:

H_0 : Il T_{off} ha influenza sulla rugosità superficiale

Per effettuare il primo test vengono calcolate le medie delle colonne e si comparano con i limiti teorici ricavati dalla distribuzione normale con un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 84 si riportano le medie delle colonne.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Mean	0,0085	0,0085	0,0078

Tabella 84 - Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{off}

In Tabella 85 si riportano invece i limiti teorici rinvenuti con la metodologia esposta sopra.

Number of samples averaged	**162**
Average	0,0083
Average Standard deviation	0,0001
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0080
Upper boundary	0,0086

Tabella 85 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e T_{off}

Dal loro confronto si nota che non ci si trova all'interno dell'intervallo che permette di smentire l'ipotesi nulla, perciò si può presuppore che il parametro considerato abbia effetto sulla rugosità superficiale ottenibile dal processo. Si procede ora con il secondo test d'ipotesi, quello effettuato sulla varianza delle colonne, per poter confermare il risultato ottenuto in precedenza. Vengono quindi calcolate le varianze dei gruppi contenenti i diversi valori di T_{off} e i risultati sono stati riportati in Tabella 86.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Variance	3,4E-06	3,8E-06	3,1E-06

Tabella 86 - Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di T_{off}

I valori limite in questo caso vengono definiti come cumulata della distribuzione χ^2 per un intervallo di fiducia pari al 95%. I limiti e i valori necessari al loro calcolo vengono riportati in Tabella 87.

Number of samples for variances	**162**
Expected variance	3,4E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	2,7E-06
Upper boundary of s^2	4,2E-06

Tabella 87 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e T_{off}

In questo caso i valori calcolati ricadono all'interno dell'intervallo per cui è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e quindi dire che il parametro non ha effetto sulla rugosità superficiale. Si ottengono quindi due risultati contrastanti. Va precisato però che questi due test d'ipotesi presuppongono che la distribuzione dei dati sperimentali segua la distribuzione gaussiana e χ^2, il test di normalità però aveva già dimostrato però che i dati non si discostavano da tale andamento probabilistico. Quindi, per verificare l'efficacia del T_{off} sulla rugosità superficiale e per superare questa apparente contraddizione, si ricorre all'analisi della varianza. Per effettuare questa analisi si procede in maniera analoga a quanto fatto per gli altri parametri di processo. Vengono calcolate la media e la varianza dei gruppi. A partire da questi dati vengono calcolati sia la varianza tra i gruppi che la varianza entro i gruppi o dovuta ad errori casuali, in

maniera tale da farne il rapporto e poterlo comparare con il valore limite della distribuzione di Fisher determinato considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. I risultati vengono riassunti in Tabella 88.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	2,54E-05	7,41	3,01
Random errors	483	3,43E-06		
Total	485			

Tabella 88 - ANOVA T_{off}: Risultati

Dato che il rapporto delle varianze risulta superiore al valore limite di Fisher, si può dire, commettendo al massimo un errore del 5%, che la variazione dei livelli di T_{off} produce una variazione significativa della rugosità superficiale.

3.4.5 Effetto Spessore

Infine, si vuole analizzare se il rimanente parametro, ovvero lo spessore, sia significativo per quanto riguarda le variazioni di rugosità superficiale. Per fare questo si procederà in maniera analoga a quanto fatto in precedenza, quindi dopo aver verificato l'eventuale presenza di *outliers*, si realizzano i grafici box-plot per i diversi livelli scelti del parametro di processo in questione. Per fare questo sono state calcolate le grandezze necessarie alla realizzazione di tale grafico, che sono state riportate in Tabella 89.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Quart 3	0,0102	0,0097	0,0086
Max	0,0138	0,0131	0,0126
Min	0,0047	0,0041	0,0047
Quart 1	0,0073	0,0068	0,0065
Median	0,0088	0,0082	0,0076
IQR	0,0029	0,0029	0,0021
Max IQR	0,0150	0,0145	0,0122
Min IQR	0,0024	0,0020	0,0029

Tabella 89 - Dati di rugosità superficiale utili per i box-plot dello spessore per EBM

Il grafico ricavato dai dati in Tabella 89 è riportato in Figura 57. L'andamento del box plot ottenuto è molto simile a quello ottenuto per il T_{off}. Le aree individuati dai quartili dei diversi livelli dello spessore sono quasi interamente contenute dall'area del caso 10 mm ma nonostante questo è possibile rintracciare una relazione tra Spessore e rugosità superficiale, all'aumentare del primo infatti si verifica una riduzione della seconda. Si può concludere quindi che le regioni in cui sono contenute la maggior parte dei dati non sono così differenti e questo potrebbe far pensare che gli effetti sistematici siano deboli e quindi che il parametro non sia così significativo.

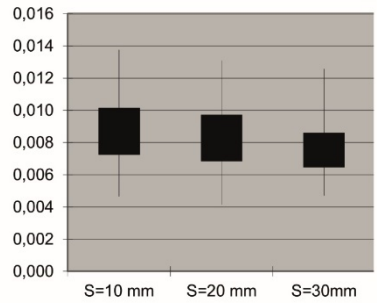

Figura 57 – Box plot spessore e rugosità superficiale per EBM

Per poter procedere con i successivi test è necessario formulare l'ipotesi nulla, che in questo caso è:

H_0 : Lo spessore del provino ha effetto sulla rugosità superficiale

Si effettua il primo test d'ipotesi considerando la media delle colonne contenti i differenti livelli del parametro considerato. I loro valori sono stati riportati in Tabella 90.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Mean	0,0088	0,0083	0,0078

Tabella 90 - Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di spessore

Il valore dei limiti teorici, definiti con il medesimo procedimento utilizzato per gli altri parametri, sono stati riportati in Tabella 91.

Number of samples averaged	162
Average	0,0083
Average Standard deviation	0,0001
Confidence level	95%
Lower boundary	0,0080
Upper boundary	0,0086

Tabella 91 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di rugosità superficiale e spessore

Confrontando i limiti dell'intervallo che permette di rifiutare l'ipotesi con i valori medi calcolati, si può notare che alcuni dei valori calcolati ricadono al di fuori dell'intervallo, perciò non si può scartare l'ipotesi nulla e quindi è possibile che lo spessore abbia effetto sui valori di rugosità superficiale. Come nei casi precedenti si effettua il test d'ipotesi considerando la varianza delle colonne, i valori necessari vengono riportati in Tabella 92 e in Tabella 93.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Variance	3,9E-06	3,2E-06	3,0E-06

Tabella 92 - Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di rugosità superficiale relativi ai livelli di spessore

Number of samples for variances	162
Expected variance	3,4E-06
Expected v	161
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	2,7E-06
Upper boundary of s^2	4,1E-06

Tabella 93 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di rugosità superficiale e spessore

Anche in questo caso il test d'ipotesi effettuato sulla media delle colonne e quello effettuato sulla loro varianza restituiscono due risultati contradditori. Infatti, le varianze delle colonne calcolate si trovano all'interno dell'intervallo di valori per cui è possibile rigettare l'ipotesi nulla. La motivazione, come nel caso precedente, può essere attribuita all'assunzione che i dati seguano la distribuzione normale e ciò fa sì che il test, in caso di discostamenti da questa, non sia sempre valido. Per eliminare questa contraddizione si utilizza nuovamente l'analisi della varianza tenendo sotto controllo solamente solo un fattore che in questo caso è lo spessore. La procedura seguita per l'analisi in questione è la medesima dei casi precedenti, perciò si riporta direttamente Tabella 94 dove è possibile determinare se il parametro è significativo o meno. Dai risultati si evince che lo spessore lo spessore ha effetto sul valore di rugosità ottenibile dalla lavorazione poiché il valore del rapporto tra le varianze è maggiore dell'indice di Fisher calcolato per un intervallo di confidenza pari al 95%.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	3,94E+01	5,20	3,01
Random errors	483	7,56E+00		
Total	485			

Tabella 94 – ANOVA spessore EBM: Risultati

3.4.6 Modello di Regressione

In maniera da poter analizzare in seguito le differenze tra i due processi, si vuole andare definire un opportuno modello di regressione che descriva la variazione dei dati sperimentali relativi alla rugosità superficiale per provini prodotti tramite EBM. L'analisi effettuata sui singoli parametri di processo ha evidenziato la significatività di ognuno di essi e quindi verranno tutti considerati all'interno dell'equazione di regressione. Verrà però verificata anche la presenza di eventuali interazioni significative per essere integrate all'interno del modello. Bisogna specificare che i dati vengono analizzati non più considerando tutte le ripetizioni delle misurazioni di rugosità superficiale, bensì per ogni set di parametri di processo si effettua la media dei sei rilievi sperimentali, perciò le equazioni di regressione vengono determinate a partire delle medie delle misurazioni per ogni prova. Le analisi svolte hanno riportato che tutti i parametri di processo sono significativi e contribuiscono alla variazione del valore di rugosità, mentre l'unica interazione significativa è quella che intercorre tra la corrente e il T_{off}.

Si definisce quindi un modello sulla base dei risultati ottenuti, vengono quindi inclusi tutti i parametri di processo e l'interazione tra Corrente e T_{off}. Il modello di regressione definitivo è riportato in equazione (38).

$$Ra = 2{,}385 + 1{,}539 \cdot I + 0{,}1502 \cdot Ton + 0{,}2627 \cdot T_{off} - 0{,}0511 \cdot Spessore - 0{,}1110 \cdot I^{*}T_{off} \quad (38)$$

In Tabella 95 e Tabella 96 si riportano rispettivamente i dati riguardanti la precisione del modello e l'analisi della varianza. Se paragonato al primo modello si verifica una riduzione della capacità di spiegare la variabilità dei dati sperimentali ma allo stesso tempo si ottiene una drastica riduzione del numero di termini considerati e quindi una sua semplificazione. L'analisi dei dati riguardanti la tabella ANOVA invece mettono in luce che all'interno del modello siano presenti solo termini significativi.

Model Summary

S	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}
0,798937	78,74%	75,70%	70,73%

Tabella 95 – Precisione del Modello di Regressione per i dati di rugosità superficiale di EBM considerando i parametri di processo e le relative interazioni

Analysis of Variance

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	5	77,84%	163,57	32,71	52,70	0,000
I	1	4,72%	18,26	18,26	29,42	0,000
Ton	1	57,97%	121,81	121,81	196,21	0,000
Toff	1	3,18%	6,42	6,42	10,35	0,002
Spessore	1	6,70%	14,07	14,07	22,68	0,000
I*Toff	1	5,28%	11,09	11,09	17,87	0,000
Error	75	22,16%	46,56	0,62		
Total	80	100,00%				

Tabella 96 – ANOVA del Modello di Regressione per i dati di rugosità superficiale di EBM considerando i parametri di processo e le relative interazioni

Per completezza si riportano in Figura 61 anche i grafici che contengono i dati riguardanti l'andamento dei residui. Come accadeva in precedenza la disposizione di questi sembra essere casuale per cui non si verificano particolari tendenze nell'assunzione del segno. Lo stesso accade anche per i residui secondo l'ordine di acquisizione della misurazione. Il grafico di probabilità normale sembra confermare il fatto che i residui si dispongano secondo la distribuzione normale, dato che non sono presenti evidenti differenze tra la retta e i punti riferiti alle misurazioni.

