

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di Ingegneria ‘Enzo Ferrari’



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica

Industria 4.0

A.A. 2025/2026

**Realizzazione di elettrodi per la lavorazione di Electrochemical Machining
mediante tecnica additiva DLP**

Relatore:

Prof. Defanti Silvio

Laureando

Parisi Pasqualino

INDICE

ABSTRACT	5
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	6
1.1 Introduzione all'argomento: Il contesto industriale e l'evoluzione delle lavorazioni meccaniche	6
1.2 Le motivazioni dello studio: Il "collo di bottiglia" del Tooling in ECM.....	7
1.3 L'integrazione dell'Additive Manufacturing: Opportunità e limiti attuali.....	8
1.4 Scopo del lavoro di tesi e obiettivi sperimentali.....	9
1.5 Struttura dell'elaborato	10
CAPITOLO 2: STATO DELL'ARTE E RICERCA BIBLIOGRAFICA	11
2.1 La tecnologia ECM (Electro Chemical Machining)	12
2.2 L'Additive Manufacturing nel Tooling	19
2.3 Tecniche di metallizzazione dei polimeri	26
2.4 Analisi della letteratura: Casi studio e modalità di cedimento degli elettrodi ibridi	33
2.5 Identificazione del Gap Tecnologico e Posizionamento della Tesi	37
CAPITOLO 3: MATERIALI E STRUMENTI (SETUP SPERIMENTALE)	38
3.1 La resina e la stampante 3D: Caratteristiche del materiale fotopolimerico utilizzato	39
3.2 Il processo di rivestimento (Coating): Pre-trattamento superficiale e bagni galvanici	42
3.3 La macchina ECM Specifiche, elettrolita e sistema di bloccaggio	48
CAPITOLO 4: PROGETTAZIONE DELL'ELETTRODO IBRIDO CON APPROCCIO DfAM	53
4.1 Introduzione ai vincoli di progetto e all'approccio sperimentale a due fasi	54
4.2 Fase 1: Configurazione base a impronta stellata con flussaggio trasversale (Cross-Flow).	57
4.3 Fase 2: Ottimizzazione DfAM con flussaggio interno conformale	60
4.4 Criteri essenziali di dimensionamento del processo ECM	65
CAPITOLO 5: CAMPAGNA SPERIMENTALE E ANALISI DEI RISULTATI	68
5.1 Preparazione finale dell'elettrodo ibrido e setup di macchina.....	70
5.2 Test preliminari: Ottimizzazione fluidodinamica e redesign geometrico	74
5.3 Metodologia metrologica e calcolo del Material Removal Rate (MRR).....	78
5.4 Lavorazione in regime Statico: Valutazione di tensione e tempo di lavorazione	83
5.5 Lavorazione in regime Dinamico: Ottimizzazione del feed-rate e del gap	89
5.6 Test di perforazione passante e individuazione dei limiti cinematici	95

5.7 Valutazione post-processo dell'integrità strutturale dell'elettrodo	98
CAPITOLO 6: ANALISI TECNICO ECONOMICA	101
6.1 Introduzione alla transizione verso l'Hybrid Tooling	102
6.2 Confronto Tecnologico: Manifattura Convenzionale vs. DfAM.....	104
6.3 Analisi dei Tempi di Sviluppo (Lead Time e Time-to-Market)	106
6.4 Modello di Costo (Cost Breakdown Analysis).....	108
6.5 Sostenibilità Ambientale e Scalabilità del Processo	110
CAPITOLO 7: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	112
7.1 Sintesi dell'attività di ricerca e validazione dell'Hybrid Tooling	113
7.2 Principali evidenze sperimentali e traguardi tecno-economici.....	114
7.3 Sviluppi futuri e nuove prospettive di indagine	115
BIBLIOGRAFIA	117

ABSTRACT

La Lavorazione Elettrochimica (ECM - *Electrochemical Machining*) è un processo non convenzionale di asportazione di materiale essenziale per la produzione di componenti complessi in leghe avanzate, privo di stress termici e meccanici. Tuttavia, la sua diffusione industriale su lotti medio-piccoli è storicamente limitata dagli elevati costi e dai lunghi tempi di approvvigionamento (*Lead Time*) degli elettrodi catodici, tipicamente ricavati da blocchi massivi di rame o ottone tramite costose lavorazioni sottrattive (fresatura CNC o elettroerosione).

Il presente lavoro di tesi si propone di superare tali criticità tecnologiche ed economiche indagando e validando il paradigma dell'**Hybrid Tooling** (utensileria ibrida) applicato all'ECM. L'obiettivo della ricerca è la progettazione, fabbricazione e validazione sperimentale di un elettrodo polimerico metallizzato, in grado di eguagliare le performance termofluidodinamiche di un utensile metallico tradizionale.

Dal punto di vista metodologico, l'utensile (caratterizzato da un'impronta di scavo a stella) è stato realizzato sostituendo il nucleo in metallo pieno con un *core* in resina fotopolimerica (*Phrozen Aqua-Gray 4K*), stampato in 3D tramite tecnologia *Digital Light Processing* (DLP). La superficie è stata successivamente funzionalizzata rendendola conduttiva mediante l'applicazione di una lacca grafitica e la successiva elettrodeposizione galvanica massiva di un *coating* in rame spesso 0,25 mm. Sfruttando le regole del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), l'elettrodo è stato ottimizzato integrando direttamente al suo interno un *plenum* e una rete di 5 micro-canali di adduzione conformale, una geometria fluidodinamica ad alta efficienza impossibile da realizzare dal pieno.

La campagna sperimentale, condotta su piastre in lega di alluminio **AlSi10Mg** mediante il centro di lavoro industriale **IMPULSE ECM 50**, ha collaudato l'utensile in regimi di erosione statica, affondamento dinamico profondo e perforazione passante. I rilievi metrologici (analisi confocale 3D e stereoscopica) hanno dimostrato la totale stabilità strutturale del componente ibrido: il lavaggio idraulico interno in pressione (2 bar) ha dissipato il calore generato per Effetto Joule, impedendo il rammollimento della resina sottostante (il cui limite termico HDT è di soli 70 °C) e scongiurando qualsiasi fenomeno di delaminazione del metallo. L'impostazione di parametri ottimali a tensione continua (12 V) e avanzamento controllato (0,2 mm/min), unita a un *offset* geometrico di 5 mm per inibire la corrosione parassita, ha garantito un'eccellente precisione di scavo e la minimizzazione dell'overcut.

Infine, l'analisi tecnico-economica ha certificato come la soluzione ibrida proposta abiliti vere e proprie logiche di *Rapid Tooling*: il passaggio alla manifattura additiva ha permesso di abbattere il *Lead Time* da diversi giorni a meno di 24 ore, contraendo i costi diretti di oltre l'80% e azzerando la generazione di truciolo metallico di scarto. In conclusione, la ricerca valida formalmente l'*Hybrid Tooling* stampato in 3D come una tecnologia affidabile, scalabile e sostenibile, pronta a ridefinire gli standard manifatturieri per le lavorazioni elettrochimiche di precisione.

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1 INTRODUZIONE ALL'ARGOMENTO: IL CONTESTO INDUSTRIALE E L'EVOLUZIONE DELLE LAVORAZIONI MECCANICHE

Nel moderno panorama manifatturiero, l'ingegneria meccanica è costantemente spinta verso limiti operativi sempre più estremi. Settori ad altissimo valore aggiunto, come l'industria aerospaziale, l'automotive, il biomedicale e l'energia, richiedono quotidianamente la progettazione e la produzione di componenti caratterizzati da geometrie tridimensionali estremamente complesse, tolleranze dimensionali stringenti e finiture superficiali di altissimo livello. A questa complessità geometrica si affianca una sfida altrettanto gravosa legata alla scienza dei materiali: la necessità di resistere a carichi termici e meccanici elevati ha portato all'impiego massiccio di materiali "difficili da lavorare" (Hard-to-Cut Materials), quali superleghe a base nichel (es. Inconel), leghe di titanio, acciai inossidabili temprati e carburi metallici.

Di fronte a queste esigenze, le lavorazioni meccaniche convenzionali per asportazione di truciolo (come la fresatura, la tornitura e la foratura) mostrano limiti intrinseci sempre più evidenti. Tali processi si basano sul contatto fisico tra l'utensile e il pezzo e sull'applicazione di forze di taglio meccaniche per vincere la resistenza a scorrimento plastico del materiale. Di conseguenza, la lavorazione di leghe ad alta durezza e tenacità comporta una rapida e severa usura degli utensili, vibrazioni critiche che compromettono la tolleranza del componente e la generazione di elevate temperature nella zona di taglio. Quest'ultimo fattore è particolarmente dannoso, in quanto induce alterazioni microstrutturali (Zone Termicamente Alterate - HAZ) e l'insorgenza di tensioni residue di trazione sulla superficie del pezzo lavorato, riducendone drasticamente la vita a fatica.

Per superare queste barriere tecnologiche, l'industria ha progressivamente integrato le cosiddette Lavorazioni Non Convenzionali (Non-Traditional Machining - NTM). Tra queste, un ruolo di assoluta eccellenza è ricoperto dall'**Electro Chemical Machining (ECM)**, o lavorazione elettrochimica.

L'ECM è un processo di asportazione di materiale che non si basa sull'energia meccanica o termica, bensì sull'energia chimica ed elettrica. Sfruttando il principio della dissoluzione anodica governata dalle leggi di Faraday sull'elettrolisi, il processo permette di "sciogliere" il pezzo a livello atomico. In questa configurazione, il componente da lavorare funge da anodo (polo positivo) e l'utensile funge da catodo (polo negativo). Entrambi sono immersi – o per meglio dire, separati da un sottilissimo meato detto *gap* – in una soluzione elettrolitica (tipicamente soluzioni acquose di nitrato di sodio o cloruro di sodio) pompata ad alta pressione. Facendo fluire una corrente continua ad alta intensità, gli atomi del pezzo si ossidano, passando in soluzione sotto forma di ioni e trasformandosi in precipitati solidi (fanghi) che vengono lavati via dal flusso dell'elettrolita.

I vantaggi dell'ECM sono essenzialmente: tasso di asportazione del materiale (Material Removal Rate - MRR) completamente indipendente dalla durezza del pezzo; non essendoci contatto fisico non si generano forze di taglio, tensioni residue o difetti superficiali; non vi è generazione di scintille o calore, garantendo l'assenza di danni termici. Soprattutto, al catodo (l'utensile) si sviluppa unicamente gas idrogeno: teoricamente, l'utensile in ECM non subisce alcuna usura chimica o meccanica e può produrre un numero indefinito di componenti mantenendo inalterata la propria forma.

1.2 LE MOTIVAZIONI DELLO STUDIO: IL "COLLO DI BOTTIGLIA" DEL TOOLING IN ECM

Nonostante le potenzialità sopra descritte, la diffusione della tecnologia ECM nell'industria manifatturiera di media e piccola scala è fortemente limitata da un aspetto critico: la progettazione e la realizzazione del *Tooling*, ovvero degli elettrodi (utensili).

In un'operazione ECM, l'utensile deve essere un "negativo" geometrico della cavità che si desidera ottenere sul pezzo. Tradizionalmente, questi elettrodi vengono realizzati ricavandoli dal pieno tramite lavorazioni CNC ad alta precisione, utilizzando blocchi massicci di materiali ad alta conducibilità elettrica, tipicamente rame puro, ottone, bronzo o speciali acciai inossidabili. Questa prassi industriale solleva tre ordini di problematiche che costituiscono le principali motivazioni della presente attività di ricerca:

1. **Costi e Lead Time elevati:** La materia prima (come il rame puro) ha un costo specifico molto elevato. A questo si somma il costo delle ore macchina necessarie per fresare e rifinire geometrie tridimensionali complesse. Questo iter rende il *Tooling* tradizionale antieconomico per la fase di prototipazione, per produzioni in serie limitata (Small Batch Production) o per pezzi unici, vanificando il concetto di *Rapid Tooling* e allungando enormemente i tempi di commercializzazione (Time-to-Market).
2. **Limiti geometrici legati all'asportazione di truciolo:** Per progettare un elettrodo tradizionale si è vincolati alle regole del Design for Manufacturing (DfM) sottrattivo. Vi sono geometrie, come sottosquadri pronunciati o micro-dettagli, che le frese non possono fisicamente raggiungere senza interferenze.
3. **La criticità del lavaggio (Flushing):** Questo è il limite ingegneristico più severo. Nell'ECM, la stabilità del processo dipende vitalmente dal flusso dell'elettrolita. Se il fluido ristagna nel *gap*, i fanghi metallici e le bolle di idrogeno si accumulano, alterando la conducibilità locale e innescando cortocircuiti che danneggiano irreversibilmente sia il pezzo che l'utensile. Per evitare ciò, è necessario iniettare l'elettrolita direttamente dalla faccia lavorante dell'utensile. Tuttavia, realizzare fori e reti di canali interni con traiettorie curve e fluidodinamicamente ottimizzate all'interno di un blocco di rame massiccio è pressoché impossibile tramite foratura tradizionale.

Spesso si è costretti a scendere a compromessi progettuali, realizzando fori rettilinei che creano turbolenze e zone d'ombra nel lavaggio.

Alla luce di queste limitazioni, appare evidente la necessità di un cambio di paradigma tecnologico nella produzione degli utensili per lavorazioni elettrochimiche.

1.3 L'INTEGRAZIONE DELL'ADDITIVE MANUFACTURING: OPPORTUNITÀ E LIMITI ATTUALI

Negli ultimi anni, l'Additive Manufacturing (AM), comunemente noto come stampa 3D, ha rivoluzionato il concetto di prototipazione e produzione, permettendo la creazione di componenti strato su strato a partire da modelli CAD virtuali. L'AM abbatte quasi totalmente i vincoli geometrici tradizionali, permettendo la realizzazione di forme cave e canali interni complessi, introducendo il paradigma del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) e la filosofia della "complessità gratuita".

L'idea di utilizzare la stampa 3D per realizzare utensili sacrificali o di prototipazione rapida per lavorazioni non convenzionali ha iniziato ad affacciarsi nella letteratura scientifica. I primi tentativi hanno visto l'utilizzo della tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) in polimeri come l'ABS. Tuttavia, la marcata rugosità superficiale (effetto gradino o *staircase effect*) intrinseca della tecnologia a filamento si trasferisce come un errore di tolleranza sul pezzo lavorato, oltre a disturbare pesantemente il flusso laminare dell'elettrolita in ambito ECM.

Una soluzione molto più promettente è rappresentata dalle tecniche a resina fotopolimerizzabile, in particolare la **Stereolitografia (SLA)** e la **Digital Light Processing (DLP)**. La tecnologia DLP, impiegata nel presente lavoro, utilizza un proiettore luminoso (UV) per reticolare strati di resina liquida con risoluzioni che possono scendere al di sotto dei 50 micrometri. Questo garantisce precisioni centesimali e superfici estremamente lisce, ideali per la fabbricazione di utensili di altissima precisione. Inoltre, la tecnologia DLP eccelle nella creazione di micro-canali di lavaggio interni complessi, risolvendo alla radice il problema del *flushing* sopra esposto.

Nasce tuttavia un paradosso fisico: i polimeri fotopolimerizzati sono eccellenti isolanti elettrici (dielettrici), mentre un elettrodo ECM richiede una conducibilità elettrica massimale per far fluire centinaia o migliaia di Ampere. Per coniugare i vantaggi geometrici dell'AM in resina con le necessità elettriche dell'ECM, la resina deve essere sottoposta a un processo di **metallizzazione**. Tecniche come la placcatura chimica (*Electroless Plating*) e la successiva elettrodeposizione galvanica (*Electroplating*) permettono di rivestire il nucleo polimerico con un guscio sottile, continuo e tenace di metallo conduttivo (solitamente rame o nichel).

Questa tecnica ibrida (Polimero stampato 3D + Rivestimento Rame) è stata recentemente esplorata nel campo dell'Elettroerosione (EDM). Tuttavia, i risultati in letteratura evidenziano un limite insormontabile per l'EDM: le scariche elettriche generano plasmi locali con

temperature di migliaia di gradi Celsius. Questo calore estremo, pur asportato dal fluido elettrolita, fonde il substrato polimerico causando la rapida delaminazione del rivestimento in rame e la distruzione dell'elettrodo dopo brevi cicli di sgrossatura.

Ed è in questo esatto confine tecnologico che si inserisce l'intuizione alla base di questa tesi magistrale. A differenza dell'EDM, **l'ECM è un processo "a freddo"**. La temperatura nel *gap* di lavorazione raramente supera i 60-80°C. Utilizzare elettrodi polimerici metallizzati in ambito ECM significa sfruttare tutti i vantaggi geometrici ed economici dell'Additive Manufacturing, eliminando il problema della degradazione termica per fusione che affligge il settore EDM.

1.4 SCOPO DEL LAVORO DI TESI E OBIETTIVI SPERIMENTALI

L'obiettivo principale di questa attività progettuale e del conseguente elaborato di tesi magistrale è **valutare, dal punto di vista tecnico, ingegneristico e sperimentale, la possibilità e l'efficacia di utilizzare elettrodi realizzati in materiale polimerico mediante tecnica DLP e successivamente metallizzati in rame, come utensili (*Tooling*) diretti nelle lavorazioni ECM.**

La tesi si propone di validare l'ipotesi secondo cui l'uso combinato di stampa 3D ad alta risoluzione e tecniche di *coating* possa consentire una drastica riduzione dei costi e dei tempi di attrezzaggio (Lead Time) per l'ECM, superando contestualmente i limiti fluidodinamici degli utensili tradizionali e i limiti termici riscontrati finora nell'EDM.

Per raggiungere questo scopo generale, il lavoro è stato strutturato in una serie di obiettivi sperimentali e analitici specifici:

1. Progettazione orientata all'AM (Design for Additive Manufacturing):

Studiare e sviluppare geometrie di elettrodi che integrino canali di lavaggio interni conformati per ottimizzare il flusso dell'elettrolita. Contestualmente, affrontare il problema meccanico del bloccaggio dell'utensile (*clamping*): progettare soluzioni di interfaccia (es. design a flangia o codoli ibridi) per far sì che la macchina ECM possa serrare l'elettrodo polimerico cavo senza schiacciarlo radialmente e senza danneggiare il delicato rivestimento conduttivo superficiale.

2. Analisi del processo di metallizzazione e adesione:

Indagare le metodologie di pre-trattamento superficiale (es. irruvidimento chimico o meccanico, *wet etching*) necessarie per trasformare la superficie liscia e inerte della resina DLP in un substrato recettivo per la placcatura chimica (*electroless copper plating*). L'obiettivo è massimizzare l'ancoraggio meccanico del metallo al polimero per scongiurarne il distacco.

3. Validazione Sperimentale in ambiente ECM:

Testare fisicamente i prototipi realizzati su un **centro di lavoro industriale ECM**. Verrà valutato il comportamento dell'elettrodo sotto sforzo, monitorando due parametri critici:

- *Resistenza idrodinamica*: la capacità del rivestimento in rame di non delaminarsi sotto l'azione erosiva (sforzo di taglio o *shear stress*) dell'elettrolita pompato ad alta pressione.
- *Gestione termica (Effetto Joule)*: l'analisi del surriscaldamento del sottile strato di rame attraversato da alte densità di corrente, per verificare che il calore interno non porti la resina DLP al rammollimento (superamento della temperatura di transizione vetrosa, T_g). Nello stesso tempo, verificare che la sottile sezione conduttiva risulti sufficiente per il flusso di corrente richiesto dalla lavorazione.

4. Analisi dei risultati e valutazione tecnico-economica:

Valutare la qualità della lavorazione ottenuta sul pezzo anodo (tolleranze dimensionali e finitura superficiale). Inoltre, comparando l'utensile ibrido con quello massiccio in rame, fornire una stima dei vantaggi in termini di riduzione dei costi di produzione e flessibilità operativa per l'industria meccanica.

Attraverso questo percorso di ricerca, la tesi ambisce a fornire un contributo originale e tangibile nell'ambito del *Rapid Tooling* per le lavorazioni non convenzionali, gettando le basi per l'impiego industriale di utensili ibridi in polimero/metallo capaci di coniugare le performance dell'elettrochimica con l'estrema agilità dell'Additive Manufacturing.

1.5 STRUTTURA DELL'ELABORATO

Il presente documento è articolato secondo una struttura logica progettata per guidare il lettore dalla teoria alla pratica sperimentale. Nel **Capitolo 2** verrà condotta un'approfondita analisi bibliografica (Stato dell'Arte), esplorando le equazioni governanti l'ECM, le tecnologie DLP e le frontiere attuali della metallizzazione dei polimeri. Il **Capitolo 3** dettaglierà i materiali, i setup di stampa 3D, le ricette dei bagni galvanici e l'architettura della macchina ECM impiegata. Il **Capitolo 4** si concentrerà sulla fase di DfAM e ingegnerizzazione dell'elettrodo. Infine, il **Capitolo 5** e il **Capitolo 6** riporteranno rispettivamente la campagna di test sperimentali, l'analisi dei risultati ottenuti, il confronto tecnico-economico e le conclusioni finali del lavoro svolto.

CAPITOLO 2: STATO DELL'ARTE E RICERCA BIBLIOGRAFICA

Introduzione alla Ricerca Bibliografica

Il presente capitolo si prefigge l'obiettivo di delineare un quadro esauriente e rigoroso dello stato dell'arte relativo all'impiego di utensili non convenzionali nelle lavorazioni elettrochimiche. L'analisi della letteratura scientifica è stata condotta interrogando i principali database accademici internazionali (quali Scopus, ScienceDirect e Google Scholar), focalizzando la ricerca sull'intersezione di tre macro-aree tecnologiche: i fondamenti fisici dell'Electro Chemical Machining (ECM), l'evoluzione del *Rapid Tooling* tramite tecnologie di Additive Manufacturing (AM) e le metodologie chimico-fisiche per la metallizzazione di substrati polimerici ad altissima risoluzione. La sintesi critica di questi domini permetterà di identificare con chiarezza il *gap* tecnologico che il presente lavoro di tesi intende colmare.

2.1 LA TECNOLOGIA ECM (ELECTRO CHEMICAL MACHINING)

L'Electro Chemical Machining (ECM) rappresenta una tecnologia di lavorazione non convenzionale) impiegata nell'industria manifatturiera moderna. Sviluppata originariamente per la lavorazione di leghe ad alta resistenza e materiali difficili da tagliare (Hard-to-Cut Materials) in ambito aerospaziale, l'ECM si differenzia radicalmente dalle lavorazioni tradizionali per asportazione di truciolo. Il processo, infatti, non fa uso di energia meccanica o termica diretta per recidere i legami del materiale, ma sfrutta l'energia chimica ed elettrica per dissolvere il componente a livello atomico [1].

2.1.1 Principi fisici e Dissoluzione Anodica

Il principio di base dell'ECM è l'elettrolisi controllata, ovvero l'inverso del processo di elettrodeposizione galvanica. Il sistema è costituito da una cella elettrolitica in cui il pezzo in lavorazione funge da anodo (collegato al terminale positivo di un generatore di corrente continua) e l'utensile funge da catodo (collegato al terminale negativo). I due elettrodi sono fisicamente separati da uno spazio microscopico denominato *machining gap* (o meato di lavorazione), all'interno del quale fluisce ad alta velocità una soluzione elettrolitica acquosa ad alta conducibilità.

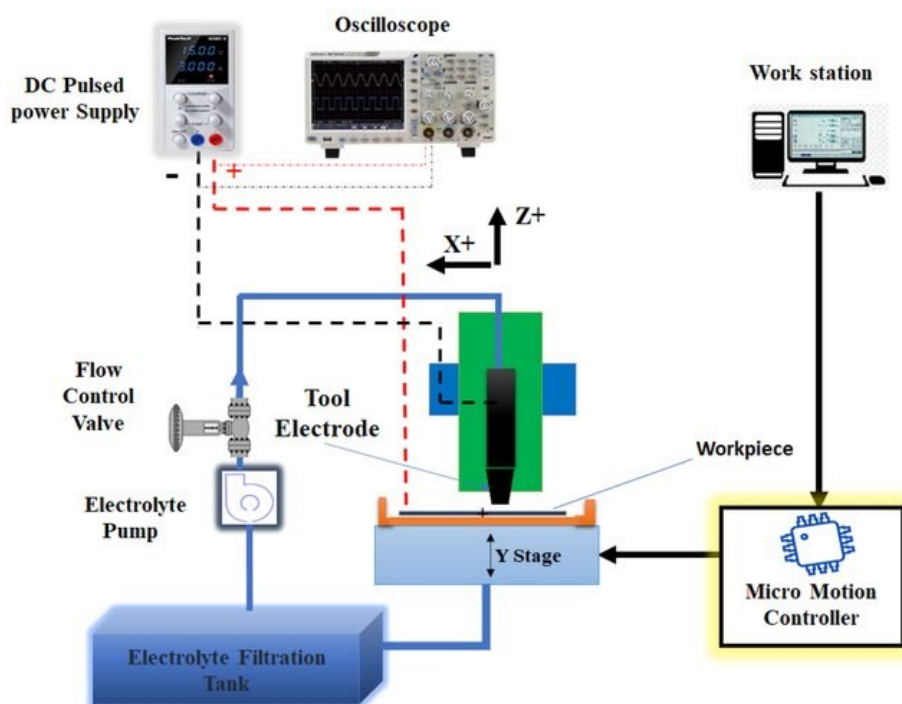


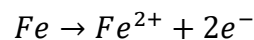
Figura 2.1-1: Rappresentazione schema a blocchi di un impianto di lavorazione elettrochimica (ECM). Mostra l'alimentazione in corrente continua o pulsata, l'oscilloscopio, il sistema di pompaggio e filtrazione dell'elettrolita, l'elettrodo utensile e il pezzo in lavorazione montato su stage motorizzato, con controllo dei micromovimenti e monitoraggio da workstation.

Applicando una differenza di potenziale (solitamente compresa tra 5 V e 25 V) si instaura un campo elettrico che induce il passaggio di una corrente di elevata intensità (da centinaia a svariate migliaia di Ampere) attraverso l'elettrolita. La reazione che permette l'asportazione di materiale prende il nome di **dissoluzione anodica**.

Considerando come esempio la lavorazione di un pezzo in ferro (Fe) immerso in una tipica soluzione acquosa di cloruro di sodio (NaCl), i processi chimici primari che avvengono agli elettrodi sono i seguenti:

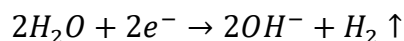
Reazione all'Anodo (Pezzo in lavorazione):

Il campo elettrico costringe gli atomi di ferro (o in generale gli atomi metallici del componente) sulla superficie del pezzo a cedere elettroni al circuito esterno, trasformandosi in ioni positivi che passano in soluzione:



Reazione al Catodo (Utensile):

Gli elettroni che viaggiano attraverso il circuito raggiungono l'utensile. Sulla superficie del catodo, questi elettroni reagiscono con le molecole d'acqua della soluzione elettrolitica, causando la riduzione dell'acqua con conseguente sviluppo di idrossido e gas idrogeno:



Reazione nel Bulk dell'elettrolita:

Lontano dalle superfici degli elettrodi, gli ioni metallici Fe^{2+} si combinano con gli ioni ossidrilici OH^{-} per formare idrossido di ferro, un precipitato solido comunemente definito *sludge* o fango di lavorazione:

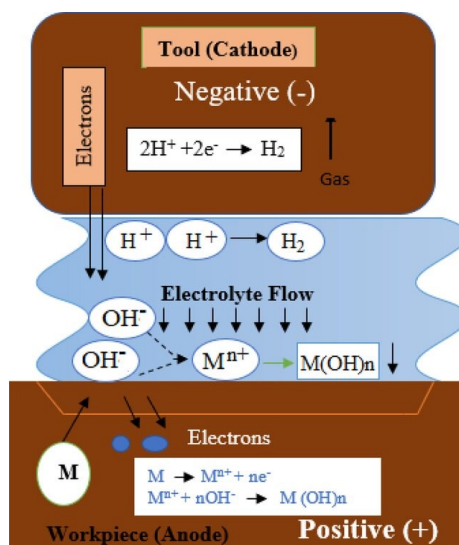
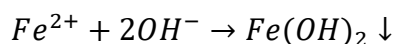


Figura 2.1-2: Dettaglio dello sviluppo di bolle di idrogeno sul catodo (utensile) durante il processo ECM. All'anodo (pezzo) avviene la dissoluzione del metallo con formazione di ioni M^{n+} , mentre al catodo (utensile) si sviluppa idrogeno. Essendo l'idrogeno un gas dielettrico, il suo accumulo crea una

barriera isolante che ostacola il passaggio della corrente, rendendo indispensabile il flusso di elettrolita che rimuove i prodotti di reazione e mantiene attivo il processo.

È di fondamentale importanza notare, ai fini del presente lavoro di tesi, che il **catodo (l'elettrodo utensile) non subisce alcuna reazione di ossidazione o dissoluzione**. Sulla sua superficie si genera esclusivamente gas idrogeno. Questa caratteristica intrinseca garantisce che l'utensile non sia soggetto a usura chimica o meccanica durante il processo ECM, rendendolo teoricamente capace di lavorare un numero elevato di componenti senza subire alterazioni dimensionali.

2.1.2 Le Leggi di Faraday e la Cinematica di Asportazione

Il volume di materiale asportato nell'unità di tempo, noto come *Material Removal Rate* (MRR), è rigorosamente governato dalle leggi dell'elettrolisi formulate da Michael Faraday nel 1833. A differenza della fresatura, in cui l'MRR massimo dipende principalmente dalla durezza del materiale e dalla potenza e coppia del mandrino, nell'ECM esso è dipendente esclusivamente dalla carica elettrica e dal peso atomico del materiale anodico.

La Prima Legge di Faraday stabilisce che la massa di materiale dissolto all'anodo (m) è direttamente proporzionale alla quantità di carica elettrica (Q) che attraversa la cella:

$$m \propto Q \Rightarrow m \propto I \cdot t$$

dove I è l'intensità di corrente in Ampere e t è il tempo in secondi.

La Seconda Legge di Faraday introduce la dipendenza dalla natura chimica del materiale, affermando che la massa dissolta è proporzionale al peso equivalente del materiale stesso. Unificando le due leggi si ottiene l'equazione fondamentale dell'ECM:

$$m = \frac{A}{z \cdot F} \cdot I \cdot t$$

Dove:

- A è il peso atomico del materiale anodico (g/mol).
- z è la valenza del metallo (numero di elettroni scambiati nella reazione di dissoluzione).
- F è la Costante di Faraday, pari a 96485 C/mol , che rappresenta la carica di una mole di elettroni.
- Il termine $\frac{A}{z \cdot F}$ prende il nome di **Equivalente Elettrochimico (ECE)**.

Per scopi ingegneristici, è più utile esprimere l'asportazione in termini volumetrici (V_{MRR}) e di velocità di penetrazione. Dividendo la massa per la densità del materiale anodico (ρ_a) e per il tempo, si ottiene il tasso di asportazione volumetrica:

$$MRR = \frac{ECE \cdot I}{\rho_a} \left[\frac{mm^3}{s} \right]$$

La velocità teorica di recessione della superficie anodica v_a , ovvero la velocità a cui il pezzo si "scioglie", è funzione della densità di corrente $J(A/cm^2)$, definita come $J = \frac{I}{S}$, dove S è l'area frontale dell'elettrodo:

$$v_a = \frac{ECE \cdot J}{\rho_a}$$

2.1.3 Modellazione Elettrica e Dinamica del Gap (Equilibrium Gap)

Nella pratica industriale, l'utensile viene fatto avanzare verso il pezzo con una velocità di *feed* costante (v_f). Affinché il processo sia stabile, la velocità di avanzamento dell'utensile deve eguagliare la velocità di dissoluzione del pezzo ($v_f = v_a$).

Per comprendere come si stabilizza la distanza tra elettrodo e superficie lavorata, è necessario modellare il *gap* come una resistenza elettrica pura attraversata dall'elettrolita, la cui conduttività è indicata con κ ($\Omega^{-1}cm^{-1}$). Secondo la legge di Ohm applicata all'elettrolita:

$$I = \frac{V_{gap}}{R} = \frac{V_{gap}}{\frac{h}{\kappa \cdot S}} = \frac{\kappa \cdot S \cdot V_{gap}}{h}$$

Dove h è la dimensione fisica del meato (gap size), S rappresenta la Superficie (o Area attiva) dell'elettrodo rivolta verso il pezzo in lavorazione, e V_{gap} è la tensione effettiva disponibile per guidare la corrente. La tensione V_{gap} non coincide con la tensione V erogata dal generatore, a causa delle cadute di potenziale agli elettrodi (sovratensione di attivazione anodica e catodica ΔV):

$$V_{gap} = V - \Delta V$$

Sostituendo l'espressione della corrente nella formula della velocità di dissoluzione, si ricava la dimensione del gap in condizioni dinamiche:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{ECE \cdot \kappa \cdot (V - \Delta V)}{\rho_a \cdot h} - v_f$$

In condizioni di regime stazionario ($\frac{dh}{dt} = 0$), il meato raggiunge una dimensione di equilibrio costante (h_e), definita **Equilibrium Gap**:

$$h_e = \frac{ECE \cdot \kappa \cdot (V - \Delta V)}{\rho_a \cdot v_f}$$

Questa equazione è di capitale importanza per la tolleranza dimensionale: dimostra che il *gap* si auto-regola in base alla tensione applicata, alla conduttività dell'elettrolita e alla velocità di avanzamento. Se si verifica una perturbazione locale (es. un picco di materiale), il gap si riduce localmente ($h < h_e$), la resistenza elettrica diminuisce, la densità di corrente J aumenta e il materiale viene asportato più velocemente fino a ristabilire l'equilibrio.

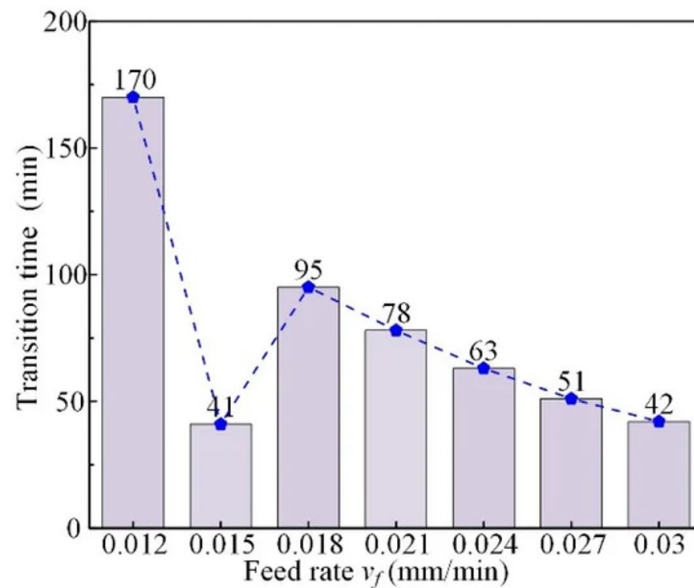


Figura 2.1-3: Rappresentazione grafica dell'andamento temporale del meato inter-elettrodico (gap) nell'Electrochemical Machining. Il grafico cartesiano (Tempo vs. Feed rate) illustra come, impostando una velocità di avanzamento costante dell'utensile, il sistema converga sempre in modo asintotico verso una distanza di equilibrio fissa (h_e). Sia che si parta da un gap iniziale troppo ampio (curva discendente) o troppo ristretto (curva ascendente), la distanza si stabilizza nel tempo in modo automatico.

2.1.4 Fluidodinamica del Gap e Importanza del Lavaggio (Flushing)

L'elettrochimica da sola non è sufficiente per garantire l'esito della lavorazione. Il mantenimento delle reazioni richiede che l'elettrolita venga costantemente rinnovato all'interno dello stretto meato (h_e tipicamente $\approx 0.1 - 0.3 \text{ mm}$).

