



Ricerca di Sistema elettrico

Processi di produzioni polveri per Additive Manufacturing: Ricerca e sviluppo

S. Galvagno, C. Borriello, S. Portofino, G. Pandolfi, P. Iovane

PROCESSI DI PRODUZIONI POLVERI PER ADDITIVE MANUFACTURING: RICERCA E SVILUPPO

S. Galvagno, C. Borriello, S. Portofino, G. Pandolfi, P. Iovane
(ENEA)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: 1.3 Materiali di frontiera per usi energetici

Work package: WP3- Sviluppo dei materiali per Additive Manufacturing, per la produzione di componenti metallici in sostituzione dei prodotti di fonderia

Linea di attività: WP3-LA 3.4 Processi di produzione di polveri metalliche per AM: ricerca e sviluppo

Responsabile del Progetto: Daniele Mirabile Gattia ENEA

Responsabile del Work package: Daniele Mirabile Gattia ENEA

Indice

Sommario	4
1 Introduzione	5
2 Additive manufacturing: la tecnologia e le materie utilizzate.....	8
2.1 Tecniche AM	8
2.2 Produzione di polveri.....	11
2.3 Materiali di interesse.....	15
3 Upgrading impianto prototipo	21
3.1 Descrizione e funzionamento dell'impianto.....	21
3.2 Progettazione preliminare.....	27
4 Conclusioni	33
5 Bibliografia.....	35
6 Abbreviazioni ed acronimi	39
APPENDICE.....	40

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di programma 2019-2021 WP3 intitolato "Sviluppo dei materiali per Additive Manufacturing, per la produzione di componenti metallici in sostituzione dei prodotti di fonderia" e più precisamente nella linea di attività LA 3.4, si è posta l'attenzione sui processi di additive manufacturing (AM), sulle caratteristiche delle polveri utilizzate per i processi AM e sulle tecniche di produzione di materiali per AM, in forma di polvere, con particolare attenzione alle leghe metalliche come ad esempio gli acciai.

Lo scopo è la produzione di polveri metalliche e non, mediante plasma termico a corrente continua (DC) che possano trovare un utilizzo in AM. Per l'ottenimento di tale obiettivo è risultato necessario prevedere la progettazione di modifiche ed implementazioni da apportare sull'impianto prototipo, con sorgente DC plasma torch, installato nel Centro Ricerche ENEA Portici presso il laboratorio SSPT-PROMAS-NANO. Generalmente la tecnologia impiegata per questi trattamenti è basata sul plasma ad accoppiamento induttivo (ICP). Sperimentare l'impiego di un processo basato sul più economico plasma DC può offrire dei vantaggi in termini di costi e flessibilità delle attrezzature. Attualmente l'impianto è utilizzato per la produzione di nanomateriali e richiede modifiche per processare materiali da utilizzare successivamente in tecnologie AM.

L'AM ha un alto potenziale innovativo che scopre sempre nuovi campi di impiego al crescere delle tecniche di processo e dei materiali utilizzabili. Tuttavia la competizione con i normali processi produttivi è ancora limitata ad alcune applicazioni e necessita approfondimenti e ricerca per svilupparne il pieno potenziale.

Il presente report da una parte esamina i materiali ed i precursori che meglio si prestano al trattamento termico al plasma finalizzato ad ottenere un prodotto impiegabile in AM e dall'altra definisce i requisiti e le caratteristiche di massima che dovrà avere l'impianto. All'interno di tale documento saranno quindi indicati in linea di massima i materiali su cui saranno eseguiti i futuri test, con eventuale revisione in ragione di evidenze sperimentali ed opportunità che si renderanno palesi durante lo svolgimento della sperimentazione. Saranno inoltre presentati i disegni preliminari di progettazione che, assieme ad altre possibili soluzioni mostrate, saranno rivisti, discussi ed eventualmente modificati sulla base dell'esperienza del costruttore al momento della realizzazione.

1 Introduzione

Al giorno d'oggi, i mercati aziendali cercano tecnologie di produzione in grado di trovare rapidamente risposta all'elevate esigenze di variabilità, con catena di approvvigionamento efficiente e consumo di energia ottimizzato. Come soluzione, Industria 4.0 utilizza i vantaggi dell'integrazione delle moderne tecnologie di produzione con sistemi informatici per promuovere le capacità di produzione [1]. In questo contesto, una produzione intelligente migliora la competitività a lungo termine ottimizzando lavoro, energia e materiale per produrre prodotti di qualità elevata e trovare una risposta rapida alle esigenze di mercato ed ai tempi di consegna [2]. Le fabbriche intelligenti rappresentano la nuova generazione del sistema di produzione nei concetti di Industria 4.0 ed un supporto alle tecnologie avanzate come produzione informatizzata, sistemi cyber-fisici (CPS), big data, Internet of Things (IoT), cloud computing (Figura 1) [3].

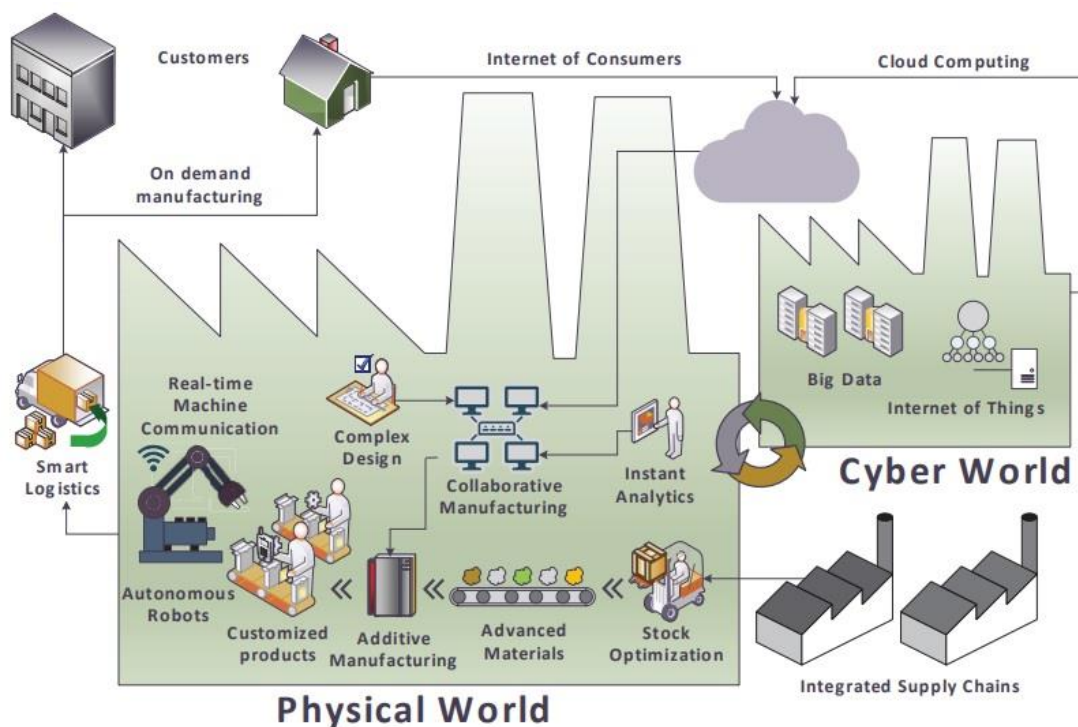


Figura 1. Schematizzazione dei componenti di smart manufacturing in Industria 4.0 [3]

Tra le tecnologie definite abilitanti per Industria 4.0 va segnalata l'Additive Manufacturing (AM) definita come il processo di unione di materiali per creare oggetti a partire da modello virtuale 3D mediante stesura strato per strato (ASTM F2792). Questa tecnologia viene applicata alla fabbricazione di varie strutture e componenti complessi e fu inizialmente impiegata da Charles Hull per la stereolitografia SLA (StereoLithographic Apparatus) nel 1986 [4]. Gli altri metodi di stampa sono stati scoperti nel corso degli anni e l'applicazione della tecnologia AM si è estesa straordinariamente in soli tre decenni trasformando processi produttivi e logistici. Vi è una crescita significativa degli investimenti sul AM da \$ 4 miliardi nel 2014 a oltre \$ 21 miliardi entro la fine del 2020 [5]. Questa crescita è probabilmente dovuta ai molti miglioramenti in tecnologie e materiali impiegati che incoraggiano il mercato a investire in vari settori, come biomedicale, aerospaziale e automobilistico [3]. Tuttavia, i vantaggi del AM attraggono molte attenzioni da parte del settore manifatturiero per attività come produzione su misura seriale, prototipazione, produzione sostenibile, tempi di consegna e costi ridotti [6]. Recentemente, nuovi sviluppi nei processi AM, come la bioprinting, la stampa quadridimensionale (4D), la stampa in nanoscala e la stampa di materiali nanometrici, hanno reso la tecnologia più accattivante [7]. Inoltre i processi AM aiutano

efficacemente le aziende e gli utenti finali più piccoli a sviluppare autonomamente i loro progetti e prodotti innovativi [8].

Ovviamente, l'AM può essere una componente vitale nella filosofia dell'industria 4.0 o della produzione intelligente grazie alla sua alta capacità, in termini di approccio di produzione non tradizionale per la personalizzazione di massa. Tra i molti vantaggi, l'impatto ambientale potenziale del AM è impressionante nel miglioramento della sostenibilità nei sistemi di produttivi rispetto ai metodi di produzione tradizionali. I vantaggi della sostenibilità di AM possono essere sintetizzati in alta efficienza delle risorse, durata della produzione e catena del valore riconfigurata [9-11]. Tuttavia, l'evoluzione del AM non è stata sufficientemente esplorata ed è spesso limitata a molte esperienze di ricerca ed ad impieghi su singole tecnologie di produzione, non sfruttato quindi in modo completo sui componenti del sistema di produzione. Sebbene l'AM offra numerose sfaccettature e capacità uniche nel processo di produzione, esso dovrebbe essere preso in considerazione per semplificare la produzione industriale come un concetto unico di "progettazione e produzione" [12].

I processi AM sono fondamentalmente i processi additivi, ovvero che aggiungono strati di materiali alla superficie precedente tramite diverse tecniche di deposizione che portano a qualità, densità e geometrie diverse delle parti [13,14]. I processi convenzionali sono generalmente sottrattivi o una combinazione di più processi in caso di parti complicate [15]. Il principale svantaggio dei processi convenzionali è l'elevata quantità di materiali di scarto e la mancanza di sistemi di controllo per modificare continuamente i processi in base alle condizioni correnti. Con l'ascesa di macchine controllate da computer, quest'ultimo problema viene in qualche misura risolto, ma i materiali di rifiuto rappresentano ancora una sfida [16]. Nell'approccio attuale, in cui si parla di quarta rivoluzione industriale, Industria 4.0, si è deciso di accoppiare le strutture fisiche con la moderna tecnologia informatica [17,18]. In tal modo il controllo durante i processi di produzione si ridurrà, mentre sarà possibile realizzare la fabbricazione in meno passaggi, in meno tempo e con meno sprechi di materiale per un rapporto costi-benefici più elevato [19].

Tutti i processi AM sono controllati da computer ed è possibile controllare un numero illimitato di macchine contemporaneamente mediante lo stesso computer. I processi possono quindi essere modificati online con un'unica unità di controllo [20]. Il risultato di questa combinazione è che per un singolo utente un prodotto specifico, o personalizzato, può essere prodotto contemporaneamente all'interno di ciascuna macchina [21]. Questa flessibilità nella fabbricazione di diversi prodotti allo stesso tempo, con un livello quasi illimitato di complessità, offre l'opportunità di utilizzare le macchine AM come parte inevitabile della moderna era manifatturiera. Ci sono diversi termini usati per indicare questa categoria; i più usati sono prototipazione rapida, produzione rapida, stampa tridimensionale (3D), produzione intelligente e produzione cloud [22]. La produzione cloud (Figura 2) si riferisce a processi fortemente orientati ai servizi ed ha il vantaggio di poter essere modificata online [23]. Al fine di chiarire questo concetto, consideriamo come esempio il caso di un cliente che ordina un pezzo in fabbrica definendo la geometria desiderata acquistare. Grazie all'accesso agli strumenti di progettazione disponibili nella fabbrica, si possono cambiare i materiali, colori e altre caratteristiche estetiche del prodotto desiderato, personalizzando l'acquisto; allo stesso tempo, si possono controllare le disponibilità dei materiali, delle macchine e dei sistemi di trasporto/approvvigionamento. Controllando tutti gli elementi, i clienti possono caricare facilmente i loro progetti e ricevere il loro prodotto specifico e unico [24].

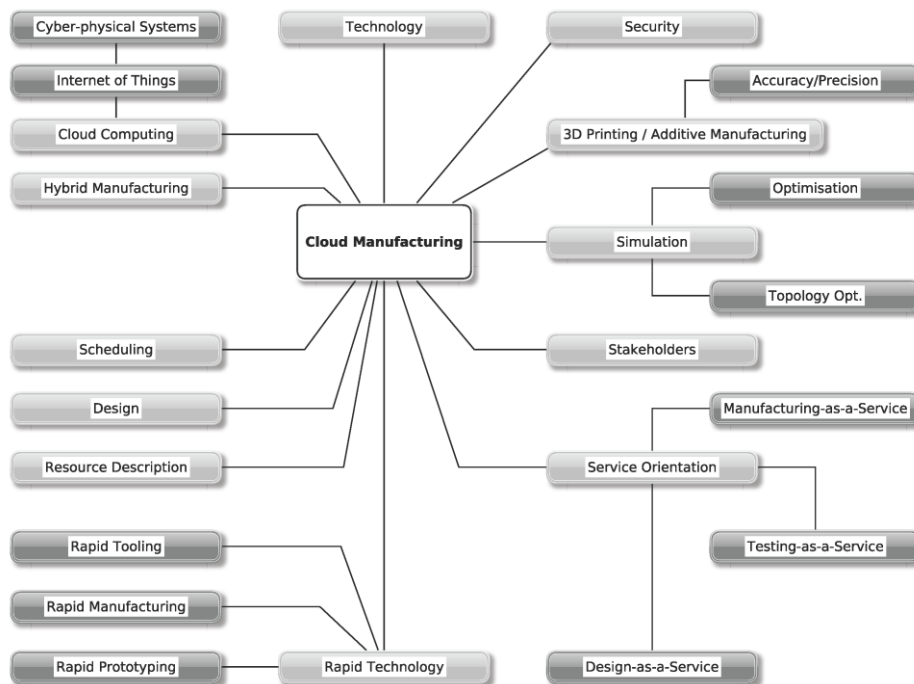


Figura 2. Diagramma di flusso della produzione cloud e sezioni coinvolte [25]

Negli anni diverse tecniche AM sono state sviluppate, non allo scopo di sostituire tutta la produzione tradizionale, ma per ampliare la gamma di selezione dei processi disponibili per i produttori ed i clienti. Ogni processo ha i suoi vantaggi/svantaggi e la scelta di quale utilizzare dipende dall'applicazione richiesta.

Per considerare i vantaggi dei diversi processi AM è necessario rilevare le loro caratteristiche chiave. Ci sono tre principali caratteristiche chiave da considerare nella valutazione ovvero tempo, costi e flessibilità; su queste basi i vantaggi del AM vengono valutati per l'applicazione prevista.

Uno degli scopi principali dell'utilizzo di AM è quello di migliorare l'approvvigionamento ovvero ridurre il tempo di produzione e aumentare la velocità di fornitura [26]. In questo caso le prestazioni della catena di fornitura dei pezzi di ricambio possono essere migliorate modificando l'ubicazione di impianti di produzione cioè decentralizzando la produzione in diversi siti regionali nelle vicinanze dei mercati principali [27]. I vantaggi derivanti dalla produzione distribuita relativa ai pezzi di ricambio sono inferiori agli svantaggi dovuti ai tempi di inattività delle strutture; questo approccio comporta minori costi complessivi, maggiore robustezza e maggiore flessibilità nelle variazioni della catena di approvvigionamento [28]. Avere la produzione di sistemi in loco consente una rapida produzione di parti personalizzate eliminando i tempi di trasporto e il costo delle parti. A differenza della produzione tradizionale, dove dovrebbero esserci enormi quantità di materiale rimosso, le tecnologie di AM applicano i materiali abilmente, in certi casi riutilizzando i materiali rimanenti per la costruzione della parte successiva.

Casi studio hanno dimostrato che i materiali di rifiuti prodotti da tecniche AM sono ridotti del 40% rispetto ai metodi tradizionali e il 95-98% dei materiali rimanenti possono essere riciclati [29]. Inoltre, in linea teorica l'AM non richiede risorse aggiuntive come dispositivi, utensili da taglio, maschere e refrigeranti. La produzione *on demand* riduce il rischio di prodotti finiti invenduti. La flessibilità può essere definita parte del processo: i designer godono di più flessibilità nel progettare parti complesse grazie alla maggiore libertà derivante dalla possibilità di modificare facilmente i parametri del processo di produzione in base alle esigenze. Poiché in AM esistono vincoli di quantità minima di produzione, possono verificarsi realizzazioni di parti uniche con geometrie complesse senza essere influenzati da vincoli di fabbricazione dovuti a logiche di scala del processo di produzione, come avviene nella produzione tradizionale. Inoltre, è possibile costruire un singolo pezzo con proprietà diverse in vari punti produttivi [30,31]. La qualità del prodotto dipende dal processo più che dalle competenze degli operatori, la produzione quindi può essere esattamente in linea con la domanda dei consumatori.

In una semplificazione estrema possiamo dire che i vantaggi dei processi AM si riconducono alla fine ad uno o due dei fattori chiave sopra esposti: ridurre i tempi e/o i costi del processo. Questo è alla fine il risultato della flessibilità dei processi AM.

Tuttavia nonostante le opportunità offerte dalle tecnologie di AM, la correlazione processo-proprietà-geometria è molto complessa.

In tale ambito si colloca l'Accordo di programma 2019-2021 WP3 intitolato "Sviluppo dei materiali per Additive Manufacturing, per la produzione di componenti metallici in sostituzione dei prodotti di fonderia".

In generale il progetto nella sua articolazione cercherà di intervenire su alcuni aspetti importanti dell'applicazione delle tecnologie di AM alla realtà applicativa del sistema elettrico, esplorando le potenzialità e le opportunità offerte. Nello specifico della linea di attività LA 3.4, saranno di seguito fornito un quadro relativo alle caratteristiche, alle potenzialità ed ai limiti dei processi AM comunemente utilizzati. Inoltre, dato lo sviluppo crescente di tali tecnologie, una particolare attenzione sarà rivolta al tipo di materiali impiegabili ed alle caratteristiche che tali materiali devono avere per il migliore utilizzo delle tecniche AM considerate. Sarà quindi posta l'attenzione sulle tecnologie di produzione delle polveri per AM; in particolare l'interesse sarà focalizzato sulla produzione di polveri per AM mediante tecnologia del plasma termico, tecnica in crescente sviluppo applicativo negli ultimi anni. Data la disponibilità di un impianto basato su plasma termico DC nel CR ENEA di Portici, saranno discusse le caratteristiche e le modifiche da effettuare su tale installazione per il trattamento delle polveri da impiegare successivamente per le tecnologie AM.

2 Additive manufacturing: la tecnologia e le materie utilizzate

2.1 Tecniche AM

La procedura generale di tutti i processi AM è quella di deposizione di strati successivi di materiale fino al punto in cui l'oggetto 3D finale è completato [32]. Alcuni di questi processi necessitano di post-elaborazione ma alcuni di essi creano parti già pronte all'uso con un numero ridotto di processi.

I processi AM più comunemente utilizzati sono: l'estrusione, la laminazione a strati, la fotopolimerizzazione, il getto di materiale/legante, la fusione del letto di polvere, la deposizione ad energia diretta.

A seconda del materiale utilizzato in uno specifico progetto, la sorgente di deposizione varia. I materiali più comuni utilizzati nei processi AM sono polimeri, plastiche ingegnerizzate, ceramica, metalli, ossidi metallici e leghe metalliche [33]. La materia prima è disponibile anche in diverse forme solide e liquide, come polimeri/resine liquide, barre, fili, fogli, polveri, ecc. Vengono utilizzate diverse sorgenti di energia come bobine di riscaldamento a resistenza, tubi caldi, raggi laser/ionici/elettronici, vibrazioni ultrasoniche e luce ultravioletta (UV) [34–39].

L'estrusione è il metodo più utilizzato per la tecnologia di stampa FDM (Fused Deposition Modeling); è applicata ai polimeri termoplastici e richiede alte temperature operative. I prodotti finali hanno un'elevata porosità, ma i bassi costi di lavorazione e la flessibilità delle geometrie ottenute ne aumentano le applicazioni per la realizzazione di diverse parti meccaniche. Inoltre, con questo metodo è possibile rinforzare le matrici polimeriche con filler (materiali ceramici, metalli, fibre, ed altro) [40].