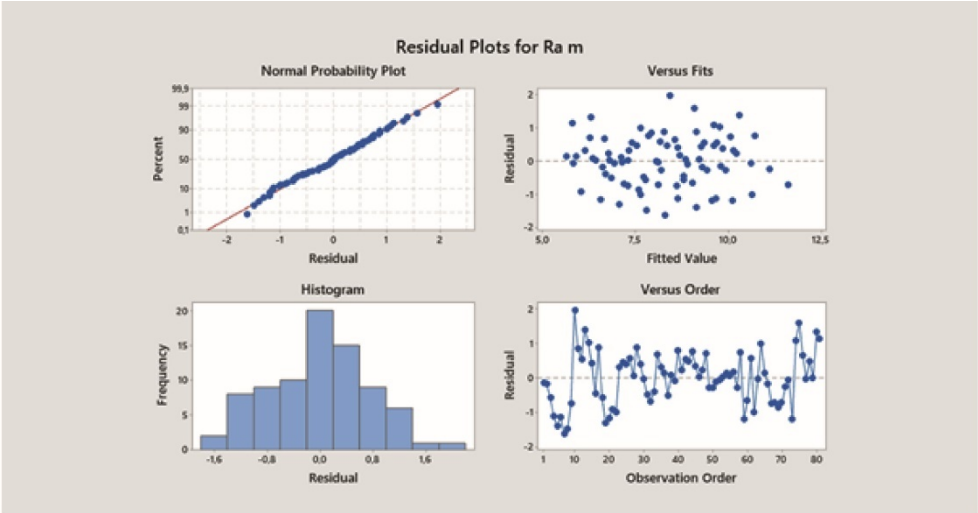

Figura 58 – Residui del Modello di Regressione per i dati di rugosità superficiale di EBM considerando i parametri di processo e le relative interazioni

3.4.7 Effetto dei parametri di processo

In questo paragrafo si riportano i grafici riferiti all'effetto dei parametri di processo e delle interazioni sulla rugosità superficiale. Dopo aver effettuato l'analisi del piano sperimentale è stato infatti possibile determinare l'effetto sulla rugosità superficiale per ogni livello del parametro di processo considerato. I risultati sono stati riportati in Figura 59.

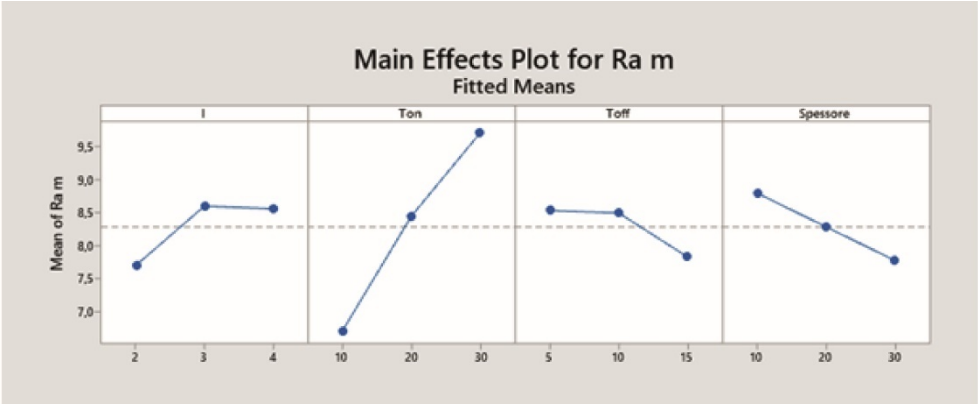

Figura 59 – Effetto dei livelli dei parametri di processo sulla rugosità superficiale per EBM

L'andamento dei parametri di processo è in alcuni casi profondamente diverso rispetto a quello rinvenuto in precedenza per il processo di L-PBF. Mentre il ruolo del T_{on} e dello spessore rimangono quasi invariati e valgono tutte le considerazioni fatte al paragrafo 3.2.7. Infatti, al crescere del T_{on} aumenta l'energia di scarica e di conseguenza aumenta la dimensione dei crateri che causano aumento della rugosità superficiale, cosa già riscontrata in precedenza e in letteratura. Lo Spessore aumentando progressivamente determina una diminuzione del valore di rugosità superficiale, la motivazione di questo fenomeno è la medesima che è stata presentata in precedenza e già rinvenuta in letteratura per provini prodotti con tecnologie convenzionali. L'andamento di Corrente e T_{off} invece è diverso rispetto a quello che è stato trovato per il processo di L-PBF. Innanzitutto, non è più presente una relazione quadratica tra corrente e rugosità superficiale ma è lineare. Nonostante questo, la tendenza sembra essere più o meno la stessa, all'aumentare della corrente si verifica un aumento del valore di finitura superficiale. Questo aumento è molto più marcato tra 2 e 3 A rispetto che il passaggio tra 3 e 4 A, dove l'azione della corrente sembra mantenersi costante o avere un leggero effetto decrescente sulla rugosità superficiale. Questo aumento di valore di rugosità può essere spiegato dall'aumento del valore dell'energia di scarica e quindi dei crateri, tendenza già rinvenuta in letteratura. L'effetto della corrente può affievolirsi poiché per valori più alti di corrente la differenza di energia introdotta non è più tale da causare un ulteriore aumento della rugosità superficiale. Il parametro che determina una maggiore differenza tra i due processi è l'andamento del T_{off}, tra i due piani sperimentali la relazione tra questo e la rugosità superficiale è opposto. In questo caso all'aumentare del valore dell'intervallo di tempo tra le scariche si verifica una riduzione della rugosità superficiale, che diventa tanto più significativa quanto diventa maggiore il valore della costante moltiplicativa del T_{off}. Infatti, aumentando il valore della costante si va ad aumentare l'intervallo di tempo in cui non si verificano scariche elettriche nel quale è possibile rimuovere, grazie all'apporto del dielettrico, i detriti prodotti durante la lavorazione. Per quanto riportato in letteratura, una corretta espulsione dei detriti dal *gap* di lavoro evita la presenza di scariche anomale che porterebbero ad una maggiore usura dell'elettrodo e ad una peggiore finitura superficiale. Per questo motivo, la diminuzione della rugosità superficiale come conseguenza di un aumento del T_{off} è un dato già rinvenuto e documentato in letteratura.

Si riporta in Figura 60 anche l'effetto sulla rugosità superficiale delle interazioni incluse nel modello. In questo caso si riporta solo l'effetto dell'interazione presente tra I e T_{off}, dato che risulta essere la sola interazione che ha effetto sul processo. L'effetto di questa è che va a compensare l'aumento della rugosità superficiale dovuto all'aumento della corrente durante la scarica. I due parametri infatti hanno due effetti opposti sul valore medio di rugosità e in questo caso il T_{off} va a limitare l'aumento di questa dovuto all'aumento della corrente elettrica. Si osserva questa tendenza per valori di corrente superiori a 3 A e diventa sempre più consistente all'aumentare del valore del T_{off} . Si osserva però che per il livello minimo di corrente si verifica un aumento della rugosità superficiale all'aumentare dell'intervallo di tempo tra due scariche consecutive.

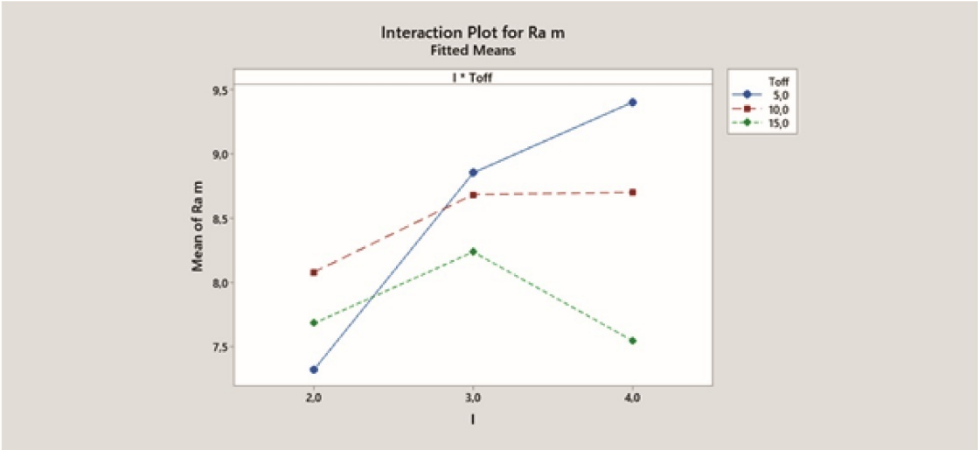

Figura 60 – Effetto dell'interazione $I * T_{off}$ *sulla rugosità superficiale*

3.5 Analisi dei dati della velocità di taglio (V_t) per il processo di EBM

Si vuole verificare ora l'effetto e la significatività dei parametri sulla velocità di taglio per i provini realizzati tramite il processo di EBM. Si procederà nelle analisi in maniera analoga al caso precedente, verranno analizzati prima tutti i parametri singolarmente, si passerà poi all'analisi completa del DoE e si determinerà un modello di regressione che sia in grado di spiegare adeguatamente i dati sperimentali senza complicarlo eccessivamente.

3.5.1 Distribuzione dei dati sperimentali

Ricalcando la procedura eseguita in precedenza per l'analisi dei dati della rugosità superficiale dei provini di EBM, si vuole andare a verificare quale sia la distribuzione dei dati sperimentali e se questa possa essere assimilata ad una distribuzione normale. Per poter paragonare qualitativamente la distribuzione teorica e la distribuzione sperimentale si va a realizzare l'istogramma della frequenza relativa. Dato che il numero di esperimenti è il medesimo, il numero di classi necessario è pari a 9 come nel caso della tecnologia L-PBF. A questo punto per poter generare all'interno dello stesso grafico la curva di probabilità normale associata, è necessario calcolare le principali grandezze, i cui valori sono stati riassunti in Tabella 97.

Data Number	81	
Mean value	81	mm/min
Standard deviation	1,3465	mm/min
Maximum	0,7410	mm/min
Minimum	3,4483	mm/min

Tabella 97 - Dati principali relativi alle misurazioni di velocità di taglio per EBM

Determinato il numero di classi, è possibile la realizzazione della tabella per il calcolo della frequenza relativa e delle altre grandezze che verranno poi utilizzate anche dal test χ^2.