Il flusso fluidodinamico, che è governato dalle equazioni di Navier-Stokes, deve vincere enormi perdite di carico per scorrere a velocità che superano i 30 m/s . Le funzioni del fluido sono quattro e tutte ugualmente critiche:

1. **Conduzione della corrente elettrica:** È la funzione primaria del fluido. L'elettrolita chiude fisicamente il circuito tra anodo e catodo, consentendo il passaggio delle elevate densità di corrente necessarie alla dissoluzione atomica.
2. **Smaltimento degli ioni metallici:** L'accumulo di ioni Fe^{2+} o precipitati solidi $Fe(OH)_2$ aumenta la viscosità locale e altera la conducibilità chimica κ , generando errori di forma sul pezzo lavorato (Stray Corrosion).
3. **Evacuazione del gas idrogeno:** Le bolle di idrogeno si formano al catodo. Poiché il gas è un isolante elettrico perfetto, una frazione volumetrica di gas troppo elevata (effetto *void fraction*) riduce drasticamente la conducibilità dell'elettrolita. Se il gas ristagna, si verificano scintille (sparking) che danneggiano irreversibilmente pezzo e utensile.
4. **Dissipazione termica:** L'elettrolita funge da refrigerante per asportare il calore generato per effetto Joule.

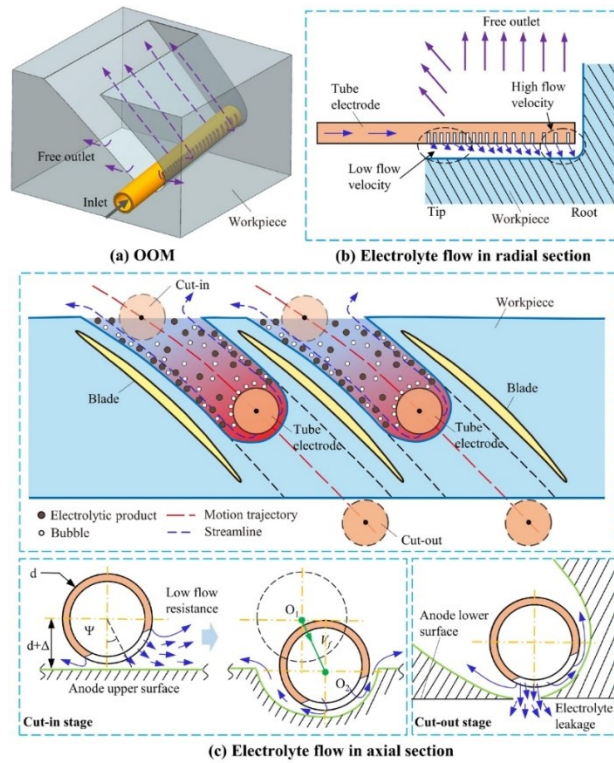


Figura 2.1-4: Rappresentazione schematica delle principali configurazioni di iniezione dell'elettrolita nel meato di lavorazione ECM. L'immagine mette a confronto il flusso laterale (cross-flow) e il flusso assiale (forward flow).

La progettazione dei canali di adduzione dell'elettrolita (flushing design) rappresenta dunque la sfida cardine nell'ingegnerizzazione di un elettrodo ECM. Nelle lavorazioni tradizionali con elettrodi metallici, i canali sono ricavati per foratura profonda e risultano spesso rettilinei. Questa limitazione geometrica induce la formazione di zone di stagnazione o vortici (eddies) sulla faccia lavorante, sfociando in profili asportati difettosi. Da qui emerge la validità ingegneristica dell'Additive Manufacturing e delle resine DLP proposte in questa tesi, che permettono la creazione di canali conformali ottimizzati fluidodinamicamente per garantire un flusso laminare e omogeneo in ogni punto della geometria utensile [2].

2.1.5 Aspetti Termici, Resistenza dell'Elettrolita ed Effetto Joule

Sebbene l'ECM sia universalmente classificato come un processo "a freddo" per il pezzo in lavorazione (l'anodo), in quanto non vi è attrito meccanico né generazione di plasma ad alta temperatura (come avviene nell'EDM), la gestione termica all'interno del gap rappresenta il parametro limitante più severo per l'impiego di elettrodi polimerici.

Il passaggio di correnti estremamente elevate attraverso la soluzione salina genera calore per dissipazione resistiva (**Effetto Joule**). La potenza termica generata (P_g) nel volume dell'elettrolita è data da:

$$P_g = R_{gap} \cdot I^2 = \frac{h}{\kappa \cdot S} \cdot I^2$$

Questo calore deve essere interamente smaltito per convezione forzata dal flusso dell'elettrolita stesso. Assumendo un processo adiabatico ideale (in cui né il pezzo né l'utensile conducono calore, un'approssimazione accettabile nel caso di un utensile polimerico isolante), l'aumento di temperatura (ΔT) del fluido lungo la direzione di flusso è calcolabile tramite il bilancio energetico:

$$P_g = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Sostituendo la portata massica ($\dot{m} = \rho_e \cdot v \cdot S_{flow}$ dove ρ_e è la densità dell'elettrolita, c_p il suo calore specifico, e v la velocità del fluido), si ottiene il gradiente di temperatura nel gap:

$$\Delta T = \frac{I^2 \cdot h}{\kappa \cdot S_{flow}^2 \cdot v \cdot \rho_e \cdot c_p}$$

Questa equazione riveste un ruolo cruciale nella progettazione termo-meccanica dell'elettrodo ibrido studiato in questa tesi. L'innalzamento della temperatura dell'elettrolita (che può passare dai $20^\circ C$ iniziali fino a prossimità dei $70^\circ C - 80^\circ C$ in zone di scarso lavaggio) si somma al riscaldamento causato dalla resistenza intrinseca del sottile strato di rame placcato sulla superficie dell'utensile in resina DLP.

Se la temperatura locale all'interfaccia tra il *coating* di rame e il nucleo in resina supera la Temperatura di Transizione Vetrosa (T_g) del fotopolimero impiegato (solitamente situata tra i $65^\circ C$ e i $90^\circ C$ a seconda della formulazione), il materiale polimerico subirà un drastico decadimento del modulo elastico, rammollendosi sotto la pressione di lavaggio (2 MPa) e portando al collasso strutturale dell'utensile e alla delaminazione del rivestimento conduttivo.

Pertanto, il successo dell'impiego di elettrodi polimerici in ECM è strettamente subordinato all'equazione termica appena descritta: la velocità del fluido v deve essere mantenuta sufficientemente alta tramite un design for additive (DfAM) ottimale per garantire che il ΔT generato dall'effetto Joule rimanga nei limiti di operabilità del polimero.

2.2 L'ADDITIVE MANUFACTURING NEL TOOLING

L'integrazione delle tecnologie di Fabbricazione Additiva (Additive Manufacturing - AM) all'interno dei cicli produttivi tradizionali ha generato un profondo mutamento di paradigma nell'ingegneria manifatturiera. Se inizialmente la "stampa 3D" era relegata alla mera Prototipazione Rapida (Rapid Prototyping) per valutazioni estetiche o di ingombro, l'evoluzione dei materiali e la precisione dei macchinari hanno permesso di elevare questa tecnologia ad applicazioni funzionali e strutturali. In questo contesto, una delle branche di maggior interesse industriale e accademico è rappresentata dal **Rapid Tooling (RT)**, ovvero l'impiego dell'AM per la fabbricazione rapida di utensili, stampi, maschere di foratura ed elettrodi [3].

2.2.1 Il Paradigma del Rapid Tooling (RT) Diretto e Indiretto

La letteratura scientifica classifica il Rapid Tooling in due macro-categorie:

1. **RT Indiretto:** L'AM viene utilizzato per creare un modello *master* (positivo), il quale viene successivamente impiegato per fabbricare lo stampo o l'utensile finale tramite processi secondari (es. colata sotto vuoto in silicone o formatura in sabbia).
2. **RT Diretto:** Il componente generato dalla macchina di Additive Manufacturing costituisce, da solo o a seguito di lievi post-trattamenti, l'utensile finale impiegato nel processo produttivo primario.

Il presente lavoro di tesi si colloca nel dominio del **Rapid Tooling Diretto**. Nel caso specifico delle lavorazioni elettrochimiche (ECM) e per elettroerosione (EDM), l'obiettivo del RT Diretto è la sostituzione del tradizionale elettrodo in rame massiccio (fresato dal pieno) con un elettrodo polimerico stampato in 3D e successivamente reso conduttivo tramite metallizzazione superficiale. Questa strategia mira ad abbattere drasticamente i *Lead Time* e i costi legati all'approvvigionamento e alla lavorazione CNC di leghe di rame costose, abilitando al contempo la fabbricazione di geometrie *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) impossibili da ottenere per via sottrattiva.

2.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM) come primo approccio: Potenzialità e Limiti

I primi tentativi documentati in letteratura volti alla realizzazione di elettrodi polimerici hanno sfruttato la tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM), nota anche come *Fused Filament Fabrication* (FFF). In questo processo, un polimero termoplastico in forma di filamento (tipicamente Acrilnitrile Butadiene Stirene - ABS, o Acido Polilattico - PLA) viene estruso attraverso un ugello riscaldato e depositato strato su strato (layer-by-layer) lungo percorsi generati dal software di *slicing*.

L'approccio FDM al tooling per lavorazioni non convenzionali è stato indagato da diversi autori. Studi come quelli di Padhi et al. [4] e Singh et al. [1] hanno dimostrato la fattibilità di stampare elettrodi in ABS e rivestirli con uno strato di rame via elettrodeposizione galvanica

per impiegarli nell'EDM. Anche in ambito ECM, Kim et al. [2] hanno recentemente testato elettrodi FDM metallizzati, dimostrando che il processo di dissoluzione anodica può essere sostenuto da un guscio conduttivo spesso pochi decimi di millimetro.

Tuttavia, l'analisi critica di questi studi fa emergere **quattro limitazioni intrinseche e invalidanti** della tecnologia FDM per la produzione di elettrodi di precisione:

1. **Lo Staircase Effect (Effetto Gradino):** Data la geometria cilindrica del filamento estruso (tipicamente con diametro dell'ugello di 0.4 mm e spessore del layer di $0.1 - 0.2\text{ mm}$), le superfici curve o inclinate del pezzo stampato presentano una marcata discretizzazione a gradini. Questo difetto macroscopico si ripercuote sulla rugosità superficiale (R_a). Nell'ECM, il *machining gap* "copia" fedelmente la forma dell'elettrodo: un utensile con elevata R_a genererà un componente lavorato affetto dai medesimi difetti geometrici.
2. **Porosità e difetti di tenuta (Watertightness):** La deposizione di cordoni di materiale plastico lascia inevitabilmente dei micro-vuoti (voids) tra un filamento e l'altro. Un elettrodo FDM non è quasi mai a tenuta stagna. Quando l'elettrolita viene pompato nei canali interni a pressioni di 2-3 MPa, il fluido può infiltrarsi nelle porosità, causando perdite di pressione (cali di efficienza nel lavaggio) o l'infiltrazione al di sotto del rivestimento metallico, promuovendone la delaminazione precoce.
3. **Anisotropia Meccanica:** I legami tra i layer lungo l'asse di accrescimento Z sono puramente termici (fusione parziale) e non raggiungono mai la resistenza meccanica intra-layer (asse $X - Y$). Questo rende i codoli degli elettrodi intrinsecamente fragili se sottoposti a sforzi flessionali durante il bloccaggio nel mandrino.
4. **Limiti di risoluzione nei canali interni:** La FDM richiede strutture di supporto (support structures) per sostenere tetti o canali orizzontali in fase di stampa. Rimuovere meccanicamente i supporti dall'interno di un micro-canale curvo di lavaggio fluidodinamico è un'operazione fisicamente impossibile, vanificando i vantaggi del DfAM.

2.2.3 Le Tecnologie a Resina (Vat Photopolymerization)

Per superare i limiti risolutivi e strutturali dell'estrusione termoplastica, il *Rapid Tooling* di alta gamma si orienta inequivocabilmente verso i processi di polimerizzazione in vasca (Vat Photopolymerization). Queste tecnologie non si basano sulla fusione di un materiale, ma su una complessa reazione chimica indotta dalla luce.

Il materiale di partenza è un fotopolimero allo stato liquido, composto da una miscela di monomeri, oligomeri e, componente fondamentale, i **fotoiniziatori**. Quando questa resina viene esposta a radiazioni elettromagnetiche con una specifica lunghezza d'onda (tipicamente nell'ultravioletto, spettro UV attorno a $385 - 405 \text{ nm}$), le molecole dei fotoiniziatori si scindono generando radicali liberi. Questi ultimi innescano una reazione a catena (fotopolimerizzazione radicalica) che lega i monomeri creando un reticolo polimerico tridimensionale termoindurente (cross-linking), trasformando la resina liquida in un solido rigido.

All'interno di questa famiglia tecnologica, due sono i processi dominanti: la **Stereolitografia (SLA)** e la **Digital Light Processing (DLP)**.

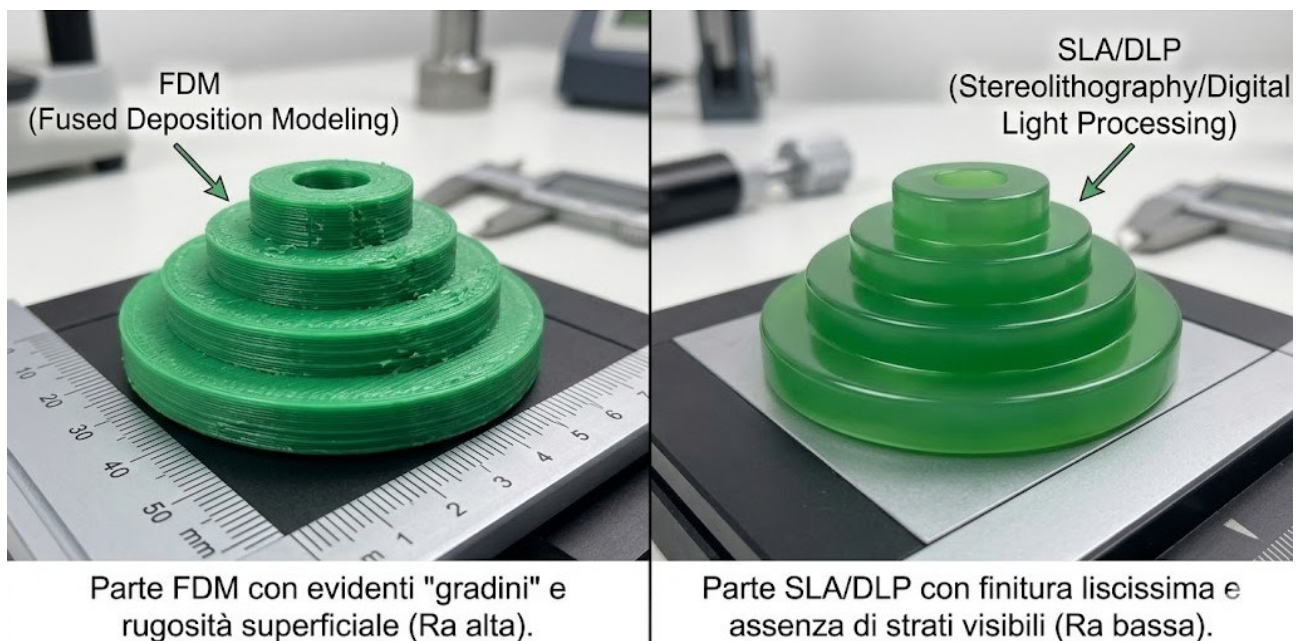


Figura 2.2-1: Confronto di finitura Superficiale, FDM vs. SLA-DLP.

Immagine affiancata che mostra un pezzo in FDM con i classici "gradini" e a lato lo stesso pezzo liscissimo fatto in SLA/DLP. La rugosità si propaga "a specchio" in ECM perché il gap mantiene una distanza costante h_e .

2.2.4 Stereolitografia (SLA) vs. Digital Light Processing (DLP)

Pur condividendo la medesima base chimica, SLA e DLP differiscono radicalmente nel metodo di proiezione dell'energia luminosa, influenzando i tempi di produzione e la precisione locale [5].

Nella **SLA (Stereolithography)**, un singolo raggio laser UV viene focalizzato e movimentato da un sistema di specchi galvanometrici ad altissima velocità. Il laser "disegna" il profilo della sezione (slice) sulla superficie della resina, polimerizzando il materiale punto per punto. L'area di polimerizzazione è definita dallo *spot size* del laser (tipicamente $\approx 140 \mu m$).

Già nel 2008, pionieri come Çoğun et al. [6] utilizzarono la SLA per dimostrare i vantaggi delle resine ad alta risoluzione nella fabbricazione di elettrodi con canali di raffreddamento interni per l'EDM, evidenziando il salto qualitativo rispetto ai termoplastici.

La tecnologia **DLP (Digital Light Processing)**, che costituisce il cuore sperimentale della presente tesi, rappresenta un'evoluzione orientata alla velocità e alla micro-precisione. Al posto del laser, la DLP utilizza uno schermo proiettore UV equipaggiato con un **Digital Micromirror Device (DMD)**. Il DMD è un chip a semiconduttore composto da milioni di specchi microscopici indipendenti. Questo dispositivo permette di proiettare istantaneamente l'intera immagine 2D dello strato da polimerizzare (mask projection) contro il fondo della vasca in resina.

I vantaggi ingegneristici della DLP rispetto alla SLA e alla FDM sono sostanziali e determinanti per l'applicazione ECM:

- **Velocità di Build costante:** Poiché l'intero strato viene esposto simultaneamente, il tempo di stampa dipende esclusivamente dall'altezza totale del pezzo lungo l'asse Z e non dalla complessità o dall'area della sezione trasversale ($X - Y$). Questo massimizza la produttività del *Rapid Tooling*.
- **Risoluzione definita dal Voxel:** La precisione planare ($X - Y$) nella DLP non è data da uno spot laser circolare, ma dalla dimensione fisica del singolo pixel proiettato, che crea un parallelepipedo volumetrico (Voxel). Nelle macchine DLP moderne, la risoluzione $X - Y$ può scendere a $35 - 40 \mu m$, con spessori del layer (Z) impostabili fino a $10 \mu m$.

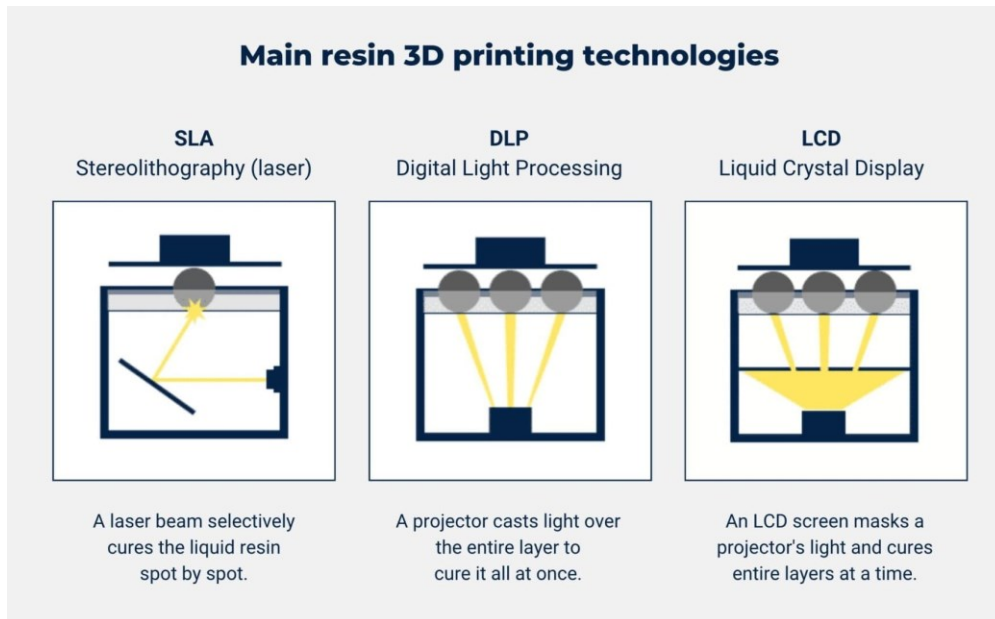


Figura 2.2-2: SLA vs DLP schematic mechanism.



Figura 2.2-3: SLA vs DLP

2.2.5 I Vantaggi cruciali della resina DLP per gli Elettrodi ECM

La transizione verso la resina DLP per la fabbricazione del nucleo dell'elettrodo non è una semplice miglioria estetica, ma una necessità funzionale e ingegneristica per la buona riuscita dell'elettrodeposizione e del successivo processo ECM.

A. Eccellenza nella Finitura Superficiale (Basso R_a) e quasi Assenza di Staircase Effect

Grazie alla risoluzione micrometrica e alla fluidità della resina non ancora polimerizzata che attenua i bordi dei layer, i componenti DLP presentano superfici estremamente lisce, spesso paragonabili a pezzi stampati a iniezione. Questa caratteristica risolve alla radice il trasferimento di difetti geometrici sul pezzo in lavorazione ECM. Inoltre, una superficie omogenea è un pre-requisito vitale per i successivi bagni di metallizzazione chimica (*Electroless Plating*): un film di rame cresciuto su una superficie DLP risulta uniforme e privo delle discontinuità elettriche che affliggono i componenti in FDM [7].

B. Isotropia Strutturale e Tenuta Stagna (Watertight)

A differenza dei termoplastici in cui l'adesione tra i layer è fisica (fusione), nelle resine DLP avviene una reazione chimica. Quando uno strato viene polimerizzato, rimangono sulla sua superficie superiore dei gruppi radicalici non completamente reagiti. Quando lo strato successivo viene proiettato, esso crea legami covalenti incrociati (cross-linking chimico) direttamente con lo strato sottostante. Ne consegue che il pezzo finale è quasi perfettamente **isotropo** dal punto di vista meccanico. Questo garantisce che l'elettrodo possa sopportare le forze di serraggio del mandrino senza sfaldarsi (delaminazione inter-layer) e, soprattutto, risulti intrinsecamente a tenuta stagna. L'elettrolita pompato a svariati MegaPascal (MPa) nei canali interni non può permeare la struttura massiccia del fotopolimero.

C. Maggiore libertà di progettazione per la Micro-Fluidodinamica

Nelle tecnologie di stampa DLP, la progettazione dei canali interni richiede un'attenta valutazione delle geometrie per evitare l'impiego di supporti strutturali interni, la cui successiva rimozione manuale risulterebbe impossibile. Attraverso i principi del DfAM, è possibile realizzare condotti auto-portanti, con angoli di inclinazione superiori a quelli critici rispetto al piano di stampa. Terminato il processo, la resina liquida intrappolata nei canali viene evacuata agevolmente mediante aria compressa e lavaggio con alcol isopropilico (IPA), rivelando condotti interni puliti. Questa libertà geometrica consente di integrare all'interno dell'utensile reticoli fluidodinamici complessi: canali di *flushing* coassiali, distributori di flusso a "soffione", pareti a spessore variabile e geometrie topologicamente ottimizzate. Come evidenziato dall'equazione dell'Effetto Joule discussa nel Paragrafo 2.1, il controllo del flusso dell'elettrolita è l'unica variabile a disposizione dell'ingegnere per evitare il superamento della temperatura di transizione vetrosa (T_g) e prevenire il collasso termico del film metallico depositato. La tecnologia DLP si configura pertanto come una soluzione tecnologica di interesse nella fabbricazione di elettrodi ECM avanzati.



Figura 2.2-4: Sezione di un componente per tooling (stampo o elettrodo) dotato di canali di raffreddamento/lavaggio conformati (conformal cooling channels). Realizzabili esclusivamente tramite tecnologie di Additive Manufacturing (AM), questi circuiti interni complessi e curvilinei seguono parallelamente la morfologia esterna del pezzo, garantendo una distribuzione fluidodinamica e termica ottimale e uniforme.

2.3 TECNICHE DI METALLIZZAZIONE DEI POLIMERI

L'impiego di polimeri ottenuti tramite Additive Manufacturing come elettrodi per lavorazioni elettrochimiche (ECM) pone un limite fisico invalicabile: le resine fotopolimeriche (SLA/DLP) e i materiali termoplastici (FDM) sono eccellenti dielettrici, caratterizzati da una resistività elettrica tipicamente superiore a $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$. Affinché l'utensile possa fungere da catodo e trasportare le elevate densità di corrente richieste dal processo di dissoluzione anodica (spesso superiori a 50 A/cm^2), l'intero componente deve essere rivestito con un layer metallico continuo, omogeneo e fortemente ancorato al substrato.

La letteratura scientifica e l'industria dei circuiti stampati (PCB - *Printed Circuit Boards*) offrono diverse tecnologie per la metallizzazione dei polimeri. Nel contesto del *Rapid Tooling* per ECM, le metodologie si dividono in tre grandi famiglie: la placcatura chimica autocatalitica (*Electroless Plating*), l'elettrodeposizione galvanica (*Electroplating*) e i processi di deposizione fisica da vapore (*Physical Vapor Deposition* - PVD).

2.3.1 La sfida dell'adesione: Teoria e Pre-trattamento (Surface Conditioning)

Il problema ingegneristico primario nella metallizzazione delle resine da stampa 3D risiede nell'adesione all'interfaccia polimero-metallo. A causa della bassa energia superficiale e dell'inerzia chimica tipica delle resine DLP polimerizzate, il metallo depositato tende a delaminarsi (sfogliarsi) se sottoposto a sforzi di taglio indotti dal flusso dell'elettrolita ad alta pressione, o a stress termici derivanti dall'Effetto Joule (disallineamento dei coefficienti di dilatazione termica lineare, CTE).

Per garantire un legame tenace, l'adesione deve passare da una debole interazione di Van der Waals a un robusto ancoraggio meccanico e, ove possibile, chimico. Questo si ottiene attraverso una rigorosa sequenza di pre-trattamento [8].

La sequenza standard per le resine fotopolimeriche prevede tre fasi critiche:

1. **Swelling (Rigonfiamento):** Il polimero viene immerso in una soluzione a base di solventi organici. Questo processo allenta temporaneamente le catene polimeriche superficiali, facilitando la penetrazione dei reattivi nella fase successiva.
2. **Etching (Incisione Chimica o Mordenzatura):** È la fase più importante. Il componente subisce un attacco chimico controllato tramite agenti fortemente ossidanti, come miscele di acido cromico (H_2CrO_4) o, più modernamente (per ragioni di tossicità), soluzioni alcaline di permanganato di potassio (KMnO_4). L'ossidante degrada selettivamente alcune porzioni della matrice polimerica o delle cariche interne, creando una fitta rete di micro-caverne e porosità superficiali sub-micrometriche. La rugosità superficiale (R_a) aumenta controllatamente, fornendo i "siti di ancoraggio" in cui il rame potrà incastrarsi meccanicamente.
3. **Neutralizzazione e Desmear:** I residui dell'ossidazione (es. biossido di manganese) vengono rimossi chimicamente per lasciare una superficie pulita e microscopicamente spugnosa.

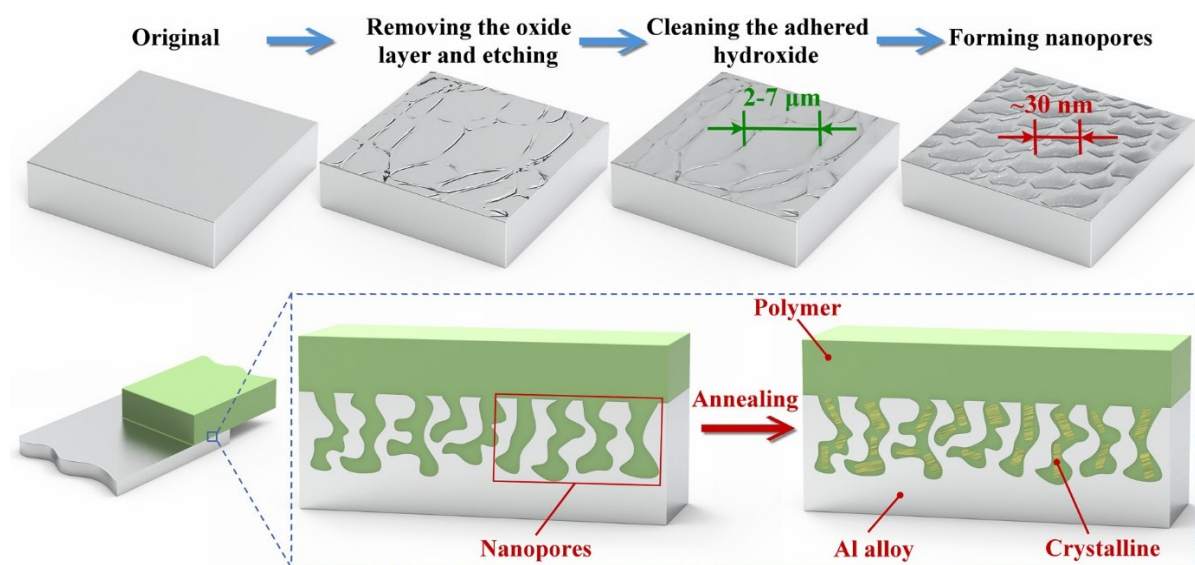


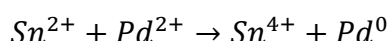
Figura 2.3-1: Interlocking meccanico su ampia area tramite nanopori: legame diretto ad altissima resistenza di materiali polimerici e metallici.

2.3.2 Sensibilizzazione e Attivazione (Catalisi)

Poiché il polimero non è conduttivo, non è possibile avviare direttamente una deposizione galvanica (che richiede il passaggio di elettroni). È necessario ricorrere prima a una reazione chimica (*Electroless*), la quale tuttavia necessita di un catalizzatore per innescarsi.

La resina incisa (etched) viene sottoposta a:

- **Sensibilizzazione:** Immersione in una soluzione acida di cloruro stannoso (SnCl_2). Gli ioni Sn^{2+} vengono adsorbiti all'interno delle micro-cavità del polimero.
- **Attivazione:** Immersione in una soluzione di cloruro di palladio (PdCl_2). Avviene una reazione di ossidoriduzione in cui lo stagno cede elettroni al palladio:



Il Palladio metallico (Pd^0) precipita sotto forma di nano-particelle, ancorandosi tenacemente alle pareti delle porosità. Queste particelle fungeranno da centri catalitici attivi per la successiva placcatura del rame [8].

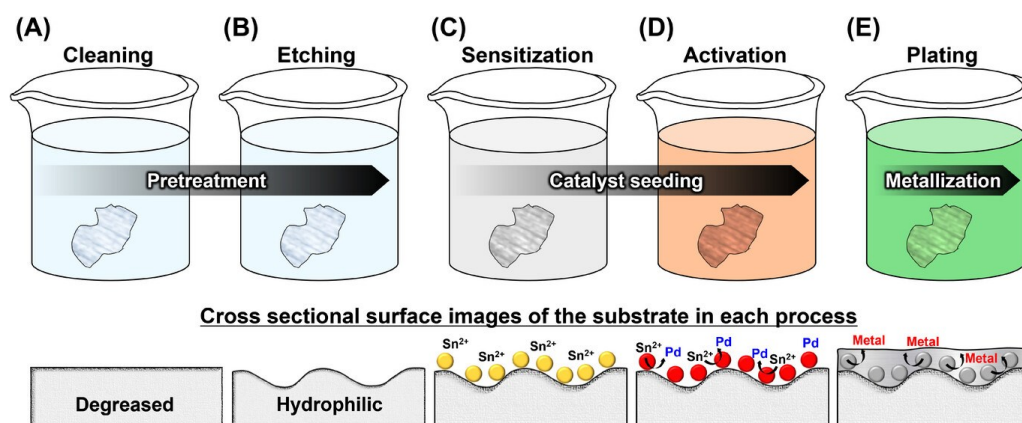


Figura 2.3-2: Schema rappresentativo del processo di catalisi in due fasi (Two-step method).

L'adsorbimento degli ioni stannosi è seguito dalla riduzione degli ioni palladio, i quali formano i nuclei attivi per la successiva placcatura.

2.3.3 Placcatura Chimica Autocatalitica (Electroless Copper Plating)

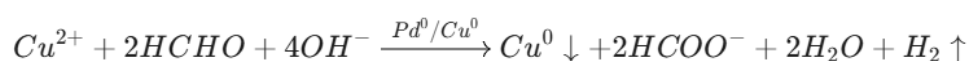
L'*Electroless Plating* è un processo di deposizione metallica che avviene puramente per via chimica, senza l'ausilio di un generatore di corrente esterno. È l'unica via praticabile per rendere inizialmente conduttivo un substrato isolante complesso [8].

Il componente attivato viene immerso in un bagno termostato (solitamente tra 30°C e 50°C per il rame) contenente:

- Una fonte di ioni metallici (es. Solfato di Rame, $CuSO_4$).
- Un agente riducente (tipicamente Formaldeide, $HCHO$).
- Agenti complessanti (come l'EDTA o tartrati) per mantenere il rame in soluzione nell'ambiente fortemente alcalino.
- Agenti stabilizzanti e regolatori di pH (Idrossido di Sodio, $NaOH$).

Quando il bagno entra in contatto con le nanoparticelle di palladio presenti sulla resina, la formaldeide subisce un'ossidazione catalitica, rilasciando elettroni che vengono immediatamente catturati dagli ioni rame (Cu^{2+}), i quali si riducono a rame metallico solido (Cu^0).

La stechiometria generale della reazione catodica e anodica (che avvengono simultaneamente sulla stessa superficie) può essere riassunta nell'equazione globale:



La caratteristica fondamentale di questo processo è la sua natura **autocatalitica**: una volta che il primo strato di rame si è depositato sui siti di palladio, il rame stesso funge da catalizzatore per la prosecuzione della reazione.

Il grande vantaggio dell'*Electroless Plating* per il *Rapid Tooling* (DfAM) risiede nel suo **Throwing Power** (potere penetrante) elevatissimo: poiché non dipende dalle linee di forza di un campo elettrico, il rame cresce con spessore uniforme su tutta la superficie bagnata. Lo spessore tipico ottenuto è compreso tra 1 μm e 5 μm .

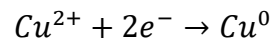
2.3.4 Elettrodeposizione Galvanica (Electroplating o Electroforming)

Lo strato sottile depositato via *electroless* è sufficiente per conferire conduttività superficiale, ma la sua sezione resistente è troppo sottile per supportare le altissime correnti dell'ECM senza fondersi istantaneamente per Effetto Joule. Si rende quindi necessario "ispessire" il rivestimento metallico (spesso superando i 100 – 300 μm) tramite **Elettrodeposizione Galvanica** o *Electroforming* [9].

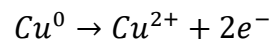
In questo processo, l'elettrodo polimerico pre-rivestito viene collegato al polo negativo (catodo) di un alimentatore, mentre piastre di rame puro (al fosforo) fungono da anodi solubili. Il tutto è immerso in una soluzione elettrolitica, tipicamente un bagno acido a base di solfato di rame ($CuSO_4$) e acido solforico (H_2SO_4).

L'applicazione del campo elettrico impone il movimento degli ioni nel bulk del fluido:

- **Al catodo (Utensile in stampa 3D):** Gli ioni rame si riducono, accrescendo lo spessore del rivestimento:



- **All'anodo (Piastra di Rame):** Il rame si ossida, reintegrando costantemente gli ioni consumati nella soluzione:



La massa e lo spessore del deposito seguono le Leggi di Faraday, garantendo tassi di deposizione (misurati in $\mu\text{m}/\text{ora}$) di gran lunga superiori a quelli dell'electroless.