La fotopolimerizzazione VAT è un processo che impiega la luce UV per polimerizzare strato per strato ad una velocità di elaborazione elevata, pur mantenendo la semplicità del processo. La prima e più commercializzata tecnologia di AM che utilizza la fotopolimerizzazione è la stereolitografia (SLA) che coinvolge quattro differenti tecnologie: laser, ottica, chimica dei fotopolimeri ed informatica (software); essa non prevede la fusione di un polimero solido, bensì la solidificazione di un fotopolimero (resina) liquido. I vantaggi della tecnologia di prototipazione SLA sono evidenti sul pezzo finito: ha ottime finiture superficiali, ottime tolleranze geometriche e dimensionali. Al contrario della tecnologia FDM, con la tecnologia SLA è possibile realizzare forme molto complesse. Per quanto riguarda gli svantaggi, i macchinari per la stereolitografia sono molto costosi, difficili da calibrare e soprattutto i polimeri utilizzati non sono

certamente economici. Inoltre bisogna sottolineare che il pezzo finito deve essere lavato dal polimero liquido in eccesso che ancora lo bagna e che, per ottenere delle elevate resistenze meccaniche, il polimero deve essere completamente reticolato.

Anche la tecnologia di stampa DLP (Digital Light Processing) sfrutta la fotopolimerizzazione che avviene però attraverso una sorgente luminosa differente rispetto ad un laser. Le stampanti 3D con tecnologia di stampa DLP utilizzano infatti un vero e proprio videoproiettore. La fonte di luce si trova al di sotto di una vaschetta con fondo trasparente (VAT) contenente fotopolimero liquido, ed i layer vengono proiettati, uno dopo l'altro, intanto che la piattaforma di stampa si muove dal basso verso l'alto. La sequenza di fotopolimerizzazione restituisce come risultato un modello dalla definizione impeccabile, realizzato in molto meno tempo rispetto ad uno stereolitografico. A differenza di una stampante 3D SLA, le stampanti DLP proiettano infatti in un solo passaggio tutta la superficie del layer di stampa senza doverlo "disegnare" per intero.

La Sheet Lamination è un altro processo AM: la tecnica assembla fogli di metallo uno sull'altro per formare un oggetto 3D. In questo processo, differenti colle, saldature e brasature possono essere utilizzate per mantenere i fogli di materiale in posizione più a lungo, ma la saldatura ad ultrasuoni è la più efficace e la più comune [41]. UAM (ultrasonic additive manufacturing) è il nome del processo AM che utilizza la saldatura ad ultrasuoni. I fogli vengono alimentati nell'area di costruzione dell'oggetto nella geometria richiesta ed una testa ad ultrasuoni li spinge contro lo strato precedente e li salda insieme. Questo processo è noto per essere un processo economico e veloce anche se è necessaria la rimozione del secondo materiale (legante) dopo l'esecuzione delle parti [42].

Material jetting and binder jetting rappresentano due processi distinti che lavorano sullo stesso principio. Nel getto di materiale i polimeri vengono solitamente fusi e depositati sotto forma di goccioline che danno luogo alla geometria richiesta. I polimeri fusi subiscono quindi un processo di indurimento mediante calore, luce o sostanze chimiche, reazioni per aumentare la forza di legame [43].

La tecnologia binder jetting è nata per la stampa 3D di polveri metalliche anche se da qualche tempo viene utilizzata anche per la stampa 3D con polimeri e polveri ceramiche. Il ciclo di stampa prevede una testina di stampa molto simile a quelle delle stampanti 2D. La testina in questione rilascia un legante (binder) su un letto di polvere in corrispondenza dell'area del layer da stampare. Il legante solidifica la polvere nelle aree di contatto e definisce il layer di stampa. Nella fase successiva, il piano di stampa si abbassa e viene steso un nuovo letto di polvere. A questo punto la testina rilascia il legante per la definizione di un nuovo layer e così via. Una volta completato il processo, dovrà essere rimossa la polvere in eccesso non utilizzata per accedere al modello 3D. L'oggetto non sarà però ancora pronto. Sarà necessario un processo di post-produzione per la stabilizzazione delle geometrie. Successivamente, le parti vengono sinterizzate in forni ad atmosfera controllata e temperature diverse a seconda delle polveri metalliche e del legante utilizzato [44]. Uno dei vantaggi di questa tecnologia di stampa 3D, sta nella possibilità di poter stampare in totale assenza di supporti. La tecnologia binder jetting, pur non restituendo modelli 3D con alto livello di definizione superficiale, trova applicazioni in molti settori industriali. Di solito, questi due processi sono considerati rapidi, ma il prodotto finale presenta alcune porosità pertanto la loro migliore applicazione è la produzione di oggetti meccanici selettivamente porosi.

Le tecnologie a fusione di letto di polvere (PBF o powder bed fusion) appaiono in diverse forme: a seconda se si utilizzi una sorgente laser o un fascio elettronico per fondere insieme strato per strato un letto di materiale; se è richiesto o meno un ambiente sottovuoto la tecnologia PBF può essere ulteriormente classificata come Direct Metal Laser Melting (DMLS), electron beam melting (EBM), Selective Laser Melting (SLM), and Selective Laser Sintering (SLS). La fusione laser selettiva (SLM) è una delle più diffuse. In SLM, le particelle metalliche vengono alimentate in strati di diverso spessore ed un raggio laser fonde le regioni desiderate della superficie. Nel passaggio successivo, un nuovo strato di polvere viene distribuito sulla piastra e la sorgente laser scioglie la polvere fino a quando la deposizione termina e si ottiene la forma finale. Le sorgenti di fusione possono variare in base alle condizioni e al prezzo delle macchine utilizzate [45]. Le più comuni sono i fasci laser, elettronico e ionico. L'atmosfera della camera è controllata flussando alcuni gas inerti che minimizzano il processo di ossidazione durante fusione e solidificazione della polvere [41]. I gas comunemente utilizzati sono azoto ed argon. Una interessante caratteristica della SLM è la sua

capacità di fabbricare oggetti da materiali a classificazione funzionale partendo da premiscelati o polveri separate [46].

Un altro processo AM molto utilizzato è noto come deposizione ad energia diretta (Directed energy deposition o DED). In questo processo, una testa laser (DED-L) o un fascio elettronico (DED-EB) o un arco elettrico (DED-PA) viene utilizzato come fonte di energia termica per fondere le particelle metalliche depositate nella regione di costruzione tramite ugelli di polvere posti accanto alla sorgente [47].

La DED-L è significativamente più veloce di SLM, ma offre una minore precisione geometrica nel prodotto finale. Per l'elevata velocità di deposizione, è possibile produrre pezzi con un elevato rapporto di forma (altezza e spessore) [47]. I processi DED possono essere condotti in atmosfera controllata o in aria. Poiché la materia prima è immessa a getti tramite ugelli, la DED utilizza più polvere per fabbricare una parte specifica rispetto alla SLM [48]. La Figura 3 riporta in uno schema riassuntivo i layout delle principali tecnologie AM.

E' importante sottolineare che in alcune macchine moderne, soprattutto quelle che operano con le polveri in particolare con i letti, il materiale in eccesso può essere riciclato, favorendo così la sostenibilità nel settore manifatturiero additivo [49].

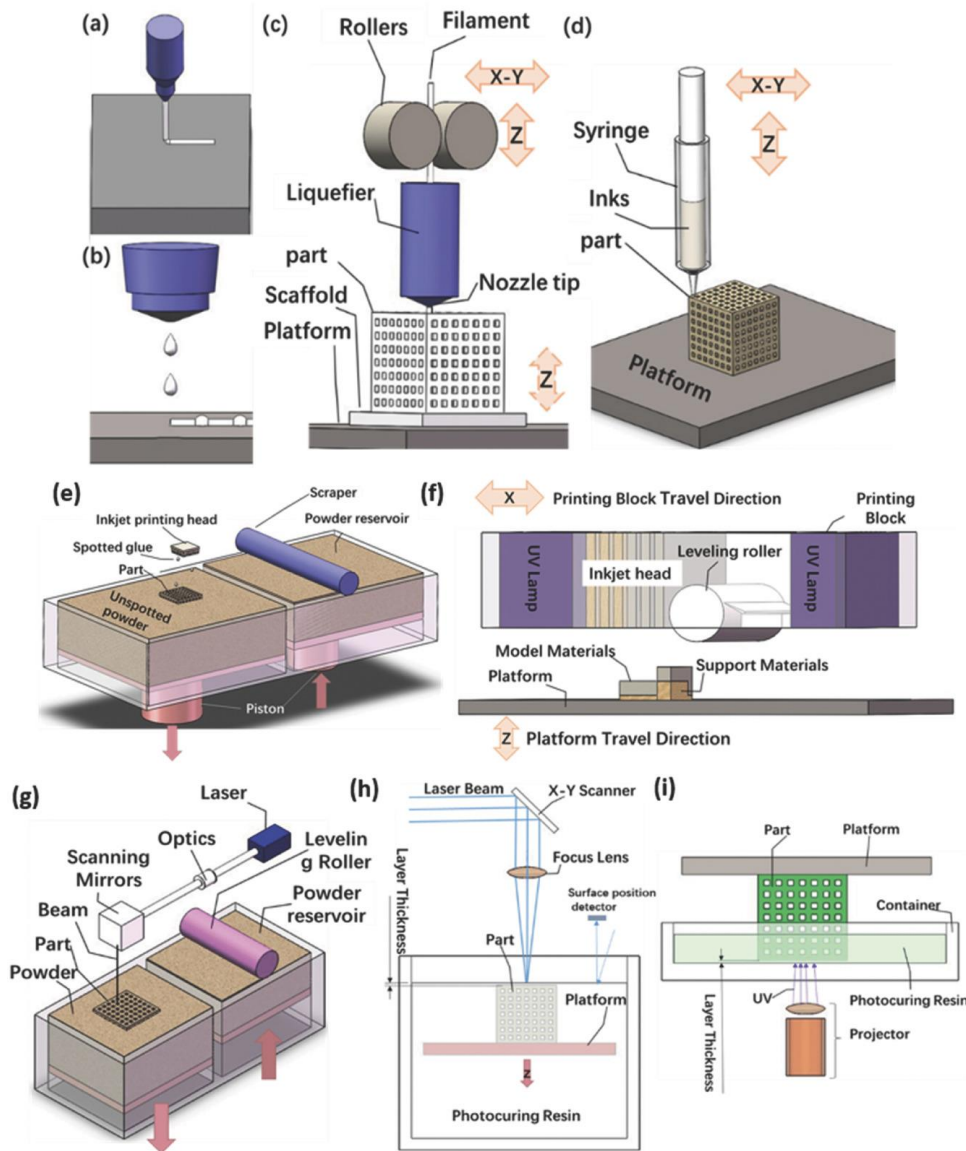


Figura 3. Schema dei processi AM[49]

2.2 Produzione di polveri

Lo sviluppo crescente delle tecnologie AM ha determinato una crescente richiesta di materie prime aventi proprietà specifiche, tali da influenzare in maniera diretta le proprietà dei componenti finali. Molte materie prime usate in AM sono costituite da polveri fini con particelle di dimensioni medie comprese tra i 20 μm e i 60 μm , come ad esempio nelle macchine a tecnologia a letto di polvere; tale range dimensionale permette di stendere, durante il processo, uno strato di polvere con uno spessore di qualche decina di micrometri. Le dinamiche legate alla reattività del materiale, e quindi di conseguenza alla sua preparazione, sono però molto complesse. Nell'esempio considerato, nel caso in cui ci sia un'ampia distribuzione granulometrica le particelle più piccole andranno ad occupare gli spazi vuoti lasciati liberi dalle particelle più grandi, quindi si avrà un grado migliore di impacchettamento. Tuttavia, a causa del fatto che la forza di attrazione tra le particelle cresce in modo inversamente proporzionale alle loro dimensioni, le particelle più fini tenderanno ad avere una scarsa scorrevolezza e quindi sarà più difficile stendere uno strato di polveri omogeneo.

La granulometria, oltre al grado di impacchettamento, influenza i processi di microfusione perché particelle più piccole fondono prima e fungono da legante per le particelle più grandi ma possono avere proprietà ottiche peggiori rispetto alle particelle più grandi, influenzando l'assorbimento energetico [50,51].

Anche la forma delle particelle gioca un ruolo importante: è la caratteristica che contribuisce in modo più significativo alla densificazione nei processi AM. Polveri sferiche e con la superficie liscia hanno un impacchettamento migliore e permettono di ottenere layer densi e omogenei, mentre polveri di forma irregolare tendono a causare la presenza di agglomerati e porosità.

Le tecniche "a letto" non sono però le sole che impiegano polveri come materiali di partenza. Le tecnologie di produzione attualmente disponibili rendono possibile la realizzazione di una grande varietà di polveri in grado di soddisfare i requisiti necessari per un vasto numero di applicazioni. Ad esempio, molte tecniche di stampa 3D attualmente in uso (Fused filament fabrication (FFF), FDM, SLA, DLP) utilizzano polveri metalliche o ceramiche di dimensioni micro e submicrometriche come componenti di paste, resine e filamenti polimerici: tali polveri conferiscono proprietà avanzate ai prodotti e consentono di formare e, dopo l'eliminazione della matrice, densificare oggetti metallici e ceramici senza utilizzare stampi o presse. In alternativa, come visto sopra, macchine AM di potenza, quali SLS, SLM, EBM, consentono di sinterizzare strato per strato oggetti metallici e ceramici partendo da letti di polvere e slurry/paste. In questo caso per favorire la distribuzione dei letti e la coalescenza delle superfici, sono quindi richieste polveri con alta sferoidicità.

La produzione di polveri metalliche segue processi diversi a seconda delle materie prime impiegate e delle proprietà che ad esse si desidera conferire. Tra i metodi più adoperati va evidenziata l'atomizzazione, forse il metodo più versatile per produrre polveri metalliche; la tecnica può essere utilizzata per ogni materiale che può essere fuso. Essa consiste nel formare delle goccioline di materiale rompendo la continuità della colonna di liquido (metallo fuso) mediante getti di gas o liquido. Tali goccioline solidificano immediatamente e vanno a formare polveri, che normalmente presentano un diametro inferiore a 150 μm (anche se è possibile ottenere polveri con dimensione maggiori, se necessario).

Mediante atomizzazione vengono prodotte da 10 a 105 tonnellate all'anno di polveri, con un range dimensionale che può variare da 10 a 1000 μm . Il processo di atomizzazione comprende un'ampia serie di tecnologie utilizzate sia a livello industriale che sperimentale, ma quelle sicuramente più importanti sono l'atomizzazione a gas o ad acqua (che da sole rappresentano il 95% degli impianti di atomizzazione a livello mondiale) e, più recente, l'atomizzazione con plasma.

In generale, il materiale viene introdotto nel sistema e riscaldato fino a fusione. Il materiale fuso è fatto fluire, di solito per gravità, attraverso un ugello in un reattore per caduta. Qui la colonna di liquido viene frammentata e raffreddata impiegando dei getti di fluido (liquido o gas freddi). Le particelle liquide staccate tendono ad assumere durante il volo forma sferoidale e condensano sul fondo del reattore.

L'atomizzazione ad acqua (Water Atomization) è il metodo più usato in assoluto e si può applicare a tutti i materiali che non reagiscono violentemente con l'acqua, purché possano essere fusi e versati agevolmente. Si è visto che metalli con temperature di fusione inferiori ai 500°C tendono a formare polveri molto irregolari a causa del raffreddamento troppo rapido; questo è spesso un fenomeno indesiderato.

In generale l'atomizzazione ad acqua è molto più economica degli altri metodi di atomizzazione grazie al basso costo del mezzo (l'acqua) e alla bassa quantità di energia necessaria a pressurizzarla. I principali svantaggi, invece, sono da ricercarsi nella presenza di impurità, soprattutto ossidi, e nella forma troppo irregolare delle polveri ottenute.

Il sistema di atomizzazione ad acqua prevede apparati contenenti il metallo liquido, un ugello di uscita, la camera di atomizzazione, un sistema di pompaggio e riciclaggio dell'acqua ed una attrezzatura per la disidratazione e l'asciugatura delle polveri, come schematizzato in maniera semplificata in Figura 4a [52].

Il metallo viene fuso in un crogiolo e viene versato in un sifone in modo da fornire un flusso costante di materiale all'ugello posto alla base del sifone stesso. Tramite l'ugello è possibile regolare la forma e la dimensione del flusso di metallo e dirigerlo attraverso un sistema di ugelli di atomizzazione che disgregano il flusso stesso in tante goccioline per mezzo di getti d'acqua ad alta velocità. Successivamente viene rimossa l'acqua dalle polveri in sospensione, che vengono poi inviate all'unità di essiccazione per rimuovere l'umidità ed essere raccolte.

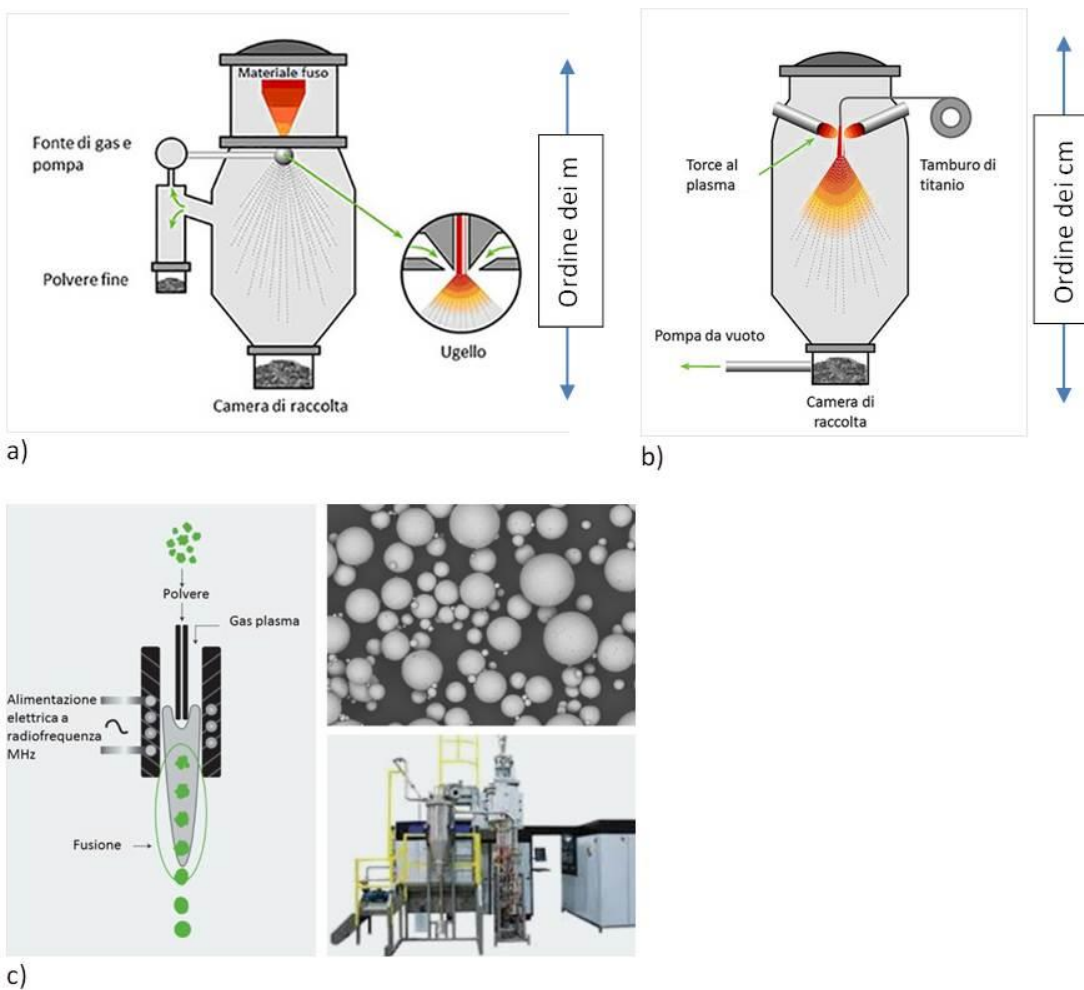


Figura 4. a) Atomizzazione in gas/acqua; b) Atomizzazione a plasma; c) Impianto plasma termico [52]

L'atomizzazione a gas è un processo, analogo al precedente, in cui la continuità del flusso di metallo liquido viene interrotta da un gas ad alta velocità, come aria, azoto, argon o elio; generalmente si preferisce ricorrere ai gas inerti piuttosto che all'aria per evitare fenomeni di ossidazione e/o contaminazione del metallo. L'atomizzazione avviene per trasferimento di energia cinetica dal mezzo di atomizzazione al metallo. L'atomizzazione a gas funziona in modo molto simile a quella in acqua e quindi anche l'impianto è strutturato allo stesso modo (Figura 4a): il metallo fuso viene colato dall'alto direttamente dentro la camera di atomizzazione, dove viene atomizzato da getti di gas ad alta pressione.