Class	From	To	Mean value	f_a	f_r	Fr. Density	Normal distr.
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm^{-1}]	[mm^{-1}]
1	-1,61736	-0,95872	-1,28804	0	0,000	0,0	0,00
2	-0,95872	-0,30008	-0,62940	0	0,000	0,0	0,02
3	-0,30008	0,35856	0,02924	0	0,000	0,0	0,11
4	0,35856	1,01719	0,68787	32	0,395	0,6	0,36
5	1,01719	1,67583	1,34651	28	0,346	0,5	0,54
6	1,67583	2,33447	2,00515	13	0,160	0,2	0,36
7	2,33447	2,99311	2,66379	4	0,049	0,1	0,11
8	2,99311	3,65175	3,32243	4	0,049	0,1	0,02
9	3,65175	4,31038	3,98106	0	0,000	0,0	0,00

Tabella 98 – Suddivisione in classi dei dati sperimentali di velocità di taglio di EBM e calcolo delle frequenze relative

Dalla Tabella 98 è stato possibile realizzare il grafico riportato in Figura 61. Come in precedenza questa analisi non permette di affermare con certezza se i dati dispongano o no secondo una distribuzione normale ma, come per la rugosità superficiale e per la precedente analisi sulla velocità di taglio, è possibile identificare la presenza di un'asimmetria dei dati che tendono a disporsi verso sinistra. Il valore di questa quantità, calcolato tramite l'equazione (33), è pari 1,14 che è leggermente inferiore al valore calcolato per l'analisi della velocità di taglio per il caso di L-PBF.

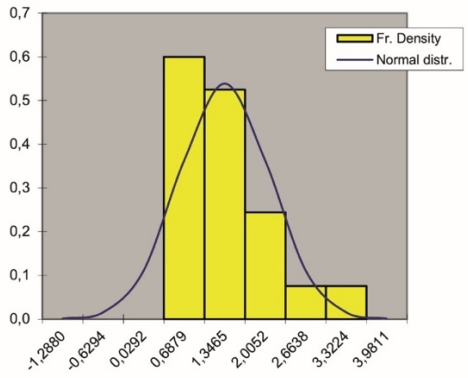

Figura 61 – Istogramma della frequenza relativa dei dati di velocità di taglio di EBM e curva di probabilità normale associata

Si calcola il valore χ^2 sperimentale, ottenuto sommando il valore della variabile aleatoria W di ogni classe, calcolata in maniera analoga all'analisi precedente. I risultati di questo calcolo vengono riassunti in Tabella 99.

Evaluation of χ^2

From [mm]	To [mm]	f_{rt}	f_{at}	f_a	$(f_a - f_{at})^2/f_{at}$
-1,61736	-0,95872	0,0009	0,1	0	0,07
-0,95872	-0,30008	0,0122	1,0	0	0,99
-0,30008	0,35856	0,0781	6,3	0	6,32
0,35856	1,01719	0,2371	19,2	32	8,52
1,01719	1,67583	0,3433	27,8	28	0,00
1,67583	2,33447	0,2371	19,2	13	2,01
2,33447	2,99311	0,0781	6,3	4	0,85
2,99311	3,65175	0,0122	1,0	4	9,18
3,65175	4,31038	0,0009	0,1	0	0,07
			Experimental χ^2		28,01

Tabella 99 - Valutazione χ^2 Sperimentale

Il valore sperimentale deve essere confrontato con i limiti teorici per poter determinare la normalità della distribuzione dei dati. I limiti teorici vengono calcolati considerando un intervallo di confidenza pari al 95% e 6 gradi di libertà, calcolati sottraendo al numero delle classi il numero di vincoli che, come si era detto nel paragrafo precedente, sono 3. I limiti sperimentali calcolati con i dati valori valgono:

- Limite inferiore χ^2: 1,24
- Limite superiore χ^2: 14,45

Dato che il χ^2 calcolato è maggiore del limite superiore teorico, si può affermare che la distribuzione dei dati sperimentali non segue la distribuzione normale.
In Figura 62 viene riportato il grafico di probabilità normale per visualizzare graficamente la differenza tra la distribuzione teorica e quella sperimentale.

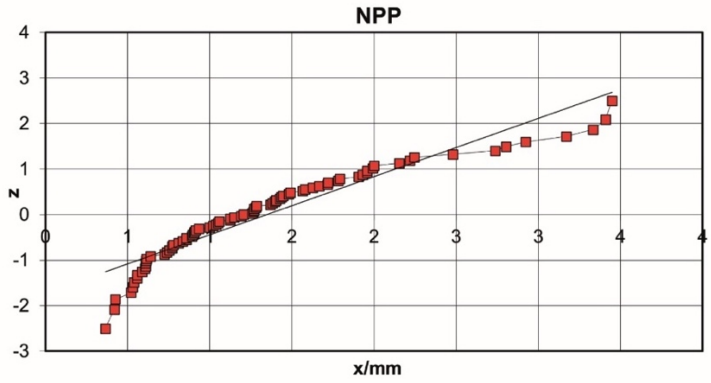

Figura 62 – Grafico di Probabilità Normale dei dati sperimentali di velocità di taglio per EBM

A differenza di quanto accade per i dati della rugosità superficiale, i valori di velocità di taglio non si dispongono lungo la retta che rappresenta la distribuzione normale e la distribuzione è molto simile a quella che si ottiene nella precedente analisi velocità di taglio. A causa di questa somiglianza, è possibile ipotizzare che le cause della discrepanza tra distribuzione sperimentale e quella teorica siano dovuti dai medesimi motivi esposti al paragrafo 3.3.1, quindi instabilità del processo e cortocircuiti, usura progressiva del filo e metodologia sperimentale.

3.5.2 Effetto della Corrente

Similmente a quanto è stato fatto per la rugosità superficiale, si vuole indagare quale sia l'effetto della corrente sulla velocità di taglio e quindi sulla produttività della lavorazione. Per fare questo viene utilizzata la metodologia esposta nel paragrafo 1.1 che è anche stata utilizzata nelle analisi precedenti.
I dati vengono quindi divisi secondo i tre livelli assumibili dal parametro e si vanno a calcolare le grandezze necessarie alla determinazione dei grafici box-plot.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Quart 3	1,40	1,75	1,97
Max	2,73	3,16	3,44
Min	0,36	0,52	0,60
Quart 1	0,61	0,77	0,90
Median	0,99	1,26	1,42
IQR	0,79	0,98	1,07
Max IQR	2,65	3,28	3,65
Min IQR	-0,63	-0,76	-0,77

Tabella 100 - Dati di velocità di taglio utili per i box-plot della corrente per EBM

Il grafico ricavato dai dati della Tabella 100 è stato riportato in Figura 63.

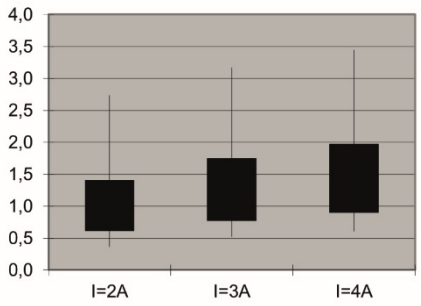

Figura 63 - Box-plot corrente e velocità di taglio per EBM

Analizzando il grafico si può notare come le aree rettangolari dai quartili dei vari livelli di corrente siano parzialmente sovrapposte ma nonostante questo si può ritrovare una relazione diretta tra corrente e rugosità. Le aree individuate infatti suggeriscono che all'aumentare della corrente si verifica un aumento del valore di rugosità superficiale. Questa relazione è la medesima riscontrata per il caso del processo di L-PBF ma in questo caso risulta più evidente, dato che la sovrapposizione delle aree individuate da corrente pari a 3 e 4 A risultano meno sovrapposte. Nonostante questo, non è possibile quantificare quanto la corrente influisca sul processo e per questo motivo verranno effettuati ulteriori test per studiarne l'effetto e la significatività.
Per procedere con i test successivi è necessario formulare l'ipotesi nulla che verrà poi smentita o confermata dai test, in questo caso l'ipotesi che si vuole verificare è la seguente:

H_0 : La corrente ha influenza sulla velocità di taglio.

Si procederà a verificare tale affermazione mediante i test d'ipotesi eseguiti su media e varianza.
Per effettuare il primo test si calcolano le medie delle colonne, ovvero le medie dei valori di velocità di taglio per un determinato valore di corrente. I risultati dei calcoli sono riportati in Tabella 101.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Mean	1,10	1,36	1,57

Tabella 101 – Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di corrente

I risultati ottenuti dai calcoli vanno confrontati con i limiti teorici che vengono determinati con un intervallo di confidenza pari al 95% e come cumulata della distribuzione normale. I limiti teorici e le grandezze necessarie al calcolo vengono riportate in Tabella 102.

Number of samples averaged	27
Average	1,34
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,06
Upper boundary	1,62

Tabella 102 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e corrente

Dato che i valori calcolati ricadano all'interno dei limiti dell'intervallo teorico, è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e dire che la corrente non ha effetto sulla velocità di taglio. Per confermare il risultato ottenuto si effettua anche il secondo test d'ipotesi che è eseguito sulla varianza delle colonne, pertanto si calcolano le varianze delle colonne per ogni livello di corrente. I risultati dei calcoli vengono riportati in Tabella 103.

	I = 2A	I = 3A	I = 4A
Variance	3,8E-01	5,2E-01	6,7E-01

Tabella 103 – Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di corrente

Come nel caso precedente, i valori calcolati vanno confrontati con i relativi limiti teorici calcolati come cumulata della distribuzione χ^2, utilizzando sempre un intervallo di confidenza pari al 95%. I valori dei limiti teorici e le grandezze utilizzate per il loro calcolo vengono riportati in Tabella 104.

Number of samples for variances	27
Expected variance	5,3E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	2,8E-01
Upper boundary of s^2	8,5E-01

Tabella 104 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e corrente

In questo caso il test sulla varianza conferma l'esito del precedente test effettuato sulla media, infatti anche in questo caso i valori calcolati si trovano all'interno dell'intervallo individuato dai limiti teorici, perciò è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Come ultimo test si effettua l'analisi della varianza (ANOVA), si procede quindi al calcolo delle medie e delle varianze delle colonne che sono le grandezze necessarie al calcolo della varianza tra i gruppi e la varianza dovuta ad errori causali o varianza entro il gruppo. Ottenuti questi due valori è possibile farne il rapporto e confrontarlo con il valore limite associato della distribuzione di Fisher, considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella

105 vengono si riportano i risultati ottenuti. Come si può notare il rapporto tra le varianze è inferiore al valore limite di Fisher e quindi si può rifiutare l'ipotesi iniziale. In questo caso l'analisi della varianza mette in luce quello che era stato già osservato mediante il test d'ipotesi, ovvero che il valore della corrente non influenza la velocità di taglio.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	1,48E+00	2,82	3,11
Random errors	78	5,25E-01		
Total	80			

Tabella 105 – ANOVA corrente EBM: Risultati

Sebbene si sia trovato questo risultato, prima di eliminare la corrente dagli studi che verranno fatti in seguito, si ne studierà l'influenza anche sul software statistico Minitab (R 17.1 Minitab), per vedere se considerando i P-Value questo parametro risulti non significativo oppure se guadagna significatività a causa delle interazioni che potrebbe avere con qualche altro parametro di processo.