Tuttavia, l'elettrodeposizione presenta limiti geometrici critici. La distribuzione dello spessore è governata dalla densità di corrente primaria (Primary Current Distribution), che si concentra sugli spigoli vivi (fenomeno noto come *dog-boning* o effetto punta) ed è quasi nulla all'interno dei fori o dei canali profondi (scarsa capacità penetrante o *Low Throwing Power*). Per elettrodi ECM complessi, questo richiede l'uso di anodi conformati ausiliari e di una raffinata miscela di additivi organici nel bagno (levellers, brighteners, carriers) che agiscono come inibitori locali per forzare una crescita omogenea. Inoltre, alti tassi di deposizione possono generare stress residui interni (*internal stress*) nel guscio di rame, i quali, sommandosi alle pressioni fluidodinamiche dell'ECM, possono innescare cricche nel rivestimento.

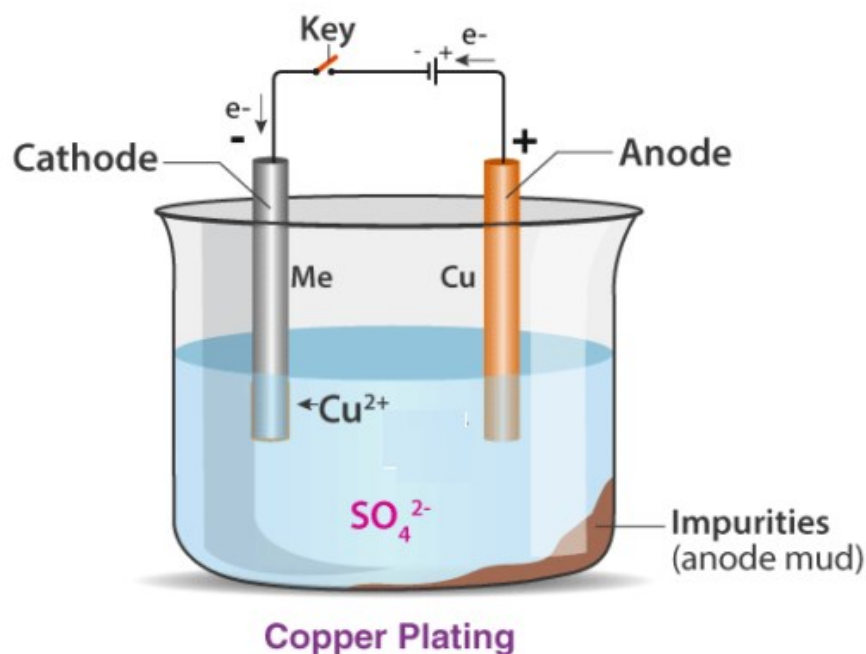


Figura 2.3-3: Schema di elettrodeposizione del rame: bagno anodo-catodo

2.3.5 Deposizione Fisica da Vapore (PVD - Magnetron Sputtering)

Un'alternativa radicale ai processi chimici in fase umida (*Wet Chemistry*) è rappresentata dalla Deposizione Fisica da Vapore (PVD), e in particolare dallo **Sputtering**. Questo processo avviene in camere ad alto vuoto (pressioni nell'ordine di $10^{-3} - 10^{-5}$ mbar) ed è interamente fisico [10].

Il principio di base del *Magnetron Sputtering* sfrutta un plasma confinato magneticamente. All'interno della camera viene introdotto un gas inerte (tipicamente Argon, *Ar*). Applicando un'elevata differenza di potenziale, il gas si ionizza formando un plasma (Ar^+ e e^-). Gli ioni positivi di Argon vengono accelerati dal campo elettrico e fatti collidere violentemente contro un "bersaglio" (Target) in rame purissimo.

L'impatto comporta un trasferimento di quantità di moto (momentum transfer): se l'energia cinetica dello ione incidente supera l'energia di legame del bersaglio, gli atomi di rame vengono strappati (sputtered) dalla superficie. Il rendimento di questo processo è misurato dallo *Sputter Yield* (*Y*), definito come il rapporto tra atomi emessi e ioni incidenti.

Gli atomi di rame espulsi viaggiano in linea retta attraverso il vuoto e condensano sulla superficie dell'elettrodo polimerico stampato in 3D, formando un film metallico sottilissimo (nell'ordine dei nanometri o pochi micron) ed estremamente puro.

2.3.6 Confronto tecnologico e scelta per gli elettrodi ECM

L'analisi comparativa tra *Wet Chemistry* (Electroless + Galvanica) e *Dry Chemistry* (PVD Sputtering) è cruciale per la determinazione del protocollo ottimale nel *Rapid Tooling* elettrochimico.

Lo Sputtering offre indiscutibili vantaggi ecologici (assenza di bagni chimici esausti da smaltire, come il palladio o la formaldeide) e permette di depositare quasi ogni tipo di lega su qualsiasi polimero, bypassando la problematica fase di mordenzatura chimica (l'adesione è garantita dall'alta energia di impatto degli atomi). Cuppari et al. [11] hanno impiegato con successo il PVD come primo layer per rendere conduttiva una resina SLA micro-strutturata.

Tuttavia, per la specifica applicazione ECM analizzata in questa tesi, il PVD presenta due limiti invalidanti:

1. **Natura Line-of-Sight (Lineare):** Gli atomi viaggiano in linea retta. Lo Sputtering ha una capacità di ricopertura di gradini (Step Coverage) e fori profondi pressoché nulla.
2. **Spessore insufficiente:** Lo Sputtering deposita film nanometrici. Per raggiungere gli spessori strutturali atti a gestire centinaia di Ampere senza disciogliersi per Effetto Joule, il processo richiederebbe decine di ore in camera a vuoto, con costi proibitivi e rischio di surriscaldamento del substrato plastico dovuto al bombardamento del plasma.

Si deduce pertanto che l'approccio ibrido, basato su un pre-trattamento di attacco chimico (*Wet Etching*), seguito da placcatura chimica (*Electroless Copper Plating*) per penetrare l'intera architettura DfAM, e concluso da una robusta elettrodeposizione galvanica (*Electroforming*), rappresenta ad oggi la soluzione ingegneristica più completa, scalabile e affidabile per la produzione di utensili polimerici per le lavorazioni elettrochimiche.

2.4 ANALISI DELLA LETTERATURA:

CASI STUDIO E MODALITÀ DI CEDIMENTO DEGLI ELETTRODI IBRIDI

L'utilizzo di elettrodi ibridi, costituiti da un nucleo polimerico generato in Additive Manufacturing e da un guscio metallico conduttivo, rappresenta una delle sfide più ambiziose nel panorama del *Rapid Tooling* per le lavorazioni non convenzionali. L'analisi critica della letteratura prodotta nell'ultimo quindicennio evidenzia un percorso di ricerca tortuoso, caratterizzato da iniziali successi concettuali ma costantemente frenato da severi limiti fisici legati alla degradazione termo-meccanica dei materiali impiegati.

Per comprendere appieno le motivazioni che spingono la presente tesi verso l'applicazione della tecnologia DLP in ambito puramente elettrochimico (ECM), è indispensabile analizzare i casi studio documentati e le relative modalità di cedimento (*Failure Modes*).

2.4.1 Applicazioni e limiti nel dominio dell'Elettroerosione (EDM)

La stragrande maggioranza degli studi pionieristici sull'uso di elettrodi stampati in 3D si è concentrata sull'Elettroerosione (Electro Discharge Machining - EDM). In questo processo, l'asportazione di materiale avviene tramite scariche elettriche ad altissima frequenza che scoccano attraverso un fluido elettrolita, generando plasmi locali con temperature che superano gli 8000 °C [12].

Çoğun et al. [6] furono tra i primi a validare l'uso di elettrodi in resina SLA rivestiti in rame (tramite placcatura chimica e galvanica) per l'EDM, dimostrando la fattibilità di integrare canali di raffreddamento interni. Successivamente, Padhi et al. [4] e Singh et al. [1] hanno condotto estese campagne sperimentali utilizzando elettrodi in ABS stampati in FDM e metallizzati con spessori di rame variabili tra 0.1 mm e 0.3 mm. I risultati di questi studi concordano su un punto fondamentale: l'elettrodo polimerico è in grado di innescare e sostenere il processo di erosione, ma è destinato a un **collasso catastrofico precoce**.

Il limite invalicabile riscontrato nell'EDM è la **Delaminazione Termica**. Nonostante il bagno elettrolitico, l'impulso termico della scintilla riscalda violentemente il sottile strato di rame. Il rame, essendo un eccellente conduttore termico ($k \approx 400 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), trasferisce istantaneamente il calore all'interfaccia con il polimero sottostante.

I polimeri (resine o ABS) presentano una Temperatura di Transizione Vetrosa (T_g) tipicamente compresa tra i 70 °C e i 105 °C. Superata questa soglia, il materiale subisce un drastico crollo del modulo elastico (passando dallo stato vetroso a quello gommoso) e, contemporaneamente, si innesca una severa discrepanza di dilatazione termica.

La deformazione termica differenziale ($\varepsilon_{termica}$) all'interfaccia tra due materiali è governata dalla differenza dei loro coefficienti di dilatazione termica lineare (α):

$$\varepsilon_{termica} = (\alpha_{polimero} - \alpha_{rame}) \cdot \Delta T$$

Considerando che il rame ha un $\alpha \approx 16 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ mentre i polimeri hanno valori di $\alpha \approx 80 \div 100 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, l'espansione del nucleo plastico è di quasi un ordine di grandezza superiore a quella del guscio metallico. Questo genera sforzi di taglio interfacciali enormi che lacerano

l'ancoraggio meccanico (Mechanical Interlocking) creato durante il pre-trattamento chimico, portando alla formazione di bolle (*blistering*), allo sfaldamento del rame e alla conseguente fusione del polimero esposto [13].

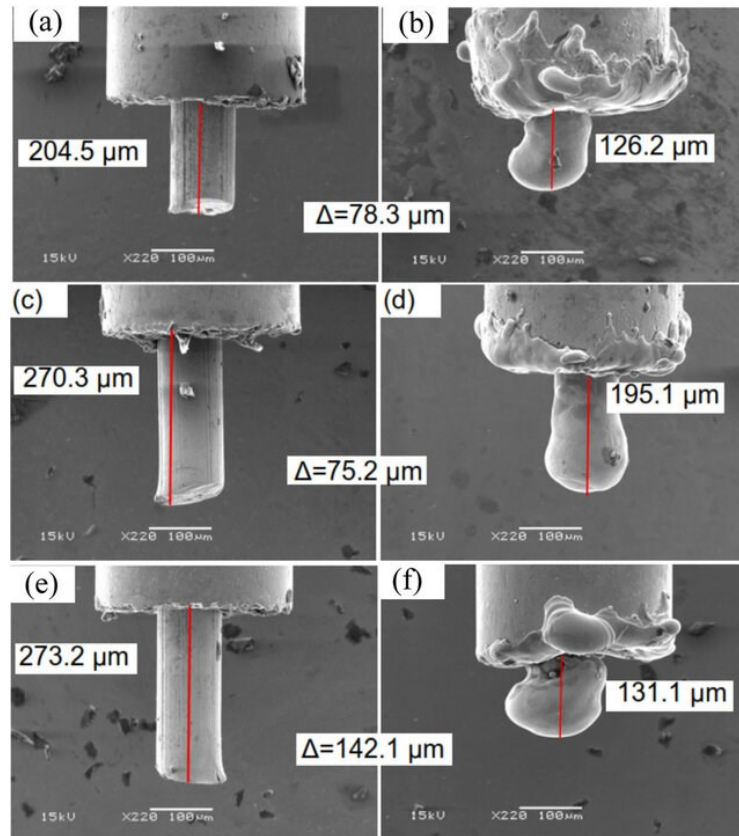


Figura 2.4-1: Immagini SEM degli elettrodi dell'utensile prima e dopo cinque scariche: (a) e (b): wet-EDM; (c) e (d): spray-EDM; e (e) e (f): dry-EDM. Mostra una degradazione termica e sfaldamento del rivestimento in rame su un elettrodo polimerico a causa delle temperature del plasma in fase di elettroerosione (EDM). Il superamento della T_g causa il collasso strutturale.

Gli elettrodi ibridi in EDM sono pertanto relegati a correnti di picco bassissime ($< 3 \text{ A}$), rendendoli inutilizzabili per operazioni di sgrossatura industriale.

2.4.2 La transizione strategica verso le Lavorazioni Elettrochimiche (ECM)

La presa di coscienza dei limiti termici insormontabili dell'elettroerosione ha spinto la ricerca sull'applicazione degli elettrodi AM verso l'Electro Chemical Machining. L'ECM, basandosi sulla dissoluzione anodica a bassa temperatura (tipicamente il *bulk* dell'elettrolita opera tra i 20 °C e i 60 °C), si configura teoricamente come l'ambiente perfetto per preservare l'integrità strutturale del polimero.

Le prime evidenze sperimentali in questa direzione sono recentissime. Kim et al. (2023) [2] hanno testato elettrodi in FDM ramati in operazioni di foratura ECM, confermando che l'assenza di plasma elimina il problema della fusione istantanea del substrato, permettendo all'elettrodo di operare per tempi prolungati. Ancora più rilevante è lo studio di Yan et al. (2020) [14], che ha impiegato resine fotosensibili flessibili per texturizzazioni ECM, dimostrando la tenuta chimica del *coating* metallico nell'aggressivo ambiente salino (cloruro o nitrato di sodio).

Tuttavia, il passaggio all'ambiente elettrochimico, pur risolvendo il problema della scintilla, introduce due nuove e insidiose modalità di cedimento legate all'unicità fluidodinamica ed elettrica del processo.

2.4.3 Modalità di cedimento specifiche in ambiente ECM

Durante l'avanzamento dell'utensile durante la lavorazione ECM, l'elettrodo polimerico metallizzato è sottoposto a uno stress combinato multifisico (idrodinamico, elettrico e meccanico) che può comprometterne l'integrità attraverso tre principali meccanismi:

A. Delaminazione Meccanica da *Shear Stress* Idrodinamico

Come analizzato nel Paragrafo 2.1, il processo richiede che l'elettrolita fluisca nel meato (*gap*) a velocità elevatissime ($v > 20 \text{ m/s}$) per asportare i fanghi. Questo flusso turbolento in spazi confinati esercita un violento sforzo di taglio (*Shear Stress*, τ) sulla superficie ramata dell'elettrodo.

Secondo le equazioni della fluidodinamica per i flussi in condotti sottili, lo sforzo di taglio a parete è approssimabile come:

$$\tau_w = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \approx C_f \cdot \frac{1}{2} \rho_e v^2$$

dove μ è la viscosità dinamica, ρ_e la densità dell'elettrolita e C_f il coefficiente di attrito.

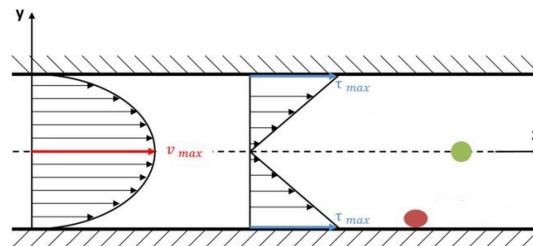


Figura 2.4-2: Profilo delle velocità e generazione dello sforzo di taglio (*Shear stress*) all'interfaccia in un condotto. Sforzi locali eccessivi fungono da cuneo idraulico, innescando la delaminazione meccanica.

Se la forza di adesione interfacciale ottenuta tramite l'Etching chimico (misurata in N/mm^2) è inferiore alla somma vettoriale degli sforzi idrodinamici e della pressione di ristagno all'interno dei canali DfAM (spesso attorno ai $2 \div 3 MPa$), il fluido si infiltra nelle micro-cricche del rivestimento, agendo come un cuneo idraulico che "spella" letteralmente l'elettrodo, disattivandolo elettricamente e inquinando il gap con scaglie di rame.

B. Delaminazione Termica Indiretta (Effetto Joule sul Coating)

Sebbene l'ECM sia un processo "a freddo", il rivestimento metallico sottile è attraversato da densità di corrente altissime (fino a $100 A/cm^2$). Questo strato di rame presenta una resistenza elettrica non nulla (R_{film}), calcolabile in base alla resistività del rame placcato (ρ_{Cu}) e allo spessore del layer (s):

$$R_{film} = \rho_{Cu} \cdot \frac{L}{W \cdot s}$$

Al passaggio della corrente totale di lavorazione (I), il guscio di rame si comporta come una resistenza scaldante, dissipando una potenza termica per Effetto Joule pari a

$P_{Joule} = R_{film} \cdot I^2$ Il flusso termico superficiale (q'') viene generato *direttamente sull'utensile*:

$$q'' = \frac{R_{film} \cdot I^2}{S_{frontale}}$$

Se il lavaggio dell'elettrolita non è perfettamente progettato (presenza di zone di stagnazione, *dead zones*), la convezione forzata non riesce ad asportare questo calore. La temperatura locale del rame sale rapidamente, trasferendosi al nucleo in resina DLP. Non appena si supera la T_g , si innesca il medesimo processo di delaminazione differenziale descritto per l'EDM. La prevenzione di questo fenomeno ricade interamente sull'ottimizzazione topologica dei canali interni (DfAM).

C. Collasso Meccanico al Serraggio (Clamping Failure)

Un aspetto ingegneristico spesso trascurato nella letteratura accademica, ma critico in ambito industriale, è l'interfacciamento tra l'elettrodo polimerico cavo e il mandrino della macchina utensile. I classici sistemi di serraggio a pinza elastica (es. ER32 o mandrini idraulici) esercitano forze di compressione radiale estreme. La resina DLP, pur essendo isotropa, presenta un limite di snervamento a compressione nettamente inferiore rispetto al bronzo o all'acciaio massiccio. Un serraggio diretto sul codolo ramato dell'utensile provoca la micro-frattura del polimero, la distruzione del layer conduttivo e, di conseguenza, l'interruzione del circuito elettrico prima ancora dell'inizio della lavorazione.

2.5 IDENTIFICAZIONE DEL GAP TECNOLOGICO E POSIZIONAMENTO DELLA TESI

La rassegna sistematica della letteratura condotta in questo capitolo fa emergere un quadro tecnologico ben definito:

1. Le tecnologie FDM offrono risoluzioni incompatibili con le tolleranze di micro-finitura, mentre la resina DLP garantisce superfici ideali per l'elettrodeposizione e precisione nei canali interni.
2. I processi di metallizzazione *electroless* e *electroplating*, se preceduti da un rigoroso *wet etching*, rappresentano la via maestra per rivestire geometrie complesse (DfAM), a patto di massimizzare l'ancoraggio meccanico.
3. L'ambiente EDM è termicamente incompatibile con l'attuale generazione di polimeri, mentre l'ECM offre il mezzo ideale, a condizione di saper gestire gli stress idrodinamici e l'Effetto Joule autogeno.

Il **Gap Tecnologico** attuale risiede nell'assenza di un framework metodologico e sperimentale completo per l'utilizzo di elettrodi massivi in resina DLP in lavorazioni ECM strutturali ad alta densità di corrente. Fino ad oggi, gli studi (come quello di Kim et al.) si sono limitati a test esplorativi a bassi amperaggi su geometrie semplici, senza affrontare organicamente la triplice sfida: gestione fluidodinamica per evitare il collasso termico da Effetto Joule locale, massimizzazione dell'adesione per resistere all'alta pressione, e progettazione di sistemi di bloccaggio ibridi per la protezione del codolo.

Ed è esattamente in questo spazio di indagine inesplorato che si posiziona il presente lavoro di tesi. Concependo, fabbricando e validando sperimentalmente elettrodi ECM in resina DLP metallizzata, integrati da sistemi di serraggio dedicati e canali di flusso conformali, questa ricerca ambisce a elevare il *Rapid Tooling* polimerico dallo stadio di curiosità accademica a vera e propria soluzione industriale per le lavorazioni elettrochimiche avanzate.

CAPITOLO 3: MATERIALI E STRUMENTI (SETUP SPERIMENTALE)

Materiali, Metodi e Setup Sperimentale

L'analisi critica della letteratura condotta nel capitolo precedente ha evidenziato come il successo operativo di un utensile polimerico in ambiente ECM dipenda da un delicato equilibrio multifisico. La sopravvivenza dell'elettrodo è intrinsecamente legata alla sinergia tra la qualità topografica del substrato stampato in 3D, l'efficacia dell'adesione interfacciale del *coating* metallico e la corretta gestione dei parametri fluidodinamici ed elettrici durante la lavorazione.

Questo capitolo delinea rigorosamente l'intero impianto metodologico e l'apparato strumentale impiegati per la fabbricazione, la metallizzazione e la validazione sperimentale degli elettrodi ibridi. L'attività di ricerca è stata strutturata in tre macro-fasi sequenziali: la progettazione e produzione del *core* polimerico tramite Additive Manufacturing, la funzionalizzazione superficiale e deposizione metallica (elettrodeposizione galvanica), e infine il collaudo sul banco prova ECM. Nei paragrafi seguenti verranno descritte in dettaglio le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali di base, le architetture delle macchine utilizzate e le sequenze operative standardizzate sviluppate per garantire la ripetibilità dell'esperimento.

3.1 LA RESINA E LA STAMPANTE 3D:

CARATTERISTICHE DEL MATERIALE FOTOPOLIMERICO UTILIZZATO

La scelta della tecnologia di stampa 3D e del materiale di base rappresenta il primo, fondamentale snodo critico per la fabbricazione di un elettrodo destinato all'elettrochimica. Come ampiamente discusso, le tecnologie a deposizione di filamento fuso (FDM), pur essendo economicamente vantaggiose, generano superfici caratterizzate da un ineliminabile "effetto gradino" (*staircase effect*) e da macro-porosità inter-layer. Tali difetti topografici non solo inficiano la continuità del film metallico, ma innescano turbolenze locali nel flusso dell'elettrolita, promuovendo fenomeni di delaminazione meccanica.

Per superare queste barriere strutturali, la presente campagna sperimentale si è avvalsa della tecnologia di fotopolimerizzazione in vasca (*Vat Photopolymerization*), e nello specifico del processo **DLP - Digital Light Processing**.

Questo approccio garantisce una risoluzione isotropa e una compattezza strutturale nettamente superiori, requisiti imprescindibili per la successiva fase di metallizzazione chimica.

3.1.1 Il sistema di Additive Manufacturing e i parametri di slicing

Tutti i campioni di test e gli elettrodi prototipali ottimizzati fluidodinamicamente (DfAM) sono stati realizzati utilizzando la stampante 3D **Anycubic Photon Mono X 6Ks**. Questa architettura si basa su una sorgente luminosa che utilizza una matrice di LED UV posizionati sotto uno schermo LCD monocromatico, operante a una lunghezza d'onda di **405 nm**, capace di indurre la polimerizzazione selettiva di una resina liquida fotosensibile contenuta in un'apposita vasca (vat).

L'elevata risoluzione ottica del sistema impiegato, caratterizzata da uno schermo LCD monocromatico 6K con dimensione del pixel pari a **34 µm** nel piano XY, garantisce due vantaggi ingegneristici fondamentali per l'applicazione ECM:

1. **Finitura superficiale nativa (Surface Integrity):** Una rugosità superficiale (Ra) molto contenuta sui piani verticali e inclinati. Superfici sub-micrometricamente lisce sono essenziali per garantire una elettrodeposizione galvanica omogenea, prevenendo il collasso delle linee di corrente sulle creste di stampa.
2. **Risoluzione dei micro-canali conformali:** La capacità di risolvere geometrie cave complesse, libere da materiale di supporto interno. Questa caratteristica è vitale per la creazione dei condotti di adduzione dell'elettrolita, i quali devono presentare tolleranze dimensionali ristrette per garantire la corretta pressurizzazione del meato di lavorazione senza generare perdite di carico concentrate.

Il processo di conversione dal modello CAD tridimensionale alle istruzioni di macchina (Slicing) è stato eseguito tramite il software proprietario **Anycubic Photon Workshop**. Al fine di massimizzare la precisione dimensionale senza incorrere in tempi di fabbricazione

proibitivi, lo spessore del singolo strato polimerizzato (Z-axis resolution) è stato impostato a **50 μm** .

Inoltre, le strategie di orientamento nel volume di stampa sono state studiate per minimizzare l'impiego di strutture di supporto sulle superfici attive dell'elettrodo, ovvero quelle destinate ad affacciarsi sul pezzo in lavorazione. La rimozione meccanica dei supporti genera infatti micro-cricche e crateri superficiali che agirebbero come inneschi per la delaminazione del *coating* metallico sotto l'azione dello *shear stress* fluidodinamico.

3.1.2 La chimica del fotopolimero e le caratteristiche termo-meccaniche

Il materiale costituente il nucleo (*core*) dell'elettrodo deve possedere una rigidità tale da sopportare gli sforzi di compressione esercitati dal sistema di collegamento tra elettrodo e prolunga mandrino e le pressioni idrostatiche interne generate dal flusso dell'elettrolita.

Sulla base di tali vincoli, è stata selezionata la resina ingegneristica **Aqua-Gray 4K** fornita da **Phrozen**. Dal punto di vista macro-molecolare, si tratta di una miscela complessa a base di oligomeri e monomeri acrilici e metacrilici, addizionata con specifici fotoiniziatori che, eccitati dai fotoni UV, innescano una reazione a catena di reticolazione (*cross-linking*). A differenza dei polimeri termoplastici impiegati nell'FDM (che fondono reversibilmente), il materiale stampato è un polimero termoindurente: la sua struttura a rete tridimensionale lo rende infusibile e chimicamente stabile.

Le proprietà termomeccaniche di questo materiale (dichiarate dal produttore e valutate a valle dei necessari trattamenti termici post-stampa) sono i parametri di guardia per prevenire il collasso termico analizzato nella letteratura. Dalla scheda tecnica ufficiale (Technical Data Sheet) si evincono i seguenti valori nominali:

- **Carico di rottura a trazione (Ultimate Tensile Strength): 24 MPa.** Un valore adeguato a resistere agli stress meccanici indotti durante il montaggio in macchina.
- **Modulo Elastico (Young's Modulus): 1.03 GPa.** La notevole rigidità previene flessioni dell'elettrodo sotto la spinta dell'elettrolita ad alta pressione, garantendo il mantenimento del *gap* (meato) frontale e laterale impostato.
- **Temperatura di deflessione termica (HDT @ 0.45 MPa): 70 °C.**

Il valore della HDT (strettamente correlato alla Temperatura di Transizione Vetrosa, T_g) rappresenta in assoluto la caratteristica materiale più critica per l'intera tesi. Nonostante l'ECM sia un processo nominalmente "a freddo", le densità di corrente estreme che attraversano il sottile film di rame generano un inevitabile innalzamento locale della temperatura per Effetto Joule. Una HDT elevata garantisce che il nucleo polimerico mantenga il proprio modulo elastico e non subisca un rammollimento strutturale (*softening*), scongiurando la discrepanza di dilatazione termica all'interfaccia plastica-metallo che porta allo sfaldamento del rivestimento.

3.1.3 Post-Processo: Stabilizzazione del substrato per la chimica in fase umida

Al termine del ciclo in macchina, il grado di conversione dei doppi legami carbonio-carbonio non è totale e la superficie del pezzo risulta intrisa di resina liquida non reagita. Se metallizzato in questo stato, i solventi presenti nei bagni chimici attaccherebbero i monomeri liberi, provocando il disfacimento della superficie e inquinando irrimediabilmente la soluzione di rame.

Affinché il polimero acquisisca la piena stabilità chimica e le proprietà meccaniche di targa, tutti i campioni sono stati sottoposti a una rigorosa procedura bifasica di post-processing.

1. **Lavaggio (Washing):** Subito dopo il distacco dalla *build platform*, i componenti sono stati immersi in un bagno di Alcool Isopropilico (IPA) con purezza > 99%. Il lavaggio è stato condotto all'interno di un **bagno a ultrasuoni** per un tempo di 10 minuti. L'azione combinata della turbolenza del solvente e della cavitazione ultrasonica è fondamentale per dissolvere la resina viscosa intrappolata all'interno dei micro-canali conformali, garantendone la perfetta pervietà idraulica. A valle del lavaggio, i pezzi sono stati asciugati con aria compressa filtrata per rimuovere ogni residuo di solvente.
2. **Post-Polimerizzazione (Post-Curing):** Una volta completamente asciutti, i campioni sono stati inseriti in una camera UV Anycubic Wash & Cure Max. L'esposizione alla radiazione UV a 405 nm per una durata di 30 minuti fornisce l'energia di attivazione necessaria per portare a saturazione i legami polimerici non reagiti nel *bulk* del materiale. Questo trattamento genera *ulteriore* ritiro volumetrico a causa del completamento della reticolazione (cross-linking), stabilizzando le proprietà termomeccaniche del componente e, soprattutto, elimina la collosità superficiale (*surface tackiness*), consegnando un substrato solido, e pronto per affrontare le fasi successive.

3.2 IL PROCESSO DI RIVESTIMENTO (COATING):

PRE-TRATTAMENTO SUPERFICIALE E BAGNI GALVANICI

La metallizzazione di un nucleo polimerico stampato in 3D tramite tecnologia DLP rappresenta la sfida cardine del presente lavoro di ricerca. Poiché la resina acrilica (Phrozen Aqua-Gray 4K) è un materiale intrinsecamente isolante dal punto di vista elettrico, si rende necessario applicare uno strato metallico superficiale altamente conduttivo (rame) per trasformare il prototipo plastico in un elettrodo funzionante per la lavorazione elettrochimica (ECM).

Nella letteratura classica dei trattamenti galvanici su plastica (Plating on Plastics - PoP), il ciclo standard prevede una sequenza nota come *wet-chemical metallization*, come dettagliata nel capitolo 2.3.

Nel **presente quadro sperimentale**, a causa della stringente non disponibilità in laboratorio di reagenti chimici altamente regolamentati, tossici e nocivi per l'ambiente (quali l'acido cromico, la formaldeide e l'NMP) e di metalli nobili ad alto costo (il palladio), si è optato per una strategia di metallizzazione alternativa, sostenibile e di *rapid prototyping*. Tale approccio prevede l'attivazione fisica della conducibilità elettrica mediante l'applicazione di una vernice spray conduttiva a base di grafite, seguita da un processo di ottimizzazione della rugosità meccanica e da una successiva elettrodeposizione galvanica massiva.

Di seguito viene descritta dettagliatamente la sequenza operativa effettivamente implementata e validata presso i laboratori.

3.2.1 Pulizia, sgrassaggio e attivazione conduttiva tramite lacca grafitica

Subito dopo la fase di post-curing l'elettrodo polimerico è stato sottoposto a un ciclo di pulizia e sgrassaggio superficiale. L'utensile è stato lavato manualmente con alcol isopropilico (IPA). Questo step è cruciale per rimuovere qualsiasi traccia di grasso cutaneo dovuto alla manipolazione, polveri ambientali o residui latenti di resina liquida non completamente eliminati dai precedenti lavaggi. La presenza di contaminanti oleosi o lipidici comprometterebbe infatti l'adesione chimico-fisica di qualsiasi rivestimento successivo.

Una volta ottenuta una superficie chimicamente pura e perfettamente asciutta, si è proceduto alla fase di attivazione elettrica. Non potendo sfruttare la deposizione chimica *electroless*, la conducibilità è stata indotta mediante l'applicazione manuale di una vernice conduttiva a base di grafite colloidale ad alto grado di purezza (**GRAPHIT 33 di Kontakt Chemie**).

Il meccanismo di conduzione di questa vernice si basa sulla **teoria della percolazione**. Le micro-particelle di grafite, disperse all'interno di un legante termoplastico e di una miscela di solventi organici, devono addensarsi sulla superficie del pezzo in modo tale da superare la "soglia di percolazione", ovvero quel limite geometrico oltre il quale i singoli grani conduttivi si toccano reciprocamente, creando un network tridimensionale continuo capace di far fluire gli elettroni.

Per garantire il superamento di questa soglia e assicurare una conducibilità omogenea e priva di discontinuità geometriche su tutta la superficie cilindrica dell'elettrodo, sono stati applicati **5 strati di vernice successive**. L'applicazione manuale richiede estrema precisione per evitare accumuli localizzati che altererebbero le tolleranze dimensionali del cilindro. Tra un'applicazione e la successiva, e prima del passaggio alla fase meccanica, è stato rispettato un tempo di asciugatura fisso di **5 minuti** a temperatura ambiente. Questo tempo è necessario per consentire la totale evaporazione della frazione volatile dei solventi organici della vernice, permettendo al legante di formare un film e intrappolare la grafite in una matrice solida, stabile e coesa con la resina sottostante.

Al termine dei 30 minuti dall'ultima applicazione di vernice, la reale attivazione elettrica del pezzo è stata validata sperimentalmente mediante l'ausilio di un **multimetro digitale**. Posizionando i puntali a diverse distanze sulla superficie verniciata, è stata verificata la presenza di continuità elettrica e la drastica caduta della resistenza (passata da un valore nell'ordine dei Mohm a pochi ohm). Questa misurazione preliminare è un parametro di controllo qualità fondamentale: se lo strato grafitico mostrasse resistenze troppo elevate o zone isolate, il successivo bagno galvanico fallirebbe a causa dell'impossibilità di far circolare la corrente elettrica.

3.2.2 Ottimizzazione micro-meccanica della rugosità tramite burattatura secca

L'applicazione manuale della vernice conduttiva GRAPHIT 33 introduce inevitabilmente un limite geometrico: la finitura superficiale risulta disomogenea, caratterizzata dalle microscopiche creste lasciate dallo strumento di verniciatura e dalla granularità intrinseca della polvere di grafite. Poiché il processo ECM è un'erosione atomica "speculare" (la rugosità e i difetti geometrici dell'elettrodo vengono fedelmente copiati sul pezzo in metallo lavorato), era impensabile trasferire il pezzo direttamente nel bagno galvanico in queste condizioni. Un rame depositato su una superficie rugosa avrebbe amplificato i difetti, generando noduli galvanici e concentrazioni di campo elettrico deleteri.

Per risolvere questo problema, il pezzo completamente asciutto è stato inserito all'interno di una **burattatrice rotativa per un ciclo di burattatura a secco della durata di 1 ora**. Come media (inserti abrasivi) sono stati utilizzati elementi interamente naturali: **chicchi di riso e frammenti di gusci di noci**.

La scelta di questa specifica combinazione risponde a requisiti micro-meccanici ben precisi:

- I gusci di noci, essendo caratterizzati da una durezza contenuta ma da spigoli geometrici efficaci, svolgono un'azione di micro-abrasione dolce, levigando le creste superficiali dello strato grafítico senza asportarlo o delaminarlo dal substrato in resina.
- I chicchi di riso svolgono un'azione sinergica di lucidatura e assorbimento di eventuali micro-frazioni di solvente residuo, uniformando lo strato conduttivo.

Il moto rotatorio del buratto genera un urto continuo e uno strofinamento a bassa energia cinetica tra i media naturali e l'elettrodo cilindrico. Questo trattamento ha ridotto i picchi di rugosità, confermando visivamente il passaggio da una finitura opaca e granulosa a una superficie liscia, compatta e lucida, ideale per ricevere una deposizione galvanica coerente.

Al termine del trattamento, il pezzo è stato accuratamente pulito mediante un getto di aria compressa filtrata. Questa operazione garantisce la rimozione di ogni impurità solida sospesa, lasciando l'elettrodo perfettamente preparato e geometricamente pulito per la successiva e finale fase di elettrodeposizione.

3.2.4 Elettrodeposizione Galvanica massiva del Rame (Electroplating)

La fase culminante del rivestimento consiste nella crescita galvanica dello strato di rame, deputato a sopportare lo stress elettrico e fluidodinamico del processo ECM. Il pezzo attivato e burattato è stato immerso in una cella elettrochimica contenente una soluzione acquosa acida standard, composta da **Solfato Rameico ($CuSO_4$)** e **Acido Solforico (H_2SO_4)**.

All'interno di questo sistema elettrochimico:

- Il Solfato Rameico agisce come fornitore dei portatori di carica, dissociandosi in ioni rameici (Cu^{2+}) responsabili della deposizione catodica.
- L'Acido Solforico ha il duplice scopo di aumentare drasticamente la conducibilità elettrica della soluzione (riducendo la caduta ohmica del bagno) e di mantenere un pH fortemente acido, prevenendo la precipitazione di idrossidi di rame indesiderati.