A causa della minore capacità termica del gas rispetto all'acqua, le goccioline di metallo hanno un tempo di solidificazione maggiore che si traduce in particelle di polvere più sferiche di quelle che si ottengono con l'atomizzazione ad acqua. Idealmente queste polveri dovrebbero essere lisce e sferiche, ma in pratica, specialmente quando si producono polveri molto fini, si assiste alla presenza di "satelliti", cioè particelle molto piccole attaccate alla superficie di quelle più grandi. Si ritiene che ciò sia causato dalla circolazione di gas all'interno della camera di atomizzazione e che questo sollevi le particelle più fini fino a farle scontrare con quelle più grandi, ancora parzialmente fuse.

Gli attuali processi di atomizzazione in gas sono ottimizzati in modo tale da limitare fenomeni di ossidazione durante la produzione delle polveri, per cui la quantità di ossigeno al loro interno solitamente non supera i valori già presenti nel metallo liquido prima dell'atomizzazione. Tuttavia, specialmente nel caso dell'argon, le polveri possono contenere piccole quantità del gas di nebulizzazione all'interno di singole particelle e questo determina la formazione di microporosità. Probabilmente questo fenomeno è dovuto ad un intrappolamento meccanico che si verifica quando le particelle si scontrano durante l'atomizzazione. Nel caso degli acciai rapidi è stato possibile eliminare la porosità utilizzando, al posto dell'atmosfera di argon, inerte e insolubile, un'atmosfera di azoto, reattivo e solubile, che semplicemente rimane incorporato sotto forma di nitruri [53].

Nelle polveri prodotte tramite atomizzazione a gas si possono trovare spesso delle contaminazioni costituite da materiale refrattario proveniente dai crogioli ceramici e/o dagli ugelli atomizzatori. Una soluzione a questo problema consiste nel ricorrere al processo EIGA (Electrode Induction-melting Gas Atomization), una variante dell'atomizzazione a gas in cui il metallo viene immerso nell'atomizzatore sotto forma di bacchette che vengono fuse da una bobina ad induzione poco prima di entrare nella camera di atomizzazione.

L'atomizzazione al plasma è un processo relativamente nuovo, sviluppato per la produzione di polveri ad elevata purezza di metalli reattivi e leghe con alto punto di fusione come ad esempio titanio, zirconio, tantalio. L'atomizzazione al plasma consente di produrre particelle fini con forma altamente sferica e basso contenuto di ossigeno. Il materiale che deve essere atomizzato può essere introdotto sotto forma di filo o di bacchetta, nel caso si utilizzi un processo RF-PA (Radio Frequency Plasma Atomization), oppure può essere introdotto sotto forma di polveri, nel caso si ricorra al processo RF-PS (Radio Frequency Plasma spheroidization).

L'RF-PA viene alimentato coassialmente all'interno della torcia di plasma ad induzione dove l'estremità del materiale viene esposta al plasma fino ad arrivare a fusione; i gas caldi del plasma atomizzano il filo non appena questo arriva all'ugello supersonico installato all'estremità dell'uscita della torcia.

L'RF-PS sfrutta invece il calore del plasma per portare le polveri (solitamente di bassa qualità, riciclate o prodotte con qualche altro processo meno raffinato) fino al punto di fusione in modo che la tensione superficiale della fase liquida consenta ad ogni particella di assumere una forma perfettamente sferica. L'RF-PS permette di ottenere teoricamente la maggiore resa tra tutti i processi di produzione delle polveri (superiore al 90%); inoltre il processo di sferoidizzazione tramite utilizzo del plasma può essere altamente controllato, permettendo l'ottenimento di particelle delle dimensioni richieste con impianti più flessibili e dalle dimensioni più limitate (Figura 4c).

Il cuore della tecnologia al plasma è la torcia, in grado di raggiungere temperature superiori ai 10.000 °C. Essendo un processo che non utilizza elettrodi, non ci sono parti soggette ad erosione e questo previene l'insorgere di problemi associati alla contaminazione delle polveri. Questa tecnologia permette di produrre in continuo ed è possibile operare con una vasta gamma di gas e a varie pressioni operative, creando così un'atmosfera inerte, riducente o ossidante a seconda delle necessità. La dimensione delle particelle ottenute con questo processo varia fino ad un massimo di 200 µm, con alcuni materiali, ed è possibile utilizzare materiali molto diversi, come leghe di acciaio inossidabile, leghe di titanio, leghe di alluminio e superleghe di nichel.

Pur non avendo un'ampia diffusione, applicazioni che usano il plasma come mezzo energetico in luogo della fusione sono già presenti sul mercato, ad esempio con sistemi sviluppati da General Electric e Carpenter Additive [54, 55]. La tecnologia offre i vantaggi di poter impiegare precursori solidi, liquidi e gassosi e, rispetto alle tecnologie più tradizionali, è fortemente energy intensive e coinvolge reazioni molto veloci ad

alta velocità di conversione, quindi con installazioni molto compatte che occupano minori volumi. La tecnica offre un’alta flessibilità e ben si adatta ai concetti della Fabbrica 4.0, che promuove la produzione dei materiali *on demand* ed alta versatilità produttiva.

Come accennato sopra, per alcune tecnologie 3D è opportuno a volte utilizzare polveri di dimensioni micro ma anche nano, in particolar modo come componenti di paste, resine e filamenti polimerici [49,56].

A seconda del tipo di precursore, la produzione di nanomateriali si realizza mediante plasma attraverso un processo fisico oppure chimico.

Il processo fisico è rappresentato dal ciclo evaporazione-condensazione, nel quale prima il materiale viene riscaldato ed evaporato nel plasma, poi i vapori risultanti vengono sottoposti ad un rapido quenching: in queste condizioni di processo risulta favorita una nucleazione omogenea che dà origine alla formazione di nanoparticelle.

Il processo chimico spiega invece qualsiasi percorso di produzione in cui sia implicata una reazione chimica, come ad esempio un processo di evaporazione-reazione-condensazione, in cui uno o più reagenti gassosi reagiscono con il vapore generato dal materiale introdotto nel reattore al plasma, e il prodotto risultante condensa per formare nanoparticelle. Il reagente gassoso può essere un componente di gas del plasma o iniettato separatamente nella zona del plasma o nel reattore. Anche la sintesi di nanomateriali attraverso la decomposizione termica e la pirolisi dei precursori nel plasma seguita dalla condensazione è valutata come un processo chimico. Agenti utilizzati per il quenching possono essere gas inerti, come Ar e N₂, o gas reattivi, quali CO₂, CH₄ e NH₃, a seconda delle esigenze del processo e del tipo di nanomateriale da sintetizzare. Solitamente vengono utilizzati filtri porosi (metallici o polimerici) per la raccolta dei nanomateriali preparati, che sono installati a valle del reattore del plasma. Nel caso di sintesi di polveri metalliche o di altre polveri reattive occorre prestare particolare attenzione alla gestione e manipolazione della polvere. Di solito è necessaria la passivazione delle polveri prima della loro rimozione dalla sezione di filtrazione del processo o da una glove box.

La Tabella 1 riporta un confronto dettagliato tra le tecniche utilizzate per la sintesi dei nanomateriali.

Tabella 1. Confronto tra le diverse tecniche di sintesi di nanomateriali

	Processi ad umido (sol-gel)	Ball Milling	Laser	Plasma termico
Principio della tecnologia	Chimica in soluzione. Polveri prodotte per precipitazione da soluzione acquosa	Polveri prodotte attraverso la frantumazione del materiale in mulino a palle ad alta intensità	Evaporazione flash del precursore seguita da quenching rapido dei vapori	Evaporazione/condensazione; processo basato su reazioni in fase gas e fusione. Possono essere usati precursori solidi, liquidi e gassosi.
Qualità delle polveri	Alta purezza ma polveri agglomerate. Non sferiche e scarsa cristallinità	limitata purezza ed uniformità della composizione	Alta purezza e qualità delle polveri	Elevata purezza; sferoidizzazione; limitato grado di agglomerazione.
Flessibilità / limitazioni	Limitata ad ossidi ceramici; Lunghezza dei trattamenti post sintesi (filtrazione, essiccamento, deagglomerazione, ecc.)	Impiego di polveri limitato (metalliche); collezione di impurezze	Limitata a piccole produzioni; selezione richiesta nei precursori.	Molto flessibile; applicabile ad un ampio range di materiali metalli e ceramici
Processo	continuo	Discontinuo	Continuo	Continuo e scalabile
Costo	basso costo	basso costo	alto costo	costo medio

La tecnologia plasmatica presenta, oltre a quanto già indicato, altri potenziali vantaggi:

- una zona plasma a grande volume e ad alta temperatura;
- possibilità di iniezione diretta del materiale di alimentazione, rendendo possibile l'evaporazione in flight anche delle materie prime con punto di ebollizione più alto;
- possibilità di lavorare con atmosfere reattive variabili, permettendo la sintesi di diversi nanomateriali;
- possibilità di utilizzare polveri di scarto miscelando anche lotti di materiali e ridimensionando le particelle;
- elevata affidabilità ed efficienza, grazie all'ampia ricerca e sviluppo degli ultimi due decenni, che la rende adatta alla preparazione di nanomateriali sia in laboratorio che in scala industriale.

La possibilità di partire da precursori in polvere potenzia la possibilità di riciclare gli scarti di produzione, come ad esempio i trucioli di lavorazione o la stessa polvere AM trattata (a contatto con i fasci energetici o usata nei supporti).

Il riciclo di materia è molto importante in quanto i flussi di materiali preziosi non sono attualmente valorizzati sufficientemente nell'industria di processo. Ciò comporta un significativo spreco di risorse preziose e costituisce un ostacolo alla competitività di questi settori. Il riciclo con tecnologia a plasma permetterebbe di ridurre i costi dei materiali per l'utente, garantendo la qualità della polvere riciclata.

Nell'ambito dello scenario indicato l'impiego di una sorgente (plasma) ad alta energia, flessibile (utilizzabile nei momenti in cui l'energia costa meno e su diverse produzioni), ad alta efficienza (alta densità con reazioni nei millisecondi) consentirebbe di conseguire un cambio di produzione per fare prodotti customizzati (produzioni personalizzate differenziate al bisogno senza scorte di magazzino) da interfacciare con una tecnica di lavorazione che minimizza gli scarti.

Come mostrato, attualmente esempi di applicazione del plasma nella produzione di polveri utilizzate in AM evidenziano che essa viene effettuata principalmente mediante tecnologia ICP; tuttavia sta sempre più crescendo l'interesse verso le tecnologie DC grazie ai recenti passi avanti fatti nella tecnica di fabbricazione delle torce oltre che la disponibilità di avere sorgenti a più elevata energia e tempi di reazione più brevi.

Infatti la densità di energia del plasma DC è sicuramente maggiore di un plasma tipo RF ed inoltre ha una "scalabilità" maggiore. Infatti, ai fini della trasposizione di processi in scala industriale, va tenuto in considerazione che la potenza delle moderne torce al plasma ad arco DC raggiunge i 3-5 MW con una durata fino a 103 h [82, 83], mentre la potenza dei plasmatron RF esistenti non supera 1 MW. Oltretutto, il costo di produzione di 1 kW di potenza generata da torce al plasma RF e MW è circa 3 volte più alto del costo di generazione del plasma nelle torce ad arco DC [84]. Le torce DC possono quindi avere un'alta efficienza energetica e possono essere utilizzate per la realizzazione di processi ad alta temperatura su scala industriale.

Essendo in dotazione un plasma termico DC nel CR ENEA di Portici, sarà quindi valutato l'upgrading da effettuare per poter produrre successivamente polveri da utilizzare in AM.

2.3 *Materiali di interesse*

Oggi, l'AM inizia a trovare applicazione sempre più diffusa nell'industria aerospaziale, biomedicale e robotica. Oltre che per la prototipazione la stampa 3D trova spazio in questi settori industriali per la fabbricazione di parti metalliche con geometrie complesse, o a minor peso; come descritto precedentemente le principali tecniche impiegate sono DMLS, SLM, laser curing, laser engineered net shaping (LENS), e EBM, ecc. Tutte queste tecniche impiegano polveri metalliche come materia prima. La forza di queste applicazioni consiste nel produrre, partendo direttamente dal modello digitale (CAD), complesse strutture e geometrie caratteristiche impossibili da creare utilizzando altri metodi. Tuttavia, tutti questi processi AM basati sui metalli, impiegano fonti di energia elevate, come laser o fascio di elettroni, per fondere la polvere, con elevati costi di produzione associati all'esercizio ed alle attrezzature. Nonostante ciò continua la rapida ascesa di queste tecniche che mira non solo a rivoluzionare i metodi di produzione esistenti, ma a promuovere anche nuovi processi di produzione per i precursori (polveri metalliche). Infatti, un processo AM basato sul metallo economicamente sostenibile è altamente

desiderabile per le piccole imprese e i laboratori universitari, spesso con limitate risorse economiche da investire o impegnati in attività di ricerca ed esplorative.

La tabella 2 mostra le caratteristiche di processo delle tecnologie a letto di polveri più comuni [57]. Le tecniche a letto di polvere richiedono una distribuzione omogenea delle polveri durante la stesura dei diversi strati, ad opera di un rullo o di un coltello, in modo da avere la ripetizione costante e riproducibile del materiale con uno spessore di qualche decina di micrometri. Come detto già in precedenza, le particelle di dimensioni troppo piccole migliorano il grado di impaccamento delle polveri all'interno dei sistemi di distribuzione ma peggiorano la scorrevolezza limitando fortemente l'applicazione del prodotto finale. Il risultato migliore si ottiene quindi quando è presente una percentuale ridotta di particelle di piccole dimensioni, ma comunque sufficiente ad occupare gli interstizi tra le particelle più grandi.

Per le tecnologie "di potenza" in teoria ridotte dimensioni delle polveri favoriscono la fusione/sinterizzazione, quindi richiedendo minore energia; inoltre, le particelle più piccole fondendo prima fungono da legante per le particelle più grandi ma possono avere una riflettività maggiore o una minore assorbanza del fascio laser rispetto a quelle più grandi [49,50].

Anche la geometria della polvere gioca un ruolo importante per la realizzazione di un buon manufatto nei processi AM; la forma sferica delle particelle e la minore rugosità della superficie migliorano la densificazione permettendo la stesura di layer densi ed omogenei senza presenza di agglomerati e porosità tipici di polveri a forma irregolare. Quindi geometrie omogenee, preferenzialmente sferiche e senza satelliti favoriscono la compattazione delle polveri nel letto (minore grado di vuoto) in modo da evitare la formazione di difetti (vuoti e porosità) nel manufatto. Inoltre la forma sferica favorisce la scorrevolezza (flowability) delle particelle e quindi la loro distribuzione. Come si vede dalla Tabella 2 le polveri impiegate all'interno di questi processi hanno delle distribuzioni selezionate che variano in dipendenza dalla tecnica applicata. Questa limitazione non si presenta in modo così marcato quando le polveri sono contenute in un mezzo che le veicola come un polimero, uno slurry o un inchiostro. Quindi polveri molto sottili possono essere utilmente impiegate nelle tecniche che processano questi materiali. Il preriscaldamento delle polveri serve a diminuire le tensioni residue nel manufatto e/o nel caso degli slurry a diminuire la viscosità della pasta.

Tabella 2. Caratteristiche di processo delle tecnologie a letto di polveri più comuni

Processo	Sorgente di Energia	Materiali	Frazione di particelle (micron)	Spessore del layer (micron)	Pre-riscaldamento
SLM	Laser	Metalli	10-60	30-60	sopra 500°C
EBM	Electron Beam	Metalli	50-150	50-100	700-1100°C
SLS	Laser	Slurry	20-80	100-150	180-380°C
BJT	Riscaldamento in fornace	Metalli, slurry, ceramici	<25	50-100	no

Le tecnologie di produzione attualmente disponibili rendono possibile la realizzazione di una grande varietà di polveri in grado di soddisfare i requisiti necessari per un vasto numero di applicazioni. Attualmente è possibile realizzare polveri di molti metalli differenti, come ad esempio ferro, acciaio inox, superleghe, leghe di titanio, leghe di alluminio, rame, tungsteno, magnesio, cromo-cobalto e metalli preziosi.

Circa l'80% in peso delle polveri prodotte annualmente è costituito da ferro e acciaio, il 9% della produzione riguarda polveri di alluminio e delle sue leghe, il 4,9% riguarda il rame e le sue leghe, mentre le polveri di nichel costituiscono solo il 2%. Tutti gli altri metalli considerati nel loro insieme rappresentano circa il 4% della produzione complessiva [58].

Sono state impiegate molte varianti di acciaio in combinazione con l'SLM tra le quali l'acciaio inox 316L e il 904L, l'AISI Maraging 300, acciai da utensile H20 e X110CrMoVA1 8-2 e leghe Fe-Ni, Fe-Ni-Cu-P, Fe-Ni-Cr, Fe-Al e Fe-Cr-Al [59].

Oltre al titanio commercialmente puro, vengono utilizzate anche leghe come Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb, Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-13Zr-Sn, Ti-13Nb-13Zr; le applicazioni più interessanti riguardano la realizzazione di protesi per il settore medico e la produzione di palette di turbina per motori aeronautici [59].

Quella delle leghe di nichel è la famiglia di materiali più studiata tra quelle prodotte per AM. Tra queste leghe le più usate sono quelle per applicazioni ad elevate temperature come Inconel 625, Inconel 718, Chromel, Hastelloy X, Nimonic 263, IN738LC e MAR-M 247; SLM è stata inoltre utilizzata per realizzare componenti in NiTi, una lega a memoria di forma, anche se con risultati ancora da consolidare. Queste superleghe sono caratterizzate da un'eccellente resistenza alla corrosione e resistenza meccanica alle alte temperature, ottima resistenza a fatica e all'usura e buona saldabilità per questo sono impiegate soprattutto per la realizzazione di palette di turbina per motori aeronautici o turbine a gas per la produzione di energia [59].

Minore diffusione hanno invece le leghe di alluminio. Come materiali sono stati utilizzati alluminio puro, Al6061, AlSi12, AlMg e soprattutto l'AlSi10Mg, una lega da fonderia caratterizzata da buona resistenza meccanica e durezza e ampiamente utilizzata nel settore automotive [59].

La produzione di pezzi in materiali ceramici risulta invece molto più ardua rispetto ai metalli. I prodotti ceramici realizzati spesso risultano meno densi, le polveri sono meno scorrevoli ed è necessario ricorrere al laser a CO₂ perché genera maggiore potenza in aggiunta al fatto che i ceramici assorbono più facilmente la lunghezza d'onda che tale laser irradia.

I materiali studiati per i processi SLM includono allumina, silice, zirconia stabilizzata con ittria, miscele allumina-zirconia, carburo di silicio e vetri Li₂O-Al₂O₃-SiO₂. Le applicazioni includono prevalentemente il settore biomedico o la realizzazione di isolanti termici ed elettrici [59, 60].

Per finire applicazioni molto recenti coinvolgono la formulazione di compositi per processamento diretto di una miscela di polveri di cui una svolge il ruolo di matrice e le altre fungono da rinforzante: un esempio è rappresentato dal TiC usato come rinforzante in una matrice di titanio o acciaio inossidabile. Le applicazioni principali dei materiali compositi prodotti per SLM riguardano il settore biomedicale, l'automotive e l'aerospazio [58].

In ultimo riportiamo applicazioni relative a leghe Cr-Co o Mo-Cr-Co nel settore medicale per le protesi.

Occorre osservare come vi sia un grande sviluppo di nuovi materiali per AM, che coinvolge non solo il settore delle tecniche di potenza ma anche quelle ibride ed indirette che prevedono la formulazione di filamenti e paste contenenti carbonio, rame, silicio e materiali ceramici da formare mediante stampa 3D e successivamente sinterizzare.