3.5.3 Effetto T_{on}

Si vuole indagare ora l'eventuale influenza della durata del tempo di scarica velocità di taglio della lavorazione. Vengono calcolati i valori necessari alla realizzazione del grafico box-plot, riportati in Tabella 106.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Quart 3	1,78	1,68	1,59
Max	3,33	3,44	3,40
Min	0,41	0,36	0,42
Quart 1	0,83	0,77	0,80
Median	1,28	1,20	1,19
IQR	0,95	0,90	0,79
Max IQR	3,27	3,09	2,84
Min IQR	-0,64	-0,64	-0,44

Tabella 106 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot del T_{on} per EBM

Dallo studio del grafico riportato in Figura 64 è possibile ipotizzare che, come accadeva nel caso di L-PBF, il T_{on} non sia un parametro che vada ad influenzare in maniera preponderante la velocità della lavorazione. Questo viene suggerito dal fatto che le aree individuate dai quartili nei tre casi risultino quasi totalmente sovrapposte.

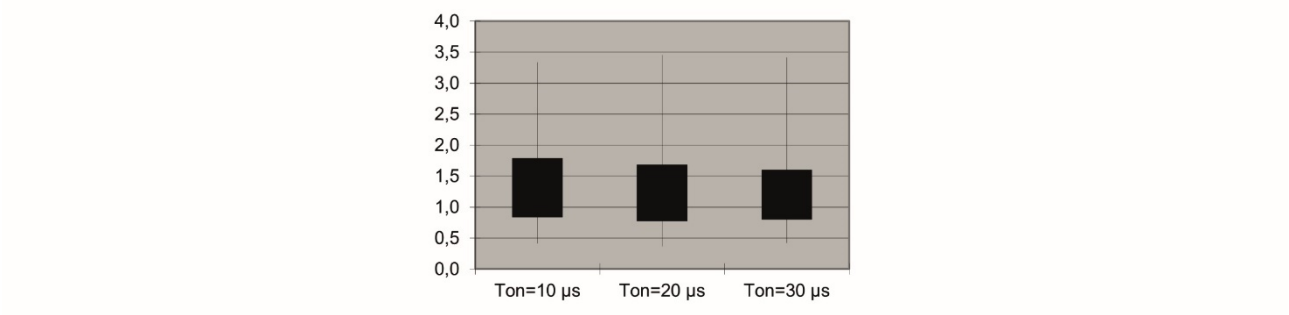

Figura 64 – Box-plot T_{on} e velocità di taglio per EBM

Si procede con la verifica dell'ipotesi nulla tramite i due test d'ipotesi. In questo caso l'affermazione che si cercherà di smentire è la seguente:

H_0 : Il T_{on} ha influenza sulla velocità di taglio.

Vengono quindi calcolate le medie delle colonne e vengono confrontate con i limiti teorici, calcolati facendo ricorso alla distribuzione normale avente media e deviazione standard riferite alla globalità delle acquisizioni. Si è considerato inoltre un intervallo di confidenza pari al 95%. I valori delle medie delle colonne sono riportati in Tabella 107.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Mean	1,41	1,32	1,30

Tabella 107 - Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{on}

I limiti teorici calcolati con la procedura esposta in precedenza sono riportati in Tabella 108.

Number of samples averaged	27
Average	1,34
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,06
Upper boundary	1,62

Tabella 108 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e T_{on}

I valori calcolati ricadono all'interno dell'intervallo teorico, per questo motivo è possibile rifiutare l'ipotesi nulla e dire che la durata della scarica elettrica non ha influenza sulla velocità di taglio della macchina. Il test d'ipotesi effettuato sulla varianza delle colonne restituisce il medesimo risultato, infatti dato che i valori calcolati ricadono all'interno dei valori limite teorici è possibile negare l'ipotesi nulla. In Tabella 109 si riportano i valori calcolati, mentre in Tabella 110 si riportano i limiti teorici che sono stati determinati facendo riferimento alla distribuzione χ^2. Si è sempre considerato un intervallo di confidenza pari al 95%.

	Ton = 10 µs	Ton = 20 µs	Ton = 30 µs
Variance	6,0E-01	5,8E-01	4,9E-01

Tabella 109 - Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{on}

Number of samples for variances	27
Expected variance	5,6E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	3,0E-01
Upper boundary of s^2	9,0E-01

Tabella 110 - Test ipotesi II (EBM): Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e T_{on}

In ultima battuta si effettua l'analisi della varianza (ANOVA) per avere conferma dei risultati ottenuti con i test d'ipotesi, dato che quest'ultimo strumento risulta più preciso e rigoroso rispetto ai precedenti. Si calcolano quindi le grandezze necessarie per effettuare tale analisi. Il rapporto tra le varianze viene paragonato ad un valore limite calcolato considerando un intervallo di confidenza pari al 95% della distribuzione di Fisher. Dai risultati riportati in Tabella 111 si evince che il rapporto tra le due grandezze è minore del valore limite, pertanto si può dire che la durata della scarica non abbia effetto sul valore di velocità di taglio.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	9,71E-02	0,17	3,11
Random errors	78	5,61E-01		
Total	80			

Tabella 111 – ANOVA T_{on} EBM: Risultati

3.5.4 Effetto T_{off}

Si vuole analizzare l'influenza del T_{off} sulla lavorazione e per questo si procede anche in questo caso alla realizzazione del box-plot, in Tabella 112 si riportano i valori calcolati necessari alla sua realizzazione.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Quart 3	2,60	1,55	1,08
Max	3,44	2,21	1,56
Min	0,93	0,55	0,36
Quart 1	1,39	0,82	0,58
Median	1,79	1,05	0,77
IQR	1,21	0,73	0,50
Max IQR	4,50	2,70	1,87
Min IQR	-0,50	-0,32	-0,20

Tabella 112 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot di T_{off} per EBM

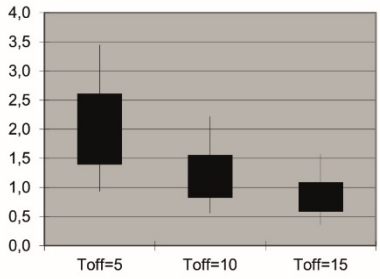

Figura 65 - Box-plot T_{off} e velocità di taglio per EBM

Analizzando il grafico in Figura 65, è possibile vedere una chiara presenza di effetti sistematici tra i diversi casi che determinano una certa relazione tra il parametro considerato e la velocità di taglio. Si può notare che aumentando la durata dell'intervallo che intercorre tra due scariche consecutive, la velocità di taglio decresce. Questa tendenza è messa

in luce dal fatto che le aree rettangolari individuate dai quartili non risultano allineate se non per piccole porzioni dell'area e che i quartili, al variare del livello del parametro, riducano sempre più il loro valore. L'andamento è simile a quello riportano per la relazione tra T_{off} e velocità di taglio per il processo di L-PBF.

Per verificare quanto appena riportato si proseguirà effettuando i test d'ipotesi e l'analisi della varianza. Si formula quindi l'ipotesi nulla, che in questo caso è la seguente:

H_0 : Il T_{off} ha influenza sulla velocità di taglio.

Procedendo con ordine, si effettua per primo il test d'ipotesi sulla media delle colonne. Vengono calcolati quindi tali valori e si confrontano con i limiti teorici della distribuzione normale, considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 113 vengono riportati i valori delle medie, mentre in Tabella 114 si riportano i limiti teorici. Confrontando questi valori si può facilmente evincere che il parametro considerato abbia effetto sulla velocità di taglio, dato che alcune delle medie calcolate si trovano al di fuori dell'intervallo teorico e quindi non è possibile negare l'affermazione fatta in principio.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Mean	1,99	1,19	0,84

Tabella 113 - Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{off}

Number of samples averaged	27
Average	1,34
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,06
Upper boundary	1,62

Tabella 114 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e T_{off}

Fatto questo si realizza invece il secondo test d'ipotesi, dove si va a considerare la varianza delle colonne. In questo caso i limiti teorici vengono calcolati con la medesima procedura utilizzata in precedenza per questo test, facendo riferimento alla distribuzione χ^2 e con un intervallo di fiducia pari al 95%. In Tabella 115 si riportano i valori della varianza delle colonne, in Tabella 116 si riportano invece i valori dei limiti teorici.

	Toff = 5	Toff = 10	Toff = 15
Variance	6,1E-01	2,4E-01	1,2E-01

Tabella 115 - Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di T_{off}

Number of samples for variances	27
Expected variance	3,2E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	1,7E-01
Upper boundary of s^2	5,2E-01

Tabella 116 - Test ipotesi II: Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e T_{off}

Confrontando i valori calcolati con i limiti teorici, il test restituisce il medesimo risultato esposto in precedenza. Alcuni valori delle varianze delle colonne non si trovano all'interno dell'intervallo per il quale è possibile rifiutare l'ipotesi nulla, quindi anche in questo caso è possibile sostenere che il parametro studiato abbia effetto sulla velocità di taglio e quindi sulla produttività della lavorazione.

Per avere un'ulteriore conferma o rifiuto dell'ipotesi nulla, si effettua infine l'analisi della varianza. Il valore limite della distribuzione di Fisher viene calcolato come negli altri casi con un intervallo di confidenza pari al 95%. Si riporta in Tabella 117 la tabella del calcolo della varianza. Analizzando i risultati, dato che il rapporto tra le varianze risulta ben maggiore del valore limite di Fisher, è possibile accettare l'ipotesi nulla e quindi dire che il T_{off} ha effetto sul valore della velocità di taglio.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	9,44E+00	29,40	3,11
Random errors	78	3,21E-01		
Total	80			

Tabella 117 – ANOVA T_{off} EBM: Risultati

3.5.5 Effetto Spessore

Si studia infine l'effetto dell'ultimo parametro di processo, ovvero lo spessore e per fare questo calcolano i valori necessari alla rappresentazione del grafico box-plot, in Tabella 118 si riportano le grandezze calcolate per la realizzazione del grafico.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Quart 3	2,60	1,50	1,07
Max	3,44	2,24	1,57
Min	1,03	0,53	0,36
Quart 1	1,41	0,82	0,57
Median	1,78	1,05	0,75
IQR	1,19	0,68	0,50
Max IQR	4,47	2,57	1,85
Min IQR	-0,45	-0,24	-0,21

Tabella 118 – Dati di velocità di taglio utili per i box-plot dello spessore per EBM

In Figura 66 si riporta il grafico realizzato utilizzando i dati della Tabella 118. Analizzando il grafico è possibile trovare delle analogie con il box-plot del T_{off}. Si può rintracciare la stessa tendenza e relazione che intercorre tra T_{off} e velocità di taglio, infatti all'aumentare dello spessore diminuisce la velocità del processo per effettuare un taglio di una data lunghezza. Questa relazione è suggerita dalla particolare disposizione dei quartili e dalle aree individuate da questi che tendono ad avere una disposizione a "gradino". Infatti, i terzi quartili ed anche i primi quartili diminuiscono progressivamente all'aumentare dello spessore. Le aree, a differenza di quello che accadeva per la corrente e per la durata della scarica elettrica, non risultano sovrapposte se non per qualche piccola frazione. Queste differenze presenti tra i box-plot dei vari livelli del parametro mettono in evidenza che potrebbe essere presente un effetto sistematico dovuto allo spessore.