L'elettrodo polimerico grafitato è stato collegato al polo negativo (catodo) dell'alimentatore DC **GW Instek SPS-3610**, mentre una piastra di rame puro è stata collegata al polo positivo (anodo) per fungere da anodo sacrificale e ripristinare continuamente la concentrazione di ioni Cu^{2+} nel bagno.

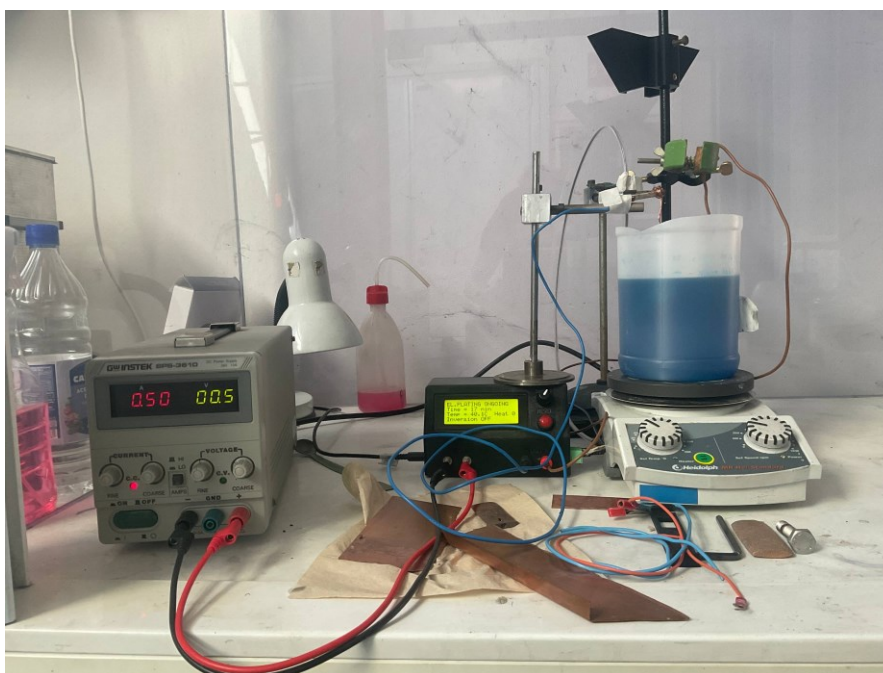


Figura 3.2-1: Alimentatore GW Instek SPS-3610 per Elettrodeposizione Galvanica e Agitatore Magnetico Heidolph MR Hei-Standard

Per ottenere un rivestimento cristallino denso, duttile, privo di stress interni e con un'adesione ottimale, il processo è stato governato secondo tre stringenti controlli di parametro:

1. Controllo Idrodinamico (Agitatore Magnetico Heidolph MR Hei-Standard)

Il bagno galvanico è stato condotto in regime di agitazione idrodinamica continua mediante l'utilizzo di un agitatore magnetico **Heidolph MR Hei-Standard**. Il controllo della cinetica del fluido è necessario per soddisfare tre requisiti di processo:

- **Abbattimento della polarizzazione per concentrazione:** Durante l'elettrodeposizione, gli ioni Cu^{2+} vicini alla superficie dell'elettrodo (catodo) vengono ridotti a rame metallico velocemente. In assenza di agitazione, si creerebbe uno "strato di diffusione di Nernst" localizzato, completamente svuotato di ioni. Questo porterebbe il processo in un regime limitato dal trasferimento di massa, causando una deposizione spugnosa, dendritica, fragile e comunemente definita "bruciatura del rame". L'agitazione del bagno assicura un continuo apporto convettivo di ioni dall'interno del bagno verso la superficie del pezzo.
- **Omogeneizzazione termica:** L'agitatore distribuisce uniformemente il calore fornito dalla piastra riscaldante, evitando la formazione di gradienti termici che altererebbero la cinetica di deposizione locale.
- **Dislocamento delle bolle di Idrogeno (H_2):** La reazione secondaria parassita al catodo prevede lo sviluppo di idrogeno gassoso. Se le micro-bolle di H_2 rimanessero attaccate alla superficie grafitata dell'elettrodo, isolerebbero localmente il pezzo dal fluido, creando difetti macroscopici noti come *pitting* (fori e vuoti nel rivestimento di rame). L'agitazione stacca meccanicamente le bolle non appena si formano.

2. Controllo Termico e Cinetico (Riscaldamento a 40 °C)

La soluzione è stata preventivamente riscaldata e mantenuta alla temperatura di **40 °C** per tutta la durata del processo, monitorando il dato in tempo reale tramite una **sonda di temperatura di tipo K** collegata al sistema Heidolph. Dal punto di vista termodinamico, l'innalzamento della temperatura a 40 °C incrementa l'energia cinetica del sistema: aumenta il coefficiente di diffusione degli ioni Cu^{2+} migliora la conducibilità elettrica del bagno galvanico. Questo favorisce la nucleazione di cristalli di rame più fitti e compatti, migliorando la duttilità del rivestimento ed evitando la formazione di tensioni interne macroscopiche che potrebbero portare allo sfolgoramento o al distacco del guscio metallico dalla resina.

3. Controllo Elettrico e Temporale

L'alimentatore GW Instek è stato impostato in modalità **di controllo di corrente (Galvanostatica)**, imponendo una corrente pari a **0.8 A**. Considerando la superficie attiva del substrato pari a $0,52 \text{ dm}^2$, è stata applicata una densità di corrente pari a $1,5 \text{ A/dm}^2$. La scelta di erogare una corrente così contenuta è una decisione di design strategica legata alla natura termomeccanica della resina **Phrozen Aqua-Gray 4K** (la quale ha un HDT di soli 70°C , come analizzato nel Capitolo 3.1).

All'inizio della deposizione, la corrente fluisce su uno strato di grafite che, per quanto ottimizzato, presenta una resistenza elettrica significativamente più alta rispetto a un metallo puro. Se si fosse applicata una corrente elevata (es. 3-4 Ampere), l'**Effetto Joule** ($P = I^2 \cdot R$) localizzato all'interfaccia tra la grafite e la resina avrebbe generato un picco di calore istantaneo. Tale calore avrebbe facilmente superato i 70°C fatali della resina, rammollendo il nucleo polimerico, deformando il cilindro e distruggendo l'adesione della vernice. Lavorando a soli 0.8 A, lo sviluppo di calore per effetto Joule è rimasto ampiamente sotto i limiti di guardia, consentendo al calore residuo di essere dissipato dal bagno termostato.

Per compensare la bassa intensità di corrente e permettere comunque la crescita di uno spessore massivo di rame (stimato intorno ai $200 \mu\text{m}$, necessari per resistere alle successive fasi di lavoro sulla macchina ECM), il processo è stato protratto per una durata di circa **5 ore**. Questa lenta cinetica di crescita, protratta nel tempo sotto agitazione e temperatura controllata, ha permesso agli atomi di rame di disporsi secondo reticoli cristallini ordinati, compatti e altamente coesi, conferendo all'elettrodo ibrido finale la necessaria robustezza meccanica e una conducibilità elettrica massiva d'eccellenza, pronto per i successivi test sulla macchina IMPULSE ECM 50.

3.3 LA MACCHINA ECM SPECIFICHE, ELETTROLITA E SISTEMA DI BLOCCAGGIO

A valle della fabbricazione e della validazione morfologica del *coating* in rame, gli elettrodi ibridi sono stati testati in condizioni operative reali. L'ambiente di lavorazione elettrochimica (ECM) rappresenta un ecosistema multifisico severo, in cui la sopravvivenza dell'utensile polimerico è dettata dall'equilibrio tra l'energia elettrica erogata, lo smaltimento termico e la gestione fluidodinamica del meato (*gap*).

La campagna sperimentale di dissoluzione anodica è stata condotta presso il laboratorio **del Dipartimento di Ingegneria “Enzo Ferrari” – Unimore**, utilizzando una cella ECM (Electrochemical Machining) allestita per il rilevamento dei principali parametri di processo.

L'architettura della macchina si compone di tre sottosistemi fondamentali, per garantire la stabilità del processo: il gruppo cinematico e generatore di potenza, il circuito fluidodinamico dell'elettrolita e l'interfaccia meccanica di serraggio dell'utensile.

Per gli esperimenti di lavorazione, è stato utilizzato un sistema **IMPULSE ECM 50** (PECM Systems LTD, Barnsley, Regno Unito).



Figura 3.2-2: IMPULSE ECM 50 (PECM Systems LTD)

3.3.1 Il gruppo cinematico e il Generatore di Potenza (Power Supply)

Il posizionamento relativo tra l'utensile (catodo polimerico) e il pezzo in lavorazione (anodo metallico massiccio) è governato da un Sistema di controllo CNC a 3 assi ad alta precisione. Questo sistema garantisce una risoluzione di posizionamento nell'ordine dei 10 µm, fondamentale per mantenere costante l'ampiezza del meato frontale (tipicamente compresa tra i 100 e i 500 µm) durante l'avanzamento dell'elettrodo.

L'asportazione di materiale mediante lavorazione ECM segue fedelmente la Legge di Faraday. La velocità di avanzamento teorica dell'utensile (v_f), che deve eguagliare la velocità di recessione del fronte anodico per mantenere il *gap* stazionario, è descritta dall'equazione:

$$v_f = \eta \cdot \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot J$$

(dove η è l'efficienza di corrente, M la massa molare del pezzo, z la valenza di dissoluzione, F la costante di Faraday, ρ la densità del materiale anodico e J la densità di corrente).

Per fornire la densità di corrente (J) necessaria a innescare l'asportazione, il banco è equipaggiato con un generatore di potenza che può lavorare in continua o pulsata, modello **High Frequency Switch Power Supply - XINGTONGLI**.

A differenza dell'EDM, l'ECM opera in regime di bassa tensione e altissima corrente. I parametri elettrici nominali impostati per le prove sperimentali prevedono:

- **Tensione di lavoro (Voltage, U):** Impostata nel *range* 0 – 24 V.
- **Corrente di picco (Peak Current, I):** Capacità di erogazione fino a 1000 A, monitorata tramite una sonda a effetto Hall.
- **Duty Cycle (se si usa corrente pulsata):** Duty Cycle del 10, 25 e 50%. L'utilizzo di corrente pulsata (PECM) favorisce un sensibile miglioramento del lavaggio del *gap* durante i tempi di spegnimento (off-time), riducendo il rischio di surriscaldamento locale del film di rame depositato sull'elettrodo polimerico.

3.3.2 Il circuito fluidodinamico e le caratteristiche chimiche dell'elettrolita

L'elettrolita svolge una triplice funzione vitale: chiude il circuito elettrico fornendo i portatori di carica (ioni), asporta i fanghi di lavorazione (idrossidi metallici) dal meato e funge da fluido termovettore per dissipare il calore generato per Effetto Joule sia sul pezzo che sul sottile guscio di rame dell'utensile.

Per la campagna sperimentale è stata selezionata una soluzione acquosa di **Cloruro di Sodio (NaCl)**.

La scelta del sale (spesso NaNO₃ viene preferito al NaCl per leghe specifiche grazie alle sue proprietà passivanti che riducono le correnti parassite laterali, migliorando la precisione geometrica, *stray material removal*) definisce la conducibilità elettrica specifica del fluido (κ). Per questa soluzione elettrolitica, con densità **1,10 g/cm³** a temperatura **ambiente** (circa 20–

25 °C), si può stimare la concentrazione del NaCl attorno a **14–16% in massa**, corrispondente a circa **2,5–3 mol/L**.

Per queste concentrazioni, la conducibilità specifica a 25 °C è tipicamente dell'ordine di $\kappa \approx 150 - 200 \text{ mS/cm}$.

Il circuito di adduzione è composto dai seguenti elementi:

1. **Sistema di pompaggio:** Una pompa **Grundfos CRK 2-150/9** di tipo centrifugo multistadio verticale a immersione, inietta l'elettrolita nell'IEG (meato interelettrodico) attraverso un distributore in PLA realizzato in FDM, appositamente progettato per confinare e dirigere il flusso dell'elettrolita alla base dell'elettrodo. La pressione di mandata è regolata tramite regolazione elettronica e impostata ad un range di 1.5 – 4.0 bar nei vari test effettuati. Questa pressione garantisce una velocità di efflusso turbolento all'interno del *gap* sufficiente a garantire l'efficace rimozione del calore e dei prodotti di reazione (gas e idrossidi metallici) dall'area di lavoro.
2. **Controllo Termico:** La temperatura dell'elettrolita nel serbatoio si trova a temperatura ambiente. Previene l'ebollizione locale nel meato e salvaguarda il *core* in resina dall'avvicinarsi alla sua Temperatura di Transizione Vetrosa (Tg).
3. **Sistema di Filtrazione:** L'elettrolita refluo attraversa un sistema di filtrazione e una vasca di decantazione per separare i precipitati colloidali di idrossido di ferro/alluminio generati dalla reazione anodica, prima di essere reimpresso in circolo.



Figura 3.2-3: Distributore dell'elettrolita nel meato di lavorazione

In questa prima configurazione sperimentale, l'adduzione dell'elettrolita avviene in modalità *cross-flow* (flussaggio laterale trasversale). Il fluido viene veicolato nel meato di lavorazione tramite un distributore esterno realizzato in manifattura additiva (FDM), la cui tenuta idraulica contro la prolunga del mandrino è assicurata dalla compressione di un O-ring dedicato, prevenendo dispersioni di fluido in pressione fuori dall'area di taglio.

In una seconda fase, l'elettrodo polimerico è stato ottimizzato mediante tecnica DfAM con la presenza di canali interni in cui far fluire l'elettrolita, e degli orifizi appositamente posizionati sull'area di lavoro, tali da permettere un lavaggio interno conformale. Integrando i canali

direttamente dentro l'elettrodo, si cerca di portare il fluido fresco esattamente dove serve, in modo simmetrico dal centro verso l'esterno.

3.3.3 Il sistema di bloccaggio ibrido (Clamping): La sfida dell'interfaccia termomeccanica

1. L'interfacciamento meccanico ed elettrico tra l'elettrodo polimerico e la prolunga in alluminio del mandrino della macchina *IMPULSE ECM 50* rappresenta un punto chiave per la stabilità del processo. Il sistema di accoppiamento deve infatti assolvere simultaneamente a tre funzioni: Garantire una perfetta concentricità e rigidità meccanica contro le spinte idrodinamiche.
2. Assicurare la tenuta stagna ad alte pressioni (fino a 10 bar) per l'iniezione coassiale dell'elettrolita.
3. Trasferire centinaia di Ampere dal generatore al sottile layer di rame dell'utensile, minimizzando la resistenza di contatto.

Per soddisfare questi requisiti, per l'alloggiamento degli elettrodi testati è stato progettato e impiegato un sistema di serraggio ibrido personalizzato: **Interfaccia M10 con Inserto Metallico**.

L'interfacciamento meccanico tra il mandrino della macchina utensile (nel nostro caso, tramite una prolunga in alluminio) e l'elettrodo polimerico ha l'obiettivo di garantire un bloccaggio rigido e coassiale, capace di resistere alla pressione dell'elettrolita e di trasmettere elevate correnti (fino a 300 A), senza compromettere l'integrità strutturale del fotopolimero.

Per la realizzazione dell'elettrodo in resina, si è scelto di scartare le soluzioni di bloccaggio convenzionali a favore di un accoppiamento assiale ibrido con inserto metallico prigioniero.

Per garantire la totale compatibilità con l'architettura della macchina *IMPULSE ECM 50*, l'interfaccia di bloccaggio dell'elettrodo polimerico è stata vincolata all'utilizzo della filettatura M10 preesistente sulla prolunga del mandrino. La modellazione CAD dell'utensile ha pertanto integrato una filettatura femmina M10x1.5. Per prevenire la frattura a taglio dei filetti polimerici causata dal ritiro volumetrico post-curing, in fase di modellazione DfAM è stata applicata una tolleranza radiale di compensazione (+0.1 mm) sul profilo del filetto.

La criticità maggiore di questa configurazione risiede nella fase di funzionalizzazione metallica: un'eventuale deposizione di rame all'interno dei filetti ne altererebbe irrimediabilmente il profilo, impedendone l'assemblaggio. Al momento del serraggio, l'elettrodo polimerico è stato progettato per garantire un accoppiamento coradiale con la prolunga del mandrino. Lo sforzo meccanico di trazione viene assorbito dai filetti in resina.

Questa interfaccia ottimizzata ha permesso di trasferire la corrente totale di lavorazione mantenendo una caduta di tensione trascurabile e preservando la perfetta integrità

fluidodinamica e strutturale del nucleo polimerico, abilitando così il test degli elettrodi in condizioni di *heavy-duty*.

CAPITOLO 4: PROGETTAZIONE DELL'ELETTRODO IBRIDO CON APPROCCIO DfAM

L'adozione della fabbricazione additiva per la realizzazione di utensili non convenzionali non deve essere intesa come una semplice sostituzione tecnologica per abbattere i tempi e i costi (Rapid Tooling), ma come un radicale cambio di paradigma progettuale. L'approccio tradizionale sottrattivo impone severi vincoli geometrici alla topologia degli utensili, limitando le geometrie interne a forature rettilinee intersecanti. Al contrario, la tecnologia di fotopolimerizzazione (SLA/DLP) abilita il concetto di *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), svincolando il progettista dalle restrizioni cinematiche della macchina utensile e permettendo la creazione di architetture interne a complessità "gratuita".

Questo capitolo documenta il percorso di ideazione, calcolo e modellazione CAD tridimensionale dell'elettrodo ibrido.

In una fase iniziale, si procederà a disegnare e stampare l'elettrodo seguendo le stesse geometrie adottate per la soluzione presente già in laboratorio, con la relativa adduzione fluidodinamica mediante il distributore in PLA realizzato in FDM.

Successivamente l'attenzione si focalizzerà in primo luogo sull'ottimizzazione fluidodinamica dei condotti di adduzione dell'elettrolita, per poi passare all'analisi delle tolleranze di compensazione del meato (gap) e alle strategie geometriche adottate per massimizzare l'adesione del *coating* metallico.

4.1 INTRODUZIONE AI VINCOLI DI PROGETTO E ALL'APPROCCIO SPERIMENTALE

A DUE FASI

La progettazione dell'elettrodo non può prescindere da una rigorosa analisi dei **vincoli di progetto ambientali e strumentali** imposti dall'hardware di laboratorio a disposizione:

1. **Vincoli Meccanici e Cinematici (IMPULSE ECM 50):** La macchina pECM Systems Ltd. IMPULSE ECM 50 impone precise condizioni al contorno. Il sistema di movimentazione dell'asse Z opera con una risoluzione di posizionamento dell'ordine di 10 μm , muovendosi a velocità di avanzamento estremamente ridotte e controllate. Per garantire che il *working gap* (il meato interelettrodico compreso tra i 10 μm e i 50 μm) rimanga costante durante tutto il processo di erosione, l'elettrodo deve esibire una rigidezza strutturale assoluta. Qualsiasi micro-deflessione o deformazione macroscopica del polimero sotto carico provocherebbe la variazione geometrica del gap, innescando errori di sformo sul pezzo o, nello scenario peggiore, un cortocircuito per contatto fisico metallo-metallo. L'interfaccia meccanica è ulteriormente vincolata dalla presenza di una prolunga cilindrica in alluminio montata sul mandrino, la quale termina con una filettatura maschio M10x1.5. L'elettrodo in resina deve pertanto accoppiarsi direttamente a questa filettatura, scaricando le forze di serraggio e di spinta idrodinamica su una struttura polimerica che possiede un modulo elastico di soli 1.03 GPa e un carico di rottura a trazione di 24 MPa.
2. **Vincoli Elettrici e Termici (Alimentatore XINGTONGLI e Resina 4K):** L'erogazione della potenza elettrica avviene tramite l'alimentatore switching XINGTONGLI. Per ottenere la dissoluzione del metallo, la corrente continua (o pulsata) deve fluire lungo lo strato ramato esterno dell'utensile. Lo spessore del rivestimento galvanico (circa 250 μm) deve essere dimensionalmente ottimizzato per minimizzare la resistenza ohmica e la conseguente generazione di calore per Effetto Joule ($P = I^2 \cdot R$). Il vincolo termico più stringente è dettato dalla natura della resina *Phrozen Aqua-Gray 4K*, il cui parametro di HDT (Heat Deflection Temperature) si attesta a soli 70 °C sotto un carico di 0.45 MPa. Superata questa soglia critica, il polimero subisce una drastica transizione vetrosa e un rammollimento strutturale, compromettendo irrimediabilmente la coesione con il guscio di rame e l'accuratezza geometrica dell'impronta di scavo.
3. **Vincoli Fluidodinamici (Pompa Grundfos CRK2-150/9):** Il lavaggio del meato interelettrodico richiede la circolazione forzata dell'elettrolita ad alta velocità per evacuare i prodotti secondari della reazione (idrossidi metallici e bolle di idrogeno gassoso). La pompa multistadio Grundfos è in grado di generare pressioni di mandata elevate. L'interazione tra il fluido in pressione e le pareti dell'elettrodo genera sollecitazioni tensionali di taglio (*shear stress*) tangenziali all'interfaccia rame-resina e

momenti flettenti sul corpo dell'utensile, che devono essere bilanciati accuratamente in fase di disegno assistito dal calcolatore (CAD).

Al fine di validare il comportamento dell'elettrodo polimerico e risolvere progressivamente queste criticità senza introdurre un numero eccessivo di variabili incontrollate, si è sviluppato un **approccio sperimentale strutturato in due fasi distinte e sequenziali**:

Fase 1: Configurazione base con flussaggio trasversale (Cross-Flow)

La prima fase della ricerca è focalizzata sulla validazione della catena manifatturiera e sulla verifica della tenuta termo-meccanica ed elettrica dell'accoppiamento ibrido, isolando la complessità fluidodinamica interna. A tal fine, l'elettrodo è stato interamente riprogettato ex-novo in ambiente SolidWorks, mutuando e replicando fedelmente le geometrie esterne macroscopiche dell'utensile pieno in rame storicamente utilizzato nei laboratori per questa specifica lavorazione (un cilindro pieno terminante con una geometria complessa ad impronta di perforazione a **stella**).

Tuttavia, a differenza del core metallico del passato, l'oggetto è stato interamente convertito in un componente polimerico stampato tramite tecnologia DLP e mascherato in fase di elettrodeposizione per preservare la filettatura interna M10 nativa della resina. In questa prima configurazione, l'elettrodo si presenta come un corpo solido internamente privo di condotti. L'adduzione dell'elettrolita nel meato viene delegata interamente a un componente ausiliario esterno: un distributore fluidodinamico stampato in PLA mediante tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling). Tale distributore viene calzato attorno alla prolunga del mandrino e sigillato tramite la compressione assiale di un O-ring elastico, incanalando il flusso dell'acqua salata lateralmente in modalità trasversale (*cross-flow*) rispetto all'impronta a stella.

L'obiettivo scientifico della Fase 1 è duplice: confermare che il filetto M10 stampato in resina 4K possa sopportare il serraggio meccanico e che la conducibilità elettrica massiva sia garantita dal contatto a battuta faccia-a-faccia tra la flangia in alluminio e la spalla piana placcata dell'elettrodo, supportata dal nastro di rame conduttivo.

Fase 2: Configurazione avanzata ottimizzata con canali interni conformali

Una volta validata la stabilità strutturale del binomio resina-rame nella Fase 1, l'approccio sperimentale evolve verso lo sfruttamento intensivo delle libertà geometriche offerte dal *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). Il lavaggio laterale trasversale (*cross-flow*) della Fase 1 mostra infatti intrinseci limiti fluidodinamici stazionari: il fluido entra da un lato dell'impronta a stella e ne esce dal lato opposto, subendo una progressiva perdita di carico, un accumulo asimmetrico di fanghi chimici e un incremento localizzato della temperatura per effetto Joule lungo il percorso di uscita. Ciò si traduce in un'asportazione non uniforme del metallo sul pezzo target.

La Fase 2 mira a risolvere radicalmente questa asimmetria integrando la rete idraulica direttamente all'interno del nucleo polimerico dell'elettrodo. Sfruttando la modellazione

tridimensionale avanzata in SolidWorks, l'elettrodo a impronta stellata viene ottimizzato inserendo una camera di calma superiore (*plenum*) e una fitta ramificazione di canali interni curvi e conformali. Questi condotti scendono all'interno del cilindro seguendone il profilo e sfociano sulla faccia di lavoro frontale attraverso micro-orifizi appositamente distribuiti lungo la geometria della stella.

Questa configurazione avanzata consente di attuare un **lavaggio interno simmetrico**: l'elettrolita fresco viene iniettato dal nucleo e diverge radialmente dal centro verso l'esterno dell'impronta. In questo modo, il fluido giunge alla corretta pressione operativa e a temperatura ambiente esattamente nella zona di reazione in cui avviene la dissoluzione atomica, garantendo un raffreddamento termico perfetto della resina Phrozen (mantenendola ben al di sotto dei 70 °C) e un'omogeneità di asportazione chimica impossibile da ottenere con qualsiasi metodologia di flussaggio esterno tradizionale.

4.2 FASE 1: CONFIGURAZIONE BASE A IMPRONTA STELLATA CON FLUSSAGGIO TRASVERSALE (CROSS-FLOW)

L'obiettivo primario di questa prima fase sperimentale è la validazione tecnologica del concetto di *Hybrid Tooling* (utensile con nucleo fotopolimerico e guscio metallico), isolando temporaneamente le complessità legate alla fluidodinamica interna. Per poter confrontare oggettivamente le performance del nuovo elettrodo stampato in 3D rispetto all'utensile massivo in rame storicamente impiegato in laboratorio, si è scelto di replicarne fedelmente le macro-geometrie esterne, trasponendole in un ambiente di modellazione CAD (SolidWorks) e ottimizzandole secondo i dettami del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM).

Questa configurazione di base (Fase 1) prevede un elettrodo a corpo solido, la cui impronta di scavo frontale è caratterizzata da una geometria complessa a forma di stella a cinque punte, utile per valutare la fedeltà di riproduzione degli spigoli vivi e la distribuzione del campo elettrico durante l'erosione. In assenza di canali interni, l'adduzione dell'elettrolita è demandata a un sistema esterno operante in modalità *cross-flow* (flussaggio trasversale).

4.2.1 Modellazione CAD e interfacciamento meccanico-elettrico

La progettazione tridimensionale dell'elettrodo è partita dalla definizione dell'ingombro massimo operativo. Il corpo base dell'utensile è stato modellato come un cilindro pieno avente un diametro nominale esterno di 20 mm e una lunghezza totale di 65 mm. I motivi che ci hanno spinto a realizzare questa geometria dell'elettrodo sono:

- Forma del distributore del flusso trasversale.
- Necessità di avere una tenuta stagna (presenza dell'oring).
- Attacco filettato compatibile con la prolunga montata in macchina.

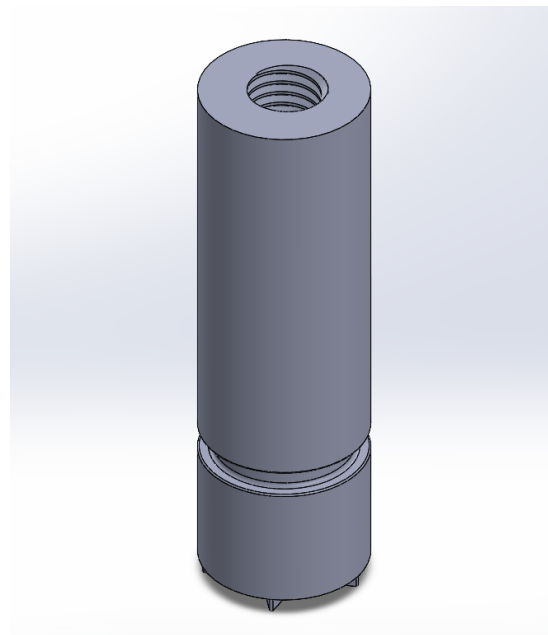


Figura 4.2-1: Modello CAD 3D (vista isometrica posteriore) dell'elettrodo base, evidenziante la sezione cilindrica e la filettatura interna M10x1.5 necessaria per l'interfacciamento con la prolunga del mandrino.

La criticità maggiore nella modellazione di questa fase risiedeva nel garantire un ancoraggio meccanico e un interfacciamento elettrico sicuri verso la prolunga in alluminio del mandrino. A tale scopo, sulla faccia superiore del cilindro è stata modellata una cavità assiale terminante con una filettatura metrica femmina **M10x1.5**. Per evitare fenomeni di strappo (spogliamento) dei filetti polimerici sotto l'azione della coppia di serraggio, la filettatura è stata estrusa per una profondità utile di 21 mm, all'interno di un foro pre-foro profondo 22,50 mm. Questa estesa lunghezza di ingaggio garantisce un'adeguata ripartizione degli sforzi di taglio lungo le spire della resina. Inoltre, in ottica DfAM, il profilo del filetto CAD è stato generato prevedendo un leggero *offset* radiale positivo (circa +0.15 mm) per compensare fisiologici ritiri volumetrici della resina Phrozen 4K durante il ciclo di *post-curing*.

Dal punto di vista elettrico, la trasmissione delle correnti elevate (fino a 300 A) bypassa i filetti interni (mascherati durante il bagno galvanico per mantenerli isolanti) e si affida al concetto di **contatto a battuta**. La faccia anulare piana del cilindro (la corona circolare attorno al foro M10) è stata modellata per essere perfettamente complanare allo spallamento della prolunga in alluminio. Serrando l'elettrodo, si genera un accoppiamento di forma ad alta pressione tra le due superfici piane metallizzate, massimizzando l'area di contatto e abbattendo la resistenza di contatto ohmica. Tale soluzione riduce drasticamente la generazione di calore per Effetto Joule, proteggendo la resina dal superamento della sua Temperatura di Deflessione Termica (HDT a 70 °C).

4.2.2 Integrazione del distributore fluidodinamico esterno in FDM

Sulla superficie laterale del cilindro, a una quota di 14,80 mm misurata dalla base della faccia di lavoro, è stata modellata una gola radiale (scanalatura). Questo dettaglio geometrico non ha funzione di scavo, bensì una funzione idraulica fondamentale: è la sede per l'alloggiamento di un O-ring elastomerico di tenuta dinamica.

Nella macchina ECM di laboratorio, l'elettrolita viene iniettato nel meato (*working gap*) attraverso un ugello distributore esterno in PLA, realizzato in manifattura additiva (FDM - *Fused Deposition Modeling*). Tale distributore avvolge l'elettrodo come un collare. La gola modellata sul cilindro permette all'O-ring di interfacciarsi tra il corpo dell'elettrodo e il distributore FDM, sigillando la camera idraulica. Sotto il profilo del *Design for Additive Manufacturing*, è fondamentale notare come la gola non sia stata disegnata con spigoli vivi a 90°. Sono stati implementati dei raccordi di fondo e di spigolo (R0,50 e R0,20). Nelle resine acriliche stampate in DLP, gli spigoli vivi rappresentano pericolosissimi intensificatori di sforzo (*stress concentrators*). L'applicazione di raccordi morbidi annulla il rischio di innesco di cricche a fatica indotte dalle pulsazioni di pressione (cavitazione) della pompa Grundfos.

Questo setup garantisce che l'intero flusso di elettrolita venga direzionato trasversalmente sull'impronta a stella a cinque punte, la quale si distanzia dal corpo cilindrico per uno spessore di 2 mm. Il lavaggio *cross-flow* così ottenuto permette di validare l'erosione di forme complesse, pur portando con sé limiti intrinseci di disomogeneità termica che verranno analizzati e risolti nella successiva Fase 2.

4.2.3 Messa in tavola e specifiche per la manifattura additiva

Prima di procedere all'esportazione del modello tridimensionale in formato .STL per le operazioni di *slicing* e stampa, le scelte progettuali e le tolleranze geometriche sono state formalizzate attraverso la redazione di una tavola tecnica 2D ingegneristica (Messa in Tavola). Questo documento rappresenta il *digital twin* normato dell'elettrodo e costituisce la baseline per le future misurazioni post-processo (controllo dimensionale post-post-curing e post-galvanica).

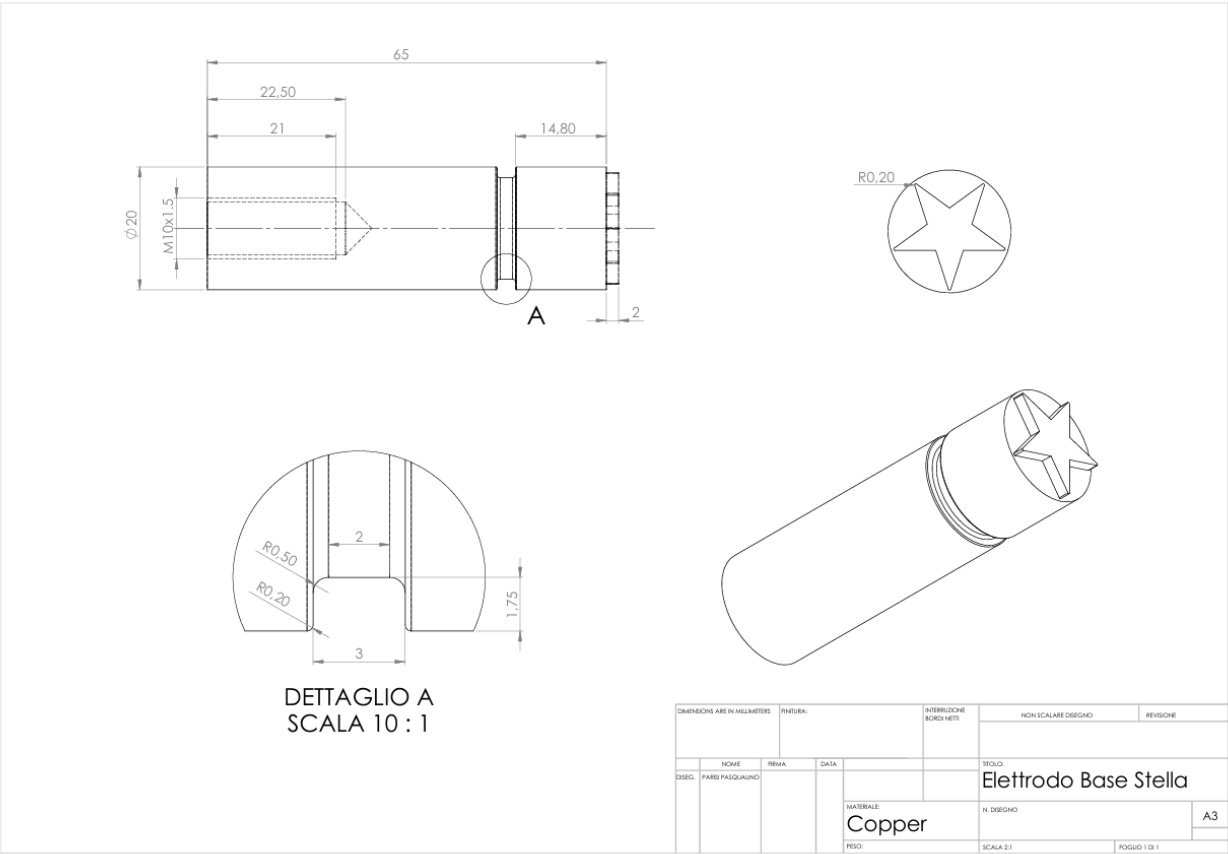


Figura 4.2-2: Messa in tavola tecnica dell'elettrodo ibrido (Fase 1). Sono evidenziate le quote di ingombro, la profondità di ingaggio della filettatura M10x1.5 e il Dettaglio A relativo alla gola di tenuta idraulica.