Per far fronte a nuove esigenze, sia in termini di costo che di materiali da impiegare, stanno nascendo dei processi AM per metallo (e non solo) ibridi; questi processi utilizzano come materiale di partenza filamenti compositi Metallo-polimero o Ceramico-polimero o filler a base di carbonio-polimero che sfruttano le grandi potenzialità di tecniche più "povere" ma largamente sviluppate applicate al AM dei materiali plastici, come la FDM. Esistono già adesso delle applicazioni commerciali di filamenti compositi polimero/filler in cui il filler presente in quantità significative o elevate conferisce delle proprietà al manufatto finale. Esempi di questo tipo sono filamenti conduttivi a base di polimero (PLA, PP, PA6, ecc.) e carbonio (grafite, nanotubi, grafene) che conferiscono conducibilità elettrica al manufatto stampato. Altri sono rinforzati con fibre di carbonio e vetro ($\leq 40\%$ in peso) che sono impiegati per la formulazione di componenti strutturali; in altri casi il filler conferisce conducibilità termica (Grafylon) o magnetiche (Magnetic Iron-PLA). Case produttrici come la TreeD, Protopasta, Formfutura hanno normalmente a catalogo materiali di questo tipo [61-63]. Nel campo dei metalli, esistono filamenti, dei diametri convenzionali per FDM (1.75 mm e 2.85 mm), che possiedono un carico di metallo $>80\%$; l'applicazione è nata inizialmente per motivi estetici per la realizzazione di modelli, ma in seguito ha iniziato a svilupparsi per l'ottenimento di parti dense in puro metallo.

Si trovano sul mercato processi proprietari come MetalX della Marketforged che forniscono oltre al materiale di partenza (filamento o barretta) il sistema completo di stampa 3D, rimozione del legante (binder) e densificazione (sintering). Il costo di questi sistemi è ancora elevato, ma sicuramente molto inferiore a quello dei sistemi ad elevata energia.

Tuttavia recentemente sono disponibili sul mercato prodotti come il filamento Ultrafuse 316X della BASF o i Metalfil della VirtualFoundry (basati su acciaio, rame, titanio, ecc.) (Figura 5) che possono essere processati con le normali macchine FDM disponibili in commercio.

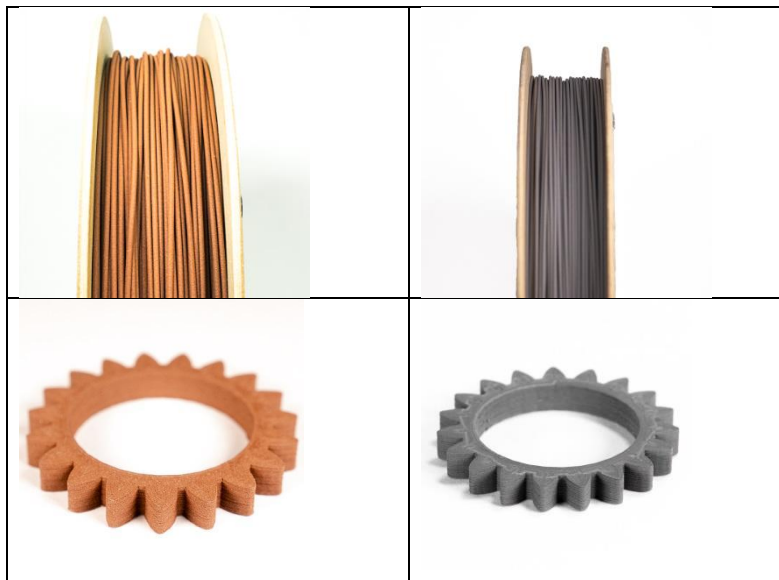


Figura 5. Filamenti ad alto contenuto metallo ed oggetti di prova [64]

Il processo inizia con una stampa FDM come un normale filamento plastico; Il filamento è innanzitutto riscaldato sopra la temperatura di transizione vetrosa e quindi estruso dall'ugello della stampante per realizzare un "verde". Successivamente, il "verde" subisce un processo di debinding per rimuovere il contenuto di plastica e formare un "marrone"; in seguito la parte formata subisce un processo di sinterizzazione per ottenere la parte metallica finale [65,66]. La Figura 6 mostra il processo applicato alla realizzazione di un manufatto.

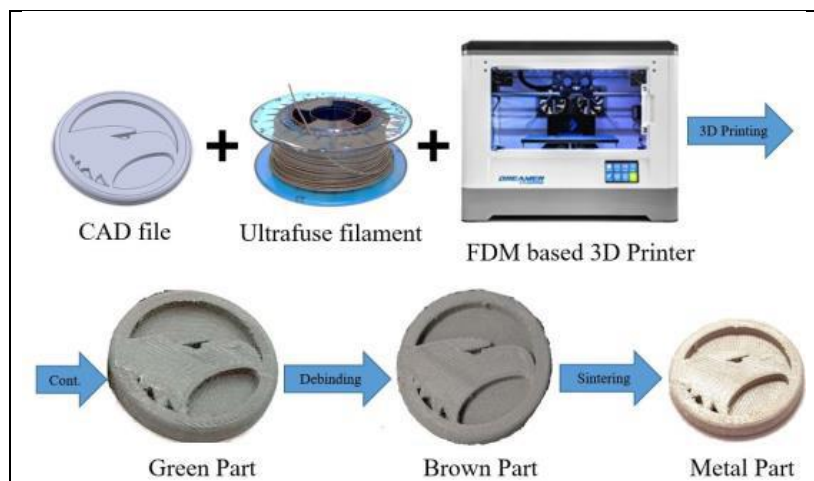


Figura 6. Processo di stampa 3d utilizzando un filamento "metallico" [66]

In ultimo ma non meno importante ricordiamo la stampa di materiali fluidodensanti o di resine attraverso le tecniche LDM (liquid deposition modeling) o SLA/DLP in cui il materiale stampato è sotto forma di pasta, di solito ceramica, o una resina fotopolimerizzabile [67]. Le paste, simili ad impasti a base di argilla possono essere formulate con l'aggiunta di un binder polimerico (circa 10-20%) e una grande quantità di filler (es. ceramico tecnico come allumina); anche in questo caso l'oggetto formato va successivamente sottoposto ad operazione di debinding e sinterizzazione.

Nel secondo caso, oltre alle resine pure esiste la possibilità di formulare resine fotopolimerizzabili caricate con filler a base ceramica, carboniosa o metallica. Anche in questo caso dopo formatura seguirà il processo di cura, debinding e sintering.

La LDM assume importanza nel campo della ceramica, dell'edilizia e delle applicazioni legate ai ceramici tecnici; la SLA/DLP sta assumendo una sempre maggiore importanza in applicazioni nel campo del jewellery design, nel biomedicale (in particolare odontoiatrico), nell'ingegneria e nella meccanica.

Anche in questo caso grande importanza è data dallo sviluppo di materiali ad alta prestazione per i processi di stampa: disponibilità di nuovi impasti e resine. Anche se iniziano ad essere presenti sul mercato prodotti commerciali per questo tipo di applicazioni, lo sviluppo di queste applicazioni e materiali richiede notevoli sforzi di ricerca.

Come detto in precedenza la dimensione delle particelle è un parametro fondamentale soprattutto in relazione al tipo di materiale trattato e dall'applicazione finale a cui il prodotto è destinato, pertanto i parametri delle particelle utilizzate per queste applicazioni sono diversi da quelli richiesti per applicazioni nelle macchine di potenza sia in termini di natura delle particelle che di caratteristiche fisiche e geometriche. Particelle di piccole dimensioni, submicroniche e nanometriche contribuiscono ad aumentare il carico di materiale all'interno del mezzo della matrice (paste, resine e filamenti); inoltre forme allungate facilitano una direzionalità nell'impiego di fibre come rinforzo e aumentano la struttura del manufatto [49,56].

Tuttavia una dettagliata analisi di questi argomenti, per l'approfondimento dei quali si rimanda a pubblicazioni specializzate, esula dallo scopo del presente documento.

Qui ci limitiamo ad osservare come le caratteristiche del filler impiegato differiscano in ragione dell'applicazione e della tecnica adottata e/o, nel caso della sintesi di filler e polveri, suggeriscano la potenziale applicazione.

In base a quanto detto ed all'analisi della letteratura specializzata, la sperimentazione sull'impianto sarà condotta verso l'ottenimento di polveri di interesse nel campo energetico. Esistono diversi esempi in letteratura che riguardano l'impiego di questi materiali attraverso tecniche AM.

La Figura 7 schematizza i materiali che possono essere processati per AM per applicazioni energetiche [49].

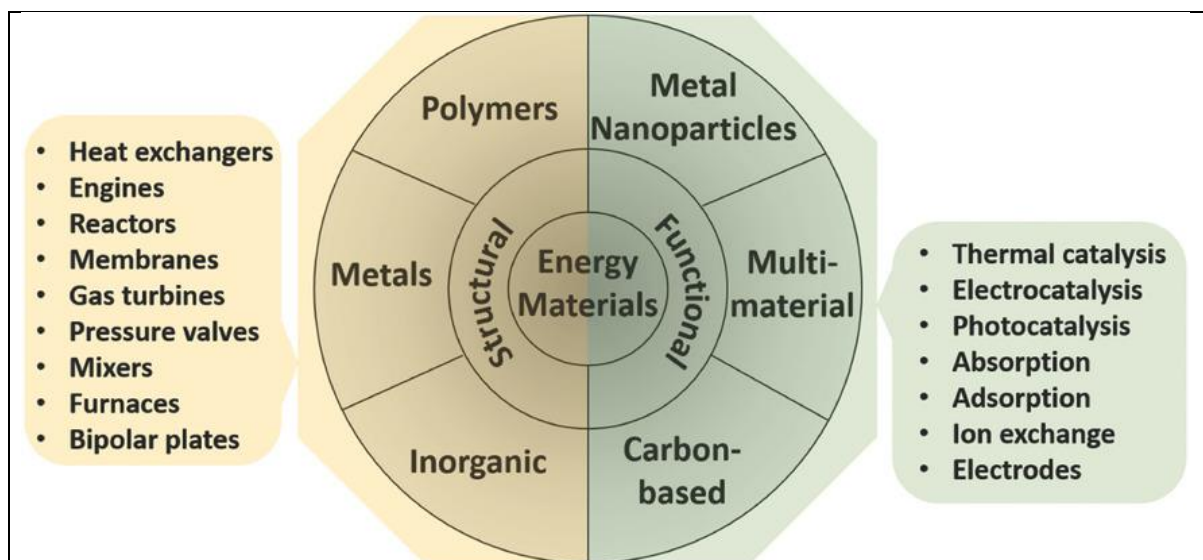


Figura 7. Materiali che possono essere processati per AM per applicazioni energetiche [49]

Tra le applicazioni di tipo strutturale che impiegano polimeri, metalli e ceramici troviamo la realizzazione di scambiatori di calore, reattori chimici, membrane, miscelatori, ma anche turbine e motori; d'altra parte nel campo delle applicazioni di tipo funzionale che impiegano materiali a base di carbonio (grafene, nanotubi, grafite), nanoparticelle di metallo (nichel, alluminio, argento, ecc. o ossidi degli stessi) e multimateriali (sistemi di ossidi o sistemi metallici supportati) troviamo la realizzazione di catalizzatori termochimici,

eletrocatalizzatori, fotocatalizzatori, superfici assorbenti, superfici autopulenti, membrane a scambio ionico, elettrodi, ma anche percorsi conduttivi e circuiti elettrici in 3D.

Ovviamente la scelta del materiale dipende fortemente sia dalle proprietà del componente che dalle condizioni di lavoro a cui è sottoposto.

Nel caso di parti strutturali per un dispositivo energetico, la compatibilità di determinati materiali, con specifiche condizioni di reazione, dipenderà da vari fattori, quali resistenza, conducibilità, resistenza alla temperatura e alla corrosione e proprietà superficiali

La Figura 8 fornisce un outlook del campo di impiego dei materiali per AM per applicazioni strutturali in dipendenza della resistenza meccanica e della temperatura operativa.

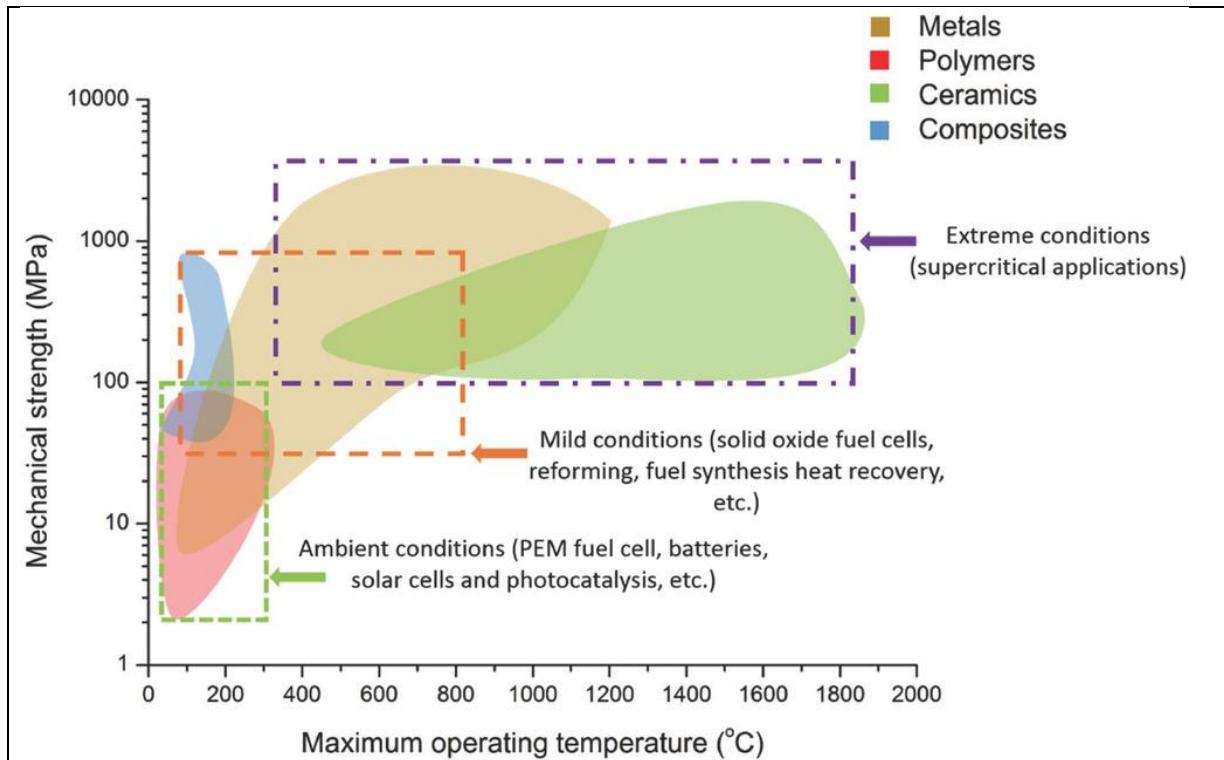


Figura 8. Confronto di materiali strutturali in AM in termini di resistenza meccanica e massima temperatura operativa [49].

La bassa temperatura e resistenza alla corrosione, nonché la mancanza di conducibilità elettrica limita l'uso di polimeri nella produzione di dispositivi energetici. Tuttavia, l'uso di polimeri in condizioni di lavoro "lievi" è molto interessante per il loro basso costo e facilità di manipolazione rispetto ai metalli e ad altri materiali inorganici.

I metalli, tra cui acciaio inossidabile, rame, alluminio, nichel e altri compositi o leghe metalliche, sono ampiamente utilizzati nella produzione di dispositivi energetici a causa della resistenza alle alte temperature, della conducibilità elettrica e della capacità di resistere a pressioni di esercizio elevate. Possono anche essere fabbricati usando varie tecniche AM, come SLS, SLA, stampa a getto d'inchiostro e Direct-Ink- Writing (DIW). Ovviamente rispetto ai polimeri aumentano notevolmente i costi relativi ai materiali ed al processo. In molti casi è anche richiesto un trattamento post-processo.

I materiali inorganici presentano diversi vantaggi in alcune applicazioni energetiche. Ad esempio, per la loro resistenza alla corrosione e alla temperatura i ceramici, possono essere ampiamente utilizzati nelle celle a combustibile a ossido solido; la loro trasparenza ottica appare vantaggiosa per le applicazioni nel campo dell'energia solare.

Tuttavia i materiali per queste applicazioni, così come i metodi per il loro processamento (stampa) non sono certamente al livello di sviluppo delle altre due categorie; questo aggiunge ulteriori limiti applicativi, ma incoraggia maggiori sforzi di ricerca in questo campo.

I materiali chimicamente attivi, come i catalizzatori, sono al centro di ogni processo di produzione energetica; pertanto, la scelta di un materiale funzionale attivo appropriato è di vitale importanza per garantire il corretto decorso della reazione. Materiali a base di carbonio (grafene, ossido di grafene (GO), fibre di carbonio (CF), nanotubi di carbonio (CNT), ecc.), particelle nano-metalliche (NMP) e compositi sono generalmente utilizzati come catalizzatori e/o supporti nelle applicazioni energetiche. I materiali attivi possiedono anche altre funzionalità, come capacità di adsorbimento e scambio ionico. Zeoliti, strutture metallo-organiche (MOF), nanotubi di carbonio (CNT) e silice mesoporosa funzionalizzata sono impiegati per la cattura di CO₂, ma possono anche essere utilizzati come supporto catalizzatore nella conversione catalitica della CO₂. La morfologia dei materiali attivi svolge un ruolo importante, ad esempio i materiali porosi gerarchicamente strutturati possono fornire un'ampia superficie per reazioni, trasporto interfacciale e accorciare i percorsi di diffusione; per questo motivo hanno una grande prospettiva di utilizzo nei sistemi di conversione e stoccaggio dell'energia. Tuttavia, restano ancora irrisolte le grandi sfide per realizzare una fabbricazione controllata di strutture con morfologia, sfaccettature e chimica della superficie pienamente controllata. La flessibilità di progettazione e il costo relativamente basso delle tecnologie AM sono una potenziale risorsa da impiegare e sviluppare nell'immediato futuro per affrontare queste sfide.

Sulla base di quanto detto la sperimentazione sull'impianto sarà condotta principalmente su acciaio 316L largamente impiegato per applicazioni di tipo strutturale, ma anche per la realizzazione di scambiatori e diffusori; in alternativa ci si potrà indirizzare verso una polvere di silicio, semiconduttore utilizzato in campo elettronico e nei processi di sintesi. Come materiale ceramico, si focalizzeranno gli sforzi verso il SiC adoperato in campo elettronico, strutturale, sensoristico o Allumina utilizzata per la realizzazione di isolanti termici ed elettrici.

La selezione dei materiali potrà naturalmente subire modifiche durante l'esecuzione dei test per ragioni operative che eventualmente emergeranno.

Accanto ai materiali "vergini" potranno essere presi in considerazione precursori (reagenti, sali) e prodotti anche quelli provenienti da fonti povere e/o di riciclo, in accordo con i principi base dell'economia circolare e dello sviluppo sostenibile.

3 Upgrading impianto prototipo

3.1 Descrizione e funzionamento dell'impianto

L'attività sul plasma termico prevede di progettare modifiche ed implementazioni da apportare sull'impianto prototipo, con sorgente DC plasma torch [68]. Attualmente l'impianto è utilizzato per la produzione di nanomateriali e richiede modifiche per processare materiali per AM.

L'impianto prototipo installato nel Centro Ricerche ENEA Portici presso il laboratorio SSPT-PROMAS-NANO. è basato sulla tecnologia del plasma termico; esso è alimentato da argon e/o azoto anche se sono previsti altri gas di processo, come l'elio, che viene impiegato per migliorare il contenuto energetico del plasma.

La Figura 9 mostra l'intero impianto attualmente installato presso il CR ENEA Portici.