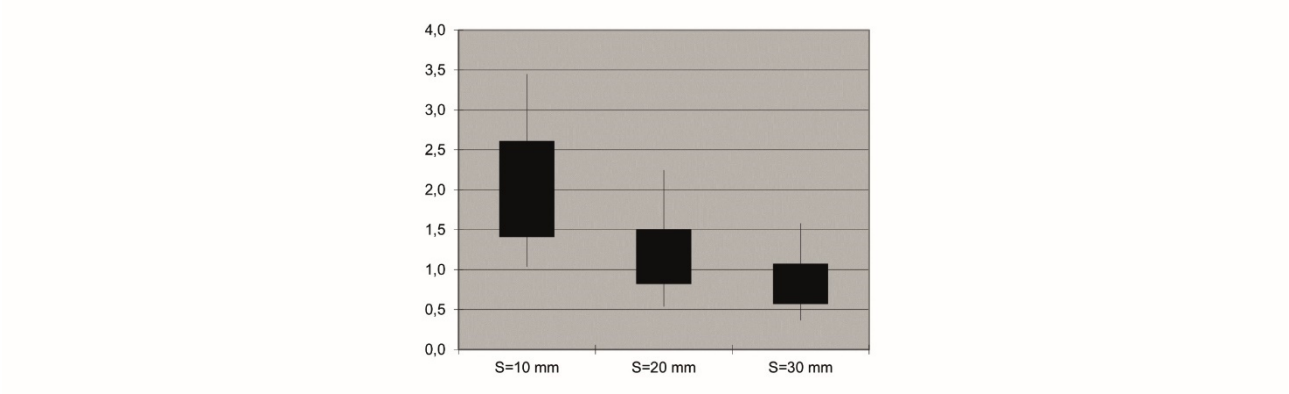

Figura 66 – Box-plot spessore e velocità di taglio per EBM

Per verificare la presenza di effetti sistematici si effettuato prima i test d'ipotesi e successivamente l'analisi della varianza. Prima di poter procedere è necessario formulare l'ipotesi nulla, che verrà poi confermata o rifiutata dei test. In questo caso l'ipotesi nulla è la seguente:

$$H_0: Lo\ spessore\ ha\ influenza\ sulla\ velocità\ di\ taglio$$

Si calcolano quindi le medie delle colonne e i rispettivi limiti teorici per poter eseguire il primo test. Tali limiti sono stati calcolati come in precedenza, ovvero tramite la distribuzione normale considerando un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 119 si riportano i valori delle medie delle colonne, mentre in Tabella 120 vengono riportati i valori dei limiti teorici.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Mean	2,00	1,19	0,85

Tabella 119 - Test ipotesi I (EBM): Medie delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di spessore

Number of samples averaged	27
Average	1,34
Average Standard deviation	0,14
Confidence level	95%
Lower boundary	1,06
Upper boundary	1,62

Tabella 120 - Test ipotesi I (EBM): Limiti teorici di media per i dati valori di velocità di taglio e spessore

Dal confronto delle due tabelle non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla poiché i valori calcolati non ricadono all'interno dell'intervallo individuato dai limiti teorici. Perciò non è possibili escludere che lo spessore abbia effetto sulla velocità di taglio. Si effettua il secondo test d'ipotesi, in questo caso la verifica si effettua sulla varianza delle colonne. Vengono pertanto calcolati i valori delle varianze delle colonne e vengono comparati con i valori limite, questa volta vengono definiti utilizzando la distribuzione χ^2 e un intervallo di confidenza pari al 95%. In Tabella 121 vengono riportati i valori delle varianze delle colonne riferite ai vari livelli del parametro considerato, mentre in Tabella 122 si riportano i valori dei limiti teorici.

	S = 10 mm	S = 20 mm	S = 30 mm
Variance	6,0E-01	2,4E-01	1,3E-01

Tabella 121 - Test ipotesi II (EBM): Varianze delle colonne dei valori di velocità di taglio relativi ai livelli di spessore

Number of samples for variances	27
Expected variance	3,2E-01
Expected v	26
Confidence level	95%
Lower boundary of s^2	1,7E-01
Upper boundary of s^2	5,2E-01

Tabella 122 - Test ipotesi II: Limiti teorici di varianza per i dati valori di velocità di taglio e spessore

L'esito del secondo test d'ipotesi conferma quanto si era ottenuto in precedenza, infatti i valori di varianza calcolati non rientrano negli estremi teorici e per questo motivo non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Perciò anche in questo caso il risultato è che lo spessore ha effetto sulla velocità di taglio. L'ultimo test che rimane da effettuare è l'analisi della varianza. Per fare questo si utilizza la solita procedura: si calcola il rapporto tra le varianze e lo si paragone con il valore limite della distribuzione di Fisher, calcolato con un intervallo di confidenza pari al 95%. Dato che il rapporto tra le varianze è notevolmente maggiore del valore limite è possibile affermare che lo spessore ha effetto sul valore di rugosità superficiale. In Tabella 123 per completezza si riporta la tabella ANOVA dove sono presenti tutti i risultati dei calcoli.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	2	9,44E+00	29,41	3,11
Random errors	78	3,21E-01		
Total	80			

Tabella 123 – ANOVA spessore EBM: Risultati

3.5.6 Modello di Regressione

In questo paragrafo si andrà ad analizzare il piano sperimentale per studiare l'effetto dei parametri di processo e definire un modello di regressione, in maniera del tutto analoga a quanto fatto in precedenza e sfruttando i medesimi strumenti di calcolo. Dalle precedenti analisi è emerso che la corrente e il T_{on} hanno poca influenza sulla velocità di taglio e quindi sulla produttività del processo. Come si è visto in precedenza i vari parametri possono dar vita a delle interazioni tra loro che possono essere più significative del singolo parametro. Per tale motivo verranno ricercate e si determinerà la loro influenza tramite strumenti statici. Si cerca quindi un modello di regressione che includa il contributo di tutte le interazioni dei parametri di processo fino al secondo ordine. Le analisi condotte in questo modo confermano il fatto che il T_{on} sia un parametro non significativo per quanto riguarda le variazioni di velocità di taglio, lo stesso si può dire delle interazioni delle quali sono quella che intercorre tra T_{off} e spessore risulta significativa. Alla luce di questo si riporta in equazione (39) il modello di regressione trovato considerando solamente i parametri significativi.

$$V_t = 3{,}852 + 0{,}2336 \cdot I - 0{,}2055 \cdot T_{off} - 0{,}10264 \cdot \text{Spessore} + 0{,}0045 \cdot T_{off} * \text{Spessore} \quad (39)$$

In Tabella 124 e Tabella 125 si riportano rispettivamente i dati riguardati la precisione del modello e l'analisi della varianza dei parametri e interazioni considerate.

Model Summary

S	R^2	R^2_{adj}	R^2_{pred}
0,208057	92,51%	92,12%	91,42%

Tabella 124 – Precisione del Modello di Regressione per i dati di velocità di taglio di EBM considerando i parametri di processo e le interazioni significative

Analysis of Variance

Source	DF	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	4	92,51%	40,63	10,15	234,67	0,000
I	1	6,71%	2,94	2,94	68,05	0,000
Toff	1	40,89%	8,14	8,14	188,13	0,000
Spessore	1	40,75%	8,12	8,12	187,75	0,000
Toff*Spessore	1	4,16%	1,82	1,82	42,24	0,000
Error	76	7,49%	3,29	0,04		
Total	80	100,00%				

Tabella 125 – ANOVA del Modello di Regressione per i dati di velocità di taglio di EBM considerando i parametri di processo e le interazioni significative

L'analisi della varianza mette in luce che i parametri inclusi nel modello siano solo quelli significativi e che contribuiscono in maniera importante sulla precisione del modello. In Figura 67 si riporta anche l'andamento dei residui. Anche in questo caso, sebbene qualitativamente i residui non si discostino in maniera evidente dalla distribuzione normale, analizzando il loro segno è possibile notare che essi non dispongano nemmeno in questo caso in maniera totalmente casuale. Infatti, a seconda dell'area del grafico è possibile notare che i residui assumono segno positivo o negativo. Pertanto, anche in questo caso è possibile che siano presenti degli effetti sistematici che non sono stati considerati all'interno del modello.

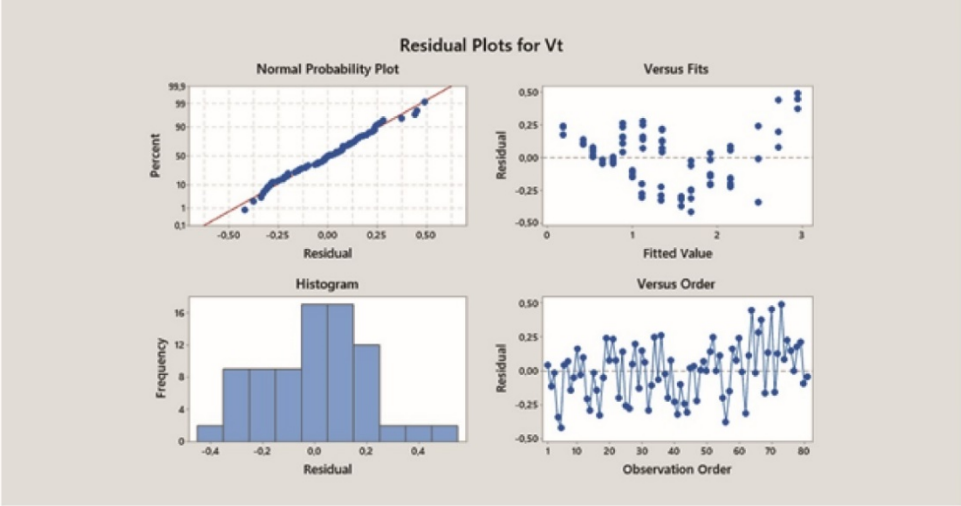

Figura 67 – Residui del Modello di Regressione per i dati di velocità di taglio di EBM considerando i parametri di processo e le interazioni significative

3.5.7 Effetto dei Parametri di processo

Dopo aver effettuato l'analisi del DoE mediante il software Minitab, è stato possibile determinare l'effetto di ogni singolo parametro di processo sulla velocità di taglio. In Figura 68 vengono riportatati i risultati delle analisi.