Tutte le quote riportate tengono già conto del volume teorico che andrà successivamente a occupare lo strato di rivestimento galvanico di rame spesso circa 250 μm , dimostrando un approccio olistico in cui il CAD non modella semplicemente la forma finale, ma prevede l'incremento di spessore derivante dalla metallizzazione successiva.

4.3 FASE 2: OTTIMIZZAZIONE DFAM CON FLUSSAGGIO INTERNO CONFORMALE

La transizione dalla Fase 1 (configurazione a corpo solido) alla Fase 2 rappresenta un secondo aspetto innovativo della presente ricerca. Se la prima fase ha avuto lo scopo di validare l'integrità strutturale del fotopolimero metallizzato e il suo interfacciamento con la macchina utensile, la Fase 2 sfrutta appieno il paradigma della Manifattura Additiva, che consente di realizzare geometrie interne di complessità illimitata a "costo zero" in termini di tempo macchina.

L'elettrodo è stato interamente riprogettato in ambiente SolidWorks per ospitare una rete fluidodinamica interna, eliminando la necessità del distributore esterno in FDM e passando da un sistema di lavaggio *cross-flow* a un sistema di **flussaggio interno conformale**.

4.3.1 Transizione dal lavaggio trasversale al lavaggio simmetrico

Nelle lavorazioni ECM di precisione, la gestione dell'elettrolita nel meato interelettrodo (*working gap*) è il parametro più critico per determinare la qualità superficiale e l'accuratezza dimensionale dell'impronta.

Il sistema di flussaggio trasversale laterale, (utilizzato nella Fase 1), garantisce un flusso idrodinamico per lo più laminare e molto stabile. Questa stabilità è ottimale per minimizzare la rugosità superficiale del pezzo. Tuttavia, l'analisi di questa configurazione su geometrie complesse evidenzia tre limiti intrinseci legati alla direzione del flusso:

1. **Asimmetria termica:** Il fluido entra da un lato freddo e, attraversando il gap, assorbe il calore generato per Effetto Joule, uscendo dal lato opposto a una temperatura superiore. Questo gradiente termico altera la conduttività locale dell'elettrolita, causando un'asportazione disomogenea.
2. **Accumulo di fanghi:** I prodotti di scarto della reazione anodica (idrossidi metallici) e le bolle di idrogeno gassoso tendono ad accumularsi nella zona di valle del flusso, rischiando di innescare cortocircuiti o fenomeni di *pitting*.
3. **Zone di stagnazione:** Geometrie complesse e ricche di spigoli (come la stella a cinque punte) creano delle zone di "ombra fluidodinamica" o vortici di ricircolo se investite da un flusso unidirezionale laterale.

L'integrazione di un sistema di **flussaggio interno simmetrico** risolve radicalmente queste problematiche. Veicolando l'elettrolita fresco in pressione direttamente all'interno del corpo dell'elettrodo per poi farlo sfociare sulla faccia di lavoro frontale. In questo modo, l'acqua salata fredda impatta direttamente la zona di massima densità di corrente, raffreddando uniformemente il *coating* di rame e la resina sottostante, e spazzando i residui chimici verso l'esterno dell'impronta in modo isotropo a 360 gradi.

4.3.2 Progettazione della rete fluidodinamica interna

Il redesign dell'utensile ha mantenuto inalterati i vincoli esterni di ingombro (cilindro mm, lunghezza 65 mm) e la filettatura superiore M10x1.5 (profondità 21 mm) per garantire la retrocompatibilità meccanica con la prolunga del mandrino. La vera rivoluzione progettuale si concentra nell'architettura interna.

Come si evince dalle sezioni CAD e dalla messa in tavola, l'ingresso del fluido non avviene più tramite distributore esterno, ma attraverso un **collettore laterale filettato G 1/4** integrato direttamente nel corpo dell'elettrodo. Questa protuberanza radiale permette l'avvitamento diretto della raccorderia pneumatica/idraulica proveniente dalla pompa Grundfos, sigillando il sistema e garantendo il contenimento di pressioni di mandata elevate (fino a 2-4 bar) senza trafilementi.

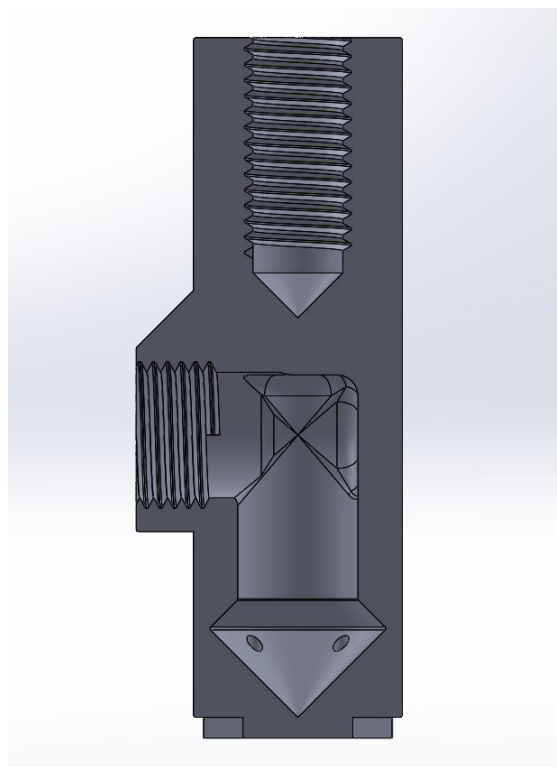


Figura 4.3-1: Vista in sezione trasversale dell'elettrodo. È visibile il plenum centrale (camera di calma) che connette l'ingresso laterale al distributore conico inferiore.

Una volta varcato l'ingresso laterale, il fluido fa il suo ingresso in un **plenum centrale** (camera di calma). Questo volume cilindrico interno ha una funzione idrodinamica vitale: funge da vaso di espansione per abbattere la velocità turbolenta del fluido in ingresso, uniformare il campo di pressione statica e preparare il liquido alla discesa verso la faccia di lavoro.

Dal plenum, il fluido viene convogliato verso il basso attraverso un **distributore a cono invertito**. La scelta di questa geometria risponde principalmente al requisito di Stampabilità accoppiata al Design for AM (DfAM), in quanto la raccordatura conica introduce un angolo di inclinazione rispetto al piano di stampa che elimina la presenza di sottoquadri (*overhangs*).

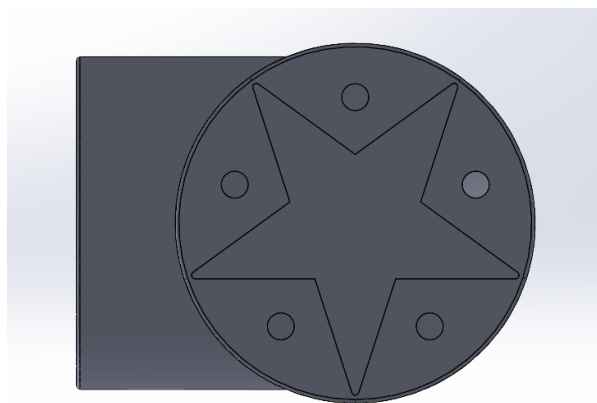


Figura 4.3-2: Vista in pianta della faccia di lavoro frontale. Si apprezza la distribuzione dei 5 fori di efflusso conformali, disposti strategicamente attorno al perimetro dell'impronta a stella.

Sulla faccia di lavoro frontale (che ospita l'impronta a stella sporgente), sono stati modellati **5 micro-orifici di efflusso, ciascuno avente un diametro di 1,5 mm**. Questi canali non sono disposti casualmente, ma seguono una logica di **lavaggio conforme**. Sono stati posizionati a raggiera attorno al perimetro della stella, concentrandosi negli "interstizi" (le concavità tra le punte della stella). In queste zone, infatti, il ricambio di elettrolita risulta più difficoltoso. I 5 getti di fluido ad alta pressione uscenti da questi micro-fori generano un effetto doccia (*shower-head effect*) all'interno del gap, garantendo che ogni singolo spigolo della geometria venga costantemente lambito da elettrolita fresco, annullando il rischio di surriscaldamento locale della resina polimerica Phrozen. Inoltre, la scelta del posizionamento degli ugelli fuori dall'impronta evita di lasciare traccia dei fori sul pezzo in lavorazione.

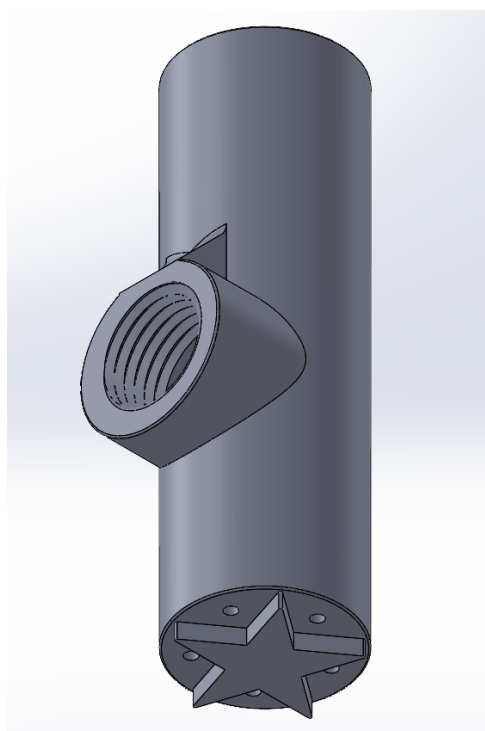


Figura 4.3-3: Vista isometrica frontale inferiore. La combinazione tra l'impronta massiva a stella e l'array di micro-canali di adduzione rende questa geometria realizzabile unicamente mediante Manifattura Additiva.

Il design di una complessa rete interna richiede la rigorosa applicazione delle regole del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), con particolare riferimento ai vincoli imposti dalla tecnologia DLP (Digital Light Processing).

In un processo di stampa 3D a fotopolimerizzazione su vasca, la creazione di cavità chiuse (come il plenum e i canali) presenta il gravoso problema dei supporti di stampa. Se la "volta" (il tetto) della camera interna fosse stata disegnata piatta (orizzontale rispetto al piano di stampa), la resina liquida non avrebbe avuto alcun appoggio strutturale durante l'indurimento dei layer sospesi nel vuoto, collassando su sé stessa e ostruendo il passaggio del fluido. Inserire strutture di supporto all'interno di una camera chiusa è un errore progettuale inaccettabile, poiché risulterebbe fisicamente impossibile rimuoverle durante la fase di *post-processing*, rendendo l'utensile inutilizzabile.

Per ovviare a questo problema, la volta della camera di distribuzione inferiore è stata progettata come una cuspide conica.

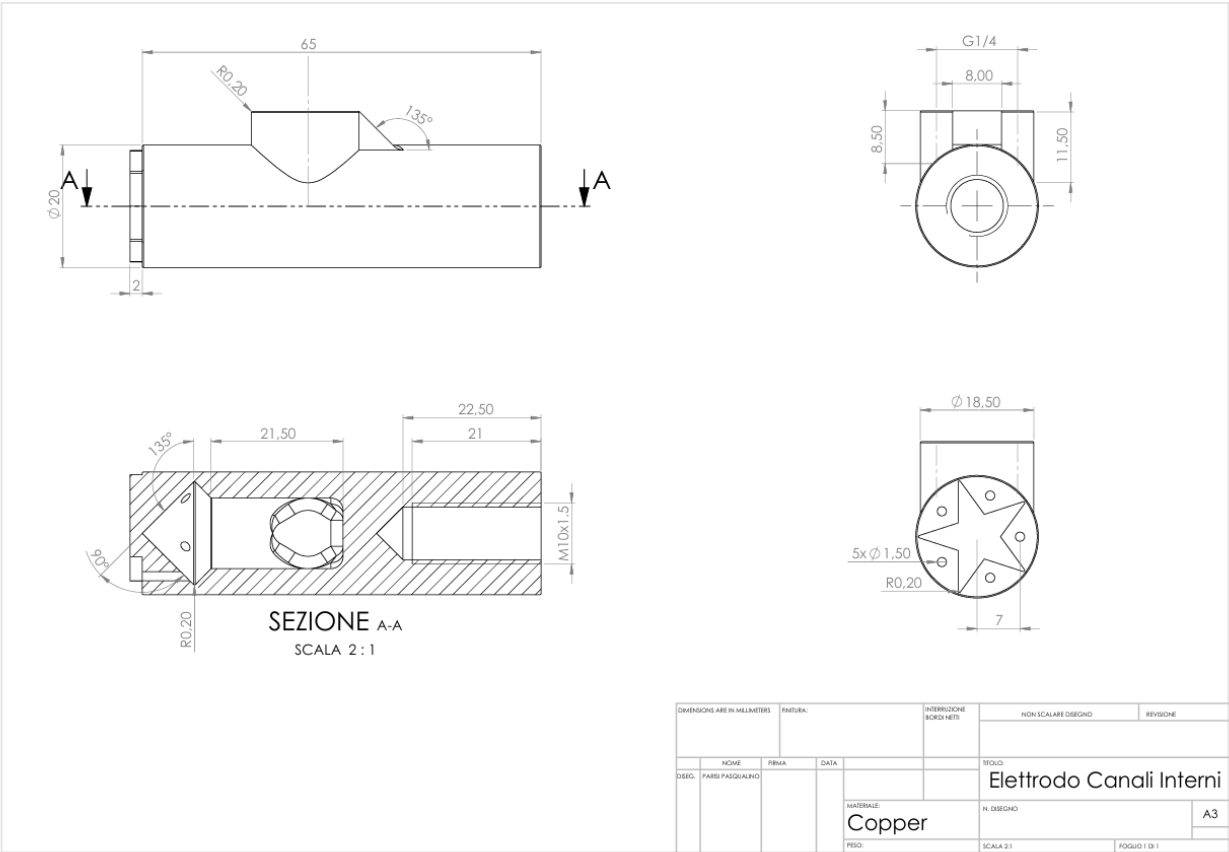


Figura 4.3-4: Messa in tavola della Fase 2. La vista in sezione A-A evidenzia l'angolo interno di 135° della volta conica, progettato secondo le regole DfAM per garantire l'auto-sostentamento in fase di stampa 3D.

Come chiaramente visibile nella sezione A-A della messa in tavola (Figura 4.3-5), la parete della volta interna è stata disegnata con un angolo di **135°** misurato rispetto alla parete cilindrica verticale, corrispondente a un **angolo di spoglia o overhang di 45°** rispetto al piano orizzontale (ed evidenziante un angolo al vertice di 90°). In manifattura additiva, **l'angolo di**

45° rappresenta la "Regola d'Oro" per le strutture auto-portanti (*self-supporting structures*).

Man mano che la stampante Anycubic costruisce il pezzo strato per strato (asse Z), le pareti a 45° si espandono verso il centro sorreggendosi reciprocamente sul layer immediatamente sottostante (effetto a sbalzo). Questa specifica scelta geometrica permette di stampare l'intero volume vuoto interno senza la necessità di generare un singolo supporto sacrificale.

Inoltre, il post-processo di un pezzo così complesso beneficia enormemente del bagno a ultrasuoni in Alcool Isopropilico (IPA) descritto nel Capitolo 3: l'IPA viene iniettato a forza dal collettore laterale, attraversa la camera auto-portante e fuoriesce dai 5 orifizi frontali, assicurando che le onde di cavitazione liberino perfettamente i condotti da 1,5 mm da ogni residuo di resina non reticolata prima del *curing* definitivo sotto i LED UV.

La sinergia tra le necessità fluidodinamiche del processo ECM e i vincoli geometrici imposti dalla stampa DLP ha portato a un componente che fonde leggerezza, efficienza idraulica e ottimizzazione topologica, elevando nettamente le performance dell'utensile ibrido.

4.4 CRITERI ESSENZIALI DI DIMENSIONAMENTO DEL PROCESSO ECM

La progettazione tridimensionale dell'elettrodo ibrido (sia nella configurazione a flussaggio trasversale della Fase 1, sia in quella ottimizzata della Fase 2) definisce la topologia e le capacità fluidodinamiche dell'utensile. Tuttavia, la reale asportazione del materiale e la stabilità termo-meccanica del nucleo polimerico durante la lavorazione dipendono dal corretto bilanciamento dei parametri operativi di macchina.

A differenza delle lavorazioni per asportazione di truciolo, in cui la cinematica definisce direttamente la geometria tagliata, l'Electrochemical Machining è un processo di dissoluzione anodica a livello atomico. Il dimensionamento teorico del processo si basa su principi elettrochimici macroscopici, i quali permettono di stimare a priori i parametri da impostare sul controllo numerico della macchina e sull'alimentatore, garantendo al contempo la salvaguardia della resina.

4.4.1 La Legge di Faraday e il Tasso di Asportazione (MRR)

Per la valutazione quantitativa del materiale asportato dal pezzo in lavorazione (anodo) durante i test, i dati sperimentali sono stati confrontati con i modelli teorici derivati dalla **Legge di Faraday**, già discussa nel Capitolo 2.

A partire dal volume geometrico rimosso e dal tempo di lavorazione, è stato calcolato il *Material Removal Rate* (MRR) volumetrico sperimentale [mm^3/s]. Questo valore è stato messo in relazione con l'MRR teorico al fine di determinare l'efficienza di corrente del processo (η), definita come:

$$\eta = \frac{\text{MRR}_{\text{sperimentale}}}{\text{MRR}_{\text{teorico}}}$$

In laboratorio, il valore teorico di asportazione non viene mai raggiunto ($\eta < 1$). Una frazione dell'energia elettrica fornita viene infatti dissipata in reazioni parassite secondarie (come lo sviluppo di ossigeno all'anodo) o in calore per Effetto Joule. Questa equazione permetterà, durante i test pratici, di calcolare a priori il tempo necessario per scavare l'impronta a stella alla profondità desiderata, semplicemente leggendo il valore di corrente continua o media sul display dell'alimentatore.

4.4.2 Dinamica del Meato Interelettrodico (Equilibrium Working Gap)

Il parametro cinematico più critico da impostare sulla macchina IMPULSE 50 è la velocità di avanzamento del mandrino (asse Z), indicata con f [mm/min o mm/s]. Affinché il processo sia stabile e l'elettrodo polimerico non si schianti contro il pezzo in metallo, il sistema deve raggiungere una condizione di stato stazionario.

Durante la discesa dell'utensile, la distanza fisica tra la faccia ramata dell'elettrodo e il pezzo (il *working gap*, indicato con g) si assesta dinamicamente su un valore di equilibrio g_e . A questo valore, la velocità con cui l'utensile avanza eguaglia perfettamente la velocità lineare di dissoluzione del metallo sottostante.

Assumendo l'elettrolita come un conduttore ohmico, l'espressione analitica del gap di equilibrio si ricava bilanciando la Legge di Ohm con la Legge di Faraday:

$$g_e = \eta \cdot \frac{M}{z \cdot F \cdot \rho} \cdot \frac{\kappa \cdot (U - \Delta U)}{f}$$

Dove:

- κ è la conducibilità elettrica specifica dell'elettrolita (acqua salata) [S/cm].
- U è la tensione operativa impostata sull'alimentatore (tipicamente tra 5 V e 20 V) [V].
- ΔU è la sovratensione termodinamica di polarizzazione agli elettrodi (una caduta di tensione fisiologica all'interfaccia metallo-fluido) [V].
- f è la velocità di avanzamento (feed rate) [cm/s].

Implicazioni pratiche per l'elettrodo ibrido: L'equazione del g_e governa le scelte operative in laboratorio.

- Se si imposta un avanzamento f troppo elevato, il gap g_e si riduce drasticamente. Questo aumenta il rischio di cortocircuiti e innalza esponenzialmente la temperatura locale, portando a sicura fusione termica il nucleo in resina 4K (che possiede un HDT di soli 70 °C).
- Al contrario, se l'avanzamento f è troppo basso, il gap si allarga eccessivamente. Le linee del campo elettrico divergono, causando una perdita di accuratezza geometrica e lo smussamento degli spigoli vivi dell'impronta a stella.

La risoluzione micrometrica (1 μm) della IMPULSE 50 è proprio ciò che consente di ricercare il bilanciamento perfetto di f per mantenere un gap costante di 20-50 μm .

4.4.3 Gestione del regime pulsato (PECM) e bilancio termico

L'utilizzo di un elettrodo con nucleo in resina impone una fortissima limitazione termica che un elettrodo in rame massivo non avrebbe. Se si operasse in corrente continua (DC) pura, il calore generato per Effetto Joule ($P = U \cdot I$) sulla sottile pelle di rame non potrebbe fare in tempo a disperdersi nel volume circostante, accumulandosi sull'interfaccia polimerica e causando la distruzione dell'utensile.

Per ovviare a questo limite, i test in laboratorio potrebbero essere condotti sfruttando la tecnologia **PECM (Pulsed Electrochemical Machining)**, resa possibile dall'architettura switching ad alta frequenza dell'alimentatore XINGTONGLI. Invece di erogare corrente in modo continuo, la tensione viene fornita sotto forma di treni di impulsi rettangolari.

Il ciclo è definito dal tempo di accensione (t_{on}) e dal tempo di pausa (t_{off}), il cui rapporto definisce il **Duty Cycle (DC)**:

$$DC = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}$$

Dal punto di vista della salvaguardia dell'utensile ibrido, la dinamica pulsata è risolutiva:

1. **Fase t_{on} (Riscaldamento ed Erosione):** La corrente fluisce, il metallo del pezzo viene asportato e la temperatura all'interfaccia rame/resina subisce un picco transitorio.
2. **Fase t_{off} (Raffreddamento e Lavaggio):** La corrente si azzerà. Durante questi millisecondi di pausa, non viene generato nuovo calore, ma la pompa Grundfos continua a iniettare elettrolita freddo a pressione costante (sia lateralmente nella Fase 1, sia conformemente nella Fase 2). Il flusso asporta istantaneamente il calore latente, riportando la temperatura della resina a livelli di sicurezza (20-30 °C) ben prima dell'inizio dell'impulso successivo.

Di conseguenza, l'utilizzo del regime PECM pone una riduzione proporzionale della velocità di lavorazione, poiché il Tasso di Asportazione Effettivo (MRR_{PECM}) risulta attenuato dal Duty Cycle: $MRR_{PECM} = MRR \cdot DC$. Tuttavia, in ambito di *Rapid Tooling* polimerico, questo compromesso è imprescindibile per garantire la sopravvivenza stessa dell'elettrodo.

4.4.4 Stima dell'Overcut e dimensionamento delle tolleranze (Gap Laterale)

Un'ultima considerazione teorica essenziale per la progettazione e l'impiego dell'elettrodo a stella riguarda l'**Overcut laterale**. L'asportazione elettrochimica non è confinata esclusivamente alla faccia frontale dell'elettrodo. A causa della natura isotropa del fluido conduttivo, le linee di campo elettrico "sfuggono" anche dalle pareti laterali dell'utensile.

Questo fenomeno comporta che la cavità finale ricavata sul pezzo in lavorazione sarà sempre fisiologicamente più larga (di un fattore radiale tipicamente compreso tra i 0.1 mm e i 0.5 mm) rispetto alla geometria nominale. La gestione dell'overcut non richiede complesse equazioni di campo in questa sede, ma si risolve attraverso un processo di taratura empirica sul macchinario (modulando il voltaggio e la conducibilità) e applicando, nei futuri cicli di sviluppo DfAM, un *offset* negativo al modello CAD, ridimensionando l'elettrodo affinché "sottocompensi" preventivamente l'allargamento della zona di scavo.

CAPITOLO 5: CAMPAGNA SPERIMENTALE E ANALISI DEI RISULTATI

I capitoli precedenti hanno delineato il percorso di ricerca e sviluppo necessario per la transizione dalla manifattura di utensili tradizionali massivi verso il paradigma dell'*Hybrid Tooling* in ambito ECM (Electrochemical Machining). Dopo aver analizzato le proprietà termomeccaniche dei fotopolimeri, ottimizzato il processo di metallizzazione chimico-fisica e implementato i criteri del *Design for Additive Manufacturing* (DfAM) per la progettazione fluidodinamica avanzata dell'elettrodo, il presente capitolo ha l'obiettivo di trasferire e validare l'intero impianto teorico sul banco di prova reale.

La campagna sperimentale qui documentata rappresenta il collaudo empirico dell'elettrodo ibrido (costituito da un nucleo in resina stampato in DLP e funzionalizzato con un *coating* galvanico in rame). L'obiettivo primario della sperimentazione non è unicamente dimostrare la fattibilità dell'asportazione elettrochimica mediante un utensile plastico, ma quantificarne oggettivamente le performance in termini di tassi di asportazione (MRR), fedeltà geometrica dell'impronta (gestione dell'*overcut*) e qualità della finitura superficiale ottenuta sul pezzo in lavorazione.

Per condurre tale validazione, le prove sono state eseguite su piastre in lega di alluminio **AlSi10Mg**, impiegando il centro di lavoro **IMPULSE ECM 50**. Al fine di esplorare in modo sistematico lo spazio dei parametri operativi e isolare l'influenza delle singole variabili di processo, la campagna di test è stata strutturata secondo una progressione metodologica rigorosa:

1. **Test Preliminari di Flussaggio:** Una prima fase dedicata alla taratura idraulica del sistema per individuare la pressione ottimale di esercizio della pompa, fondamentale per garantire un lavaggio conformale efficace senza innescare stress meccanici eccessivi per il rivestimento in rame.
2. **Lavorazione in Regime Statico:** Una campagna volta a indagare l'erosione a gap variabile nel tempo, mantenendo l'utensile fermo, per studiare l'influenza diretta della tensione (12 V vs 24 V) e del tempo di esposizione sull'evoluzione della rugosità superficiale.
3. **Lavorazione in Regime Dinamico:** Il nucleo centrale della sperimentazione, in cui l'avanzamento controllato dell'asse Z (Feed Rate) ha permesso di valutare l'asportazione in condizioni di gap di equilibrio stazionario, simulando le reali condizioni di affondamento industriale.
4. **Test di Perforazione Passante:** Un collaudo estremo per determinare i limiti cinematici dell'elettrodo e l'insorgenza di criticità come i cortocircuiti ad alti tassi di avanzamento.

Tutti i risultati ottenuti in macchina sono stati successivamente sottoposti a una rigorosa analisi metrologica. Attraverso l'impiego di strumentazione ottica avanzata — tra cui uno stereoscopico Nikon SMZ1270 per la quantificazione macroscopica dell'*overcut* radiale e un

microscopio confocale 3D (Nikon Eclipse LV150N) per l'estrazione dei parametri di rugosità areale (S_a , S_z) — è stato possibile calcolare e confrontare il *Material Removal Rate* (MRR) teorico e sperimentale.

Infine, l'esito più atteso e critico della trattazione consisterà nella valutazione post-processo dell'integrità strutturale dell'elettrodo stesso. Si dimostrerà come il DfAM a canali interni conformali abbia permesso di bypassare i severi limiti termici (HDT) della resina acrilica, consentendo all'utensile ibrido di sopravvivere all'intera e prolungata campagna prove senza manifestare alcun segno di delaminazione, usura o cedimento strutturale, confermando così la validità tecnologica della soluzione proposta.

5.1 PREPARAZIONE FINALE DELL'ELETTRODO IBRIDO E SETUP DI MACCHINA

La fase propedeutica all'avvio della campagna sperimentale ha richiesto la validazione dimensionale e strutturale dell'elettrodo ibrido a seguito dell'intero ciclo di manifattura e post-processo. Dopo aver completato la fase di stampa 3D mediante tecnologia DLP, il lavaggio in bagno a ultrasuoni e il ciclo di post-curing UV, l'utensile polimerico è stato sottoposto al processo di funzionalizzazione superficiale tramite elettrodeposizione galvanica massiva, come dettagliato nel Capitolo 3.

5.1.1 Verifica metrologica e calcolo della sezione conduttiva

Al fine di garantire l'integrità strutturale del guscio metallico e la sua capacità di sopportare i carichi elettrici e termici imposti dal processo ECM, il processo di elettrodeposizione all'interno del bagno termostato di solfato rameico è stato protratto per una durata complessiva di circa **8 ore**.

Terminato il ciclo di accrescimento catodico, l'utensile è stato estratto, neutralizzato e asciugato per procedere con i rilievi metrologici. Sfruttando un calibro digitale centesimale, è stata condotta una misurazione del diametro esterno del cilindro in molteplici sezioni trasversali per valutare l'effettivo accrescimento radiale del rame.

Essendo noto dal modello CAD e dalle misurazioni pre-galvanica che il diametro nominale iniziale del core polimerico era pari a $D_i = 20,00$ mm, la rilevazione ha restituito un diametro esterno finale pari a $D_f = 20,50$ mm.

Questa variazione dimensionale indica una deposizione omogenea su tutta la superficie cilindrica. Da tali valori macroscopici, è possibile ricavare lo spessore medio radiale del *coating* di rame, pari a 0,25 mm (250 μ m), un valore eccellente che conferisce un'elevata robustezza termo-meccanica al componente ibrido.

Dal punto di vista elettrico, il dato più rilevante per la successiva lavorazione ECM è l'effettiva **sezione conduttiva utile (A)**, ovvero l'area della corona circolare di rame deputata al trasporto della corrente elettrica dal mandrino verso la zona di scavo frontale. Questa sezione è stata calcolata analiticamente come la differenza tra l'area del cerchio esterno finale e l'area del nucleo plastico isolante interno:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_f^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (20,50^2 - 20,00^2) = 15,90 \text{ mm}^2$$

Disporre di una sezione netta di rame massiccio di quasi 16 mm² rappresenta un margine di sicurezza ingegneristico fondamentale: tale area garantisce un'adeguata "autostrada" per il deflusso degli elettroni, abbattendo la resistenza ohmica intrinseca dell'utensile e riducendo al minimo lo sviluppo di calore per Effetto Joule, scongiurando il superamento della Temperatura di Deflessione Termica (HDT) della resina sottostante.



Figura 5.1-1: *Elettrodo ibrido a valle del processo di elettrodeposizione galvanica massiva, caratterizzato da uno spessore di rame depositato di 0,25 mm. Il componente è pronto per l'installazione sul mandrino per i test ECM.*

5.1.2 Materiale in lavorazione (Workpiece) e fluido elettrolitico

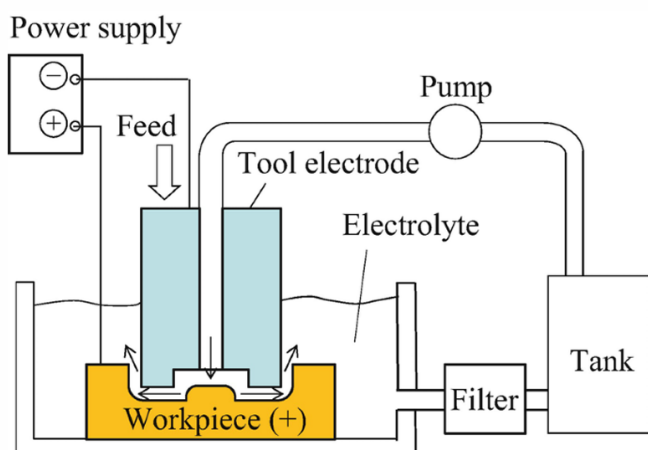
Per valutare le capacità erosive dell'elettrodo ibrido, l'intera campagna sperimentale è stata condotta selezionando come materiale target l'**AlSi10Mg**, una lega di alluminio-silicio-magnesio diffusamente impiegata nell'industria aerospaziale e automobilistica, nonché materiale d'elezione per la manifattura additiva metallica (SLM/DMLS). La scelta di questa specifica lega è motivata dalla sua eccellente resistenza meccanica e leggerezza.

Per i test sono state predisposte delle piastre rettangolari piane di AlSi10Mg con uno spessore variabile tra i **2 e i 3 mm**, recuperate e preparate presso l'officina del laboratorio universitario. Come elettrolita per innescare la dissoluzione anodica, in virtù della reattività chimica dell'alluminio, si è optato per una soluzione acquosa salina standard a base di cloruro di sodio (**NaCl**).

5.1.3 Setup della macchina IMPULSE ECM 50 e strategia di lavorazione

Le operazioni di *machining* elettrochimico sono state eseguite impiegando il centro di lavoro **IMPULSE ECM 50**, prodotto dalla PECM Systems LTD (Barnsley, Regno Unito). Questo sistema industriale è progettato per garantire il controllo micrometrico dell'avanzamento dell'utensile e l'erogazione di correnti elevate, operando all'interno di una camera chiusa (Work volume: 400 x 162 x 147 mm³) che permette la gestione in sicurezza dei fluidi in pressione. L'apparecchiatura è dotata di un'interfaccia che consente di programmare cicli in modalità statica (senza avanzamento asse Z) e dinamica (con *feed rate* impostato), supportando sia l'erogazione in Corrente Continua (DC) che Pulsata (PECM).

Schema della macchina



Schema della cella

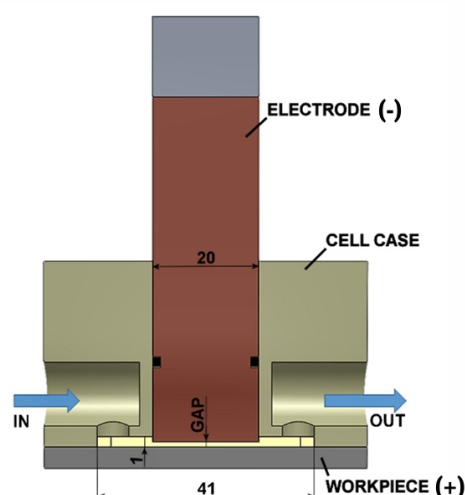


FIGURA 5.1-2: Schema Macchina ECM

Di seguito sono riportate le specifiche nominali del macchinario utilizzato:

Tabella 5.1

Specifiche tecniche dell'equipaggiamento ECM (IMPULSE ECM 50)

Parametro	Range Operativo / Valore
Corrente massima erogabile (Current)	0-1,000 A
Tensione operativa (Voltage)	0-24 V
Modalità di corrente (Current mode)	Continua (DC) e Pulsata
Tempo minimo di impulso (Minimum pulse time)	1 ms
Velocità di avanzamento (Feed rate)	0.1-1,000 mm/min
Volume di lavoro utile (x, y, z)	400x162x147 mm ³

La scelta della modalità a Corrente Continua (DC)

Uno degli aspetti metodologici più rilevanti dell'impostazione della campagna sperimentale ha riguardato la selezione del regime di erogazione della corrente. Nonostante la letteratura accademica e le considerazioni teoriche del Capitolo 4 suggerissero l'impiego della modalità in corrente pulsata (PECM) per mitigare il carico termico sul core in resina, **tutti i test documentati in questo lavoro sono stati condotti esclusivamente in modalità Corrente Continua (DC).**

Tale decisione ha risposto a una precisa strategia sperimentale: trattandosi di prove preliminari e di una prima validazione di questa specifica tipologia di utensili, l'obiettivo primario era **ridurre al minimo il numero di variabili indipendenti del sistema**. L'adozione della modalità DC ha permesso infatti di escludere parametri complessi e interconnessi come il *Duty Cycle* e la frequenza di impulso, consentendo di analizzare gli effetti diretti della tensione (modulata nel range 12 V – 24 V), del *feed rate* e della pressione idrodinamica sulle geometrie asportate, impostando un limite massimo di sicurezza sulla corrente a 300 A.

Sebbene non si sia proceduto a una mappatura termica diretta della temperatura interna del meato durante la lavorazione, l'efficacia del sistema di lavaggio conforme a canali interni (progettato in ottica DfAM) è stata confermata *a posteriori* dall'ottimo stato di conservazione dell'utensile, preservare l'integrità strutturale del core polimerico, prevenendo rammollimenti o distorsioni macroscopiche anche sotto il regime termico ininterrotto tipico della corrente continua.