Figura 9. Impianto prototipo DC plasma installato presso CR ENEA Portici

Le principali parti dell'impianto sono le seguenti:

- 1) torcia al plasma di potenza teorica max, pari a 40 kW; la torcia è in grado di avere una alimentazione orizzontale rispetto alla fiamma del plasma ed è flangiata sul reattore. La movimentazione dell'intero apparato avviene in maniera manuale. Il generatore del plasma per la torcia ha una potenza pari ad 80 kW.
- 2) chiller ad acqua per l'adeguato raffreddamento della torcia; la potenza del chiller è 20kW; la circolazione d'acqua demineralizzata pari a 17 l/min a 15°C di temperatura in ingresso alla torcia è adeguata per il corretto funzionamento della torcia.
- 3) sistema di alimentazione per polveri GTV PF 2/2, che assicura l'alimentazione continua in torcia; il sistema è in grado di assicurare diverse portate di alimentazione, variando tra 0.2 rpm fino a 50 rpm. Ovviamente la capacità di carico dipenderà dalla densità del materiale. L'alimentatore prevede due dosatori per l'alimentazione contemporanea e quantificata di due diverse polveri.
- 4) sistema di alimentazione gas, in grado di alimentare Ar, N₂ ed He, da soli o in miscela, per l'accensione del plasma (plasma gas) e come carrier per l'alimentazione delle polveri nella fiamma (feeder). Il pannello di distribuzione dei gas è basato su un sistema di regolazione manuale, dotato di flussimetri di regolazione e valvole di esclusione;
- 5) il reattore assicura l'ambiente controllato di reazione ed è costruito per resistere all'alta temperatura indotta dal plasma essendo dotato di camicia di raffreddamento in cui si ha la circolazione di acqua. Il reattore è inoltre dotato di un serbatoio di raccolta, dove le polveri ceramiche prodotte vengono raccolte insieme al non reagito ed è un sistema facilmente smontabile ed esplorabile per consentire la pulizia e la raccolta dei campioni depositati. A tal fine il reattore è montato su un tubolare in acciaio che consente l'elevazione delle parti del reattore. Il reattore ha un sistema di controllo della temperatura (su tre punti, effettuato con termocoppie adeguate alla temperatura massima raggiungibile) e della pressione mediante misuratore installato sulla flangia superiore. Entrambi i valori sono letti durante il funzionamento dell'impianto sul PLC. Tali parametri

misurati sull'impianto possono essere inviati ad un adeguato sistema di acquisizione dati interfacciato ad un PC per la registrazione dei dati di processo.

- 6) sistema di abbattimento/filtrazione costituito da filtro ceramico, per la separazione delle polveri trasportate dal flusso gassoso prima dello scarico in atmosfera. L'esercizio dell'impianto avviene in pressione atmosferica/vuoto. Le polveri sono quindi spinte dal gas di processo/plasma gas o risucchiate dal sistema di vuoto posto alla fine della sezione di abbattimento/filtrazione.

Il componente principale di tutto l'impianto è la torcia che è raffreddata mediante acqua in un sistema chiuso ed è costituita da un catodo (elettrodo) ed un anodo (ugello della torcia) in rame e tungsteno [69] (Figura 10).

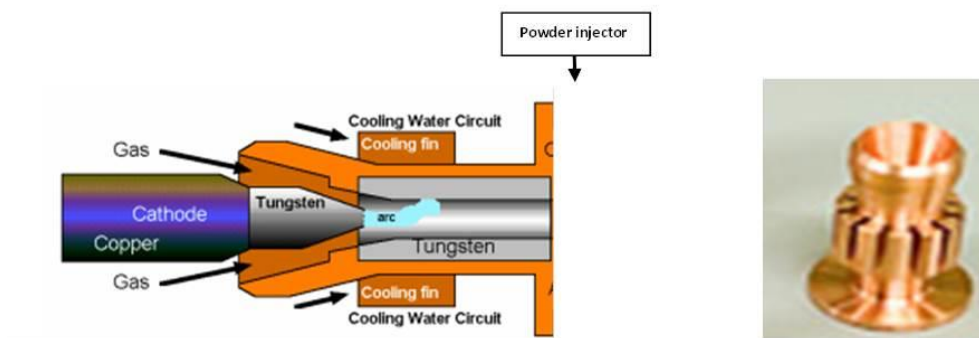


Figura 10. Torcia DC con ugello ad iniezione esterna [69]

L'ugello della torcia può avere diversi diametri, i più comuni vanno da 5 a 8 mm, in base ai quali cambia la fiamma del plasma rendendola più piccola o più larga e quindi con contenuto energetico diverso a parità di potenza. Di solito viene installato un ugello da 6mm che è in grado di avere una alimentazione di polveri radiale rispetto alla fiamma. L'alimentazione del solido avviene mediante iniettori che possono essere posizionati ad una distanza molto breve a valle dell'uscita della torcia al plasma con angolo di 90° o 45° rispetto al getto del plasma. Gli iniettori più comuni che oggi si trovano in commercio per questo tipo di torce si differenziano in base al diametro interno (1,5 mm, 1,8mm e 2mm).

Il sistema DC è contraddistinto da alta energia (temperatura del plasma > 10000°C) e tempi di contatto molto brevi (millisecondi). Le reazioni coinvolte sono quindi molto veloci e la fluidodinamica del reattore gioca un ruolo determinante.

La Figura 11 illustra il flow sheet dell'impianto.

Il materiale solido da trattare viene posto nel dosatore (6) che è dotato di due tramogge di carico per il dosaggio separato di due reagenti o miscele. Le dimensioni delle particelle vengono scelte in funzione del prodotto che si vuole ottenere e della sua applicazione futura.

Il materiale, alimentato al reattore mediante sistema pneumatico che utilizza gas inerte come gas di trasporto (di solito argon), raggiunge la fiamma del plasma mediante iniettori posizionati sotto l'anodo come mostrato in Figura 10. La portata del dosatore viene di solito fatta variare da 1-2g/min fino a 50 g/min.

I gas di processo, alimentati alla torcia per accendere il plasma, sono regolati all'impianto mediante il pannello gas (3); le utenze predisposte in ingresso al pannello sono Ar 120 NI/min 9 bar, N₂ 50 NI/min 5 bar, He 100 NI/min 4 bar.

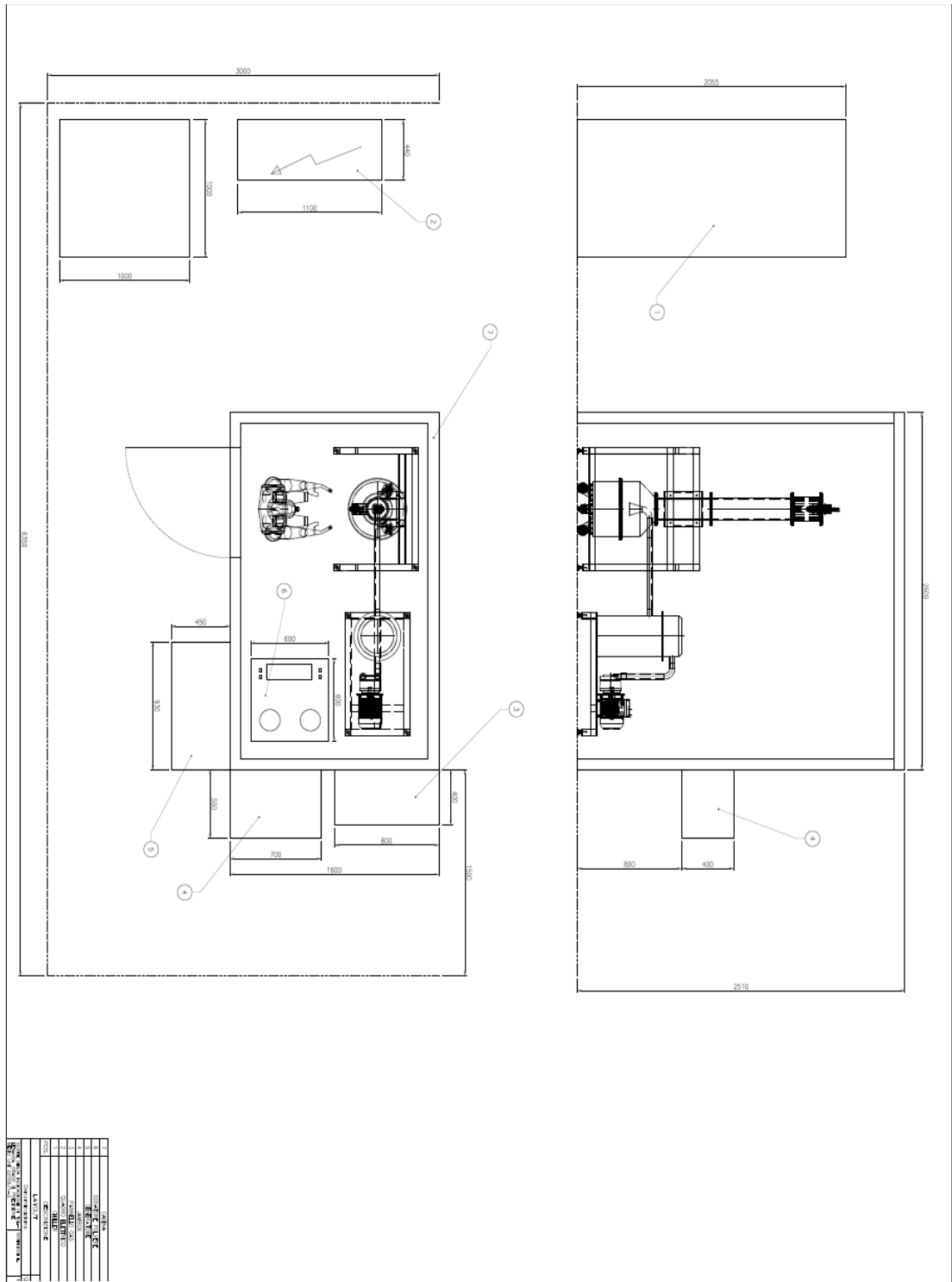


Figura 11. Flow sheet dell'impianto

La Figura 12 riporta la vista 3D delle parti principali dell'impianto. I costruttivi del progetto, realizzati mediante il software Solidworks, sono riportati in appendice A.

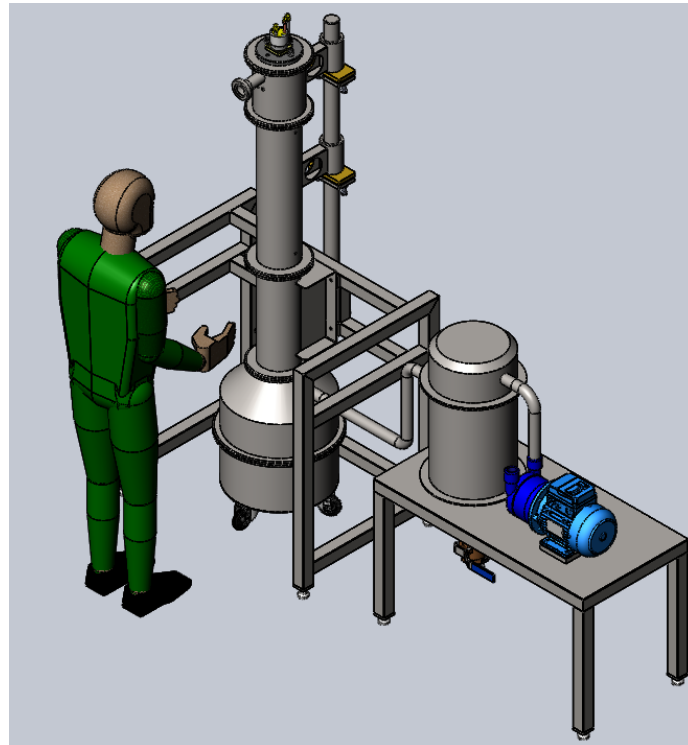


Figura 12. Vista 3D torcia, reattore e sistema di filtrazione

Le prove sperimentali vengono condotte eseguendo prima il vuoto mediante l'accensione della pompa e successivamente, raggiunto il valore di pressione voluto, si effettua l'accensione del plasma e si regola il carrier delle polveri. Dopo lo start del dosatore le polveri arrivano in fiamma dove avviene la reazione.

La Figura 13 mostra l'impianto durante le fasi di funzionamento.



Figura 13. Funzionamento impianto.

L'ultima fase del processo consiste nella condensazione dei prodotti formati per reazione nella fase vapore; in questa fase per produrre polveri submicroniche e/o nanometriche la fase gassosa è "quenched" mediante contatto con le pareti fredde del reattore (circolazione forzata di acqua a 12-15°C) e/o iniezione di gas freddo. Agendo su questi parametri si riduce la crescita delle particelle che in parte si raccolgono nel serbatoio sottostante (Figura 14) ed in parte si attaccano alle pareti del reattore.



Figura 14. Raccolta polveri dopo prova.

Per migliorare il quenching delle particelle sono stati posizionati, parallelamente alla parete del reattore, tubi in acciaio dotati di ugelli attraverso cui viene flussato gas inerte (di solito argon) per il rapido raffreddamento del materiale processato in uscita dalla fiamma del plasma. Questa procedura è risultata essere efficace soprattutto per l’ottenimento di nanopolveri.

Nel caso di processi di sferoidizzazione non si parla più di vaporizzazione ma di fusione; il materiale fuso viene raffreddato sotto l’effetto della tensione superficiale e raggiunge la forma sferica. Nello specifico si tratta di un processo di fusione a volo (*in-flight*). La Figura 15 (a) e (b) rappresentano la trasformazione che avviene durante il processo a carico delle particelle in un generico plasma ed in un plasma RF rispettivamente. Il precursore in polvere di forma irregolare viene introdotto nel plasma; a causa dell’alta energia della fiamma la polvere viene scaldata e fusa immediatamente alle alte temperature a cui è sottoposta. Sotto l’azione della tensione superficiale dello stato liquido, il materiale fuso tende nel suo volo ad assumere una forma sferica. Queste goccioline trasportate fuori dalla fiamma del plasma vengono repentinamente raffreddate grazie al grande gradiente di temperatura che si instaura tra la fiamma e l’ambiente del reattore (quenching). Le polveri sferiche condensate sono così raccolte come prodotti di sferoidizzazione.

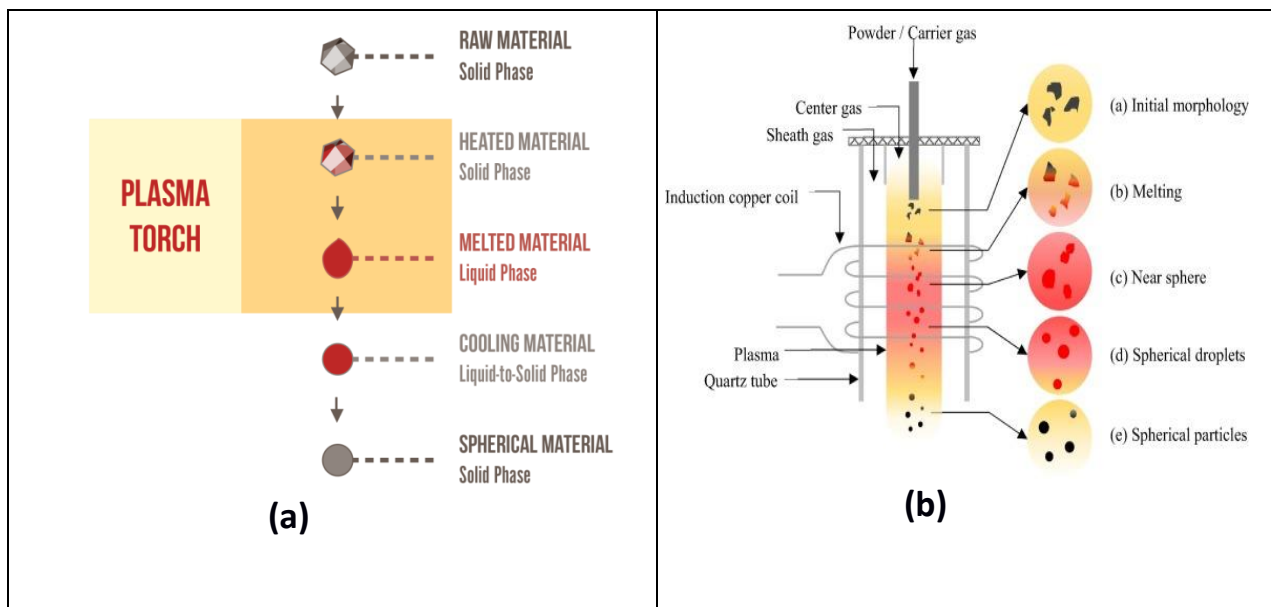


Figura 15. a) Schema della sferoidizzazione al plasma [70]; b) Processo all’interno del plasma RF [71]

Per entrambi i processi la dimensione delle particelle è un parametro fondamentale soprattutto in relazione al tipo di materiale trattato e dall'applicazione finale a cui il prodotto è destinato.

3.2 Progettazione preliminare

In generale nell'ottica di progettare modifiche ed implementazioni da apportare all'impianto al fine di produrre polveri che saranno utilizzate per AM si deve tenere conto in primo luogo delle soluzioni commercialmente esistenti e ben sperimentate. Le polveri che si trovano in commercio sono generalmente prodotte mediante tecnologia basata su ICP in cui la torcia è essenzialmente una bobina di rame che avvolge un tubo di confinamento, all'interno del quale il plasma a induzione viene generato. Durante l'operazione del plasma a induzione, il generatore fornisce una corrente alternata (AC) di radio frequenza (RF) alla bobina della torcia; questa AC induce un campo magnetico alternativo all'interno della bobina.

Attualmente, i reattori al plasma RF sviluppati e prodotti da TEKNA sono ampiamente utilizzati per la produzione di polveri sferoidali (Figura 16) e la produzione di nanopolveri [70, 72, 73].

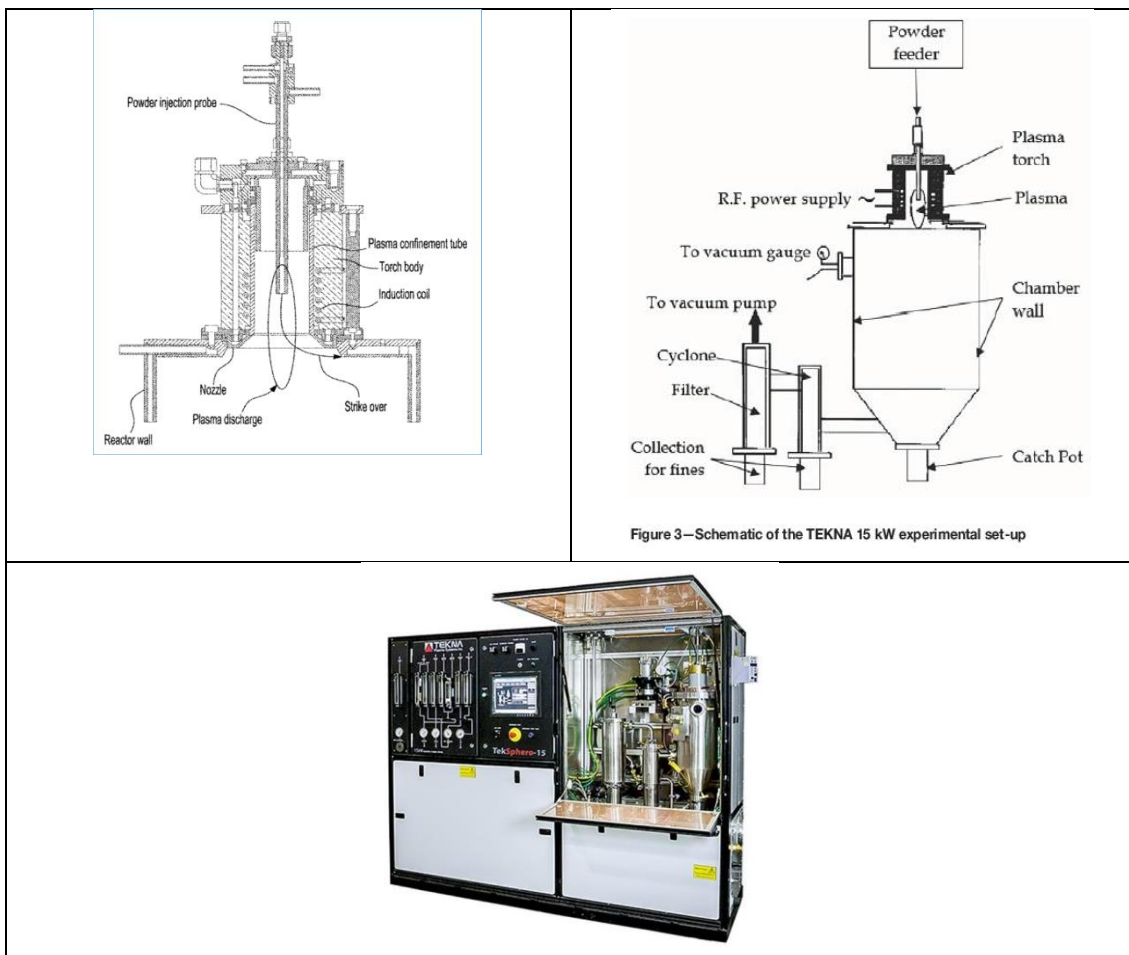


Figura 16. Schema della torcia Tekna applicata alla sferoidizzazione [70, 72, 73]

Uno dei punti di forza per cui si utilizzano plasmatron basati su RF e microne (MW), cioè senza la presenza di elettrodi, è che le impurezze introdotte dall'erosione dell'elettrodo, sono assenti nelle polveri prodotte [74]; tuttavia questo potrebbe avvenire allo stesso modo utilizzando generatori di plasma ad arco DC. L'uso di V-shaped DC Plasmatron in cui gli elettrodi di tungsteno operano atmosfera inerte per Argon [75] consente di minimizzare la presenza di impurezze dovute all'elettrodo nel flusso di plasma termico e quindi garantisce la produzione di prodotti ad elevata purezza.