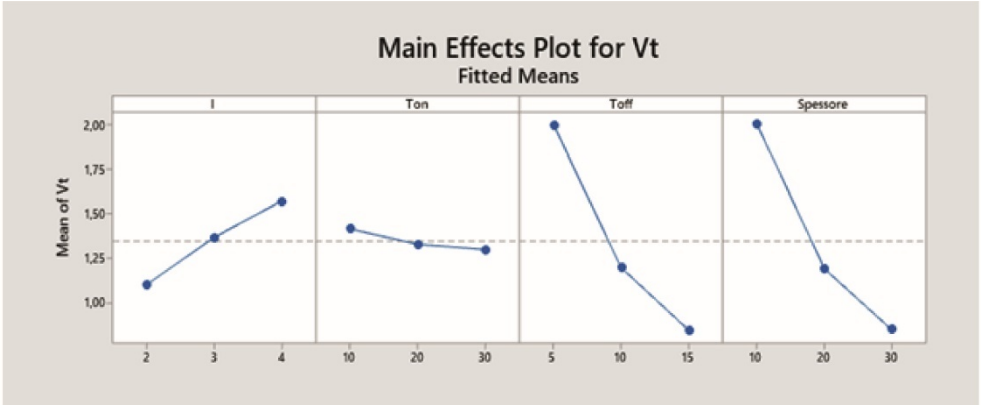

Figura 68 – Effetti dei livelli dei parametri di processo sulla velocità di taglio per EBM

I risultati degli andamenti sono analoghi a quelli riportati al paragrafo 3.3.7. In realtà i risultati sono simili anche per quanto riguarda l'equazione di regressione seppur con qualche modifica sui coefficienti moltiplicativi dovuti a pesi diversi del parametro considerato, sebbene la differenza sia ridotta. L'analisi dell'effetto dei parametri di processo conferma la poca influenza del T_{on}, dato che non causa una variazione sostanziale sulla media della velocità di taglio. Le ragioni di questa tendenza, della sua relazione con il T_{off} e dell'effetto di questo sono state già esposte al paragrafo 3.3.7. Come accadeva in precedenza, i due parametri più influenti sono T_{off} e Spessore. Il primo perché tramite un suo aumento si provoca un aumento dei tempi improduttivi che quindi vanno a ridurre notevolmente la produttività del processo, considerando anche che questo parametro è un parametro moltiplicativo del T_{on}. Lo spessore invece va a diminuire la produttività a causa della maggiore superficie su cui si deve scaricare la medesima quantità di energia, il che comporta la formazione di crateri di minore dimensione e quindi una riduzione del tasso di rimozione e della velocità della lavorazione. La corrente ha effetto sulla velocità di taglio, in particolar modo la promuove dato che va ad aumentare l'energia delle scariche elettriche e quindi della potenziale quantità di materiale che si va ad erodere.

Si ritrovano i medesimi risultati del processo di L-PBF anche per quanto riguarda le interazioni, infatti l'unica interazione veramente significativa è quella presenta tra T_{off} e spessore. Questa causa una riduzione della velocità di taglio ulteriore oltre a quelle che si avrebbe a causa dell'aumento di un singolo di parametro, ovvero oltre al decremento di produttività causato dall'aumento T_{off} si verifica una riduzione ulteriore causata dall'aumento progressivo dello Spessore. Questa interazione contribuisce a spiegare la variabilità dei dati sperimentali utilizzati per definire il modello.

3.6 Confronto tra L-PBF e EBM

Dopo aver analizzato i risultati, nei paragrafi precedenti sono state riscontrate alcune differenze sugli effetti dei parametri di processo sulla rugosità superficiale (Ra), la velocità di taglio V_t e di conseguenza sulle equazioni dei modelli di Regressione. Nel confronto dei risultati si è notato che tra i due processi produttivi non via una evidente differenza nel caso della velocità di taglio. Infatti, i parametri di processo hanno il medesimo effetto su questo indice di performance al variare dei livelli e anche i modelli di Regressione non differiscono in maniera sostanziale l'uno dall'altro, anzi anche la capacità di spiegare la variabilità del modello in termini percentuali e gli F-Value dei singoli parametri differiscono solo di pochi punti. Quindi sebbene non vengano rinvenute differenze nell'analisi della produttività del processo, lo stesso non si può dire per quanto riguarda la rugosità superficiale. Nel corso del paragrafo 3.5.7 sono state esposti i diversi andamenti dei parametri processo considerati, specialmente nel caso del T_{off} che inverte totalmente il suo effetto. Alla luce di questo, è possibile ipotizzare che siano presenti delle differenze nell'interazione tra l'elettroerosione a filo e i due processi additivi e che questi si manifestino sul grado di rugosità superficiale che è possibile ottenere a parità di parametri di processo e quindi energia di scarica. Poiché questa non è altro che un'ipotesi occorre verificare e dimostrare quanto detto utilizzando gli strumenti statistici di cui si è fatto uso in precedenza. Per effettuare questa analisi si vuole minimizzare l'eventuale effetto di altri fattori, quindi le prove vengono ordinate in maniera tale che i parametri di processo (I, T_{on}, T_{off}, Spessore) siano i medesimi per entrambe le tecnologie. L'analisi viene eseguita considerando sia i risultati di rugosità superficiale media, effettuata sulle sei misurazioni, sia i dati di velocità di taglio ricavati dalle prove. La prima analisi viene effettuate sulle medie delle misurazioni dato che i modelli di regressione vengono definiti anch'essi considerando i valori medi di rugosità. I dati vengono divisi a seconda del processo produttivo considerato, in maniera tale da poter determinare l'influenza di questo sugli indici di performance considerati. Si cerca quindi di confermare l'assenza o la scarsa significatività della tecnologia produttiva sulla velocità di taglio e invece la sua significatività sul valore di rugosità superficiale.

Si riportano dapprima le analisi che riguardano l'impatto del processo produttivo del provino sulla velocità di taglio. In Figura 69 si riportano i box-plot riferiti ai due processi. In questo caso si può notare che le aree individuate dai quartili sono totalmente sovrapposte, questo potrebbe indicare che il processo produttivo non abbia impatto sulla produttività del processo di elettroerosione a filo. Bisogna inoltre precisare che entrambi i test d'ipotesi hanno messo in luce che i valori di media e varianza siano contenuti all'interno dell'intervallo in cui è possibile rifiutare l'ipotesi nulla, ovvero la significatività del diverso processo.

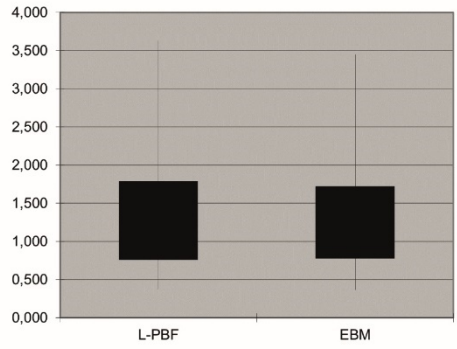

Figura 69 – Box-plot della velocità di taglio e confronto tra i due processi

L'analisi della varianza conferma l'ipotesi iniziale, infatti il valore del rapporto delle varianze risulta notevolmente inferiore al valore limite della distribuzione di Fisher, calcolato per un intervallo di confidenza pari al 95%. La medesima analisi svolta tramite Minitab conferma i risultati e riporta un P-Value pari a 0,811 e una contribuzione del parametro pari allo 0,04%. Pertanto, il parametro può essere trascurato e si può quindi affermare che il processo additivo utilizzato

per la produzione del provino non ha influenza sulla velocità di taglio, dato che l'effetto sulla media e sulla varianza di quest'ultima prodotto dai due parametri risulta trascurabile. In Tabella 126 si riportano i risultati dell'analisi della varianza.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	1	3,24E-02	0,06	3,90
Random errors	160	5,66E-01		
Total	161			

Tabella 126 – ANOVA del processo sulla velocità di taglio: Risultati

In Figura 70 si riporta il grafico degli intervalli, dove è possibile notare ancora meglio la differenza ridotta tra i due casi considerati.

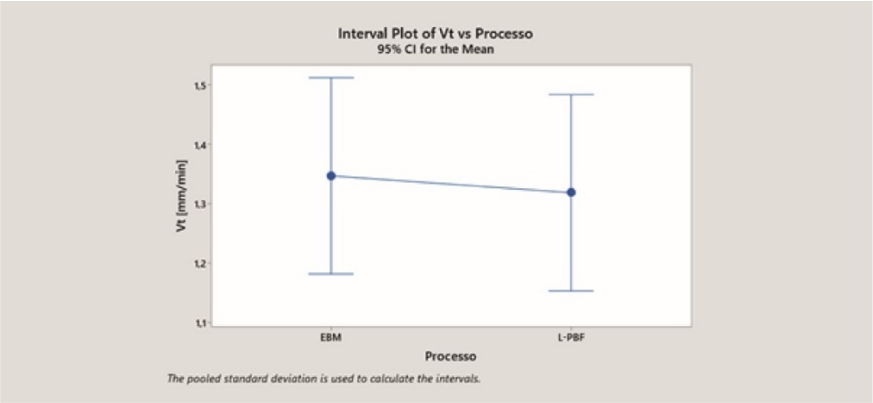

Figura 70 – Grafico degli intervalli di velocità di taglio dei due processi

Si esegue ora la medesima analisi per la rugosità superficiale. In questo caso ci si aspetta di ottenere dei risultati che confermino l'ipotesi iniziale. In Figura 71 si riportano i box-plot generati sulla base dei dati raccolti, dai quali è possibile notare che la situazione sia diversa da quella riportata per la velocità di taglio. Le aree rettangolari individuate dai quartili non sono totalmente allineate, dato che entrambi quartili del caso EBM risultano inferiori a quelli del caso di L-PBF. Questo andamento suggerisce che potrebbero esserci differenze sistematiche introdotte dal diverso processo produttivo.

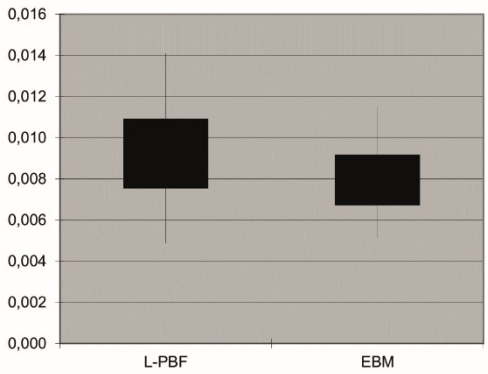

Figura 71 – Box-plot della rugosità superficiale e confronto tra i due processi

Per avere conferma di quanto si è visto attraverso il box-plot si effettua l'analisi della varianza. In Tabella 127 si riporta la tabella ANOVA, dai risultati è possibile notare che il rapporto tra le varianze risulta maggiore del limite teorico calcolato a partire dalla distribuzione di Fisher per un intervallo di confidenza pari al 95%. Per questo motivo è possibile affermare che il processo produttivo ha effetto sulla rugosità superficiale. Le analisi eseguite sul software Minitab confermano quanto già detto e infatti si ottiene un P-Value ben inferiore a 0,05 e la variabilità introdotta dal cambiamento di processo produttivo si attesta attorno al 9%. Bisogna precisare che questo non incide solo sulla media ma anche sulla varianza della rugosità superficiale, pertanto questo effetto non può essere trascurato.