5.2 TEST PRELIMINARI: OTTIMIZZAZIONE FLUIDODINAMICA E REDESIGN GEOMETRICO

L'introduzione della configurazione avanzata con canali interni conformali (Fase 2) ha risolto le criticità teoriche legate all'asimmetria termica e all'accumulo di fanghi tipiche del lavaggio trasversale (*cross-flow*). Tuttavia, la gestione di un flusso in pressione dall'interno verso l'esterno del *working gap* introduce nuove variabili di processo che necessitano di un'accurata taratura empirica. L'elettrolita (soluzione di NaCl) riveste infatti un triplice ruolo: chiude il circuito elettrico consentendo il passaggio degli ioni, asporta i prodotti di reazione (idrossidi e idrogeno gassoso) e funge da fluido termovettore per la dissipazione del calore generato per Effetto Joule.

Risulta pertanto evidente come la fluidodinamica all'interno del meato abbia un impatto decisivo sull'accuratezza della lavorazione ECM. Una pressione di mandata insufficiente provocherebbe l'ebollizione locale dell'elettrolita e la stagnazione dei residui, innescando cortocircuiti distruttivi. Al contrario, una pressione eccessiva genererebbe flussi turbolenti disordinati in grado di lasciare segni idrodinamici sulla superficie lavorata, oltre a sottoporre l'adesione del *coating* in rame a sforzi di taglio (*shear stress*) critici. L'obiettivo della campagna di test preliminari è stato proprio l'individuazione della pressione idraulica ottimale, valutando i risultati visivi sul pezzo target e l'assenza di imperfezioni o scalini sull'impronta impressa.

5.2.1 Impostazione della campagna di taratura idraulica

I test di calibrazione sono stati condotti impiegando l'elettrodo ibrido in configurazione a canali interni. La macchina IMPULSE ECM 50 gestisce la potenza della pompa tramite un'interfaccia digitale, permettendo l'impostazione percentuale della potenza. La campagna ha previsto una scansione sistematica della pressione, partendo da un valore minimo del 10% fino a un massimo del 55%, con incrementi discreti di 5 punti percentuali per ogni prova (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55).

Per quantificare fisicamente questi valori percentuali in unità ingegneristiche, è stato impiegato un manometro: la mappatura ha rivelato che un'impostazione del 35% genera una pressione effettiva di 1 bar; il 45% corrisponde a 2 bar, mentre il 55% eroga 3 bar.

Tutte le prove preliminari (eccetto una in modalità statica di controllo) sono state eseguite mantenendo costanti i parametri elettrici e cinematici:

- **Tensione operativa:** 12 V, in regime di Corrente Continua (DC).
- **Cinematica:** Modalità dinamica con velocità di avanzamento (*feed rate*) della discesa dell'elettrodo fissata a 0,1 mm/min.
- **Dinamica del gap:** Corsa dell'utensile programmata con un gap iniziale di 0,200 mm e spostamento fino alla coordinata 0,000 mm.

Come dettagliato nella Tabella 5.2, per ogni test sono stati monitorati e registrati i valori di corrente all'inizio e alla fine della prova, utili per valutare la stabilità della conducibilità elettrica del meato al variare del regime di flusso. L'analisi ha inoltre confermato un efficiente passaggio di corrente tra la barra di collegamento in alluminio e l'elettrodo.

Tabella 5.2

Risultati Test Preliminari

Mode	Pump Pressure, %	Voltage, V	Feed Rate, mm/min	Machining Time, s	Initial Gap, mm	Final Gap, mm	Initial Current, A	Final Current, A
Dynamic	10	12	0.1	...	0.2	0.0	24	22
Dynamic	15	12	0.1	...	0.2	0.0	22	19
Dynamic	20	12	0.1	...	0.2	0.0	23	19
Dynamic	25	12	0.1	...	0.2	0.0	22	18
Dynamic	30	12	0.1	...	0.2	0.0	22	18
Static	30	12	...	120	0.2	...	22	19
Dynamic	35	12	0.1	...	0.2	0.0	20	18
Dynamic	40	12	0.1	...	0.2	0.0	17	16
Dynamic	45	12	0.1	...	0.2	0.0	20	15
Dynamic	50	12	0.1	...	0.2	0.0	27	20
Dynamic	55	12	0.1	...	0.2	0.0	25	16

Tabella 5.2: *Risultati della campagna di test preliminari al variare della pressione della pompa.*

5.2.2 Valutazione della pressione ottimale

L'analisi visiva delle impronte a stella realizzate sulla piastra in lega AlSi10Mg ha fornito indicazioni inequivocabili sull'influenza del campo fluidodinamico. L'obiettivo era ricercare la riduzione della rugosità superficiale e l'assenza di segni lasciati dal flusso del fluido elettrolita.

Esaminando la progressione dei test, il risultato ottimale è stato individuato nel provino lavorato con una **Pressione della pompa impostata al 45%, corrispondente a 2 bar**. A questa pressione operativa, l'impronta si è presentata priva di scalini, denotando un bilanciamento perfetto tra la capacità di evacuazione dei fanghi chimici e l'assenza di moti turbolenti ad alta energia che avrebbero compromesso la planarità del fondo. Di conseguenza, il parametro $P = 45\%$ è stato eletto come standard operativo per tutte le prove dinamiche, statiche e di perforazione successive.



Figura 5.2-1: *Impronta di validazione evidenziata (nel cerchio rosso) ottenuta con una pressione di esercizio pari al 45% (2 bar), selezionata per la pulizia del fondo e la definizione dei bordi.*

5.2.3 Redesign DfAM: Il fenomeno dell'impronta parassita e l'offset a 5 mm

Durante l'esecuzione di questi test di calibrazione, l'ispezione ottica delle cavità ha portato alla luce un fenomeno elettrochimico inatteso e di rilevante interesse scientifico. Si è evidenziato infatti che, oltre all'impronta della stella desiderata, sul fondo del pezzo in lavorazione si imprimevano chiaramente anche le deboli sagome circolari dei micro-orifizi di adduzione del fluido.

Dal punto di vista della fisica del processo ECM, la spiegazione di questa lavorazione parassita risiede nella distribuzione del campo elettrico all'interno dello spazio tridimensionale del meato. Nella primissima versione dell'elettrodo ottimizzato, la geometria a stella possedeva un'estrusione (offset) di base di soli **2 mm** rispetto alla faccia piana retrostante che ospitava i fori di mandata. Poiché l'elettrolita inondava l'intero volume sottostante l'utensile, la distanza di 2 mm non era sufficiente ad azzerare il gradiente di

potenziale: le linee di corrente si chiudevano intensamente anche tra i bordi ramati dei forellini e la piastra di alluminio. La densità di corrente in quelle specifiche aree superava la soglia minima di dissoluzione anodica dell'alluminio, generando una "copia" indesiderata dell'array di fori sul pezzo.

Per sopprimere questo difetto, si è reso necessario un intervento di *redesign* al CAD, sfruttando appieno la reattività garantita dal *Rapid Tooling* additivo. Il modello solido è stato modificato incrementando l'estrusione (offset) della stella da 2 mm a **5 mm**.

Aumentando la quota di offset, l'obiettivo era distanziare ulteriormente i forellini dal pezzo in lavorazione. Secondo la Legge di Ohm per i conduttori ionici, la resistenza elettrica del meato aumenta proporzionalmente con la distanza interelettrodica. Portando tale distanza a oltre 5 mm, la resistenza ohmica locale è cresciuta a tal punto da abbattere drasticamente la densità di corrente in prossimità dei fori, portandola al di sotto del valore critico necessario per l'erosione.

L'elettrodo così modificato è stato tempestivamente ristampato, funzionalizzato e collaudato. L'adozione di questa configurazione definitiva a 5 mm ha garantito la totale scomparsa delle impronte parassite, validando l'utensile che verrà impiegato per l'intera campagna di test formale descritta nei successivi paragrafi.



Figura 5.2-2: Configurazione finale dell'elettrodo ibrido, equipaggiato con raccordo pneumatico per filettatura gas 1/4. Si osserva l'impronta a stella estrusa a 5 mm, modifica fondamentale per sopprimere l'asportazione parassita in corrispondenza degli orifizi.

5.3 METODOLOGIA METROLOGICA E CALCOLO DEL MATERIAL REMOVAL RATE (MRR)

La valutazione quantitativa e qualitativa delle performance di un processo di lavorazione non convenzionale come l'ECM richiede un approccio metrologico rigoroso. A differenza delle lavorazioni meccaniche tradizionali, dove le tolleranze sono imposte dalla cinematica della macchina utensile, l'erosione elettrochimica genera superfici complesse, la cui topografia e fedeltà geometrica dipendono dalla distribuzione del campo elettrico e dalla fluidodinamica del meato.

Al fine di caratterizzare l'efficienza di asportazione dell'elettrodo ibrido stampato in DLP e l'impatto dei parametri operativi (tensione, *feed rate*, *gap*) sulla lega target AlSi10Mg, è stata definita una pipeline di misurazione basata su tecniche di microscopia ottica e sulla successiva elaborazione matematica del *Material Removal Rate* (MRR) in volume.

5.3.1 Rilievi di topografia e rugosità superficiale (Microscopia Confocale)

La finitura superficiale rappresenta uno dei principali indicatori di qualità del processo ECM. Un'asportazione uniforme, priva di *pitting* (vaiolatura) e di micro-cricche termiche, è fondamentale per le applicazioni industriali. Per evitare i limiti della rugosimetria a contatto (la quale restituisce solo profili lineari 2D e rischia di graffiare le superfici in alluminio), la misurazione della topografia del fondo della cavità è stata condotta impiegando un microscopio ottico confocale **Nikon Eclipse LV150N** integrato con modulo confocale **Confovis**.

Questo strumento permette la ricostruzione tridimensionale ad altissima fedeltà della superficie erosa, operando secondo le seguenti condizioni di acquisizione:

- **Ottica e Risoluzione:** È stato impiegato un obiettivo microscopico con fattore di ingrandimento $20\times$. Il sistema ha garantito una risoluzione laterale (nel piano X-Y) di $0,595\text{ }\mu\text{m}$, accoppiata a una quantizzazione verticale (asse Z) di soli $16,8\text{ nm}$. L'altezza del singolo strato ottico scansionato è stata impostata a $0,2\text{ }\mu\text{m}$.
- **Campionamento:** L'area base scansionata in singola esposizione è stata pari a $(0,85 \times 0,85)\text{ mm}^2$. Per mappare porzioni più ampie del fondo dell'impronta a stella, il software di controllo ha eseguito lo *stitching* automatico dei campi visivi adiacenti.
- **Elaborazione del segnale:** Per isolare esclusivamente le micro-asperità della rugosità dalla macro-forma della cavità (ovvero per eliminare eventuali concavità o pendenze globali del fondo), la mappa grezza è stata trattata con un filtro di rimozione della forma tramite polinomio di primo grado. Inoltre, i picchi anomali derivanti da rumore ottico sono stati soppressi applicando un filtraggio a soglia bilaterale simmetrica, preservando unicamente il materiale compreso tra lo 0,01% e il 99,99%.

L'analisi della mappa 3D risultante ha permesso di calcolare i parametri di rugosità areale in stretta conformità alla normativa internazionale **ISO 25178**. I parametri estratti e documentati nelle tabelle riassuntive comprendono:

- **S_a (Altezza media aritmetica):** Parametro di riferimento principale che esprime la deviazione media assoluta delle altezze rispetto alla superficie media. È stato eletto a parametro cardine dell'analisi in quanto fornisce una misurazione statisticamente completa e stabile dell'intera morfologia superficiale.
- **S_z (Altezza massima):** Somma della massima altezza dei picchi (S_p) e della massima profondità delle valli (S_v). In ambito ECM, un valore elevato di S_z è indice di *pitting* localizzato, scintille anomale o disomogeneità nella dissoluzione dei precipitati di silicio dell'AlSi10Mg.
- **S_q (Altezza quadratica media):** Valore RMS (Root Mean Square) delle altezze, maggiormente sensibile alle deviazioni estreme rispetto al parametro S_a .
- **S_{sk} e S_{ku} (Skewness e Curtosi):** Rispettivamente, l'asimmetria e la "ripidezza" della distribuzione delle altezze. Una superficie con S_{sk} negativo indica una topografia dominata da valli (tipico dei difetti da micro-bolle di idrogeno), mentre il valore di curtosi definisce se le asperità sono arrotondate o costituiscono picchi taglienti.

Le mappe confocali 3D sono state infine impiegate per estrarre la misura esatta della profondità di scavo dell'impronta (Δz), dato indispensabile per il calcolo dei volumi asportati.

5.3.2 Analisi dell'overcut e quantificazione geometrica dell'impronta

A causa della natura isotropa della conduzione ionica all'interno dell'elettrolita, le linee del campo elettrico si propagano non solo perpendicolarmente alla faccia frontale dell'elettrodo, ma sfuggono radialmente anche dai bordi e dai fianchi. Questo fenomeno, universalmente noto come *overcut* (soprataglio), comporta che la geometria finale scavata nel pezzo risulti fisiologicamente più larga e arrotondata rispetto alla geometria solida CAD dell'utensile.

Per quantificare macroscopicamente l'overcut e ricostruire l'area reale effettivamente asportata, si è ricorsi all'utilizzo di uno **Stereomicroscopio Nikon SMZ1270** (Nikon, Giappone). Questo strumento è stato impostato con un fattore di zoom dell'obiettivo principale di $0,63 \times$ e un oculare di $10 \times$, permettendo l'acquisizione di immagini ottiche calibrate in alta risoluzione dell'intera impronta.

L'elaborazione delle immagini ha permesso di misurare il raggio effettivo della circonferenza circoscritta all'impronta (R), calcolato tracciando una circonferenza passante per i 5 punti estremi corrispondenti ai vertici della geometria a stella.

Calcolo dell'Area Reale di lavorazione (Fattore Sperimentale)

Il calcolo dell'area è il punto più delicato per la corretta stima del volume asportato. La geometria di partenza, generata al CAD, è una stella a 5 punte inscritta in una circonferenza

di raggio R . Dal punto di vista della pura geometria solida, una stella ideale con spigoli vivi possiede un'area pari a circa $1,12 \cdot R^2$.

Tuttavia, osservando l'impronta reale impressa sul metallo, è apparso evidente come la forma risultante non fosse più una stella geometrica perfetta. Si sono palesati due fenomeni di erosione parassita:

1. L'arrotondamento pronunciato dei vertici interni (le valli interposte tra le punte della stella), che si sono allargate smussando gli spigoli.
2. L'ispessimento e l'arrotondamento dei fianchi delle punte stesse.

A causa dell'overcut, la forma asportata "invade" progressivamente il volume vuoto, avvicinandosi morfologicamente a un pentagono sfumato o a un cerchio. Per tenere conto di questa asportazione aggiuntiva, è stato introdotto un fattore correttivo sperimentale. L'analisi d'immagine ha dimostrato che la stella ECM reale finisce per occupare circa il **75% dell'area del cerchio circoscritto**.

Ricordando che l'area del cerchio è data da $A = \pi \cdot R^2 \approx 3,1416 \cdot R^2$, l'equazione dell'area effettiva dell'impronta reale ($A_{effettiva}$) si esprime come:

$$A_{effettiva} \approx 0,75 \cdot (\pi \cdot R^2) \approx 0,75 \cdot (3,1416 \cdot R^2) \approx 2,35 \cdot R^2$$

Questa espressione analitica ($Area = 2,35 \cdot R^2$) incorpora intrinsecamente gli effetti dell'allargamento del gap laterale. L'overcut e l'arrotondamento dei profili hanno infatti comportato un aumento dell'area asportata di un fattore ragguardevole rispetto alla stringente geometria ideale del CAD.

5.3.3 Modello teorico e sperimentale del Material Removal Rate (MRR)

L'efficienza del processo è stata validata confrontando il tasso di asportazione teorico dettato dalla fisica (Elettrolisi di Faraday) con il tasso di asportazione sperimentale (volumetrico reale misurato ex-post).

Calcolo del MRR Teorico

L'equazione fondamentale di Faraday stabilisce che la massa m asportata nel tempo t è proporzionale all'intensità di corrente I :

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{F \cdot Z} \Rightarrow MRR_{massa} = \frac{m}{t} = \frac{M}{F \cdot Z} \cdot I$$

Dove M è la massa molare, Z è la valenza e F è la Costante di Faraday (96.485 C/mol). Poiché il materiale in lavorazione non è un elemento puro bensì una lega (**AlSi10Mg**), la formula deve essere riscritta ponderando i contributi delle frazioni in peso (x_i), delle valenze (Z_i) e dei pesi atomici (A_i) degli elementi costituenti principali:

$$MRR_{massa} = \frac{1}{F \cdot \sum \left(\frac{x_i \cdot Z_i}{A_i} \right)} \cdot I$$

Per la lega in esame, standardizzata sui valori nominali, sono stati considerati i seguenti contributi (Tabella 5.3):

Tabella 5.3: Composizione e parametri elettrochimici della lega AlSi10Mg

Elemento (i)	Frazione in peso (x_i)	Valenza chimica (Z_i)	Peso Atomico (A_i) (g/mol)
Al	89,5%	3	26,98
Si	10,0%	4	28,09
Mg	0,5%	2	24,31

Sviluppando la sommatoria a denominatore, si ricava il fattore di rimozione di massa equivalente della lega:

$$\sum \left(\frac{x_i \cdot Z_i}{A_i} \right) = \left(\frac{0,895 \cdot 3}{26,98} \right) + \left(\frac{0,100 \cdot 4}{28,09} \right) + \left(\frac{0,005 \cdot 2}{24,31} \right) \approx 0,11417 \text{ mol/g}$$

$$Fattore_{massa} = \frac{1}{96485 \cdot 0,11417} = 9,078 \cdot 10^{-5} \text{ g/C}$$

Per convertire il tasso di massa in volume (e permettere il confronto con i rilievi ottici), il fattore di massa è stato diviso per la densità della lega AlSi10Mg, pari a $\rho = 2,68 \text{ g/cm}^3$ (ovvero $0,00268 \text{ g/mm}^3$):

$$Fattore_{volumetrico} = \frac{9,078 \cdot 10^{-5} \text{ g/C}}{0,00268 \text{ g/mm}^3} = 0,03387 \text{ mm}^3/\text{C}$$

Questa costante indica che, per ogni Coulomb di carica elettrica fluiva nel circuito, il sistema asporta teoricamente $0,03387 \text{ mm}^3$ di lega. Essendo l'Ampere definito come Coulomb al secondo ($1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$), la formula finale per il calcolo del **MRR Teorico** per tutti i test è:

$$MRR_{teorico} [\text{mm}^3/\text{s}] = 0,03387 \cdot I_{media} [\text{A}]$$

Moltiplicando questo valore fisso per la corrente media registrata dall'alimentatore XINGTONGLI, si ottiene il volume asportato che la fisica ideale prevedrebbe ("cosa sarebbe dovuto succedere").

Calcolo del MRR Sperimentale

L'MRR Sperimentale rappresenta invece la velocità reale di erosione ("cosa è successo davvero in macchina"). Questo parametro viene calcolato dividendo il Volume Reale asportato (V_{reale}) per il tempo effettivo di lavorazione (t).

Il volume è stato ottenuto moltiplicando l'Area Effettiva (calcolata in precedenza tramite le misurazioni al microscopio stereoscopico) per la profondità Δz (acquisita dal microscopio confocale):

$$V_{reale} = A_{effettiva} \cdot \Delta z = (2,35 \cdot R^2) \cdot \Delta z$$

Per le prove in regime Statico, il tempo t è un input di macchina noto a priori (es. 10, 30, 60 secondi). Diversamente, per le campagne sperimentali in regime **Dinamico**, il tempo di lavorazione non è impostato direttamente, ma dipende dalla cinematica di affondamento programmata sul CNC. Essendo nota la corsa totale netta dell'elettrodo ($\Delta z_{elettrodo}$, calcolata dal software della macchina dalla quota iniziale a quella finale) e la velocità di avanzamento (f , il *Feed Rate*), il tempo di lavorazione in secondi (t_{sec}) è stato matematicamente dedotto:

$$t_{sec} = \frac{\Delta z_{elettrodo} \text{ [mm]}}{f \text{ [mm/min]}} \cdot 60$$

In conclusione, la formula di governo per la quantificazione empirica del tasso di asportazione in tutti i provini testati risulta essere:

$$MRR_{sperimentale} \text{ [mm}^3\text{/s]} = \frac{V_{reale}}{t_{sec}}$$

5.4 LAVORAZIONE IN REGIME STATICO:

VALUTAZIONE DI TENSIONE E TEMPO DI LAVORAZIONE

La prima fase della sperimentazione attiva di asportazione è stata condotta in regime **Statico**. In questa configurazione, l'asse Z della macchina utensile viene bloccato in una posizione fissa (velocità di avanzamento $f = 0$ mm/min) per tutta la durata del test. L'esecuzione di prove statiche è una prassi scientifica fondamentale nello studio dei processi ECM: eliminando la variabile cinematica dell'avanzamento, è possibile isolare e analizzare l'evoluzione temporale della geometria di scavo e della topografia superficiale esclusivamente in funzione della dissoluzione anodica spontanea governata dal potenziale elettrico.

5.4.1 Impostazione della campagna prove in regime statico

Per la campagna statica sono stati eseguiti complessivamente 10 test su piastre in lega AlSi10Mg. Le variabili indipendenti del sistema sono state ridotte a due:

1. **La Tensione Operativa (Voltage):** Impostata a due livelli, **12 V e 24 V**, allo scopo di indagare l'effetto della densità di corrente.
2. **Il Tempo di Lavorazione (Machining Time):** Variato su 5 step temporali per ciascun livello di tensione: **10, 30, 60, 90 e 120 secondi**, al fine di studiare il transitorio di asportazione e l'allargamento radiale dell'impronta (overcut).

I parametri di flusso e geometrici sono stati mantenuti rigorosamente costanti su valori di set-point derivati dalle precedenti ottimizzazioni:

- **Pressione della pompa:** $P = 45\%$ (corrispondente a 2 bar), per garantire un lavaggio ottimale.
- **Gap iniziale interelettrodo:** Fissato meccanicamente a **0,100 mm** (100 μm) tra la faccia dell'elettrodo ibrido e la superficie della piastra.

Tabella Dati Test Statici

ID PROVINO	Machining Time, s	Voltage, V	Initial Current, A	Final Current, A
S_10_12	10	12	31	27
S_30_12	30	12	45	31
S_60_12	60	12	64	20
S_90_12	90	12	32	14
S_120_12	120	12	25	12
S_10_24	10	24	53	45
S_30_24	30	24	45	30
S_60_24	60	24	36	21
S_90_24	90	24	31	18
S_120_24	120	24	30	15

Tabella 5.4: Parametri operativi e correnti registrate durante la campagna di test in regime statico.

5.4.2 Dinamica elettrica: l'evoluzione della corrente nel tempo

Analizzando i dati registrati nella Tabella 5.4, emerge un comportamento elettrico intrinseco della lavorazione ECM statica: per ogni singolo provino testato, si osserva un **decadimento della corrente erogata tra l'inizio e la fine della prova**. Ad esempio, nel test S_60_12 (60 secondi a 12 V), la corrente iniziale si attesta a 64 A per poi crollare a 20 A a fine ciclo. Analogο comportamento si registra a 24 V, dove nel test S_60_24 si passa da 36 A a 21 A.

Questo fenomeno è la diretta conseguenza della Legge di Ohm applicata a un meato in espansione. Essendo l'utensile fermo, la progressiva asportazione del metallo fa sì che la distanza fisica tra anodo e catodo (il gap) aumenti continuamente secondo l'asse Z. Poiché la resistenza elettrica dell'elettrolita è direttamente proporzionale alla lunghezza del percorso ionico (il gap), un allargamento del meato provoca un innalzamento della resistenza ohmica totale del circuito. Mantenendo la tensione fissa (12 V o 24 V) da parte dell'alimentatore, l'aumento della resistenza causa una caduta fisiologica e inesorabile della corrente erogata. Di conseguenza, l'erosione in regime statico è un **processo asintotico**: col passare del tempo, la densità di corrente scende a livelli tali per cui l'asportazione geometrica assiale si arresta quasi completamente, favorendo l'allargamento radiale (overcut).

5.4.3 Analisi quantitativa: Tassi di asportazione e Topografia superficiale

Per valutare l'efficienza reale del processo, i dati elettrici sono stati accoppiati ai rilievi confocali 3D e ottici. Il volume asportato, derivato dalle misurazioni della profondità massima (Δz) e dell'area effettiva inficiata dall'overcut, ha permesso di calcolare il *Material Removal Rate* (MRR) Sperimentale, confrontato con il limite imposto dalla Legge di Faraday (MRR Teorico).

Tabella Risultati Test Statici

ID PROVINO	Δz , mm	Δ Raggio (Overcut), mm	Area Impronta, mm ²	Sa, μ m	Sq, μ m	Sz, μ m	Sp, μ m	Sv, μ m	Ssk	Sku
S_10_12	0.20	0,49	258.45	3.61	4.39	23.9	9.45	14.4	-0.485	2.61
S_30_12	0.26	0,95	281.62	1.70	2.17	16.8	7.15	9.66	-0.042	3.62
S_60_12	0.84	1,10	289.70	1.78	2.21	13.6	7.93	5.69	0.313	2.94
S_90_12	0.68	1,40	305.51	2.30	2.83	16.9	10.2	6.70	0.341	2.81
S_120_12	0.74	1,17	293.21	2.12	2.56	14.7	8.03	6.70	0.154	2.52
S_10_24	0.10	0,92	280.02	1.49	2.26	24.0	6.95	17.1	-2.020	15.5
S_30_24	0.49	1,24	296.79	1.91	2.54	21.8	7.78	14.0	-0.677	5.21
S_60_24	0.88	1,20	294.89	2.50	3.18	27.9	9.68	18.3	-0.396	4.25
S_90_24	0.67	1,34	302.36	2.63	3.21	21.5	9.54	11.9	0.011	2.87
S_120_24	0.78	1,36	303.37	2.42	2.95	21.3	8.22	13.1	-0.126	2.91

Tabella 5.5: *Tabella complessiva risultati.*

Tabella Riassuntiva Test Statici

ID PROVINO	Machining Time, s	Voltage, V	Average Current, A	MRR Teorico, mm ³ /s	MRR Sperimentale, mm ³ /s	Δ MRR, mm ³ /s	Sa, μ m	Sz, μ m
S_10_12	10	12	29	0.98	5.25	4,26	3.61	23.9
S_30_12	30	12	38	1.29	2.42	1,13	1.70	16.8
S_60_12	60	12	42	1.42	4.08	2,65	1.78	13.6
S_90_12	90	12	23	0.78	2.29	1,51	2.30	16.9
S_120_12	120	12	18,5	0.63	1.80	1,17	2.12	14.7
S_10_24	10	24	49	1.66	2.77	1,11	1.49	24.0
S_30_24	30	24	37,5	1.27	4.82	3,55	1.91	21.8
S_60_24	60	24	28,5	0.97	4.34	3,37	2.50	27.9
S_90_24	90	24	24,5	0.83	2.25	1,42	2.63	21.5
S_120_24	120	24	22,5	0.76	1.96	1,20	2.42	21.3

Tabella 5.6: Tabella riassuntiva dei parametri superficiali (S_a , S_z) e dei tassi di asportazione teorici e sperimentali per il regime statico.

L'analisi della Tabella 5.6 e dei rilievi di rugosità areale (S_a , S_z) permette di trarre la conclusione più importante dell'intera campagna statica: **la finitura superficiale ottenuta con una tensione di 12 V risulta visivamente, topograficamente superiore a quella ottenuta ad una tensione di 24 V.**

Dal punto di vista termodinamico, l'applicazione di 24 V genera densità di corrente eccessivamente elevate. Il forte calore sviluppato (Effetto Joule) può portare a una maggiore ebollizione dell'elettrolita rispetto ai test condotti a 12 V, rendono disomogeneo il passaggio della corrente nel fluido. Di conseguenza, l'asportazione del materiale sulla superficie del pezzo avviene in modo irregolare. Questo potrebbe portare a valori di altezza massima (S_z) più alti (es. $S_z = 27,9 \mu\text{m}$ per S_60_24).

A 12 V, invece, la densità di corrente si assesta nel cosiddetto "regime di lucidatura elettrochimica" (*electropolishing regime*): il film anodico si dissolve e si riforma in modo controllato, e l'elettrolita riesce a evacuare il calore senza bollire. Il risultato è una superficie speculare e omogenea.



Figura 5.4-1: Vista macroscopica delle piastre lavorate in regime statico. A sinistra gli scavi superficiali a 12 V. A destra le lavorazioni a 24 V. a) S_10_12. b) S_30_12. c) S_60_12. d) S_90_12. e) S_120_12. f) S_10_24. g) S_30_24. h) S_60_24. i) S_90_24. l) S_120_24.

Confronto mirato dell'evoluzione temporale (10s vs 120s a 12V e 24V)

Per comprendere la cinetica del processo, è istruttivo incrociare i dati metrologici con le mappe 3D e le immagini ottiche stereoscopiche dei casi estremi di lavorazione:

- **Fase di innesco (10 secondi a 12 V vs 24 V):**

Nel test S_10_12 (10s @ 12V), il processo è nella sua fase iniziale. La dissoluzione inizia a intaccare lo strato superficiale della piastra. La rugosità è ancora relativamente alta ($Sa = 3,61 \mu m$), poiché la dissoluzione privilegia i picchi microscopici del materiale grezzo. L'impronta a stella è visibile ma molto superficiale ($\Delta z = 0,20 mm$).

Nel test S_10_24 (10s @ 24V), l'altissima energia "strappa" letteralmente via il materiale in pochi istanti. Il valore di Sa risulta più basso ($1,49 \mu m$), mentre l'altezza massima delle valli/picchi ($Sz = 24,0 \mu m$) si mantiene identica come per il test a 12V.

- **Fase di assestamento stazionario (120 secondi a 12 V vs 24 V):**

Aumentando il tempo di esposizione, nel test S_120_12 (120s @ 12V), la superficie asportata si stabilizza su una finitura molto omogenea. Il fondo è omogeneo, l' Sa si stabilizza a un ottimo valore di $2,12 \mu m$ e l'altezza massima dei difetti crolla ($Sz = 14,7 \mu m$).

Visivamente, la zona interna alla stella risulta brillante e pulita.

Nel test S_120_24 (120s @ 24V), il mantenimento di un'alta tensione per due minuti in regime statico ha conseguenze deleterie. Sebbene la profondità di scavo aumenti, il flusso elettrolitico fa fatica a contrastare il calore e il gas generato. Il valore Sa sale a 2,42 μm .

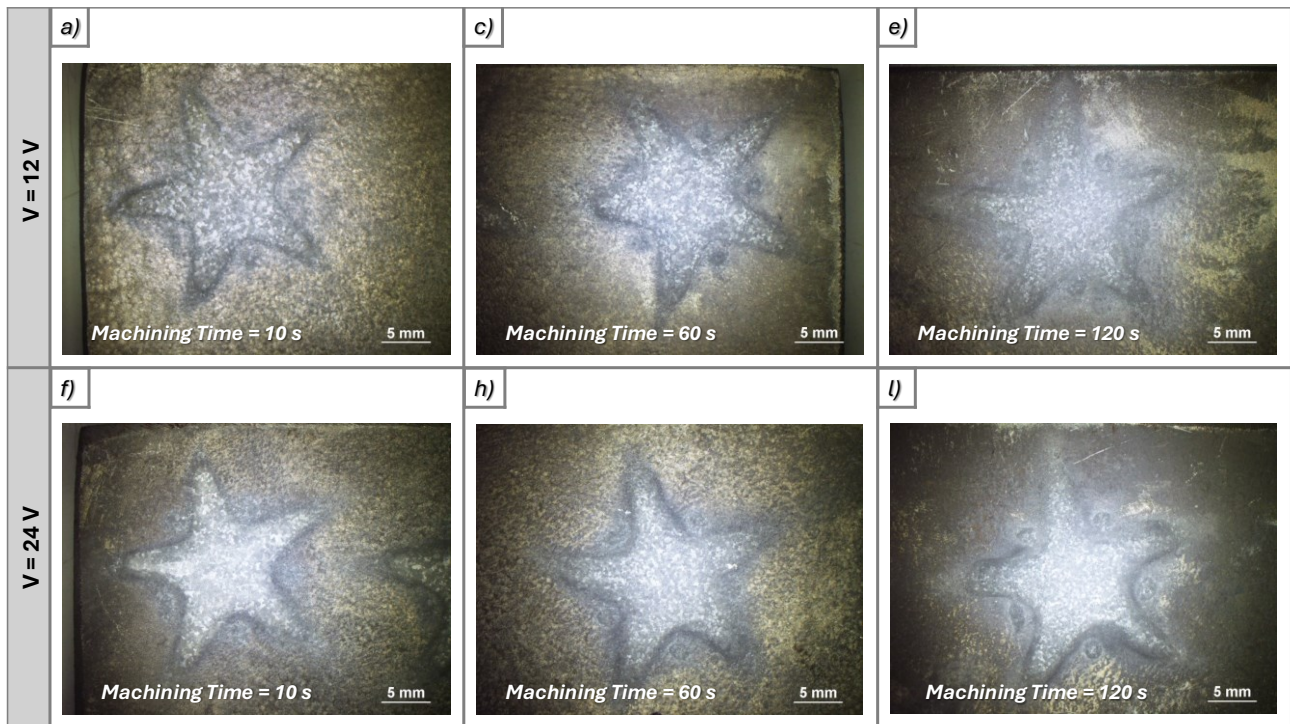


Figura 5.4-2: Rilievi ottici acquisiti mediante stereomicroscopio Nikon SMZ1270. Si evince visivamente la superiorità della finitura superficiale ottenuta nei test a 12 V (riga superiore) rispetto ai test a 24 V (riga inferiore). a) S_10_12. c) S_60_12. e) S_120_12. f) S_10_24. h) S_60_24. i) S_120_24.

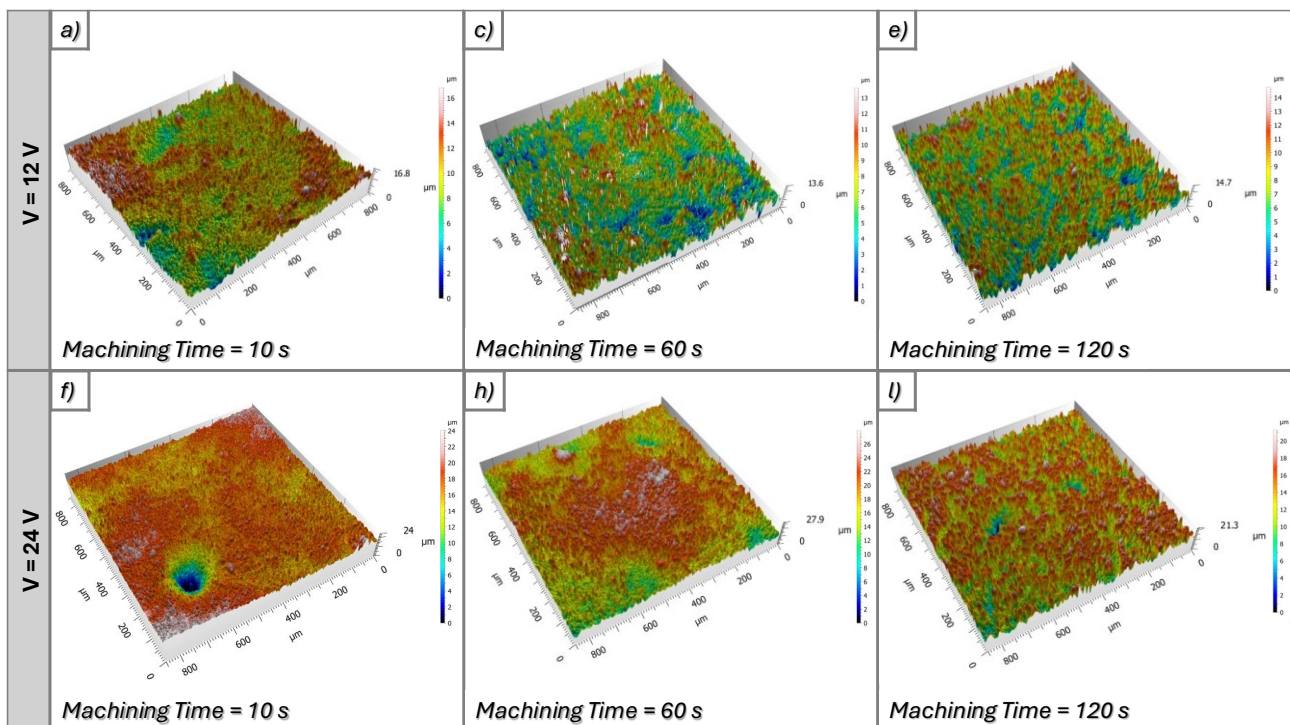


Figura 5.4-3: Topografia 3D del fondo cavità acquisita tramite microscopio confocale Nikon Eclipse LV150N. La scala cromatica evidenzia la disomogeneità e le profonde valli generate dai 24 V

prolungati (es. riquadro f) rispetto alla stabilità morfologica raggiunta a 12 V nel tempo. a) S_10_12. c) S_60_12. e) S_120_12. f) S_10_24. h) S_60_24. l) S_120_24.