Bisogna inoltre considerare che l'alimentazione delle polveri in plasma RF (vedi Figura 16) è di tipo assiale quindi il materiale entra all'interno della fiamma assicurando un buon tempo di residenza e sicuro contatto con il getto. Nel caso della torcia DC di solito l'alimentazione è radiale (vedi Figura 10) con tutte le conseguenze del caso come descritto in precedenza (perturbazione nel flusso del getto del plasma, scelta del flusso del carrier giusta affinché le polveri entrino bene in fiamma e tempi di contatto molto brevi). L'alimentazione assiale non è quindi molto diffusa nelle applicazioni delle torce DC.

Esistono tuttavia delle possibili soluzioni tecnologiche che si basano su sistemi multi elettrodo o configurazioni multitorcia. La Figura 17 mostra una configurazione in cui l'arco è trasferito tra due elettrodi (o torcia positiva e negativa) ed il materiale è iniettato in maniera assiale [76].

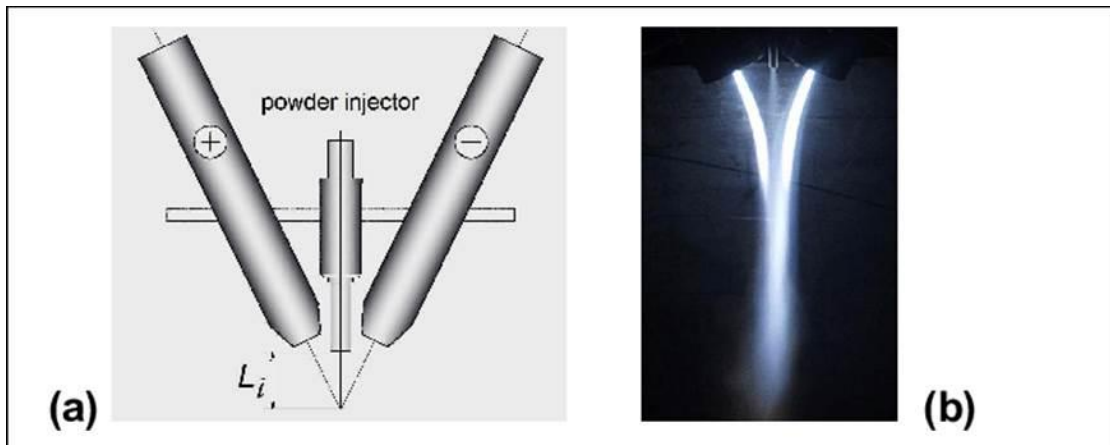


Figura 17. Arco trasferito tra due elettrodi con iniezione assiale [76]

Lo stesso tipo di sistema può essere realizzato in modo ancora più flessibile impiegando due (o più) torce complete che formano una fiamma convergente.

Questo sistema trova una applicazione commerciale per la produzione di polveri a partire da filamenti continui di metallo [77] (Figura 18).

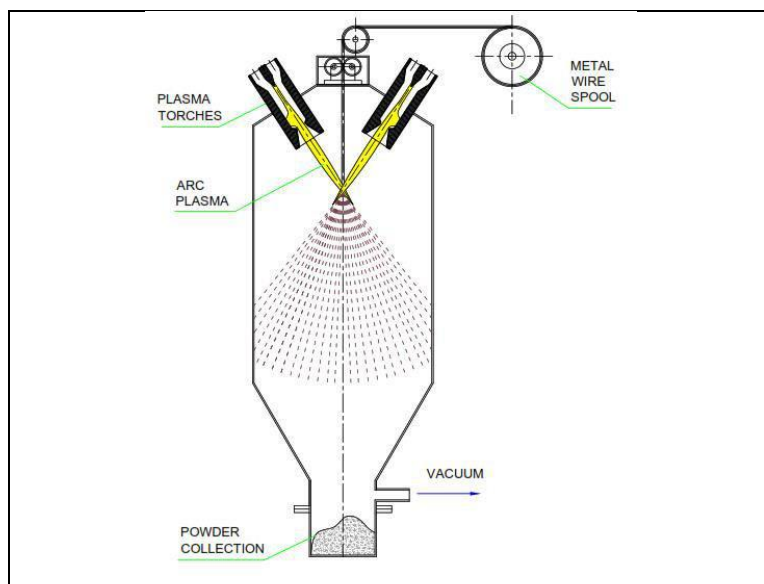


Figura 18. Schema del processo di plasma atomization [77]

Ideato da Tetronics e Pyrogenesis viene dai forni a fusione per acciai e dalla distruzione dei rifiuti, soprattutto pericolosi. Oggi trova applicazione nella produzione di polveri AM come Plasma Atomization.

Esistono anche dei sistemi che sfruttano l'approccio multielettrodo all'interno della stessa torcia. Un esempio di questo tipo di approccio è la torcia Triplex Pro della Oerlikon Metco che impiega tre catodi ed un anodo [78]. Molto interessante è la torcia DC Mettech Axial III della Northwest (Figura 19), che impiega una alimentazione assiale tra i tre catodi; la simmetria dei tre archi generati assicura la stabilità del plasma. Questa torcia trova applicazione nei processi che impiegano sospensioni di polveri [79].

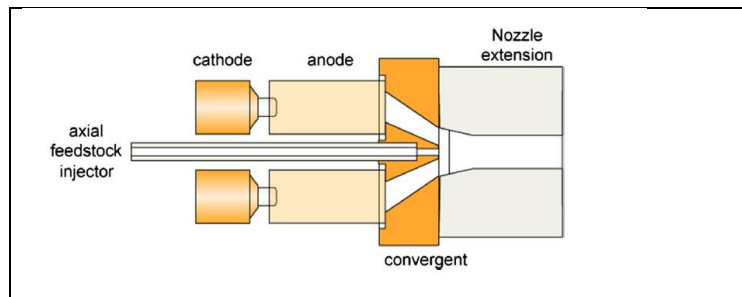


Figura 19. Schema della Mettech Axial III [79]

Un'altra soluzione adottata in letteratura è quella della torcia a catodo cavo, attraverso il quale passa la sonda di alimentazione. Su questo tipo di soluzione, relativamente nuova, vi sono alcuni brevetti depositati, ma non si riscontrano applicazioni diffuse probabilmente a causa dell'impaccamento per fusione delle polveri nel corpo della torcia durante l'alimentazione.

Un sistema alternativo è quello di utilizzare un anodo/ugello ad iniezione interna in cui l'alimentazione avviene in modo interno alla torcia ma perpendicolare alla stessa [69] (Figura 20).

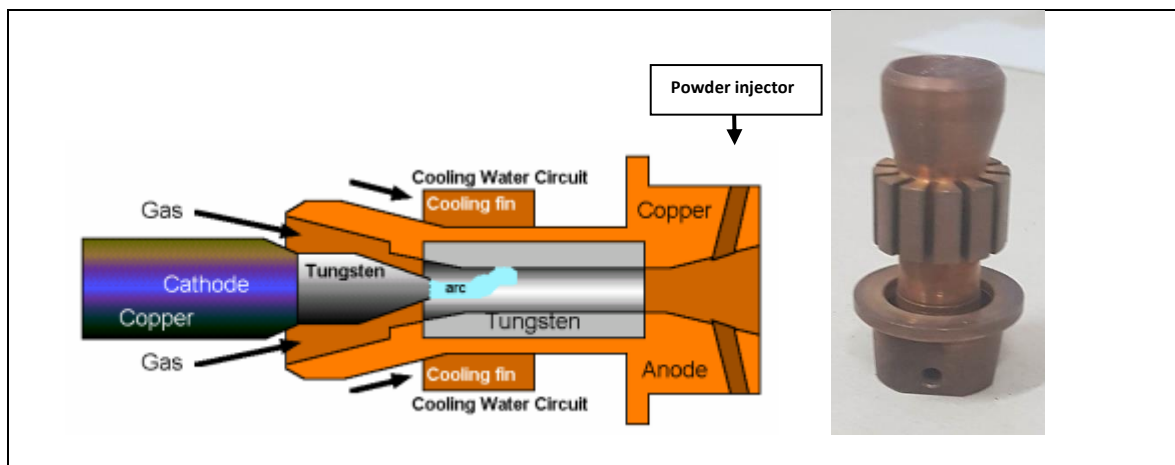


Figura 20. Torcia DC con anodo ad iniezione interna [69]

Tale sistema offre i vantaggi di una posizione precisa dell'iniettore e di un riscaldamento più inclusivo dell'intero spettro delle dimensioni delle particelle, [80] ma, come per l'alimentazione radiale tradizionale, introduce anche una significativa perturbazione nel flusso del getto del plasma. Bisogna infatti considerare che la polvere arriva all'ugello della torcia mediante gas inerte di trasporto (di solito Argon) che impartisce alle particelle uno slancio sufficiente a penetrare nel getto del plasma in modo tale che vengano trascinati nel gas del plasma. L'effetto del carrier gas è quindi molto importante; un getto troppo alto comporterebbe un attraversamento della fiamma del plasma da parte delle polveri mentre uno troppo basso porterebbe al

rimbalzo delle stesse polveri (vedi Figura 21 [81]). E' di fondamentale importanza quindi la scelta del flusso di carrier affinché le polveri viaggino all'interno del plasma.

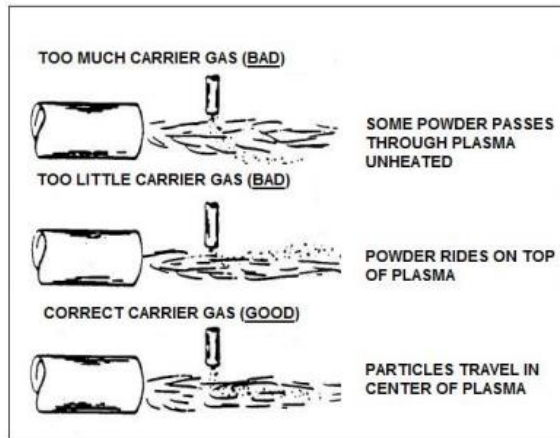


Figura 21. Effetto del carrier gas con alimentazione radiale [81]

Tale soluzione migliora sicuramente la miscelazione tra polvere e fiamma del plasma ma resta fondamentale la scelta del carrier ed inoltre serve una valutazione in termini di tempi di residenza. Di solito vengono utilizzati anodi con diametri di 6-8 mm e profili interni tali da favorire la rotazione del getto. Poiché la velocità del plasma è legata, a parità di altre condizioni, al diametro del foro di uscita dell'ugello della torcia si potrebbe quindi valutare un diametro diverso, maggiore, che dia una fiamma del plasma più lenta aumentando in questo modo la residenza della polvere all'interno del getto. In particolare, al fine di rallentare la velocità della fiamma e quindi aumentare il tempo di residenza si può valutare la possibilità di usare anodi con fori di uscita maggiori (12 o 15 mm). Probabilmente non saranno raggiunti i "lunghi" tempi di residenza di un ICP ma si può ovviare sfruttando la caratteristica dei DC di avere una maggiore densità di energia. Una applicazione simile a quella dell'elettrodo ad iniezione interna consiste nel dotare la torcia di un sistema di estensione che consente di inglobare nel disegno della torcia l'iniezione esterna. La Figura 22 mostra due soluzioni sviluppate in letteratura per questo scopo.

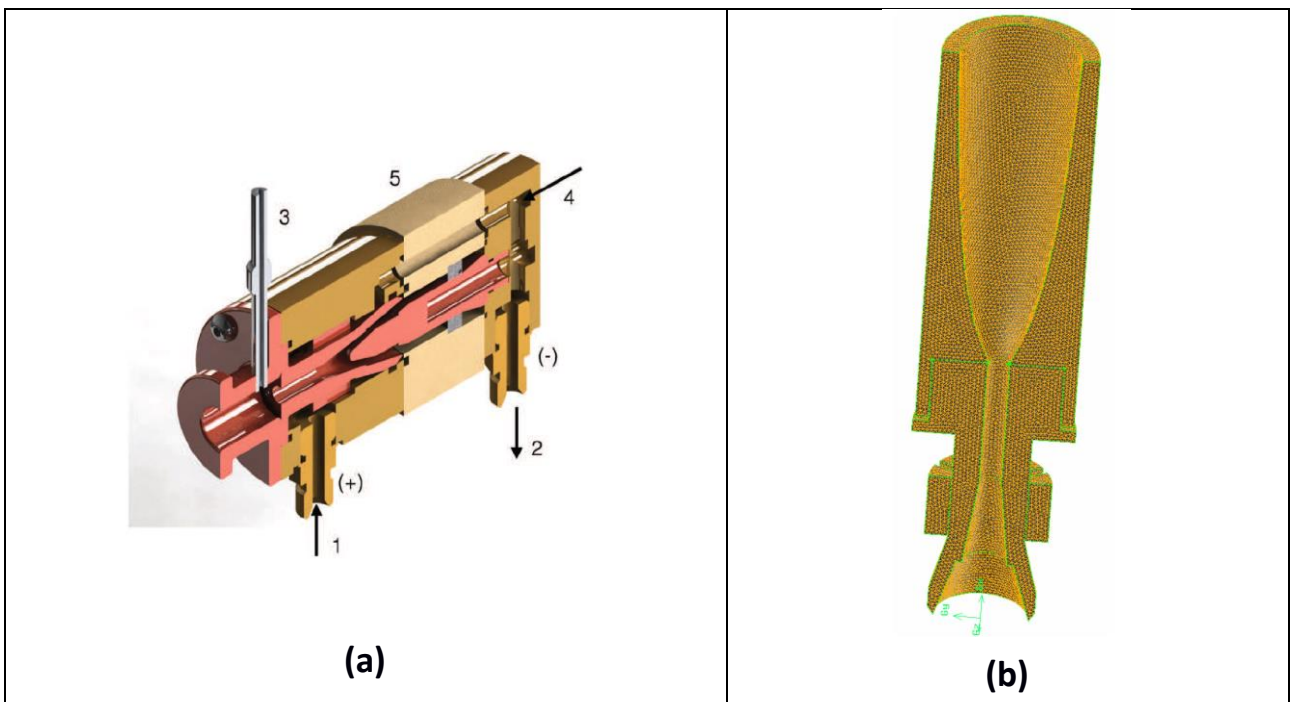


Figura 22. Estensione dell'ugello per il confinamento del plasma

La Figura 22(a) mostra il progetto di una torcia che implementa una estensione del classico ugello del plasma F4 da 6mm per favorire il contatto delle particelle iniettate lateralmente al plasma [85]; invece la figura 14 (b) implementa una estensione dell'ugello ad iniezione interna disegnata con lo stesso scopo [69]. In ogni caso le due soluzioni sono studiate per aumentare l'impiego dell'energia della fiamma riducendo la potenza richiesta per la reazione.

Un altro elemento da migliorare sul set-up sperimentale dell'impianto al plasma installato presso il CR ENEA di Portici è il grado di vuoto/ tenuta rispetto alle infiltrazioni di aria.

La presenza di aria gioca un ruolo fondamentale nei processi di sintesi e sferoidizzazione mediante plasma in quanto considerata l'alta energia in gioco l'ossigeno reagisce facilmente con il precursore alimentato. Fino ad ora il funzionamento dell'impianto è stato in regime di pressione circa pari a quella atmosferica. Dovendo però produrre polveri per AM il grado di vuoto diviene un parametro importante; diminuendo la pressione è quindi naturale migliorare la tenuta dell'impianto per evitare eventuali infiltrazioni di aria dall'esterno. Nel progetto originale si impiegava uno strato di bachelite per isolare/schermare la conduzione della torcia dal metallo sottostante (Figura 23).

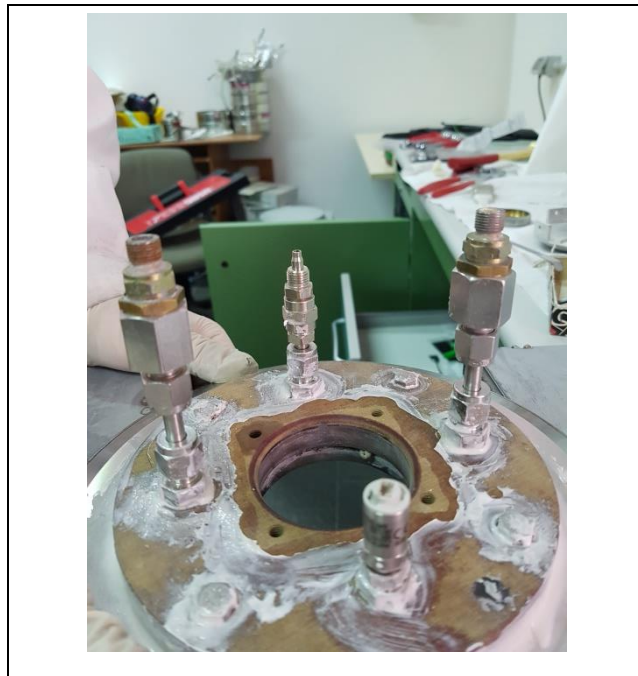


Figura 23. Alloggiamento di bachelite della torcia

La bachelite è porosa e quindi è stata impregnata di silicone per migliorare l'isolamento all'aria. Questa soluzione però non si adatta bene ad un uso a pressioni più basse. Una possibile alternativa potrebbe essere l'impiego di una plastica resistente ad alta temperatura (Teflon e/o Peek) per il rifacimento della flangia. Inoltre la tenuta sulla flangia andrà migliorata impiegando tecniche di fissaggio e sigillatura (guarnizioni) impiegate per il vuoto; la configurazione della torcia verrà sigillata sul primo elemento realizzando la mobilità del pezzo per le operazioni di scarico, ispezione e pulizia con un carroponete che sospende la torcia evitando la movimentazione manuale ed il danneggiamento della tenuta.

La pressione (vuoto) del sistema gioca anche un ruolo fondamentale in termini di allungamento fiamma; di solito la fiamma aumenta di lunghezza, permettendo quindi un maggior tempo di residenza del materiale al suo interno (aumenta il percorso in fiamma); tuttavia la fiamma così allungata determina anche una diminuzione della densità di energia portando quindi ad una fiamma "meno calda". Per un settaggio ottimale del processo occorre quindi trovare un compromesso tra questi fattori, mediante un controllo più accurato dei parametri operativi. Si migliorerà quindi il controllo della pressione modificando la valvola di

controllo della pompa ad anello d'acqua, attualmente operante in manuale, con una automatica capace di fornire aperture riproducibili.

Per migliorare il contatto tra la fiamma e le polveri iniettate si potrebbe schermare con un tubo ceramico il primo tratto della fiamma. Questa soluzione è stata in precedenza utilizzata in letteratura come estensione dell'ugello delle torce operanti in vuoto per limitare le fluttuazioni della fiamma per la differenza di pressione [69], per coating in vuoto o per saldature in ambienti particolari. Inoltre una soluzione simile è stata anche impiegata da alcuni autori per migliorare il contatto dei reagenti nella fiamma Figura 24 [86].

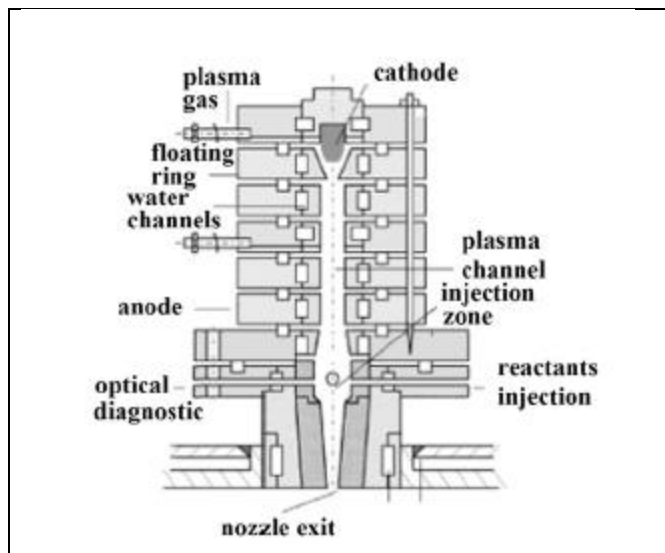


Figura 24. Confinamento fiamma [86]

L'adesione delle polveri prodotte alle pareti del reattore può rappresentare un problema rilevante. Le particelle fuoriescono fuse o in fase gas dalla fiamma e se non riescono a condensare solidificano sulle pareti del reattore determinando una perdita di materiale utile e la formazione di agglomerati di particelle sferiformi. Quindi il tempo di volo delle particelle all'interno della camera deve essere tale da determinare la loro solidificazione e la loro raccolta in basso nel serbatoio. La bassa temperatura delle pareti del reattore (raffreddata ad acqua), che determina l'ambiente freddo nella camera, può contribuire ad aumentare questo fenomeno. Questo problema esiste anche nei normali processi di gas atomization. I metodi sperimentati in letteratura per limitare questo fenomeno consistono nel modificare la geometria del reattore in ragione del tempo di volo delle particelle, aumentare la velocità di condensazione con un quenching a gas o ad acqua, spingere giù le particelle impiegando getti di gas o aumentando il risucchio da parte del vuoto.