Variation cause	Degrees of Freedom	Variance	Variance ratio	F Max
Examined factor	1	6,50E-05	16,16	3,90
Random errors	160	4,02E-06		
Total	161			

Tabella 127 – ANOVA del processo sulla rugosità superficiale: Risultati

In Figura 72 si riporta anche in questo caso il grafico degli intervalli, dove risulta molto più evidente la differenza tra i due processi produttivi.

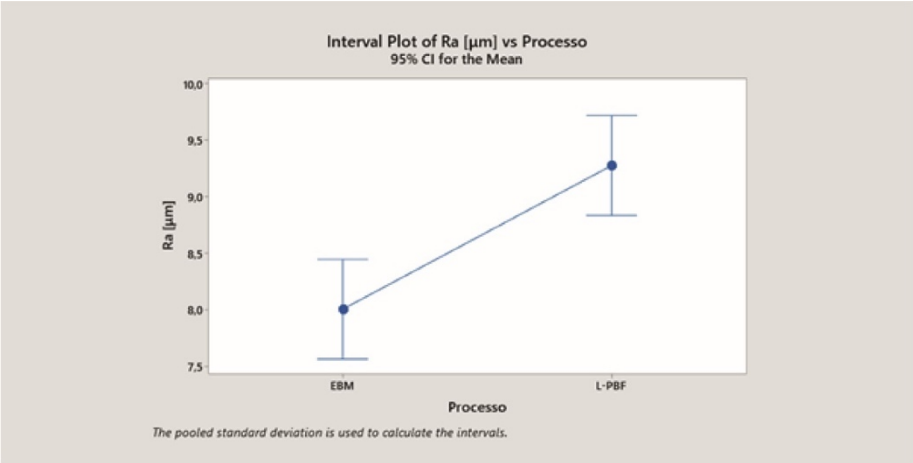

Figura 72 – Grafico degli intervalli di rugosità superficiale dei due processi

La differenza riscontrata a livello superficiale tra i due processi potrebbe essere causata da diversi fattori inerenti alla tecnologia additiva utilizzata. EBM e L-PBF producono componenti con microstrutture differenti e questo potrebbe essere una delle principali cause di variabilità dei dati e degli effetti dei parametri di processo di WEDM. Inoltre, anche le tensioni residue e la densità del materiale potrebbero avere effetto sul risultato finale della lavorazione

4 Conclusioni

L'obiettivo del seguente lavoro è stato quello di studiare il comportamento del processo di elettroerosione a filo su componenti realizzati mediante le tecniche additive di L-PBF e EBM, in maniera tale da poter determinare se fossero presenti eventuali differenze tra le due tecnologie e se gli effetti dei parametri di processo di elettroerosione a filo fossero diversi rispetto a quelli ritrovati in letteratura per componenti prodotti tramite tecnologie convenzionali. A tal proposito si è dapprima effettuata una ricerca bibliografica con l'obiettivo di avere una maggiore comprensione del processo di rimozione del materiale tramite scariche elettriche, quali fossero i parametri di processo coinvolti e quale fosse il loro effetto sulla lavorazione e sugli indici di performance. Tale ricerca ha sottolineato il fatto che, sebbene in letteratura siano presenti diversi studi riguardanti il processo di elettroerosione a filo, sono molto ridotti in numero quelli che indagano in maniera approfondita l'interazione tra il processo erosivo e le tecnologie di fabbricazione additiva. Si è quindi reso necessario effettuare degli esperimenti preliminari per effettuare una caratterizzazione della macchina di WEDM utilizzata, in maniera tale da scegliere opportunamente i parametri di processo che verranno studiati all'interno del piano sperimentale, considerando anche che il processo di elettroerosione a filo viene utilizzato principalmente per il distacco di componenti dalla piattaforma. Dopodiché si è giunti alla definizione di una geometria del provino che permettesse di effettuare il piano sperimentale minimizzando i tempi morti e il numero di esperimenti. Infine, è stato realizzato il piano sperimentale, dove si sono considerati i parametri di processo determinati grazie agli esperimenti preliminari, in maniera tale da poterne studiare l'effetto sulla velocità di taglio e sulla rugosità superficiale. A valle del processo sperimentale sono state effettuate le misurazioni di rugosità superficiale mediante rugosimetro che, insieme ai dati di velocità di taglio, sono state analizzate mediante degli strumenti di statistica descrittiva ed inferenziale.

Queste analisi hanno permesso di determinare l'effetto di ogni singolo parametro di processo sulla rugosità superficiale e sulla velocità di taglio, inoltre hanno permesso anche realizzazione di un modello di regressione. Queste procedure sono state ripetute sia sui dati provenienti da esperimenti effettuati utilizzando un provino prodotto mediante L-PBF che EBM. Le analisi hanno messo in luce che i risultati relativi all'effetto dei parametri di processo sulla velocità di taglio siano i medesimi per entrambe le tecnologie, tanto che anche i modelli di Regressione individuati differiscono solamente di qualche punto. Questo è stato confermato anche dall'analisi della varianza effettuata sulla variabilità introdotta sui dati sperimentali dai due diversi processi additivi, che infatti sottolinea come le differenze di media e varianza dei dati dei due processi risultino trascurabili. Lo stesso non si può dire della rugosità superficiale, dove il processo additivo utilizzato incide in maniera significativa. In questo caso infatti alcuni parametri di processo presentano relazioni con la rugosità superficiale diversi tra i due processi produttivi. Nel caso di L-PBF, infatti ci si trova in presenza di un legame quadratico tra corrente di scarica e rugosità e una proporzionalità diretta tra rugosità e tempo intercorrente tra due scariche successive, all'aumentare dell'intervallo di tempo si verifica anche un aumento della rugosità superficiale. Mentre per il processo di EBM la relazione dei due parametri con la rugosità superficiale è di tipo

lineare e nel caso del tempo intercorrente tra due scariche si inverte la tendenza, all'aumentare dell'intervallo di tempo si verifica una riduzione del valore di rugosità superficiale. Le differenze possono essere introdotte dalla differente microstruttura, dalle diverse densità del provino o dal differente stato tensionale dei provini di cui il processo di L-PBF e EBM sono responsabili.

Per determinare le cause delle diversità sarà possibile svolgere ulteriori analisi in futuro e andare a studiare l'effetto di ulteriori parametri di processo sulla lavorazione. In realtà uno degli sviluppi più interessanti sarà quello di studiare l'interazione del processo di elettroerosione con i supporti, che in quanto materiale non continuo presenta un comportamento diverso rispetto ai componenti pieni e tale è stato raramente soggetto ad analisi in letteratura.

Bibliografia

[1] J. Priestley, "Experiments on the circular spots made on pieces of metal by large electrical explosions," in *The history and present state of electricity with original experiments*, 1775.

[2] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2001.

[3] B.R. Lazarenko, "Inversion of the Erosion of metals and measures against contact devastation," Thesis, All Union Electrotechnical Institute WEI, 1943.

[4] B. N. Solotych, *Physical Fundamentals of electrical Spark Machining of Metals*. 1952.

[5] B. M. Schumacher, R. Krampitz, and J.-P. Kruth, "Historical Phases of EDM Development Driven by the Dual Influence of 'Market Pull' and 'Science Push,'" *Procedia CIRP*, vol. 6, 2013.

[6] A. M.Sidpara and G. Malayath, *Micro Electrical Discharge Machining*. CRC Press, 2019.

[7] Y. Qin, "Micro-Electrical Discharge Machining," in *Micromanufacturing Engineering and Technology (2nd Edition)*, Elsevier, 2015, pp. 81–105.

[8] "https://drahterosion.com/italian/beginnings_i.htm." .

[9] K. H. Ho, S. T. Newman, S. Rahimifard, and R. D. Allen, "State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 12–13, pp. 1247–1259, 2004.

[10] C. H. Kahng and K. P. Rajurkar, "FUNDAMENTAL THEORIES OF THE PARAMETERS OF EDM PROCESS.," 1977.

[11] F. L. Amorim and W. L. Weingaertner, "The behavior of graphite and copper electrodes on the finish die-sinking electrical discharge machining (EDM) of AISI P20 tool steel," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2007, doi: 10.1590/S1678-58782007000400004.

[12] F. König, W., Klocke, *"Fertigungsverfahren - 3: Abtragen und Generieren."* Berlin: Springer, 1997.

[13] A. Descoeudres, "Characterization of Electrical Discharge Machining Plasmas," vol. 3542, p. 137, 2006, doi: 10.5075/epfl-thesis-3542.

[14] M. P. Jahan, "Electro - Discharge Machining (EDM) Principle of the EDM Process," *Mod. Manuf. Process.*, pp. 377–409, 2019.

[15] B. M. Schumacher, "After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed," 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.060.

[16] H. XIA, M. KUNIEDA, and N. NISHIWAKI, "Research on Removal Amount Difference between Anode and Cathode in EDM Process.," *J. Japan Soc. Electr. Mach. Eng.*, 1994, doi: 10.2526/jseme.28.59_31.

[17] M. IKEDA, "The movement of a bubble in the gap depending on the single electrical discharge I," *J. Japan Soc. Electr. Mach. Eng.*, 1972, doi: 10.2526/jseme.6.12.

[18] B. Bommeli, C. Frei, and A. Ratajski, "On the influence of mechanical perturbation on the breakdown of a liquid dielectric," *J. Electrostat.*, 1979, doi: 10.1016/0304-3886(79)90067-6.

[19] T. Saleh and R. Bahar, "ELID Grinding and EDM for Finish Machining," in *Comprehensive Materials Finishing*, 2017.

[20] V. Handa, P. Goyal, and R. Kumar, "Review on surface modifications of the workpiece by electric discharge machining," 2020,

doi: 10.1007/978-981-15-4748-5_3.

[21] V. Prakash *et al.*, "Surface alloying of miniature components by micro-electrical discharge process," 2018.

[22] L. C. Lee, L. C. Lim, V. Narayanan, and V. C. Venkatesh, "Quantification of surface damage of tool steels after EDM," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 1988, doi: 10.1016/0890-6955(88)90050-8.

[23] D. B. Moulton, "Wire EDM - The fundamentals," 1999.

[24] D. Taylor, L. Chong, M. Junyu, and J. Muhammad P., "Micro Wire EDM," in *Micro-electrical Discharge Machining Process: Technologies and Applications*, 2018, p. 314.

[25] Y. S. Wong, M. Rahman, H. S. Lim, H. Han, and N. Ravi, "Investigation of micro-EDM material removal characteristics using single RC-pulse discharges," 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00771-4.

[26] S. S. Kumar, T. Varol, A. Canakci, S. T. Kumaran, and M. Uthayakumar, "A review on the performance of the materials by surface modification through EDM," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.08.002.