5.4.4 Overcut in regime statico

Un'ulteriore osservazione metrologica di primaria importanza riguarda la Tabella Estesa dei Risultati (Area, Δz). Come analizzato nel Paragrafo 5.3, il prolungamento del tempo di lavorazione in regime statico amplifica in modo drastico l'**Overcut radiale**.

Osservando i dati dei test a 12 V, si passa da un'area dell'impronta di 258,45 mm² (a 10 secondi) a un'area di ben 293,21 mm² (a 120 secondi). Poiché l'elettrodo non scende verso il pezzo, l'aumento della distanza catodo-anodo sul fondo (asse Z) spinge le linee del campo elettrico a cercare percorsi a minor resistenza elettrica lungo i fianchi (asse X-Y). Questo comporta che le pareti laterali della cavità vengano erose continuamente, allargando l'impronta a stella fino a farle perdere la nitidezza degli spigoli vivi originali, trasformandola progressivamente in una sagoma arrotondata.

Questa evidenza sperimentale conferma che la lavorazione statica prolungata non è idonea per l'affondamento di precisione di cavità profonde con pareti dritte. Per ottenere tolleranze strette e limitare l'overcut, è obbligatorio passare al regime **Dinamico**, in cui l'avanzamento dell'utensile compensa l'erosione mantenendo il gap piccolo e confinando il campo elettrico frontalmente, oggetto della campagna di test successiva.

5.5 LAVORAZIONE IN REGIME DINAMICO: OTTIMIZZAZIONE DEL FEED-RATE E DEL GAP

L'analisi dei test in regime statico (Paragrafo 5.4) ha dimostrato che una lavorazione priva di avanzamento cinematico porta a un inesorabile allargamento radiale dell'impronta (overcut) e a un crollo della densità di corrente, a causa dell'aumento continuo della distanza tra elettrodo e pezzo. Per realizzare tasche di precisione e mantenere confinato il campo elettrico sulla faccia frontale dell'utensile, è opportuno passare alla lavorazione in **regime Dinamico**.

Nella lavorazione ECM dinamica, l'asse Z della macchina utensile avanza verso il pezzo con una velocità costante prestabilita, definita *Feed Rate* (f). L'obiettivo fisico di questa configurazione è il raggiungimento di una condizione di stato stazionario: la velocità con cui l'utensile "insegue" il materiale deve eguagliare perfettamente la velocità di dissoluzione chimica dell'anodo, permettendo al sistema di assestarsi su un *Gap di Equilibrio* (g_e) costante per tutta la durata dell'affondamento.

5.5.1 Impostazione della campagna sperimentale dinamica

La campagna di test in modalità dinamica è stata suddivisa in due fasi sequenziali, mirate a esplorare prima l'impatto del *feed rate* su scavi superficiali, e successivamente le dinamiche termo-fluide negli scavi profondi. Anche in questa serie di test, la pressione di mandata della pompa Grundfos è stata mantenuta rigorosamente costante al **45% (2 bar)**, valore validato dai test preliminari.

Fase A: Scavo superficiale a gap stretto

Nella prima serie di 4 test, l'escursione dell'utensile è stata limitata. La posizione di partenza (Initial Gap) è stata fissata a **+0,1 mm** rispetto alla superficie della piastra, mentre la quota di fine lavorazione (Final Gap) è stata impostata a **-0,1 mm**. Questo genera uno spostamento assoluto dell'utensile ($\Delta z_{\text{elettrodo}}$) di soli 0,2 mm.

I parametri variati sono stati:

- **Tensione (Voltage):** 12 V e 24 V.
- **Feed Rate (f):** 0,1 mm/min e 0,2 mm/min.

Fase B: Affondamento profondo progressivo

Per valutare il comportamento dell'elettrodo ibrido in condizioni dinamiche, sono stati eseguiti ulteriori 4 test aumentando la profondità di penetrazione. Mantenendo il gap iniziale a **+0,1 mm**, l'utensile è stato programmato per affondare fino a **-0,5 mm** e successivamente fino a **-1,0 mm** all'interno della piastra di lega AlSi10Mg. Per queste prove, il feed rate è stato mantenuto prudenzialmente a **0,2 mm/min**, variando unicamente la tensione (12 V e 24 V).

5.5.2 Derivazione del Tempo di Lavorazione (t_{sec})

A differenza dei test statici in cui il tempo è una variabile indipendente impostata, in regime dinamico il tempo totale di esposizione al processo ECM (t_{sec}) è un parametro derivato. Poiché l'asse CNC si muove a velocità costante, il tempo di lavorazione è definito rigidamente dal rapporto tra lo spostamento totale dell'elettrodo ($\Delta z_{elettrodo}$) e la sua velocità di avanzamento (f):

$$t_{sec} = \frac{\Delta z_{elettrodo}}{f} \cdot 60$$

Dove:

- t_{sec} = Tempo di lavorazione espresso in secondi [s].
- $\Delta z_{elettrodo}$ = Corsa netta assoluta dell'utensile [mm]. Ad esempio, per uno scavo da +0,1 a -1,0, $\Delta z = 1,1$ mm.
- f = Feed Rate (velocità di avanzamento) [mm/min].

L'applicazione di questa formula ha permesso di ricavare le tempistiche esatte di esposizione (es. per il test da 1,1 mm a 0,2 mm/min, si ottengono esattamente 5,5 min, ovvero 330 s), rendendo possibile il successivo calcolo rigoroso del *Material Removal Rate* (MRR).

Tabella Dati Test Dinamici

ID PROVINO	Voltage, V	Feed Rate, mm/min	Initial Gap, mm	Final Gap, mm	Machining Time, s	Initial Current, A	Final Current, A
D_12_0.1	12	0.1	0.1	-0.1	120	45	16
D_12_0.2	12	0.2	0.1	-0.1	60	31	20
D_24_0.1	24	0.1	0.1	-0.1	120	46	20
D_24_0.2	24	0.2	0.1	-0.1	60	65	32
D_12_0.2_-0.5	12	0.2	0.1	-0.5	180	26	15
D_24_0.2_-0.5	24	0.2	0.1	-0.5	180	52	27
D_12_0.2_-1.0	12	0.2	0.1	-1.0	330	35	17
D_24_0.2_-1.0	24	0.2	0.1	-1.0	330	54	23

Tabella 5.7: Parametri operativi e correnti registrate durante la campagna di test in regime dinamico.

Tabella Risultati Test Dinamici

ID PROVINO	Δz , mm	Δ Raggio (Overcut), mm	Area Impronta, mm ²	Sa, μ m	Sq, μ m	Sz, μ m	Sp, μ m	Sv, μ m	Ssk	Sku
D_12_0.1	0.90	0,20	244.69	3.46	4.39	29.8	16.6	13.2	0.071	3.28
D_12_0.2	0.54	0,60	264.20	1.82	2.30	14.5	7.24	7.27	-0.089	3.10
D_24_0.1	1.22	0,57	262.75	2.19	2.93	32.6	14.6	18.0	-0.486	7.38
D_24_0.2	0.73	1,15	292.26	2.22	2.71	16.6	6.47	10.1	-0.429	2.79
D_12_0.2_-0.5	0.87	1,01	284.92	3.02	3.92	48.1	24.5	23.6	0.031	6.81
D_24_0.2_-0.5	1.56	1,02	285.23	3.02	3.96	23.5	15.9	7.64	1.070	4.24
D_12_0.2_-1.0	1.40	0,71	269.40	4.80	6.09	37.8	18.7	19.1	0.328	3.22
D_24_0.2_-1.0	2.02	0,68	268.00	3.18	4.72	44.3	13.7	30.6	-2.160	12.8

Tabella 5.8: Tabella complessiva risultati.

Tabella Riassuntiva Test Dinamici

ID PROVINO	Machining Time, s	Voltage, V	Average Current, A	MRR Teorico, mm ³ /s	MRR Sperimentale, mm ³ /s	Δ MRR, mm ³ /s	Sa, μm	Sz, μm
D_12_0.1	120	12	30.5	1.03	1.84	0,81	3.46	29.8
D_12_0.2	60	12	25.5	0.86	2.37	1,51	1.82	14.5
D_24_0.1	120	12	33	1.12	2.66	1,54	2.19	32.6
D_24_0.2	60	12	48.5	1.64	3.53	1,89	2.22	16.6
D_12_0.2_-0.5	180	12	20.5	0.69	1.38	0,68	3.02	48.1
D_24_0.2_-0.5	180	24	39.5	1.34	2.48	1,14	3.02	23.5
D_12_0.2_-1.0	330	12	26	0.88	1.14	0,26	4.80	37.8
D_24_0.2_-1.0	330	24	38.5	1.30	1.64	0,34	3.18	44.3

Tabella 5.9: Tabella riassuntiva dei parametri superficiali (S_a , S_z) e dei tassi di asportazione teorici e sperimentali per il regime dinamico.

5.5.3 Analisi delle correnti e stabilità del Gap

L'osservazione dei valori di corrente iniziale e finale riportati in tabella evidenzia la differenza drastica tra regime statico e dinamico. Mentre nel regime statico la corrente precipitava (es. da 64 A a 20 A), nel regime dinamico l'avanzamento dell'utensile "compensa" la dissoluzione dell'anodo.

Prendendo ad esempio il test D_12_0.2 (12 V, 0.2 mm/min), la corrente scende solo da 31 A a 20 A in 60 secondi. Nel test di affondamento profondo D_24_0.2_-1.0 (24 V, 0.2 mm/min, durata 330 s), la corrente parte da 54 A e si stabilizza a 23 A, mantenendo un'elevata densità di carica per oltre 5 minuti. Questa stabilità indica che il sistema ha effettivamente raggiunto un *Working Gap* di equilibrio, garantendo un'erosione frontale continua senza che l'utensile collida fisicamente contro il pezzo.

5.5.4 Evoluzione morfologica: L'impatto della tensione e del feed rate

L'incrocio dei dati metrologici (Tabella Risultati) con le misurazioni di rugosità areale (S_a , S_z) e con i rilievi ottici, permette di stilare un'analisi critica delle performance.

L'influenza del Feed Rate (0,1 vs 0,2 mm/min)

A parità di tensione (12 V), il confronto tra il test D_12_0.1 e D_12_0.2 rivela l'importanza dell'avanzamento. A 0,1 mm/min l'utensile scende troppo lentamente, portando il sistema ad assestarsi su un gap di equilibrio che risulta ampio. Questa condizione incrementa l'asportazione radiale (overcut) a discapito della precisione geometrica ($S_a = 3,46 \mu\text{m}$, $S_z = 29,8 \mu\text{m}$).

Aumentando il feed rate a 0,2 mm/min, l'utensile mantiene un gap più stretto. Questa condizione è confermata dalla dinamica di assorbimento della corrente, che a fine lavorazione si stabilizza su un valore maggiore (20 A) rispetto al test condotto a 0,1 mm/min

(16 A). Grazie a questo meato ridotto, il flusso di elettrolita risulta più incisivo e confinato, e la rugosità crolla a un valore di $Sa = 1,82 \mu\text{m}$, con una superficie speculare ($Sz = 14,5 \mu\text{m}$).

L'affondamento profondo (Scavo a -0,5 mm e -1,0 mm)

Spingendo l'utensile all'interno del materiale per simulare una vera lavorazione tridimensionale, emergono i limiti fisici delle tensioni elevate. Nei test condotti a **24 V** (D_24_0.2_-0.5 e D_24_0.2_-1.0), l'immissione di energia è massiva (MRR sperimentale elevato, superiore a $2,4 \text{ mm}^3/\text{s}$). Tuttavia, la qualità del fondo si riduce e le rugosità risultano leggermente più alte: le mappe 3D evidenziano la presenza di picchi anomali (Sz fino a $44,3 \mu\text{m}$ per lo scavo a -1,0 mm).

Questo fenomeno mette in evidenza un limite dell'attuale design dell'elettrodo: i canali di lavaggio, per come sono posizionati, convogliano l'elettrolita verso l'esterno della tasca di scavo. Per quanto il sistema sia pressurizzato a 2 bar, questa configurazione fatica a evacuare in modo efficiente gli idrossidi generati a 24 V. Per superare questa criticità, tra gli sviluppi futuri della ricerca si renderà necessaria un'attività di riprogettazione dell'elettrodo, introducendo canali di adduzione che si affaccino frontalmente e direttamente all'interno dell'impronta.

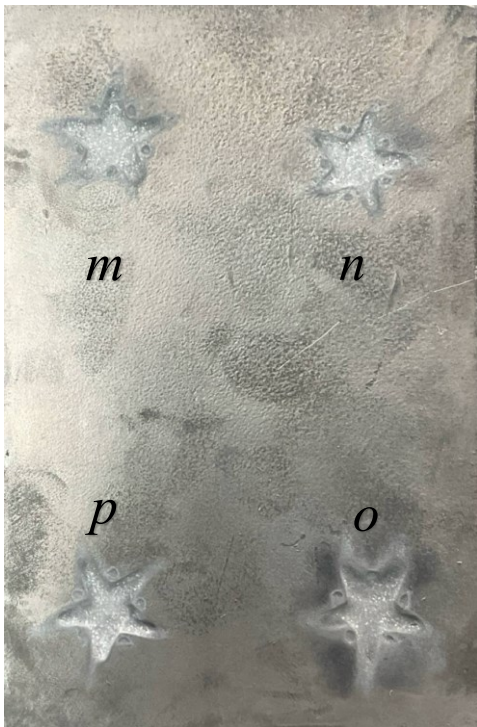


Figura 5.5-1: Vista macroscopica delle piastre lavorate in regime dinamico. A sinistra gli scavi superficiali (gap finale -0,1 mm). A destra le lavorazioni profonde (gap finale -0,5 e -1,0 mm). Riferimenti letterali da m) a t). m) D_12_0.1. n) D_12_0.2. o) D_24_0.1. p) D_24_0.2. q) D_12_0.2_-0.5. r) D_24_0.2_-0.5. s) D_12_0.2_-1.0. t) D_24_0.2_-1.0.

5.5.5 Individuazione del parametro ottimale assoluto (Il Provino "s")

Tra tutti i test effettuati nella campagna dinamica, il risultato ingegneristicamente più rilevante è rappresentato dal **Provino "s" (Identificativo: D_12_0.2_-1.0)**, lavorato con una tensione di **12 V**, *feed rate* di **0,2 mm/min**, gap iniziale di +0,1 mm e **gap finale di -1,0 mm**.

Come si evince dai rilevamenti allo stereoscopio, questo test ha restituito **il miglior risultato visivo e geometrico dell'intera sperimentazione**.

L'impronta a stella ottenuta in questo provino è la più definita: i vertici della stella risultano nitidi, le pareti laterali sono dritte e la svasatura indotta dall'overcut è stata minimizzata grazie al perfetto bilanciamento tra la velocità di avanzamento (0,2 mm/min) e la moderata densità di corrente indotta dai 12 V. Dai dati numerici, il raggio dell'impronta misurato per questo provino si attesta a 10,71 mm, a fronte di un raggio nominale a CAD di 10 mm. Questo si traduce in un diametro effettivo di 21,42 mm contro i 20 mm teorici, dimostrando un overcut radiale contenuto ad appena 0,71 mm.

Dai dati del microscopio confocale si segnala un leggero incremento dell'altezza media aritmetica ($Sa = 4,80 \mu m$) rispetto agli scavi superficiali. La stabilità termica mantenuta dai 12 V ha permesso di evitare cortocircuiti o *pitting* distruttivi, portando a termine un affondamento significativo con una buona definizione geometrica della *feature*.

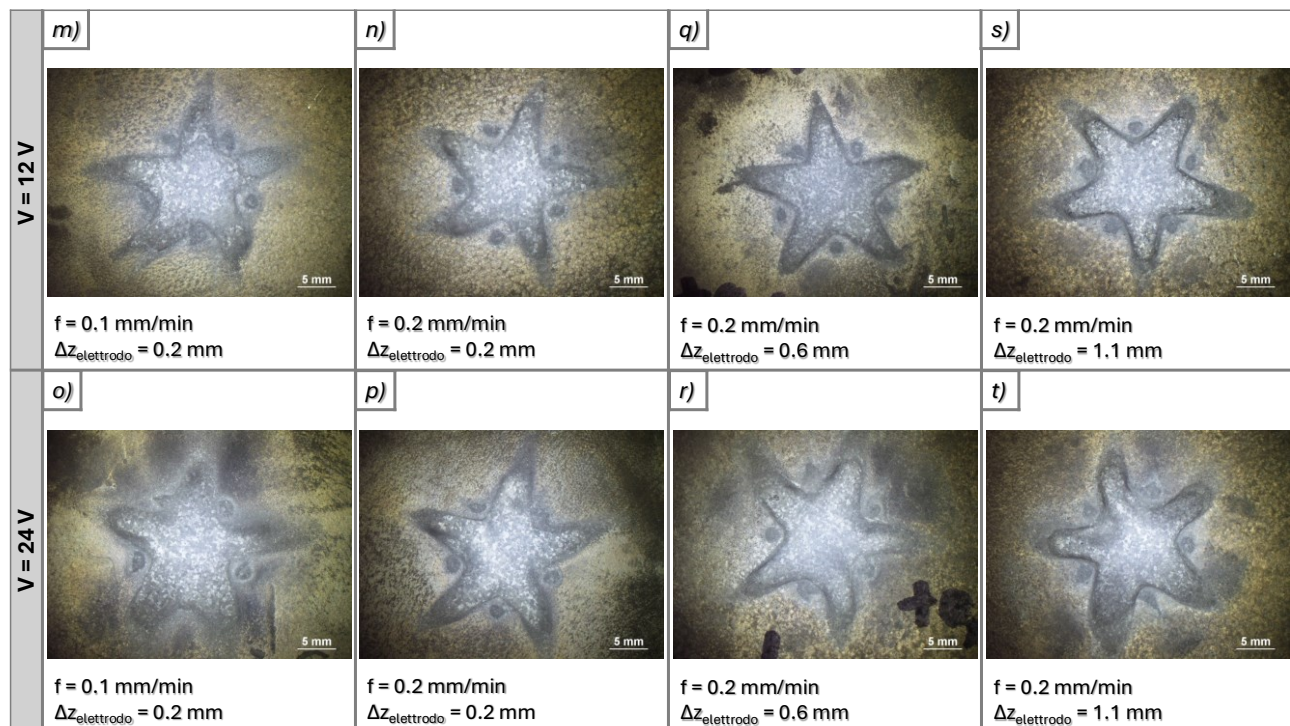


Figura 5.5-2: Immagini ottiche calibrate acquisite mediante stereomicroscopio. È evidente come il provino s) (in alto a destra) mostri i profili più definiti e l'overcut più contenuto nonostante l'affondamento massiccio. m) D_12_0.1. n) D_12_0.2. o) D_24_0.1. p) D_24_0.2. q) D_12_0.2_-0.5. r) D_24_0.2_-0.5. s) D_12_0.2_-1.0. t) D_24_0.2_-1.0.

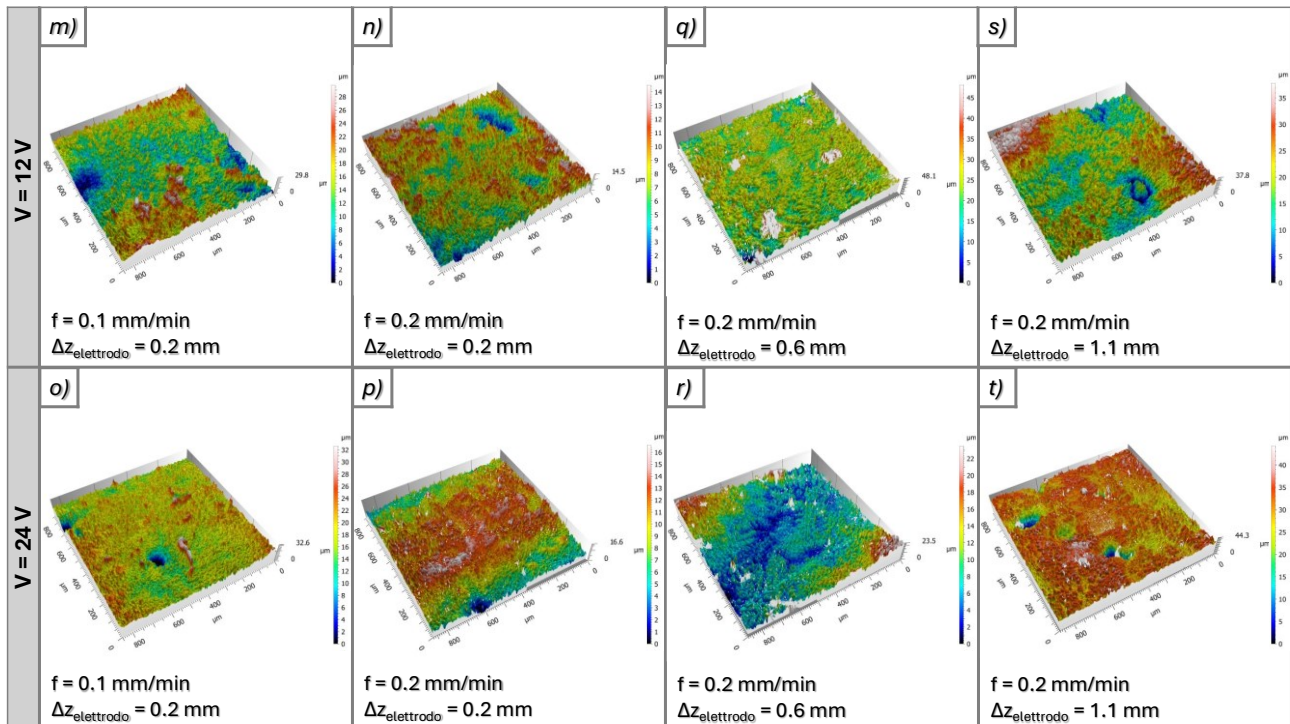


Figura 5.5-3: Topografia 3D del fondo cavità dei test dinamici. Si osserva l'ottima uniformità del fondo nei test a 12 V (riga superiore) rispetto alle marcate instabilità e dislivelli generati dalla tensione a 24 V negli scavi profondi (es. riquadri r e t). m) D_12_0.1. n) D_12_0.2. o) D_24_0.1. p) D_24_0.2. q) D_12_0.2_-0.5. r) D_24_0.2_-0.5. s) D_12_0.2_-1.0. t) D_24_0.2_-1.0.

In conclusione, la campagna dinamica ha dimostrato che la strategia vincente per l'impiego dell'elettrodo ibrido in resina non consiste nell'esasperare i parametri elettrici (24 V), bensì nell'adottare un approccio conservativo in tensione (12 V) accoppiato a un feed rate meccanico calibrato (0,2 mm/min), permettendo al sistema di lavaggio conformale di asportare i fanghi in modo omogeneo e di trasferire perfettamente la geometria CAD sul pezzo reale.

5.6 TEST DI PERFORAZIONE PASSANTE E INDIVIDUAZIONE DEI LIMITI CINEMATICI

A conclusione della campagna sperimentale in regime dinamico, e al fine di simulare un'operazione industriale completa di *brocciatura elettrochimica* (apertura di fori sagomati complessi), l'ultima fase di indagine è stata dedicata all'esecuzione di un **test di perforazione passante**.

Fino a questo momento, le lavorazioni avevano riguardato esclusivamente scavi ciechi (fino a -1,0 mm di profondità in piastre più spesse). La perforazione passante introduce un nuovo livello di criticità fluidodinamica: nel momento esatto in cui l'elettrodo "sfonda" la parete inferiore della piastra, il meato interelettrodo perde la sua base d'appoggio. Si verifica un crollo istantaneo della pressione idrostatica locale, poiché l'elettrolita in pressione trova una via di fuga verso il basso, alterando drasticamente l'omogeneità del lavaggio radiale conforme progettato nella Fase 2. Testare l'elettrodo in questa condizione limite è fondamentale per validarne la stabilità operativa in scenari produttivi reali.

5.6.1 Esecuzione della perforazione passante (Test D_12_0.2_-2.3)

Per questa prova è stata predisposta una piastra fine in lega AlSi10Mg, misurata a calibro con uno spessore effettivo di **2,30 mm**.

Sulla base dei positivi risultati morfologici (minima rugosità Sa e alta risoluzione dei bordi) ottenuti durante l'ottimizzazione del regime dinamico, i parametri termoelettrici per la perforazione sono stati ereditati dal miglior test precedente (il provino s):

- **Tensione Operativa:** 12 V (Corrente Continua - DC).
- **Pressione della Pompa:** $P = 45\%$ (2 bar).
- **Velocità di avanzamento (f):** 0,2 mm/min.

Per garantire il completo attraversamento del materiale, considerando lo spessore dell'impronta a stella dell'elettrodo, la corsa dell'asse Z è stata programmata con un gap iniziale di **+0,1 mm** e un gap di fine corsa (Final Gap) spinto fino a **-2,3 mm**. Questo si traduce in uno spostamento assoluto netto ($\Delta z_{\text{elettrodo}}$) di **2,4 mm**. Applicando la formula temporale dedotta nel Paragrafo 5.5, il test prevede un tempo di lavorazione ininterrotta di ben 720 secondi (12 minuti).

Tabella Risultati Test Perforazione

Sample	Mode	Voltage, V	Feed Rate, mm/min	Initial Gap, mm	Final Gap, mm	Initial Current, A	Final Current, A
D_12_0.2_-2.3	Dynamic	12	0.2	0.1	-2.3	32	15

Tabella 5.8: Parametri operativi e correnti registrate durante il test di perforazione passante su piastra di spessore 2,30 mm.

Il test è stato superato con successo. La corrente elettrica ha mostrato una discesa lineare partendo da un valore di picco iniziale di **32 A**, per poi assestarsi su un valore di equilibrio intorno ai **15 A** verso la fine del processo. Durante questa fase di assorbimento di corrente, durata oltre 10 minuti, non si sono registrate fluttuazioni termiche o archi elettrici nel momento critico dello sfondamento, dimostrando che il lavaggio interno a 5 orifici ha garantito un raffreddamento ottimale anche in presenza di una depressurizzazione improvvisa del meato.



Figura 5.6-1: Risultati Test Perforazione Piastra. u) D_12_0.2_-2.3.

5.6.2 Esplorazione del limite cinematico (Il Cortocircuito a 0,4 mm/min)

Dal punto di vista dell'ingegneria di produzione, il parametro più sensibile per determinare la fattibilità economica di un processo è il Tempo di Ciclo. Ridurre i 12 minuti necessari per forare 2,3 mm di alluminio richiede inevitabilmente l'incremento del *Feed Rate* (f).

Per individuare l'inviluppo operativo massimo (il limite superiore di avanzamento consentito dal sistema), è stata impostata una **seconda prova di perforazione**, mantenendo inalterati lo spessore del materiale (2,30 mm), la tensione (12 V) e la pressione (45%), ma **raddoppiando la velocità di avanzamento dell'elettrodo a $f = 0,4$ mm/min**.

La dinamica del fallimento (Short-Circuit)

Pochi istanti dopo l'inizio dell'affondamento, il sistema di acquisizione dati dell'alimentatore XINGTONGLI ha registrato un improvviso e violento picco di corrente. L'ispezione visiva ha confermato l'avvenuto **Cortocircuito** tra la faccia ramata dell'elettrodo ibrido e la piastra in alluminio. Il materiale target non si è elettro-eroso in modo sufficientemente rapido per far spazio all'utensile in discesa.

La spiegazione fisica di questo fallimento risiede nella **Cinetica di Dissoluzione Anodica**. L'Equilibrio del Working Gap (g_e) impone che la velocità meccanica di discesa eguagli la velocità di recessione del metallo:

$$g_e = \frac{C_{ECM} \cdot (U - \Delta U)}{f}$$

Raddoppiando il denominatore f , il gap di equilibrio teorico g_e tende a dimezzarsi, stringendosi pericolosamente. Affinché il materiale si dissolva al doppio della velocità, la reazione elettrochimica richiederebbe di far fluire una corrente enormemente più alta all'interno di un gap estremamente più stretto.

Tuttavia, le limitazioni intrinseche del materiale (la passivazione anodica dell'AlSi10Mg e la resistenza ohmica dell'elettrolita) impediscono al *Material Removal Rate* (MRR) di scalare linearmente all'infinito solo stringendo il gap.

A 0,4 mm/min, la velocità cinematica della macchina utensile ha superato la massima velocità di recessione chimica consentita dal sistema a 12 V. Il gap interelettrodico si è chiuso progressivamente ($g \rightarrow 0$) finché le micro-asperità della superficie ramata dell'elettrodo non sono entrate in contatto fisico diretto con il fondo della cavità in alluminio, innescando il cortocircuito.

5.6.3 Conclusioni sulla Finestra Operativa

Il fallimento controllato del secondo test di perforazione rappresenta un risultato scientifico utile per la qualificazione del processo. Ha permesso di tracciare un confine netto: per la geometria a stella a 5 punte (avente un'area di scavo reale di oltre 260 mm²), lavorata su lega AlSi10Mg a 12 V e 2 bar di pressione, **il limite superiore assoluto di velocità di avanzamento è strettamente inferiore a 0,4 mm/min.**

Operare a 0,2 mm/min garantisce un processo stabile, un meato idrodinamicamente sicuro e una finitura eccellente, mentre spingersi oltre tale soglia innesca instabilità elettrochimiche che portano inevitabilmente alla collisione. L'individuazione di questo limite cinematico conclude l'ottimizzazione dei parametri di macchina, fornendo le linee guida definitive per l'utilizzo in sicurezza dell'elettrodo ibrido.

5.7 VALUTAZIONE POST-PROCESSO DELL'INTEGRITÀ STRUTTURALE DELL'ELETTRODO

L'innovazione tecnologica posta alla base di questo lavoro di tesi — la sostituzione di un utensile metallico massivo con un elettrodo ibrido in fotopolimero placcato — introduceva degli interrogativi di natura termo-meccanica. Come ampiamente discusso in fase di progettazione, il core in resina *Phrozen Aqua-Gray 4K* presenta limiti strutturali intrinseci, dominati da una Temperatura di Deflessione Termica (HDT) di soli 70 °C e da una resistenza a trazione di 24 MPa. Operare in un ambiente ECM reale implica sottoporre questo delicato substrato a correnti fino a 65 A, pressioni idrauliche interne di 2 bar e all'aggressione chimica di una soluzione salina.

Il risultato tecnologicamente rilevante dell'intera campagna sperimentale risiede in un dato di fatto: **tutti i test descritti nei paragrafi precedenti (prove preliminari, lavorazioni statiche, affondamenti dinamici e perforazioni passanti) sono stati portati a termine impiegando ininterrottamente il medesimo, singolo elettrodo ibrido.** L'utensile non è mai stato sostituito per l'intera durata della sperimentazione.

Al termine dell'ultima prova di perforazione, l'elettrodo è stato smontato dal supporto della macchina IMPULSE ECM 50, accuratamente lavato, asciugato e sottoposto a una rigorosa ispezione visiva, tattile e dimensionale, atta a ricercare eventuali segni del collasso dei materiali compositi plastico-metallici.

5.7.1 Analisi della tenuta termica ed elettrica (Assenza di Effetto Joule)

Il rischio primario per un elettrodo a nucleo plastico è la fusione indotta dal surriscaldamento. L'ispezione post-processo non ha rivelato alcun segno di bruciatura, annerimento del rame o deformazione plastica del cilindro. La resina sottostante non ha subito rammollimenti strutturali o transizioni vetrose.

Questo eccellente stato di conservazione certifica due successi progettuali:

1. **L'efficienza del contatto elettrico a battuta:** L'interfaccia piana tra la prolunga in alluminio e la faccia superiore ramata dell'elettrodo ha garantito un passaggio di corrente massivo fluido e privo di resistenze di contatto critiche.
2. **L'efficienza termica del lavaggio conformale:** Il design DfAM a canali interni ha permesso al flusso di elettrolita fresco a 2 bar di asportare integralmente il calore latente sprigionato sul fronte di scavo. Il bilancio termico del sistema è rimasto saldamente in attivo, mantenendo il polimero a temperature di assoluta sicurezza.

L'operatività è risultata talmente stabile che, durante le decine di minuti di lavorazione complessiva cumulata, il processo ECM si è svolto in totale silenzio acustico e senza la minima emissione di scintille (arcing), confermando che l'elettrodo non ha mai colliso con il pezzo lavorato.

5.7.2 Analisi dell'integrità meccanica e fluidodinamica

Dal punto di vista delle sollecitazioni meccaniche, l'elettrodo è stato sottoposto a cicli ripetuti di serraggio sul mandrino e alla spinta continua del fluido in pressione.

- **Resistenza del nodo di bloccaggio:** L'ispezione non ha evidenziato alcuna formazione di micro-crepe o cricche a fatica nella zona del "colletto" plastico superiore. Questo dimostra che la scelta di mascherare i filetti M10 durante la galvanica e di scaricare le forze assiali esclusivamente a compressione sulla spalla dell'utensile ha preservato la resina da sforzi di taglio letali.
- **Resistenza alla delaminazione:** All'interno del *plenum* centrale e degli orifici da 1,5 mm, l'elettrolita in pressione raggiunge velocità turbolente elevate. Tale turbolenza genera uno sforzo di taglio tangenziale (*shear stress*) che tenta di strappare via il rivestimento metallico dal polimero. L'ispezione ha escluso categoricamente qualsiasi fenomeno di delaminazione o "spellatura" del *coating* di rame. Lo spessore galvanico di 0,25 mm si è mantenuto solidale e coeso, confermando che il pre-trattamento superficiale (bagno a ultrasuoni e lacca grafitica micro-burattata) garantisce un aggrappaggio interfacciale di livello industriale.

5.7.3 Alterazioni chimico-superficiali fisiologiche

L'unica alterazione visibile registrata a carico dell'elettrodo al termine della campagna è di natura puramente chimico-superficiale. Come si evince dalle evidenze fotografiche, il rame ha perso la sua lucentezza originaria (tipica della post-deposizione galvanica), assumendo una colorazione opaca con locali formazioni di patine verdastre/brunite.



Figura 5.9: Stato di conservazione finale dell'elettrodo ibrido al termine dell'intera campagna sperimentale. Il rivestimento in rame risulta strutturalmente integro e privo di delaminazioni. È visibile unicamente la fisiologica patina di ossidazione superficiale (cloruro/ossido di rame) indotta dall'interazione con l'elettrolita salino (NaCl).

Questa alterazione cromatica non rappresenta in alcun modo un degrado funzionale o un difetto del processo. Si tratta della naturale ossidazione del rame esposto per tempi prolungati a un ambiente fortemente ossidante e ricco di cloruri (la soluzione acquosa di NaCl). La formazione di questi sottilissimi strati di ossido/cloruro rameico si limita ai primissimi strati atomici della superficie e non intacca lo spessore massivo del rivestimento, non compromettendone né la rigidità strutturale né la macro-conducibilità elettrica. Sostanzialmente, ad eccezione di questa leggera ossidazione cosmetica, l'utensile è rimasto intatto e funzionalmente perfetto come al momento dell'estrazione dai bagni galvanici.