Possibili soluzioni consistono nel coibentare le pareti del reattore con un liner di grafite per rendere calda la parete nella zona di reazione oppure nel sagomare la camera in modo da modificarne la fluidodinamica camera e favorire il deflusso dalle pareti.

La figura 25 riporta una soluzione, studiata da un gruppo di ricerca italiano dell'Università di Bologna, che impiega l'iniezione di getti di gas per limitare l'adesione delle particelle alle pareti del reattore [87]. In particolare viene mostrato l'effetto dell'iniezione di gas sulla fluidodinamica delle particelle in due diverse configurazioni di reattore. Nel lavoro il design è stato applicato ad un plasmatron RF, ma la soluzione concettuale può risultare valida anche per l'applicazione ad un plasmatron DC.

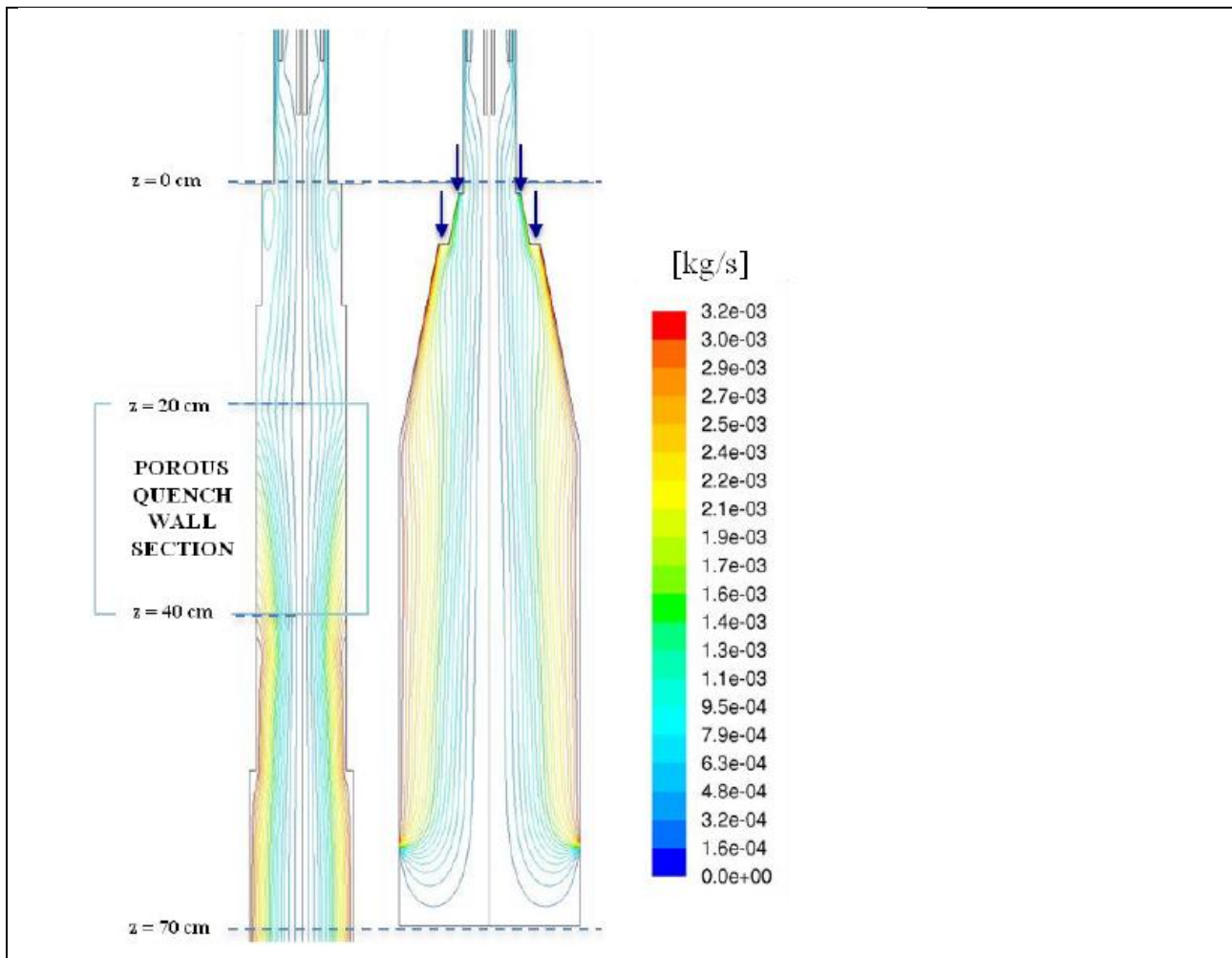


Figura 25. Progettazione di un reattore per limitare l'adesione delle particelle in due configurazioni di reattori [87].

A seguito quindi delle possibili soluzioni mostrate sono stati creati dei disegni preliminari delle modifiche da realizzare (vedi Appendice). Ovviamente le soluzioni mostrate costituiscono una progettazione preliminare che sarà rivista, discussa ed eventualmente modificata sulla base dell'esperienza del costruttore al momento della realizzazione.

4 Conclusioni

Il concetto di fabbrica intelligente è un rivoluzionario approccio che modifica sostanzialmente il modo di fare industria e produzione. L'additive manufacturing (AM) rappresenta un nuovo modo di pensare i processi produttivi sia in termini di disegno di prodotto, che di produzione e di distribuzione. Questa tecnologia ha un alto potenziale innovativo che scopre sempre nuovi campi di impiego al crescere delle tecniche di processo e dei materiali utilizzabili.

Tuttavia la competizione con i normali processi produttivi è ancora limitata ad alcuni campi di impiego e necessita approfondimenti e ricerca per sviluppare il pieno potenziale.

La ricerca nelle tecniche di stampa 3d e dei materiali utilizzabili è quindi un campo in fervido sviluppo.

Esistono tecniche di produzione di polveri e materiali per additive che nel breve periodo hanno subito importanti innovazioni. Le principali applicazioni riguardano i metalli con tecniche "di potenza" come SLS, SLM ed EBM, i materiali plastici largamente impiegati con tecniche FDM, FFF, DLP e SLA; l'impiego dei

ceramici ha una diffusione molto più limitata. Accanto ai materiali classici i materiali compositi, basati su matrici plastiche ad alto contenuto di filler metallici o ceramici, assumono importanza sempre più alta sia per le loro proprietà di rinforzo sia in ragione del fatto di introdurre mediante tecniche ibride la produzione indiretta di materiali monolitici.

La tecnica di produzione delle polveri varia in dipendenza dei materiali trattati, delle caratteristiche chimico fisiche della polvere finale e dei quantitativi di polveri prodotte sul mercato. Tecniche di macinazione, precipitazione da liquido, atomizzazione producono polveri di ogni tipo e dimensione in quantità e costi di mercato differenti. L'atomizzazione, sia essa condotta con acqua (WA), gas (GA) o plasma (PA), è la tecnica più diffusa per la produzione di polveri per additive; la qualità, ed il prezzo, delle polveri prodotte varia nell'ordine $WA < GA < PA$. Di recente impiego la sferoidizzazione al plasma (PA) produce polveri di qualità superiore alla GA ed è impiegata per produrre polveri sferoidali per AM di ottima qualità e nanopolveri. Solitamente viene impiegata la tecnologia ICP, tuttavia grazie ai recenti passi avanti della tecnica di fabbricazione delle torce DC uniti alla maggiore scalabilità dei processi basati su questa tecnologia potrebbero riportare l'attenzione sull'impiego di plasmatron a corrente continua.

E' stata quindi condotta una analisi legata al mercato delle polveri per individuare materiali di potenziale interesse per applicazioni nel campo della ricerca del sistema elettrico. L'analisi ha evidenziato che vi sono in sviluppo applicazioni nel campo dei materiali strutturali e funzionali; nel primo caso prevalgono l'impiego di polimeri e metalli mentre i ceramici risultano un po' più indietro, anche in ragione del fatto che le tecniche di produzione dei materiali e le stesse tecniche di stampa hanno uno sviluppo minore; nel secondo caso i carbon-based materials e le nanoparticelle, metalliche e ceramiche, hanno una grande importanza.

Sulla base dell'analisi fatta l'impiego di materiali ceramici in sostituzione di quelli metallici appare desiderabile per le condizioni di lavoro a cui gli oggetti finali sono sottoposti.

Per quanto detto la sperimentazione sarà condotta principalmente su acciaio 316L largamente impiegato per applicazioni di tipo strutturale, ma anche per la realizzazione di scambiatori e diffusori; alternativamente si impiegherà una polvere di silicio, semiconduttore utilizzato in campo elettronico e nei processi di sintesi. Invece come materiale ceramico, si considereranno il SiC adoperato in campo elettronico, strutturale, sensoristico o Allumina utilizzata per la realizzazione di isolanti termici ed elettrici.

Naturalmente la scelta dei materiali potrà essere rivista in ragione di evidenze sperimentali ed opportunità che si renderanno palesi durante lo svolgimento della sperimentazione.

In accordo con i principi base dell'economia circolare e dello sviluppo sostenibile, oltre ai materiali "vergini" potranno essere presi in considerazione precursori (reagenti, sali) e prodotti anche quelli provenienti da fonti povere e/o di riciclo.

Per condurre la sperimentazione si impiegherà l'impianto prototipo, basato sulla tecnologia del plasma termico DC, installato nel Centro Ricerche ENEA Portici presso il laboratorio SSPT-PROMAS-NANO. L'impianto è attualmente utilizzato per la produzione di nanomateriali e richiede modifiche per processare materiali per AM. Per progettare le modifiche ed implementazioni da apportare all'impianto è stata condotta una analisi delle criticità dell'impianto esistente e delle possibili soluzioni commercialmente esistenti e/o documentate nella letteratura scientifica specialistica.

Le tavole riportate in appendice sono i disegni preliminari delle modifiche da realizzare.

Ovviamente le soluzioni mostrate costituiscono una progettazione preliminare che sarà rivista, discussa ed eventualmente modificata sulla base dell'esperienza del costruttore al momento della realizzazione.

5 Bibliografia

1. K.-D. Thoben, S. Wiesner, T. Wuest, "Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples", *Int. J. Autom. Technol.*, 11 (2017), 4–16.
2. Y.Lu, K.C. Morris, S. Frechette, "Current standards landscape for smart manufacturing systems", *Natl. Inst. Stand. Technol.*, NISTIR 2016, 8107, 39.
3. U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, M. Dolen, "The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0", *Procedia Manuf.*, 11 (2017), 545–554.
4. T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T. Nguyen, D. Hui, "Additive manufacturing (3d printing): A review of materials, methods, applications and challenges", *Compos. Part B Eng.*, 143 (2018), 172–196.
5. M.K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R.I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, "Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints" *CIRP Ann.* 2016, 65, 737–760.
6. B. Berman, "3-d printing: The new industrial revolution", *Bus. Horiz.*, 55 (2012), 155–162.
7. J. Chang, J. He, M. Mao, W. Zhou, Q. Lei, X. Li, D. Li, C.-K. Chua, X. Zhao, "Advanced material strategies for next-generation additive manufacturing", *Materials*, 11 (2018), 166.
8. W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C.B. Williams, C.C. Wang, Y.C. Shin, S. Zhang, P.D. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering", *Comput. Aided Des.*, 69 (2015), 65–89.
9. C. Kohtala, "Addressing sustainability in research on distributed production: An integrated literature review", *J. Clean. Prod.*, 106 (2015), 654–668.
10. S. Ford, M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges", *J. Clean. Prod.*, 137 (2016), 1573–1587.
11. T. Stock, G. Seliger, "Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0", *Procedia Cirp.* 2016, 40, 536–541.
12. D.R. Evers, A.T. Potter, "Industrial additive manufacturing: A manufacturing systems perspective", *Comput. Ind.*, 92 (2017), 208–218.
13. H. Ibrahim, A. Jahadakar, A. Dehghan, N. Moghaddam, A. Amerinatanzi, M. Elahinia, "In vitro corrosion assessment of additively manufactured porous NiTi structures for bone fixation applications", *Metals*, 8 (2018), 164.
14. M. Nematollahi, G. Toker, S. Saghaian, J. Salazar, M. Mahtabi, O. Benafan, H. Karaca, M.; Elahinia, "Additive manufacturing of Ni-rich NiTiHF 20: Manufacturability, composition, density, and transformation behaviour", *Shape Memory Superelast.*, 5 (2019), 113–124.
15. J.B. ReVelle, "Manufacturing Handbook of Best Practices: An Innovation, Productivity, and Quality Focus", CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.
16. S.T. Newman, A. Nassehi, R. Imani-Asrai, V. Dhokia, "Energy efficient process planning for cnc machining", *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 5 (2012), 127–136.
17. J. Rohde, U. Jahnke, C. Lindemann, A. Kruse, R. Koch, "Standardised product development for technology integration of additive manufacturing", *Virtual Phys. Prototyp.*, 14 (2019), 141–147.
18. S.A. Tofail, E.P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, C. Charitidis, "Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities", *Mater. Today*, 21 (2018), 22–37.
19. H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, M. Hoffmann, "Industry 4.0", *Bus. Inf. Syst. Eng.*, 6 (2014), 239–242.
20. M. Rüßmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, I. Justus, P. Engel, M. Harnisch, "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries", *Boston Consult. Group*, 9 (2015), 54–89.
21. H.S. Kang, J.Y. Lee, S. Choi, H. Kim, J.H. Park, J.Y. Son, B.H. Kim, S. Do Noh, "Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions", *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.*, 3 (2016), 111–128

- 22.A. Schumacher, S. Erol, W. Sihn, "A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises", *Procedia CIRP*, 52 (2016), 161–166.
- 23.S. Mittal, M.A. Khan, D. Romero, T. Wuest, "Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, 233 (2017), 1342-1361.
- 24.L. Ren, L. Zhang, L. Wang, F. Tao, X. Chai, "Cloud manufacturing: Key characteristics and applications", *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 30 (2017), 501–515.
- 25.F.W. Baumann, D. Roller, "Additive Manufacturing, Cloud-Based 3D Printing and Associated Services—Overview", *J. Manuf. Mater. Process.*, 1 (2017), 15.
- 26.J. Holmström, J. Partanen, J. Tuomi, M.; Walter, "Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment", *J. Manuf. Technol. Manag.*, 21 (2010), 687–697.
- 27.C. Hill, "International business: Competing in the global market place", *Strateg. Dir.* 2008, 24.
- 28.W. Sutherland, R. Aveling, T. Brooks, M. Clout, L. Dicks, L. Fellman, E. Fleishman, D. Gibbons, B. Keim, F. Lickorish, "A horizon scan of global conservation issues for 2014", *Trends Ecol. Evol.*, 29 (2014), 15–22.
- 29.V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramón Blasco Puchades, L. Portolés Griñan, "Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies", *Int. J. Prod. Res.*, 49 (2011), 1061–1079.
- 30.L.D. Bobbio, R.A. Otis, J.P. Borgonia, R.P. Dillon, A.A. Shapiro, Z.-K. Liu, A.M. Beese, "Additive manufacturing of a functionally graded material from Ti6Al4V to invar: Experimental characterization and thermodynamic calculations", *Acta Mater.*, 127 (2017), 133–142.
- 31.M.C. Leu, B.K. Deuser, L. Tang, R.G. Landers, G.E. Hilmas, J.L. Watts, "Freeze-form extrusion fabrication of functionally graded materials", *CIRP*, 61 (2012), 223–226.
- 32.B. Fotovvati, N. Namdari, A. Dehghanghadikolaei, "Fatigue performance of selective laser melted Ti6Al4V components: State of the art", *Mater. Res. Express*, 6 (2018), 012002.
- 33.W.E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review", *J. Mater. Eng. Perform.*, 23 (2014), 1917–1928.
- 34.M. Vaezi, H. Seitz, S. Yang, "A review on 3d micro-additive manufacturing technologies", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 67 (2013), 1721–1754.
- 35.A. Dehghan, "Additive manufacturing as a new technique of fabrication", *J. 3d Print. Appl.*, 1 (2018), 3–4
- 36.A. Dehghanghadikolaei, "Enhance its Corrosion Behavior of Additively Manufactured NiTi by Micro-Arc Oxidation Coating", University of Toledo: Toledo, OF, USA, 2018.
- 37.A. Dehghanghadikolaei, H. Ibrahim, A. Amerinatanzi, M. Hashemi, N.S. Moghaddam, M. Elahinia, "Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel–titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process", *J. Mater. Sci.*, 54 (2019), 7333–7355.
- 38.M. Mehrpouya, S. Emamian, "Recent advantages in laser fabrication of micro-channel heat exchangers: Fortschritte in der herstellung von mikrokanal wärmetauschern mittels laserherstellung", *Mater. Und Werkst.*, 48 (2017), 205–209.
- 39.M. Mehrpouya, A. Gisario, A. Brotzu, S. Natali, "Laser welding of NiTi shape memory sheets using a diode laser", *Opt. Laser Technol.*, 108 (2018), 142–149.
- 40.J.E. Smay, J.A. Lewis, "Solid free-form fabrication of 3-d ceramic structures", *Ceramics and Composites Processing Methods*, 1st ed.; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2012; 459–484.
- 41.S.L. Sing, F.E. Wiria, W.Y. Yeong, "Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: Effect of laser process parameters on part quality", *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 77 (2018), 120–127B.
- 42.Bhushan, M.;Caspers, "An overview of additive manufacturing (3d printing) for microfabrication", *Microsyst. Technol.*, 23 (2017), 1117–1124.
- 43.P.K. Gokuldoss, S. Kolla, J. Eckert, "Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines", *Materials*, 10 (2017), 672.
- 44.A. Natarajan, R.M. Kelkar, J.J. Schoonover, P. Singh, V.S. Venkataramani, K.P. Chan, J. Leman, "Reversible Binders for Use in Binder Jetting Additive Manufacturing Techniques", U.S. Patent 15/261,547, 15 March 2018.
- 45.S.L. Sing, F.E. Wiria, W.Y. Yeong, "Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behaviour", *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 49 (2018), 170–180.