[27] M. Moradi and D. Ghodsiyeh, "Wire Electrical Discharge Machining," in *Electrical Discharge Machining*, 2015.

[28] S. Zaborski and M. Wisniewska, "EXPERIMENTAL MODEL ON THE WIRE WEAR FOR WEDM OF HARD TO MACHINE MATERIALS," vol. 19, no. 4, pp. 110–121, 2019.

[29] A. Johny and C. Thiagarajan, "Investigation of surface integrity and it's optimization on pure titanium using molybdenum wire by reciprocated travelling WEDM - A review," 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.251.

[30] J. Kapoor, S. Singh, and J. S. Khamba, "Recent developments in wire electrodes for high performance WEDM," 2010.

[31] R. Singh, "Recent Developments in Wire EDM: A Review," *Int. J. Res. Mech. Eng. Technol.*, vol. 3, pp. 150–152, 2013.

[32] M. T. Antar, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, D. Jones, and R. Perez, "Productivity and workpiece surface integrity when WEDM aerospace alloys using coated wires," 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.071.

[33] S. Oliver Nesa Raj and S. Prabhu, "Modeling and analysis of titanium alloy in wire-cut EDM using Grey relation coupled with principle component analysis," *Aust. J. Mech. Eng.*, 2017, doi: 10.1080/14484846.2016.1251077.

[34] D. Poros, M. Wisniewska, and S. Zaborski, "Comparative analysis of wedm with different wire electrodes applied to cut titanium ti6al4v," *J. Mach. Eng.*, 2020, doi: 10.36897/jme/130399.

[35] M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, and B. Skoric, "Influence of discharge energy on machining characteristics in EDM," *J. Mech. Sci. Technol.*, 2012, doi: 10.1007/s12206-011-0922-x.

[36] M. Kunieda, M. Tohi, and Y. Ohsako, "Reaction forces observed in pulse discharges of EDM," *IJEM*, vol. 8, pp. 51–56, 2003.

[37] M. Kunieda, Y. Adachi, and M. Yoshida, "Study on process reaction force generated by discharge in EDM," *Proc. 2nd Int'l Conf. MMSS*, pp. 313–324, 2000.

[38] B. Choudhuri, R. Sen, S. K. Ghosh, and S. C. Saha, "Comparative machinability characterization of wire electrical discharge machining on different specialized AISI steels," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 1, 2020, doi: 10.1007/s12034-019-1982-2.

[39] U. A. Dabade and S. S. Karidkar, "Analysis of Response Variables in WEDM of Inconel 718 Using Taguchi Technique," 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.026.

[40] A. A. Fedorov, A. I. Blesman, D. V. Postnikov, D. A. Polonyankin, G. S. Russkikh, and A. V. Linovsky, "Investigation of the

impact of Rehbinder effect, electrical erosion and wire tension on wire breakages during WEDM," *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.002.

[41] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Investigation of machining characterization for wire wear ratio & MRR on pure titanium in WEDM process through response surface methodology," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, 2018, doi: 10.1177/0954408916685588.

[42] F. Han, J. Jiang, and D. Yu, "Influence of machining parameters on surface roughness in finish cut of WEDM," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, no. 5–6, pp. 538–546, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0629-9.

[43] T. Singh, J. P. Misra, and B. Singh, "Experimental Investigation of Influence of Process Parameters on MRR during WEDM of Al6063 alloy," 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.071.

[44] P. S. Rao, K. Ramji, and B. Satyanarayana, "Experimental Investigation and Optimization of Wire EDM Parameters for Surface Roughness, MRR and White Layer in Machining of Aluminium Alloy," *Procedia Mater. Sci.*, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.426.

[45] R. Chalisgaonkar and J. Kumar, "Optimization of WEDM process of pure titanium with multiple performance characteristics using Taguchi's DOE approach and utility concept," *Front. Mech. Eng.*, 2013, doi: 10.1007/s11465-013-0256-8.

[46] A. Kumar, U. A. Kumar, and P. Laxminarayana, "Optimization of surface roughness and kerf width by wire cut-electrical discharge machining on inconel 625," 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.955.

[47] R. Calvo and M. Daniel, "Wire electrical discharge machining (EDM) setup parameters influence in functional surface roughness," 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.048.

[48] K. P. M. Priyankara and G. I. P. Perera, "Experimental Investigation to Achieve Minimum Surface Roughness in Wire EDM Process," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2020.

[49] N. Tosun, C. Cogun, and A. Inan, "The effect of cutting parameters on workpiece surface roughness in wire EDM," *Mach. Sci. Technol.*, 2003, doi: 10.1081/MST-120022778.

[50] P. Sharma, D. Chakradhar, and S. Narendranath, "Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application," *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 558–566, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.036.

[51] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, "Experimental investigation on material transfer mechanism in wedm of pure titanium (Grade-2)," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2013, doi: 10.1155/2013/847876.

[52] S. kumar, M. A. Khan, and B. Muralidharan, "Processing of titanium-based human implant material using wire EDM," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 34, no. 6, pp. 695–700, 2019, doi: 10.1080/10426914.2019.1566609.

[53] R. Sen, B. Choudhuri, J. D. Barma, and P. Chakraborti, "Study the impact of process parameters and electrode material on wire electric discharge machining performances," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 7552–7560, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.427.

[54] A. Alias, B. Abdullah, and N. M. Abbas, "WEDM: Influence of machine feed rate in machining Titanium Ti-6Al-4V using brass wire and constant current (4A)," *Procedia Eng.*, vol. 41, no. Iris, pp. 1812–1817, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.388.

[55] S. Rao, "Review on Wire-Cut EDM Process," *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, 2013.

[56] F. Nourbakhsh, K. P. Rajurkar, A. P. Malshe, and J. Cao, "Wire electro-discharge machining of titanium alloy," 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.01.003.

[57] K. Venkatarao and T. Anup Kumar, “An experimental parametric analysis on performance characteristics in wire electric discharge machining of Inconel 718,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2019, doi: 10.1177/0954406219840677.

[58] K. V. Rao, L. R. Raju, and C. K. Kumar, “Modeling of kerf width and surface roughness in wire cut electric discharge machining of Ti-6Al-4V,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 234, no. 6, pp. 533–542, 2020, doi: 10.1177/0954408920932369.

[59] M. Durairaj, D. Sudharsun, and N. Swamynathan, “Analysis of process parameters in wire EDM with stainless steel using single objective Taguchi method and multi objective grey relational grade,” *Procedia Eng.*, vol. 64, pp. 868–877, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.163.

[60] N. Tosun, C. Cogun, and G. Tosun, “A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 152, no. 3, pp. 316–322, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.373.

[61] S. S. Mahapatra and A. Patnaik, “Optimization of wire electrical discharge machining (WEDM) process parameters using Taguchi method,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, no. 9–10, pp. 911–925, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0672-6.

[62] A. Okada, T. Konishi, Y. Okamoto, and H. Kurihara, “Wire breakage and deflection caused by nozzle jet flushing in wire EDM,” *CIRP Ann.*, vol. 64, no. 1, pp. 233–236, 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.034.

[63] N. Tosun and C. Cogun, “An investigation on wire wear in WEDM,” *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)01045-2.

[64] A. Kumar, V. Kumar, and J. Kumar, “Parametric Effect on Wire Breakage Frequency and Surface Topography in WEDM of Pure Titanium,” *J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 1, pp. 51–56, 2013, doi: 10.18005/jmet0102003.

[65] A. Pramanik and A. K. Basak, “Sustainability in wire electrical discharge machining of titanium alloy: Understanding wire rupture,” *J. Clean. Prod.*, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.045.

[66] V. Aggarwal, S. S. Khangura, and R. K. Garg, “Parametric modeling and optimization for wire electrical discharge machining of Inconel 718 using response surface methodology,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 79, no. 1–4, pp. 31–47, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6797-8.

[67] F. Ghanem, C. Braham, and H. Sidhom, “Influence of steel type on electrical discharge machined surface integrity,” *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00572-7.

[68] G. N. Levy and F. Maggi, “WED Machinability Comparison of Different Steel Grades,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 183–185, 1990, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61031-2.

[69] K. Kanlayasiri and S. Boonmung, “An investigation on effects of wire-EDM machining parameters on surface roughness of newly developed DC53 die steel,” *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.220.

[70] K.-K. Choi, W.-J. Nam, and Y.-S. Lee, “Effects of heat treatment on the surface of a die steel STD11 machined by W-EDM,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 201, no. 1, pp. 580–584, 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.156.

[71] J. R. Gamage, A. K. M. DeSilva, D. Chantzis, and M. Antar, “Sustainable machining: Process energy optimisation of wire electrodischarge machining of Inconel and titanium superalloys,” *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 642–651, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.186.

[72] G. Bicknell and G. Manogharan, “A comparison of the effects of wire electrical discharge machining parameters on the processing of traditionally manufactured and additively manufactured 316L stainless steel specimens,” *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, vol. 2, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1115/IMECE2018-88014.

[73] "https://www.bmedm.com/economical-type1/729.html." .

[74] M. Santhiand and M. Fakkir Mohamed, "Optimization of WEDM process parameters using DFA and TOPSIS for Inconel 600," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 10, no. 55, pp. 3797–3802, 2015.

[75] M. Guo, J. Jhang, and D. Chen, "Application of Taguchi design method to optimize the electrical discharge machining," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 57, no. June, pp. 76–82, 2013.

[76] J. Antony, "2 - Fundamentals of Design of Experiments," in *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, J. Antony, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003, pp. 6–16.

[77] A. Ikram, N. A. Mufti, M. Q. Saleem, and A. R. Khan, "Parametric optimization for surface roughness, kerf and MRR in wire electrical discharge machining (WEDM) using Taguchi design of experiment," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 7, pp. 2133–2141, 2013, doi: 10.1007/s12206-013-0526-8.

[78] S. Ross, "Introduction to probability and statistics for engineers and scientists (2. ed.)," 1988.

[79] G. Rizza, "Benchmark destinato ad analisi dimensionali e di rugosità per il processo EBM per prodotti in Ti6Al4V," 2018.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare le relatrici di questo lavoro poiché la loro disponibilità e la loro competenza è stata fondamentale per lo sviluppo di questo elaborato. Ringrazio quindi la prof.essa Calignano per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro e per avermi formato riguardo i sistemi e il procedimento di misura. Ringrazio la prof.essa Atzeni per avermi assistito durante la realizzazione degli esperimenti e ogni qual volta fossero presenti problematiche con il macchinario. Ringrazio infine l'Ing. Galati per avermi formato sulle nozioni di statistica necessarie all'analisi dei dati sperimentali e per avermi supportato durante tale procedura.

Mi sento inoltre di dovere dei sentiti ringraziamenti al tecnico di laboratorio Giovanni Marchiandi per avermi mostrato il funzionamento del macchinario di elettroerosione a filo e per essersi reso sempre disponibile a fornirmi assistenza qualora ce ne fosse stata necessità.