In conclusione, la perfetta sopravvivenza del componente a questo severo ciclo di collaudo decreta il successo assoluto della progettazione DfAM. La fattibilità tecnica dell'utilizzo di *Rapid Tooling* polimerico per lavorazioni ECM gravose è stata scientificamente validata.

CAPITOLO 6: ANALISI TECNICO ECONOMICA

I capitoli precedenti hanno ampiamente documentato e validato l'efficacia tecnologica della soluzione *Hybrid Tooling* applicata al processo di Electrochemical Machining (ECM). La progettazione termo-fluidodinamica avanzata e la successiva campagna di test empirici hanno dimostrato come un elettrodo con nucleo in resina fotopolimerica placcato in rame possa eguagliare, e in specifici contesti superare, le performance di scavo di un utensile metallico massivo.

Tuttavia, l'ingegneria dei sistemi di produzione impone che una validazione tecnologica non sia sufficiente per giustificare l'adozione industriale di un nuovo processo: essa deve essere necessariamente supportata da una rigorosa valutazione di convenienza economica e di scalabilità. L'obiettivo di questo capitolo conclusivo è contestualizzare l'innovazione proposta all'interno delle dinamiche produttive reali.

Attraverso un'analisi comparativa tra la manifattura convenzionale (fresatura dal pieno/elettroerosione) e il paradigma *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), verranno quantificati i vantaggi in termini di abbattimento dei tempi di sviluppo (*Lead Time* e *Time-to-Market*) e la drastica riduzione dei costi diretti associati alle materie prime e ai fermi macchina. L'analisi dimostrerà come il passaggio all'utensileria ibrida rappresenti non solo un avanzamento accademico, ma una soluzione industriale matura per il *Rapid Tooling*, capace di coniugare flessibilità geometrica, competitività economica e una netta riduzione dell'impatto ambientale legato alla gestione degli scarti di lavorazione.

6.1 INTRODUZIONE ALLA TRANSIZIONE VERSO L'HYBRID TOOLING

La Lavorazione Elettrochimica (ECM) è da decenni una tecnologia abilitante per i settori aerospaziale, medicale e della *power generation*, laddove è richiesta la lavorazione di leghe speciali (come titanio, Inconel o acciai legati) per ottenere geometrie complesse prive di tensioni residue, zone termicamente alterate o micro-cricche superficiali. Il vantaggio dell'ECM risiede nell'assenza di usura fisica dell'utensile catodico, il quale scambia ioni senza mai toccare il pezzo anodico.

Nonostante questa caratteristica d'eccellenza, la diffusione dell'ECM al di fuori delle produzioni in grandissima serie è storicamente ostacolata da un collo di bottiglia critico: il **costo e i tempi di approvvigionamento degli elettrodi**.

Il limite della manifattura convenzionale

Nell'approccio tradizionale, l'elettrodo è ricavato da blocchi massicci di materiali ad alta conducibilità termoelettrica (rame elettrolitico puro, ottone o, in rari casi, tungsteno). La realizzazione di una geometria di scavo complessa — ad esempio, l'impronta a stella a cinque punte impiegata in questo lavoro, accoppiata a micro-fori di adduzione — richiede l'impiego di centri di lavoro a controllo numerico (CNC) a 5 assi o di macchine per Elettroerosione a Tuffo (EDM).

Questo approccio sottraevolutivo (*Subtractive Manufacturing*) presenta intrinseche criticità industriali:

- **Vincoli geometrici:** Geometrie interne ottimali per la fluidodinamica (come il *plenum* e i canali conformali curvi della Fase 2) sono spesso impossibili da realizzare dal pieno (sottosquadri non raggiungibili dagli utensili di taglio o dalle punte da trapano).
- **Elevato costo orario:** Le lavorazioni di precisione su rame purissimo sono lente e costose, a causa della tendenza del materiale a generare truciolo pastoso e dell'elevato costo macchina.
- **Rigidità progettuale:** Ogni singola modifica al design dell'elettrodo (es. l'estensione dell'offset da 2 mm a 5 mm resasi necessaria durante i test) impone la fresatura ex-novo di un intero blocco metallico, dilatando enormemente le tempistiche della fase di prototipazione e collaudo.

La soluzione: Hybrid Tooling tramite Additive Manufacturing

La transizione verso l'*Hybrid Tooling* (utensileria ibrida) sovverte queste limitazioni spostando il focus dal materiale alla tecnologia formativa. L'Additive Manufacturing (AM), nello specifico la stampa 3D a resina (Digital Light Processing - DLP), slegando il costo del pezzo dalla sua complessità geometrica ("*complexity for free*"), permette di stampare l'anima dell'utensile in poche ore.

Il nucleo in resina fotopolimerica abbatte quasi totalmente il peso e il costo della materia prima impiegata. Il passaggio successivo, ovvero la metallizzazione superficiale tramite elettrodeposizione galvanica (processo *Plating on Plastics* semplificato), restituisce alla struttura inerte la necessaria conducibilità massiva. Il rame depositato funge esclusivamente da "strato funzionale" veicolatore di corrente, confinando l'utilizzo del metallo costoso solo dove è termodinamicamente necessario.

L'adozione dell'Hybrid Tooling si configura quindi come una strategia di **Rapid Tooling**, offrendo all'industria un metodo per sviluppare, iterare, testare e validare utensili complessi per l'ECM con una frazione dell'investimento e del tempo richiesti dai processi storicamente consolidati.

6.2 CONFRONTO TECNOLOGICO: MANIFATTURA CONVENZIONALE VS. DFAM

Per comprendere appieno la portata dell'innovazione introdotta dall'*Hybrid Tooling*, è necessario operare un confronto ingegneristico diretto tra le capacità della manifattura convenzionale e quelle offerte dal *Design for Additive Manufacturing* (DfAM). Il termine di paragone è la geometria ottimizzata sviluppata nella Fase 2 (Capitolo 4): un elettrodo cilindrico dotato di impronta frontale a stella a cinque punte, integrato con un *plenum* interno e 5 micro-canali di lavaggio conforme.

I limiti della lavorazione dal pieno (Subtractive Manufacturing)

Nell'industria manifatturiera tradizionale, la realizzazione di un elettrodo siffatto partirebbe da un blocco (o barra cilindrica) di rame elettrolitico pieno. La sequenza delle operazioni richiederebbe l'impiego combinato di diverse macchine utensili:

1. **Sagomatura esterna:** Tornitura del cilindro esterno e fresatura CNC a 3 o 5 assi per ricavare l'impronta a stella frontale. Poiché il rame puro genera un truciolo pastoso e tende a incollarsi ai taglienti, le velocità di taglio devono essere ridotte, incrementando il tempo macchina.
2. **Foratura della rete idraulica (L'ostacolo geometrico):** La vera criticità risiede nella realizzazione della rete fluidodinamica interna. Le punte da trapano o le micro-frese operano esclusivamente secondo assi rettilinei (*line-of-sight*). Sarebbe fisicamente impossibile ricavare un *plenum* svasato (la camera di calma conica interna descritta nel Paragrafo 4.3.2) e 5 micro-orifizi da 1,5 mm angolati in modo convergente/divergente partendo da un unico ingresso laterale.
3. **Frazionamento del componente:** Per aggirare questo limite, l'utensile metallico dovrebbe essere progettato in più parti separate (es. una testa con l'impronta e un corpo con il *plenum*), lavorate singolarmente e poi assemblate mediante saldobrasatura o accoppiamenti meccanici ad altissima precisione dotati di guarnizioni, incrementando drasticamente il rischio di trafilamenti di fluido in pressione (2-3 bar) e le resistenze elettriche di contatto.

Il trionfo della complessità gratuita (Additive Manufacturing)

L'adozione della stampa 3D a resina (DLP) capovolge questo paradigma. Nella manifattura additiva vige il principio del "*Complexity for Free*" (complessità gratuita): il costo e il tempo di realizzazione di un componente non sono proporzionali alla difficoltà delle sue geometrie interne, ma dipendono unicamente dal volume di materiale depositato e dall'altezza totale sull'asse Z.

La progettazione dell'elettrodo ibrido ha sfruttato integralmente questa libertà:

- **Canali conformali:** La rete fluidodinamica è stata modellata esattamente dove la fisica del lavaggio lo richiedeva (distribuita attorno alla stella), senza doversi preoccupare di come gli utensili da taglio avrebbero potuto raggiungere quelle cavità.

- **Geometrie auto-portanti:** Applicando le regole del DfAM (l'angolo di overhang a 45° per la volta del *plenum*), è stato possibile stampare il componente in un unico pezzo monolitico (fase *green*), eliminando totalmente la necessità di assemblaggi, saldature o guarnizioni interne.
- **Integrazione di funzione:** La filettatura superiore M10 per l'accoppiamento al mandrino, il raccordo filettato laterale da G1/4" per la pompa e i 5 micro-fori erogatori sono stati creati simultaneamente in una singola sessione di stampa.

Il successivo processo di elettrodeposizione galvanica (*coating* di 0,25 mm di rame) trasforma questa sofisticata ma fragile architettura fluidodinamica in un conduttore di potenza ad altissima efficienza termica.

In sintesi, il confronto tecnologico sancisce che la manifattura convenzionale non solo è più costosa e complessa, ma risulta spesso geometricamente incapace di realizzare gli apparati di lavaggio conforme necessari per massimizzare le performance del processo ECM.

L'*Hybrid Tooling* si dimostra l'unica via tecnologicamente percorribile per ottenere design termo-fluidodinamici estremi in un componente monolitico.

6.3 ANALISI DEI TEMPI DI SVILUPPO (LEAD TIME E TIME-TO-MARKET)

Nel panorama industriale contemporaneo, il vantaggio competitivo di un'azienda non risiede unicamente nella qualità del prodotto finale, ma nella rapidità con cui questo viene immesso sul mercato (*Time-to-Market*). Nei settori manifatturieri avanzati, la progettazione e la realizzazione delle attrezzature e degli utensili dedicati (*Tooling*) rappresentano storicamente il collo di bottiglia principale dell'intero ciclo di sviluppo del prodotto. L'adozione dell'*Hybrid Tooling* si propone di abbattere drasticamente questo *Lead Time* produttivo.

Per quantificare questo vantaggio, è opportuno mettere a confronto le catene del valore cronologiche necessarie per ottenere il primo prototipo fisico funzionante dell'elettrodo ECM.

6.3.1 Cronologia della Manifattura Convenzionale

La produzione di un elettrodo in rame massiccio mediante lavorazioni per asportazione di truciolo (CNC) impone una filiera rigida e sequenziale:

1. **Approvvigionamento materiale:** L'ordine e la consegna di barre o blocchi in rame elettrolitico ad alta purezza richiedono tipicamente dai 2 ai 5 giorni lavorativi, a seconda della logistica di magazzino.
2. **Programmazione CAM:** La generazione dei percorsi utensile per geometrie complesse (come gli spigoli di una stella a cinque punte) richiede ore di lavoro da parte di personale altamente specializzato.
3. **Piazzamento e Lavorazione:** Il tempo macchina per fresare dal pieno un blocco di rame, garantendo tolleranze strette e basse rugosità senza usurare precocemente i taglienti, impegna il centro di lavoro per un intero turno lavorativo (stimato tra le 4 e le 8 ore).

In uno scenario industriale ottimistico, il *Lead Time* per un singolo elettrodo tradizionale si attesta tra i **3 e i 7 giorni lavorativi**.

6.3.2 Cronologia del Processo Ibrido (Additive Tooling)

La filiera validata nel presente lavoro di tesi sovrverte completamente le tempistiche. Svincolandosi dall'approvvigionamento di costosi semilavorati metallici, la resina fotopolimerica e i sali per il bagno galvanico costituiscono beni di consumo sempre disponibili a scaffale. La timeline per la produzione dell'elettrodo ibrido si articola come segue:

- **Stampa 3D (DLP - Anycubic):** Essendo l'utensile alto 65 mm, la stampa richiede approssimativamente **5 ore** (indipendentemente dalla complessità dei canali interni, grazie al principio additivo layer-by-layer).
- **Post-Processing (Lavaggio e Curing):** Il bagno a ultrasuoni e la stabilizzazione UV impiegano complessivamente circa **1 ora**.
- **Attivazione Superficiale:** L'applicazione della vernice grafitica, le asciugature intermedie e la burattatura di omogeneizzazione richiedono circa **1,5 ore**.

- **Elettrodeposizione Galvanica:** L'accrescimento del *coating* di rame da 0,25 mm, come documentato nei test, richiede **8 ore**.

Il tempo totale di sviluppo fisico dell'elettrodo ibrido si attesta a **circa 16 ore complessive**. Dal punto di vista della programmazione industriale, ciò significa che un elettrodo disegnato al CAD nel tardo pomeriggio può essere mandato in stampa la sera, sottoposto al bagno galvanico durante il turno di notte (processo non presidiato) e risultare **pronto per l'installazione in macchina la mattina successiva**. Il *Lead Time* si contrae a meno di **24 ore**.

6.3.3 Iterazione di Design: Il vantaggio empirico dell'agilità

Il vero valore aggiunto della riduzione del *Lead Time* si manifesta nella gestione degli imprevisti e nelle iterazioni di design. Nella manifattura tradizionale, un errore di progettazione scoperto in fase di collaudo comporta la totale rottamazione del costoso utensile in rame e l'azzeramento del cronoprogramma (altri 3-7 giorni persi).

La flessibilità del *Rapid Tooling* è stata dimostrata empiricamente in modo inequivocabile durante i test preliminari documentati nel Capitolo 5 (Paragrafo 5.2.3). Durante la prima fase di collaudo della rete fluidodinamica, si è riscontrata un'anomalia elettrochimica: la formazione di impronte parassite in corrispondenza dei micro-fori, dovuta a un offset iniziale della stella (2 mm) insufficiente a dissipare la densità di corrente sul fondo.

In un contesto produttivo convenzionale, questo difetto avrebbe generato un fermo macchina di una settimana per la riprogrammazione CAM e la fresatura di un nuovo blocco di rame. Grazie al paradigma additivo, l'intervento è stato immediato:

1. Il modello CAD è stato modificato in pochi minuti, portando l'estrusione della stella a **5 mm**.
2. Il file è stato inviato allo *slicer* e la stampante 3D ha avviato la produzione della nuova geometria.
3. Entro la fine del turno successivo, il nuovo elettrodo ottimizzato era già placcato in rame e montato sulla IMPULSE ECM 50, resolvendo definitivamente l'errore senza alcun impatto significativo sui costi di materiale.

Questa agilità (*agile manufacturing*) garantisce alle aziende la possibilità di testare fisicamente molteplici varianti geometriche nel tempo in cui la manifattura convenzionale riuscirebbe a produrne a malapena una, accelerando esponenzialmente la fase di R&D e riducendo al minimo il rischio imprenditoriale.

6.4 MODELLO DI COSTO (COST BREAKDOWN ANALYSIS)

La validazione tecnologica e l'abbattimento dei tempi di sviluppo (*Lead Time*) rappresentano fattori cruciali per l'adozione industriale dell'*Hybrid Tooling*, ma la scelta decisionale definitiva per le aziende manifatturiere risiede nella sostenibilità economica del processo. Un'accurata *Cost Breakdown Analysis* (analisi di scomposizione dei costi) permette di quantificare l'entità del risparmio generato dalla transizione dalla manifattura convenzionale sottrattiva a quella ibrida additiva.

Il confronto economico si articola su due vettori principali di spesa: i costi diretti (materie prime e consumabili) e i costi operativi (tempo macchina e manodopera).

6.4.1 Analisi dei costi per la Manifattura Convenzionale (Subtractive)

Nell'approccio tradizionale, l'elettrodo è ricavato mediante asportazione di truciolo da un semilavorato in rame elettrolitico pieno.

- **Costo della Materia Prima:** Il rame puro è una materia prima dal costo intrinsecamente elevato e soggetto a forti fluttuazioni di mercato. Inoltre, il processo sottrattivo impone un elevato *Buy-to-Fly Ratio* (il rapporto tra il materiale acquistato e quello che effettivamente compone il pezzo finale). Per fresare un cilindro complesso, è necessario partire da un blocco grezzo di volume significativamente maggiore. Oltre il 50% del rame nobile acquistato viene trasformato in truciolo. Sebbene il truciolo sia riciclabile, il suo declassamento genera una perdita economica netta.
- **Costi Operativi e Usura Utensili:** La fresatura CNC a 5 assi comporta un costo orario macchina industriale elevato (tipicamente compreso tra i 50 €/h e gli 80 €/h, dipendentemente dall'ammortamento dell'impianto). Inoltre, la natura duttile e "impastante" del rame causa una rapida usura dei taglienti in metallo duro delle micro-frese, rendendo necessaria la loro frequente e costosa sostituzione, oltre all'impiego massiccio di fluidi lubrorefrigeranti.

6.4.2 Analisi dei costi per il Processo Ibrido (Additive Tooling)

La filiera validata nei laboratori abbatte in modo sistematico entrambe le voci di spesa sopracitate.

- **Costo della Materia Prima (Core + Coating):** L'inversione di paradigma è drastica. L'elettrodo è costituito per oltre il 95% del suo volume da resina fotopolimerica. Considerato il costo medio commerciale della resina *Phrozen Aqua-Gray 4K* (circa 40-50 €/kg) e calcolando che l'elettrodo finito possiede un volume solido di circa 20 cm³ (equivalente a meno di 25 grammi di polimero), l'incidenza del costo del materiale base per singolo utensile precipita a circa **1 €**. Il restante 5% del volume è costituito dal guscio in rame di 0,25 mm. Il costo del solfato rameico disciolto nel bagno galvanico e della minima usura dell'anodo sacrificale in rame puro si traduce in pochi centesimi per pezzo.

- **Costi Operativi ed Energetici:** Le stampanti 3D DLP (come l'Anycubic utilizzata) e le vasche galvaniche hanno costi di ammortamento e consumi energetici quasi trascurabili rispetto a un centro di lavoro CNC. Inoltre, la stampa 3D e l'elettrodeposizione massiva (8 ore) sono processi "a luci spente" (*lights-out manufacturing*), ovvero avvengono senza il presidio costante dell'operatore, azzerando quasi totalmente l'incidenza della manodopera diretta sul costo del singolo componente.

6.4.3 Risparmio Globale e Gestione del Rischio (Opportunity Cost)

Sintetizzando le voci di spesa, la realizzazione del prototipo fisico di un elettrodo ibrido tramite manifattura additiva comporta una riduzione dei costi diretti stimabile in **oltre l'80%** rispetto alla fresatura CNC di un blocco di rame massiccio.

A questo abbattimento verticale delle spese vive si unisce il risparmio sui "costi occulti" (*Opportunity Costs*). Nelle prime fasi di R&D, l'eventualità di testare geometrie inefficaci o di danneggiare l'elettrodo per un cortocircuito (come accaduto nel test limite a 0,4 mm/min analizzato nel Paragrafo 5.6) è un'eventualità probabile. Distruggere un utensile in rame massiccio del valore di centinaia di euro (tra materiale e lavorazione) rappresenta un danno economico rilevante per l'azienda. Al contrario, la perdita di un elettrodo ibrido del valore materiale di pochi euro consente agli ingegneri di spingere i test verso i limiti cinematici e fluidodinamici senza alcuna remora economica, favorendo l'innovazione e la ricerca del parametro operativo ottimale.

In conclusione, il modello di costo certifica che l'*Hybrid Tooling* trasforma l'elettrodo ECM da bene strumentale ad alto valore aggiunto e criticità logistica a vero e proprio **materiale di consumo** (consumable), economico, flessibile e prontamente sostituibile.

6.5 SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E SCALABILITÀ DEL PROCESSO

L'analisi di un nuovo processo produttivo non può ritenersi completa se non include una valutazione del suo impatto ecologico e della sua capacità di adattarsi a volumi di produzione crescenti. I paradigmi moderni dell'Industria 4.0 impongono che l'innovazione tecnologica proceda di pari passo con la sostenibilità ambientale (*Green Manufacturing*) e la flessibilità logistica. L'approccio basato sull'*Hybrid Tooling* additivo risponde perfettamente a queste sfide, offrendo vantaggi sistemici rispetto alle lavorazioni sottrattive tradizionali.

6.5.1 Riduzione degli scarti e impronta di carbonio (Carbon Footprint)

La manifattura sottrattiva è per definizione un processo generatore di scarti. La fresatura di un blocco di rame massiccio trasforma una percentuale maggioritaria del materiale nobile acquistato in truciolo. Sebbene il rame sia riciclabile, i trucioli generati dai centri di lavoro CNC sono inevitabilmente contaminati da emulsioni e fluidi lubrorefrigeranti. La separazione, il lavaggio chimico e la rifusione di questi sfridi comportano un dispendio energetico enorme, incidendo pesantemente sull'impronta di carbonio globale del ciclo produttivo.

Al contrario, la tecnologia di stampa 3D DLP opera secondo un principio *Zero-Waste* (scarto zero). La stampante polimerizza esclusivamente la quantità di resina necessaria a definire il volume dell'elettrodo, supporti inclusi. L'unico scarto generato è costituito dalla minima frazione di resina incombusta rimossa durante il lavaggio in alcol isopropilico (IPA).

Anche la fase di funzionalizzazione metallica risulta ecologicamente efficiente. Il bagno di elettrodeposizione a base di solfato rameico lavora in un circuito chiuso: gli ioni di rame depositati sull'elettrodo vengono costantemente ripristinati dalla lenta dissoluzione dell'anodo sacrificale in rame puro, senza generare reflui chimici tossici o gas serra, e con un'efficienza di conversione del materiale vicina al 100%.

6.5.2 Efficienza energetica dei macchinari

Il divario di sostenibilità si allarga ulteriormente analizzando l'assorbimento energetico. Un centro di lavoro CNC a 5 assi impiegato per la fresatura del rame richiede potenze elettriche nell'ordine delle decine di kilowatt (kW) per alimentare mandrini ad alta velocità, servomotori per la movimentazione dei pesanti assi meccanici e pompe ad alta pressione per il refrigerante.

In netto contrasto, l'ecosistema necessario per produrre l'elettrodo ibrido è caratterizzato da assorbimenti minimi. Una stampante 3D LCD/DLP da banco consuma mediamente meno di 100 W durante l'operatività. Analogamente, la successiva fase galvanica massiva descritta nel Capitolo 3 ha operato erogando una corrente di soli 0,8 A a bassi voltaggi. L'energia totale (espressa in kWh) spesa per realizzare l'utensile ibrido è frazionaria rispetto a quella richiesta per asportare lo stesso volume di metallo dal pieno, traducendosi in una riduzione verticale delle emissioni indirette di CO_2 .

6.5.3 Produzione distribuita e Scalabilità Industriale

Oltre ai benefici ambientali, l'integrazione della manifattura additiva offre una scalabilità industriale senza precedenti. Se un'azienda necessitasse di scalare la produzione ECM passando da 1 a 20 macchine operanti in parallelo, l'approvvigionamento degli elettrodi convenzionali richiederebbe l'acquisto di molteplici e costosi centri di lavoro CNC, o l'esternalizzazione a fornitori con logiche di attesa incompatibili con i picchi di domanda.

L'adozione dell'*Additive Tooling* permette invece di scalare la produzione implementando una *Print Farm* (una batteria modulare di stampanti 3D a basso costo) e una serie di vasche galvaniche. Questo ecosistema produttivo occupa una frazione dello spazio di un'officina meccanica e richiede un investimento in conto capitale (CAPEX) infinitamente inferiore.

Infine, l'approccio additivo abilita la transizione verso la **Manifattura Distribuita** (*Distributed Manufacturing*). L'elettrodo non deve più essere prodotto fisicamente in un'officina centralizzata e spedito tramite corriere (generando costi e inquinamento logistico). Il progetto dell'utensile viaggia sotto forma di file CAD (*Digital Twin*): può essere inviato istantaneamente in via telematica a qualsiasi stabilimento nel mondo dotato di una stampante a resina e di un impianto galvanico di base, consentendo la fabbricazione dell'elettrodo esattamente *dove e quando serve* (logica *Just-in-Time*).

In sintesi, il modello tecnico-economico elaborato nel Capitolo 6 certifica che la sostituzione degli elettrodi massivi con controparti ibride polimeriche costituisce non solo una soluzione ingegneristica elegante ai limiti fluidodinamici, ma una direttiva strategica in grado di rendere il processo ECM più agile, scalabile, economico e profondamente allineato agli obiettivi globali di transizione ecologica.

CAPITOLO 7: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il presente capitolo riassume le attività di ricerca sperimentale condotte sull'integrazione di utensili ibridi nel processo di *Electrochemical Machining* (ECM). Il lavoro ha analizzato la fattibilità tecnica e l'efficacia operativa di elettrodi composti da un nucleo polimerico, realizzato mediante tecnologia *Digital Light Processing* (DLP), e un rivestimento superficiale in rame applicato per via galvanica.

Attraverso un approccio basato sul *Design for Additive Manufacturing* (DfAM), abbiamo ottimizzando la configurazione interna del tooling per migliorare la dissipazione termica durante l'esercizio. Le prove sperimentali, eseguite su lega AlSi10Mg, hanno permesso di valutare il comportamento dell'elettrodo ibrido in diverse condizioni di carico, fornendo dati quantitativi sulla stabilità dimensionale e sull'integrità del rivestimento metallico. Di seguito sono presentate le principali evidenze sperimentali riscontrate, un'analisi comparativa dei costi rispetto ai metodi di produzione convenzionali e le potenziali linee di sviluppo futuro per l'ottimizzazione del processo.

7.1 SINTESI DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA E VALIDAZIONE DELL'HYBRID TOOLING

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato la valutazione tecnico-sperimentale di elettrodi ibridi per la lavorazione elettrochimica (ECM), costituiti da un nucleo polimerico realizzato tramite manifattura additiva DLP (Digital Light Processing) e rivestiti mediante un guscio metallico conduttivo. Il superamento delle limitazioni tipiche del tooling tradizionale — caratterizzato da costi elevati e tempi di produzione prolungati dovuti alla lavorazione sottrattiva di metalli massivi — è stato perseguito attraverso l'integrazione di tecniche di prototipazione rapida e processi di metallizzazione galvanica.

La sfida progettuale ha riguardato la compatibilità tra le proprietà termomeccaniche del polimero (HDT di 70 °C) e l'ambiente operativo ECM, caratterizzato da correnti elevate e pressioni del fluido fino a 2 bar. Per garantire l'integrità strutturale dell'elettrodo, si è reso necessario l'impiego di strategie di Design for Additive Manufacturing (DfAM). In particolare, il passaggio da una configurazione di lavaggio trasversale (cross-flow) a una configurazione con flussaggio interno conformale ha permesso di ottimizzare la gestione termica del sistema. L'integrazione di un plenum interno e di 5 micro-orifizi da 1,5 mm ha consentito una distribuzione simmetrica dell'elettrolita, funzionale non solo alla rimozione dei fanghi di lavorazione, ma anche alla dissipazione del calore generato per effetto Joule sul rivestimento metallico.

La validazione sperimentale è stata condotta su piastre in lega di alluminio AlSi10Mg mediante macchina IMPULSE ECM 50, testando l'utensile in configurazioni di erosione statica, affondamento dinamico e perforazione passante. Le analisi metrologiche (microscopia confocale 3D) hanno confermato che l'elettrodo ibrido mantiene l'integrità strutturale durante il processo, senza evidenziare delaminazioni del rivestimento in rame o deformazioni plastiche del nucleo in resina. I test di perforazione passante hanno evidenziato la tenuta del sistema di adduzione interna anche in condizioni di repentina variazione della pressione del meato.

In sintesi, i risultati ottenuti confermano che l'utilizzo di elettrodi ibridi stampati in 3D rappresenta una soluzione tecnicamente valida per applicazioni di Rapid Tooling in ambito ECM. Il processo ha permesso di ottenere geometrie di scavo accurate, riducendo significativamente i tempi di realizzazione dell'utensile rispetto alle metodologie tradizionali e limitando l'impiego di materiali metallici nobili allo stretto necessario per la conducibilità elettrica, con una conseguente ottimizzazione dei costi di processo.

7.2 PRINCIPALI EVIDENZE SPERIMENTALI E TRAGUARDI TECNO-ECONOMICI

La campagna sperimentale ha permesso di identificare la finestra operativa ottimale per l'utilizzo dell'elettrodo ibrido in lega di alluminio AlSi10Mg, definendo i vincoli di processo necessari a garantire la stabilità strutturale del componente.

- **Parametri elettrici e cinematici:** È stata definita una configurazione operativa stabile a 12 V in corrente continua (DC) con una velocità di avanzamento (*feed rate*) di 0,2 mm/min. Tale impostazione ha consentito un regime di dissoluzione anodica controllato, riducendo le instabilità elettriche e i picchi di corrente che, in condizioni di tensione superiore (24 V), hanno causato valori di rugosità superiori.
- **Gestione fluidodinamica:** Il monitoraggio della pressione di iniezione ha confermato l'importanza del lavaggio conformale interno. La pressione di 2 bar (corrispondente al 45% della capacità della pompa) è risultata il valore di compromesso tecnico ottimale: sufficiente a garantire l'evacuazione dei fanghi di reazione e lo smaltimento del calore per effetto Joule, ma non tale da indurre sforzi di taglio eccessivi capaci di compromettere l'adesione del coating metallico sul nucleo in resina.
- **Valutazione tecnico-economica:** L'impiego del nucleo in resina DLP, rispetto alla lavorazione CNC di un blocco di rame massiccio, ha ridotto significativamente il *Lead Time* di produzione dell'elettrodo. L'analisi dei costi diretti ha evidenziato una diminuzione delle spese per singolo componente, legata principalmente al minor costo della materia prima polimerica rispetto ai semilavorati metallici e alla riduzione degli scarti.

In conclusione, i parametri ricavati certificano che il sistema è non solo pronto per essere impiegato con successo in operazioni di finitura e scavo di precisione, ma possiede tutti i requisiti di affidabilità ed economicità richiesti dai moderni standard industriali.

7.3 SVILUPPI FUTURI E NUOVE PROSPETTIVE DI INDAGINE

I risultati ottenuti in questo lavoro di tesi non rappresentano un punto di arrivo, bensì pongono le basi per una nuova serie di indagini scientifiche e ottimizzazioni industriali nell'ambito dell'*Hybrid Tooling* applicato all'Electrochemical Machining. La natura innovativa di questa architettura utensile apre diversi filoni di ricerca futuri, volti a superare le attuali limitazioni e ad espandere il campo di applicazione della tecnologia.

Di seguito si delineano le principali prospettive di sviluppo:

- **Ottimizzazione della fluidodinamica interna:** Le evidenze sperimentali hanno mostrato che la configurazione dei canali di adduzione attuale, sebbene efficace, presenta margini di miglioramento nella gestione del lavaggio frontale. Gli sviluppi futuri dovranno concentrarsi su una riprogettazione dei condotti interni (DfAM), orientata a convogliare l'elettrolita direttamente nell'area di scavo frontale. L'obiettivo è garantire un'evacuazione più rapida degli idrossidi, riducendo le zone di ristagno che si sono dimostrate critiche soprattutto operando a tensioni superiori (24 V).
- **Transizione verso regimi a corrente pulsata (PECM):** L'adozione di generatori a corrente pulsata (PECM) rappresenta un'evoluzione necessaria per migliorare il controllo termico. L'introduzione di pause controllate nel ciclo di lavoro (*off-time*) permetterà di estendere le finestre di processo, agevolando la dissipazione del calore generato per effetto Joule e la rimozione dei gas di processo, riducendo ulteriormente il carico termico sul guscio metallico e sul substrato polimerico.
- **Implementazione di rivestimenti galvanici intermedi:** Per aumentare la durabilità dell'utensile, si ipotizza l'impiego di una strategia a *multi-layer coating*. L'interposizione di uno strato intermedio (es. Nichel-Fosforo) tra la resina e il rame di finitura potrebbe incrementare la resistenza meccanica del guscio, fungendo al contempo da barriera termica e migliorando l'adesione interfacciale, riducendo i rischi di delaminazione indotti dagli sforzi di taglio fluidodinamici.
- **Protocolli avanzati di attivazione superficiale:** Al fine di standardizzare il processo di produzione dell'elettrodo, sarà necessario definire protocolli di pre-trattamento superficiale più robusti. L'integrazione di tecniche di *wet chemical etching* controllato permetterebbe di ottenere una rugosità superficiale ottimale per l'ancoraggio del metallo in modo ripetibile, superando l'attuale variabilità legata alla preparazione manuale dei campioni.
- **Espansione del range dei materiali lavorabili:** Dopo la validazione su lega AlSi10Mg, le prospettive di indagine includono l'applicazione del metodo su materiali più tenaci, come acciai inossidabili, leghe di titanio e superleghe base Nichel (Inconel). Tali materiali richiedono una ricalibrazione dei parametri elettrolitici e di densità di corrente, offrendo l'opportunità di verificare il limite massimo di tenuta strutturale del sistema ibrido in condizioni di dissoluzione anodica più impegnative.

Il presente studio conferma che l'integrazione tra libertà progettuale additiva e processi di metallizzazione costituisce una soluzione tecnologica efficace per il *Rapid Tooling*. Il lavoro svolto stabilisce una metodologia solida che potrà essere estesa verso applicazioni industriali su larga scala, migliorando l'efficienza e la flessibilità produttiva nel settore della lavorazione elettrochimica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Painuly, R. P. Singh, e R. Trehan, "Electrochemical machining and allied processes: a comprehensive review," *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2023.
- [2] U. S. Kim, K. G. Kim, S. U. Kwak, e J. W. Park, "Analysis of electrochemical machining characteristics using electrode tools fabricated by 3D printing," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, e B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2015.
- [4] P. Padhi, S. K. Kar, e A. K. Rout, "Performance analysis of a thick copper-electroplated FDM ABS plastic rapid tool EDM electrode," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
- [5] Prof. Elena Bassoli, Prof. Silvio Defanti, Appunti del corso di "Additive Manufacturing", Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, A.A. 2023/2024.
- [6] C. Çoğun, A. Özgedik, e C. Bilen, "Performance of copper-coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining (EDM)", *Rapid Prototyping Journal*, 2008.
- [7] R. Bernasconi, C. Credi, M. Levi, e L. Magagnin, "Electroless Metallization of Stereolithographic Photocurable Resins for 3D Printing of Electronic Devices," *Journal of The Electrochemical Society*, 2017.
- [8] J. Lee et al., "Electroless Plating on Polymer Surfaces: Comprehensive Review of Mechanism, Process, Analysis, and Future Applications," *Advanced Materials Interfaces*, 2024.
- [9] J. W. Dini e A. D. Knobbe, "Electrodeposition of Copper," in *Modern Electroplating*, 5a ed., M. Schlesinger e M. Paunovic, Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [10] D. M. Mattox, "Physical Sputtering and Sputter Deposition," in *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, 2a ed., Boston, MA, USA: William Andrew Publishing (Elsevier), 2010.
- [11] F. Cuppari, et al., "Combined Manufacturing Process of Copper Electrodes for Micro Texturing Applications (AMSME)," *Materials*, vol. 14, 2021.
- [12] K. H. Ho e S. T. Newman, "State of the art electrical discharge machining (EDM)," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003.
- [13] S. Zhao et al., "Numerical Evaluation on Residual Thermal Stress-Induced Delamination at PDMS–Metal Interface of Neural Prostheses," *Micromachines*, 2021.
- [14] B. Yan, X. Song, Z. Tian, X. Huang, e K. Jiang, "3D Printed Flexible Cathode Based on Cu-EDTA that Prepared by Molecular Precursor Method and Microwave Processing for Electrochemical Machining," *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 2020.