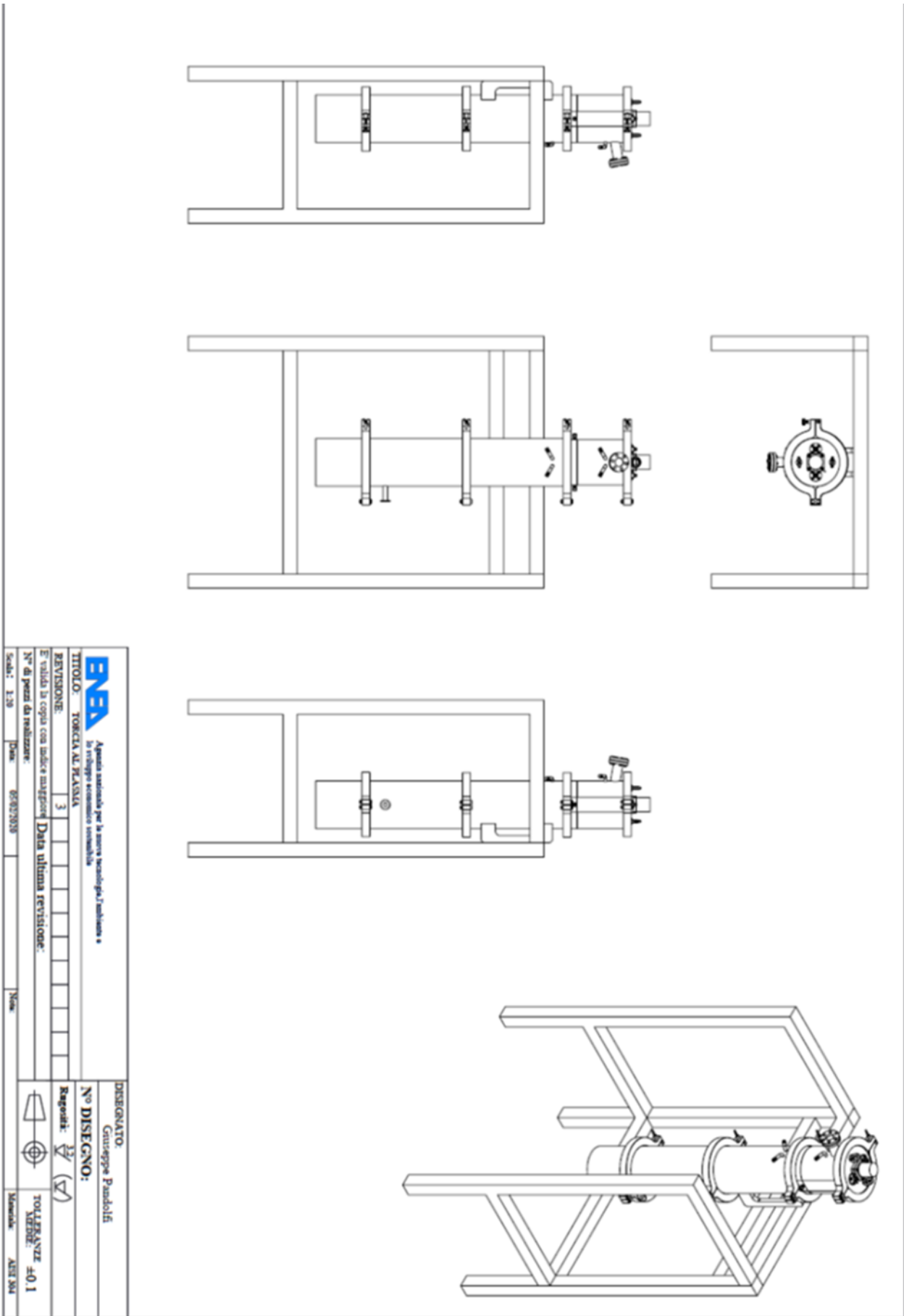
- 46.H. Attar, S. Ehtemam-Haghighi, D. Kent, I. Okulov, H. Wendrock, M. Bönisch, A. Volegov, M. Calin, J. Eckert, M. Dargusch, "Nanoindentation and wear properties of Ti and Ti-tib composite materials produced by selective laser melting", *Mater. Sci. Eng. A*, 688 (2017), 20–26.
- 47.A. Jinoop, C. Paul, K. Bindra, "Laser assisted direct energy deposition of hastelloy-x" *Opt. Laser Technol.*, 109 (2019), 14–19.
- 48.M.E. Stender, L.L. Beghini, J.D. Sugar, M.G. Veilleux, S.R. Subia, T.R. Smith, C.W. San Marchi, A.A: Brown, D.J. Dagel, "A thermal-mechanical finite element workflow for directed energy deposition additive manufacturing process modelling", *Addit. Manuf.*, 21 (2018), 556–566.
- 49.A. Zhakeyev, P. Wang, L. Zhang, W. Shu, H. Wang, J. Xuan, "Additive Manufacturing: Unlocking the Evolution of Energy Materials", *Adv. Sci.*, 4 (2017), 1-44.
- 50.J.P. Kruth, P. Mercelis, L. Froyen, M. Rombouts, "Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting," *Rapid Prototyping Journal*, 11 (2018), 26-36.
- 51.E.O. Olakanmi, R.F. Cochrane, K.W. Dalgarno, "A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure and properties", *Progress in Material Science* 74 (2015), 401-477.
- 52.LPW Technology, (2018) Available from "<http://maschinetech.com/technical-library/powder-production/>" [Online].
- 53.AAVV, "Powder Metals Technologies and Applications", Volume 7, ASM Handbook, 1998.
- 54.Carpenter Additive (2019) Available from "<https://www.carpenteradditive.com/>" [Online].
- 55.General Electrics (2019) Available from <https://www.ge.com/additive/plasma-atomization-technology>
- 56.O. Ivanova, C. Williams, T. Campbell, "Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges," *Rapid Prototyping Journal*, 19 (2013), 353-364.
- 57.Silvia Vock, Burghardt Klöden, Alexander Kirchner, Thomas Weißgärber & Bernd Kieback, "Powders for powder bed fusion: a review", *Prog Addit Manuf*, 4 (2019), 383–397
- 58.V. P. Leone, Tesi di Laurea Magistrale- Caratterizzazione meccanica avanzata di lega AlSi10Mg realizzata mediante additive manufacturing: studio del comportamento a trazione e a fatica, POLITECNICO DI TORINO, 2018.
- 59.C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang, L. E. Loh, S. L. Sing, "Review of selective laser melting: Materials and application," *Applied Physics Reviews*, 2 (2015), 041101-041101.21.
- 60.M. Sarno, S. Galvagno, C. Scudiera, P. Iovane, S. Portofino, C. Borriello, C. Cirillo, "Dopamine sensor in real sample on thermal plasma silicon carbide nanopowders," *J Physics Chem Solids*, 131 (2019), 213-222.
- 61.Formfutura (2019), "<https://www.formfutura.com/>," [Online].
- 62.TREED (2019), "<https://treedfilaments.com/>," [Online].
- 63.Filoalfa (2019), "<https://www.filoalfa3d.com/it/>," [Online].
- 64.The virtual foundry (2019) <https://www.thevirtualfoundry.com/>[Online].
- 65.Haijun Gong, Cameron Crater, Ana Ordonez, Craig Ward, Madison Waller, and Charles Ginn, "Material Properties and Shrinkage of 3D Printing Parts using Ultrafuse Stainless Steel 316LX Filament," *Vols. MATEC Web of Conferences* 249, 01001 (2018)-ICMMM 2018.
- 66."https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/metal-solutions/Ultrafuse_316L.html," [Online].
- 67.R. D. Farahani, M. Dubé, D. Therriault, "Three-Dimensional Printing of Multifunctional Nanocomposites: Manufacturing Techniques and Applications", *Adv. Mater.*, 28 (2016), 5794–5821.
- 68.P. Iovane, C. Borriello, S. Portofino, A. De Girolamo Del Mauro, G. Magnani, C. Minarini, S. Galvagno, "Thermal Plasma Synthesis of Zirconia Powder and Preparation of Premixed Ca-doped Zirconia," *Plasma Chem Plasma Process*, 39, 2019, 1397–1411.
- 69.R. Bolot, D. Klein and C. Coddet, "Design of a nozzle extension for thermal spray under very low pressure conditions," *Thermal Spray Solutions: Advances in Technology and Application* (proceedings of International Thermal Spray Conference, mai 10-12 2004, Osaka, JAP).
- 70.TEKNA, "Systems. 2019. Available from <http://www.tekna.com/>," 2019. [Online]. Available: .

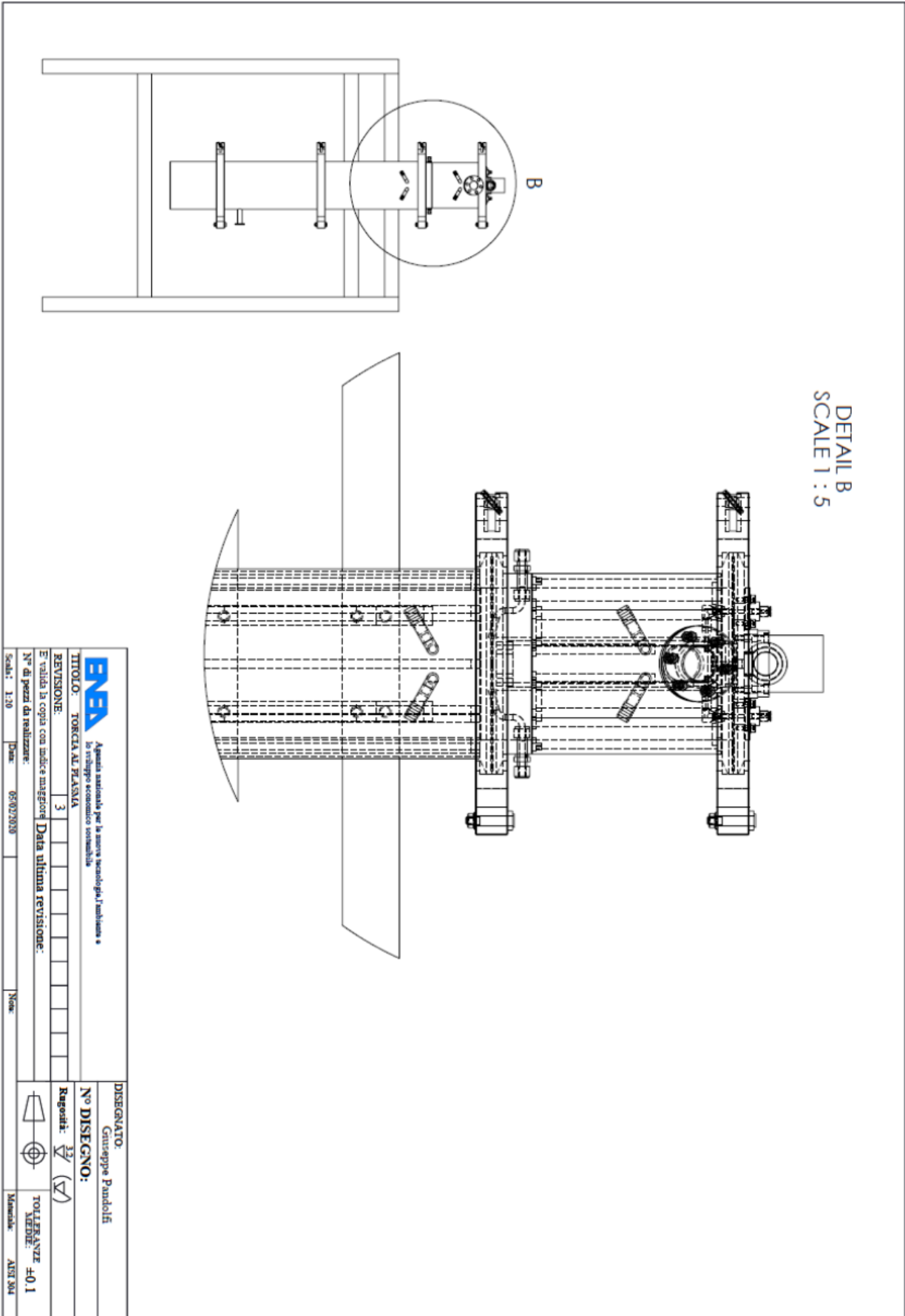
- 71.Q. Qin, F. Yang, Tao Shi, Z. Guo, H. Sun, , X. Lu, C. Chen, J. Hao, P. Cao, “Spheroidization of tantalum powder by radio frequency inductively coupled plasma processing”, 30 (2019), 1709-1714.
72. H. Bissett, I.J. Van der Walt, “Metal and alloy spheroidisation dor the Advanced Metals Initiative od South Africa, using high-temperature radio-frequency plasmas”, J. S. Afr. Inst. Min. and Metall., vol. 117 n.10 Johannesburg Oct.2017.
73. M.I. Boulos, N. Dignard, A. Auger, J. Jurewicz, and S. Thelland, “High performance induction plasma torch”, Tekna Plasma Systems, Inc., Sherbrooke, Canada, US Patent Application # 2012/0261390, October 18, 2012.
- 74.A. Samokhin, N. Alekseev, M. Sinayskiy, A. Astashov, D.i Kirpichev, A. Fadeev, Y. Tsvetkov and A. Kolesnikov, “Nanopowders Production and Micron-Sized Powders Spheroidization in DC Plasma Reactors”, Powder Technology, Alberto Adriano Cavalheiro, (September 26th 2018). IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.76262. Available from: <https://www.intechopen.com/books/powder-technology/nanopowders-production-and-micron-sized-powders-spheroidization-in-dc-plasma-reactors>
- 75.BI Mikhailov, “Electric-arc plasmachemical reactors of separated, single-chamber, and combined types. Thermophysics and Aeromechanics (Teplofizika i aeromekhanika)” 17 (2010), 425-440.
- 76.O.P. Solonenko, I.P. Gulyaev, A.V. Smirnov, Novosibirsk, “Hollow droplets micro explosive thermal spraying: fundamentals”, Vols. International Thermal Spraying Conference 2008, At Maastricht, Netherlands 2018.
- 77.A. S. Baskoro, S. Supriadi, and Dharmanto, “Review on Plasma Atomizer Technology for Metal Powder”, Vols. MATEC Web of Conferences 269, 05004 (2019).
- 78.Oerlikon Metco (2019) Available from “<https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/spray-guns/coating-equipment-plasma/triplexpro-210/>” [Online].
- 79.P. Fauchais, M. Vardelle, S. Goutier, A. Vardelle, “Key Challenges and Opportunities in Suspension and solution plasma spraying”, Plasma Chem Plasma Process, 35 (2015), 511–525.
- 80.M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, “Spray parameters and particle behavior relationships during plasma spraying”, J. Thermal Spray Technol., 2 (1993), 79-91.
- 81.B. Venkataraman, G. Sundarajan, “The Sliding Wear Behaviour of Al-SiC Particulate Composites—II. The Characterization of Subsurface Deformation and Correlation with Wear Behaviour”, Acta Mater., 44 (1996), 461-73.
- 82.MF Zhukov, Zasytkin IM, Timoshevskii AN, Mikhailov BI, Desyatkov GA. Electric Arc Generators of Thermal Plasma (in Russian). Nauka: Novosibirsk; 1999. p. 712.
- 83.Plasma Torches by Westinghouse Plasma Corporation. 2005. Available from https://www.academia.edu/24044626/Plasma_Torches_by_Westinghouse_Plasma_Corporation.
- 84.Roth JR. Industrial Plasma Engineering, Volume 1: Principles. Boca Raton: CRC Press; 1995.p. 339
- 85.I.Demnati, M.Parco, D.Grossin, I.Fagoaga, C.Drouet, G.Barykin, C.Combes, I.Braceras, S.Goncalves, C.Rey, “Hydroxyapatite coating on titanium by a low energy plasma spraying mini-gun,” Surface and Coatings Technology, 206 (2012), 2346-2353.
- 86.B. Bora, N. Aomoa, M. Kakati , H. Bhuyan, “Studies on a supersonic thermal plasma expansion process for synthesis of titanium nitride nanoparticles,” Powder Technology, 246 (2013), 413–418.
- 87.S. Bianconi, M. Boselli, M. Gherardi & V. Colombo, “Design-Oriented Modelling of Different Quenching Solutions in Induction Plasma Synthesis of Copper Nanoparticles”, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 37 (2017), 717–738.

6 Abbreviazioni ed acronimi

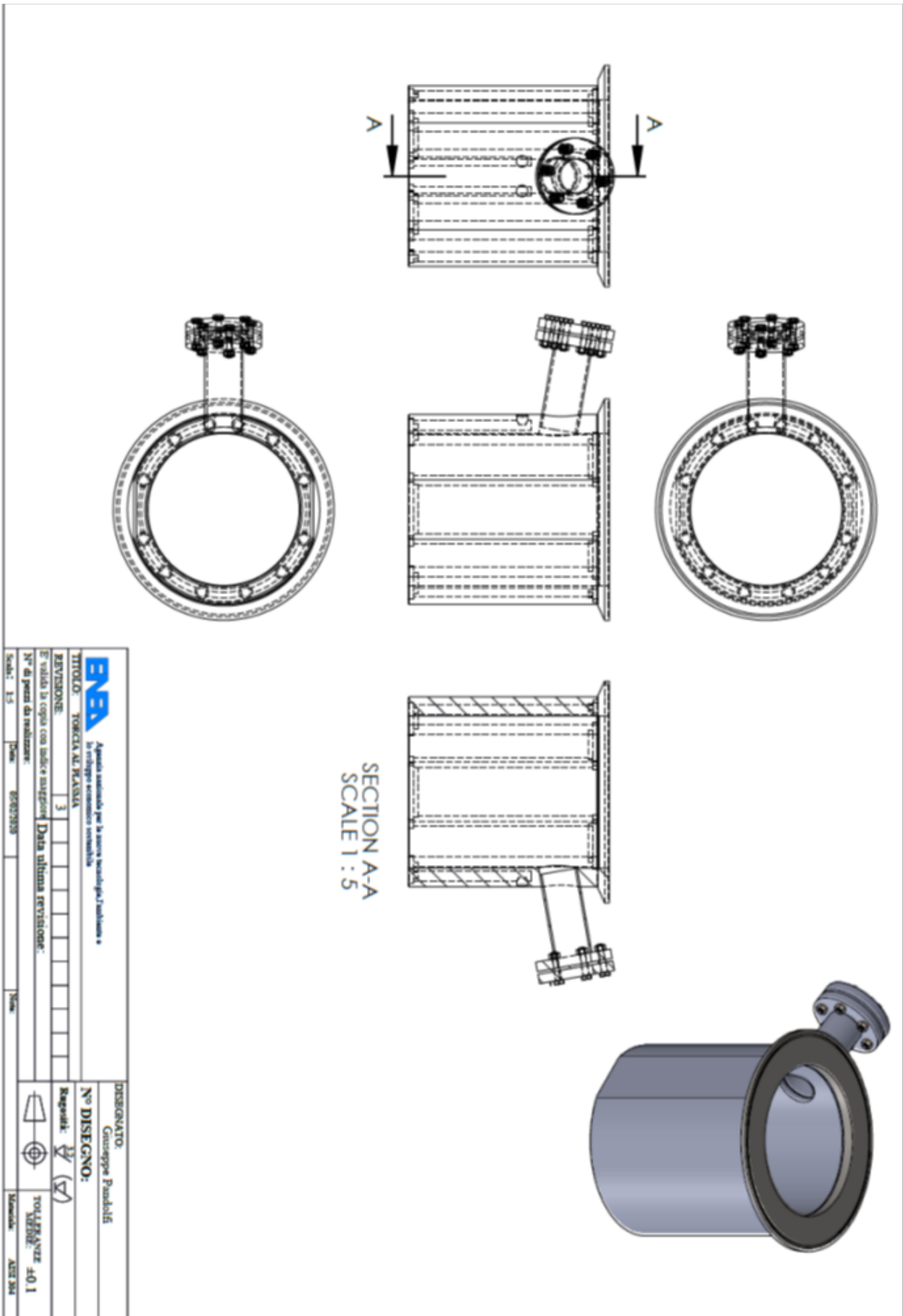
Additive Manufacturing (AM)
Plasma accoppiato induttivamente (ICP)
Corrente alternata (AC)
Radio frequenza (RF)
Sistemi cyber-fisici (CPS)
Internet of Things (IoT)
StereoLitographic Apparatus (SLA)
Tridimensionale (3D)
Quadridimensionale (4D)
Ultravioletto (UV)
Fused Deposition Material (FDM)
Digital Light Processing (DLP)
Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)
Powder Bed Fusion (PBF)
Direct Metal Laser Melting (DMLS)
Electron Beam Melting (EBM)
Selective Laser Melting (SLM)
Selective Laser Sintering (SLS)
Directed energy deposition (DED)
Fused filament fabrication (FFF)
Electrode Induction-melting Gas Atomisation (EIGA)
RF-PA (Radio Frequency Plasma Atomisation),
RF-PS (Radio Frequency Plasma spheroidisation)
Direct-Ink- Writing (DIW)

APPENDICE





		Agenzia nazionale per la nuova tecnologia, l'ambiente e lo sviluppo economico sostenibile	
TITOLO: TORCIA AL PLASMA		DISEGNATO: Giuseppe Pandolfi	
REVISIONE: 3		N° DISEGNO:	
E' valida la copia con indice maggiore Data ultima revisione:		Rappres: $\frac{3}{2}$ (V)	
N° di pezzi da realizzare:		TOLLERANZE: ±0.1 METRICO:	
Scala: 1:20		Materiale: AISI 304	



BVA		Azienda specializzata per la ricerca tecnologica, l'analisi e la sviluppo economico e ambientale	
TITOLO: TORCIA AL PLASMA			
REVISIONE:	3		
E' valida la copia con i sigilli e i taglietti. Data ultima revisione:			
N° di pezzi da realizzare:			
Scala:	1:5	Nome:	
DISEGNATO:		Giancarlo Pambolli	
N° DISEGNO:			
Reparti:	(V)		
TOLLERANZE:		ISO 1	
MATERIA:		ALU 6061	

