Perché dovremmo produrre i gioielli con stampa diretta 3D ?
Un confronto tra due pensieri: l'oggi e il domani

AUTORI
Damiano Zito, Valentina Allodi, Patrizio Sbornicchia, Stefano Rappo.

ABSTRACT

Come parte della quarta rivoluzione industriale, la stampa diretta di gioielli in metallo prezioso merita una continua analisi dello stato dell'arte per capire se e quando questa tecnica andrebbe sfruttata.
Perché un gioielliere dovrebbe decidere di usare questa tecnica per la sua produzione? Più precisamente, i più pragmatici vorrebbero una risposta ad un'altra domanda: quando questa tecnica aggiunge valore rispetto alle tecniche classiche di fusione a cera persa?
Negli ultimi anni il nostro percorso di ricerca ha incluso lo studio delle strategie di stampa, delle tecniche di supportazione e l'analisi più o meno profonda delle caratteristiche chimiche e fisiche delle polveri preziose impiegate. Con questo articolo guardiamo all'evoluzione tecnologica con un occhio più pratico e operativo, condividendo le nostre esperienze e dando un'onesta analisi dei pregi e dei difetti della stampa 3D diretta di gioielli. Questa dettagliata disamina dell'intero lavoro fatto da Progold sarà presentata attraverso l'occhio di chi tra i primi ha esclamato "WOW" al suo primo incontro con la stampa 3D e cercherà di definire quando e perché è conveniente stampare un gioiello.

1. INTRODUZIONE

I processi produttivi del settore orafo e della gioiellieria, sono rimasti sostanzialmente invariati per centinaia di anni, senza vere e proprie rivoluzioni nella modalità di realizzazione dei gioielli. Solo negli ultimi decenni alcune delle invenzioni tecnologiche del ventesimo secolo, tra cui l'elettroformatura, le lavorazioni CNC, la prototipazione rapida,la saldatura laser e il Metal Injection Molding sono state recepite dal mondo orafo ed integrate nella filiera produttiva, portando ad innovazioni incisive.
A volte queste novità sono state introdotte per migliorare vecchi processi di fabbricazione consolidati nel tempo, tuttora largamente usati per la loro indubbia efficacia, senza che questo comportasse l'apertura di nuove vie produttive. In altri casi invece l'utilizzo delle innovazioni tecnologiche ha portato a rivoluzioni totali del processo produttivo, tramite l'impiego di meccanismi di manifattura completamente differenti rispetto ai metodi già esistenti ed impensabili fino a pochi decenni fa.
È tra queste ultime tecniche, capaci di stravolgere completamente le regole di produzione fino ad ora conosciute, che è collocata la fusione laser selettiva.
Rispetto alle tecniche di fabbricazione classiche della gioielleria la fusione laser selettiva (SLM™) è una tecnologia estremamente giovane, essendo nata da una collaborazione tra l'Istituto Fraunhofer di Aachen e la F&S Stereolithographietechnicl GmbH nel 1995. La distribuzione commerciale delle prime stampanti è cominciata pochi anni più tardi, nel 2000, grazie alla collaborazione con la MCP HEK GmbH, poi nominata SLM™

Solution GmbH, e attualmente condividente la tecnologia con la Realizer GmbH del Dr. Matthias Fockele. La tecnica SLM™ si differenzia dalla sinterizzazione selettiva laser (SLS™), in quanto avviene una completa fusione delle particelle da parte del fascio laser invece che una saldatura superficiale per effetto della temperatura.
Al contrario della fusione laser, la microfusione a cera persa, procedura produttiva protagonista del settore orafo, vanta origini millenarie ed il suo primo impiego per la produzione seriale risale addirittura alla prima età del bronzo (3000-3500 a.C.). Sin dagli albori di questa tecnica, la realizzazione dei manufatti ha sempre richiesto la presenza di un modello da riprodurre, creato separatamente in materiale plasmabile manualmente, stabilendo già in origine l'impossibilità di una costruzione diretta degli oggetti pensati dall'artista oppure dall'artigiano.
Nonostante siano molteplici le tecniche di fusione a cera persa, ognuna di essa implica una notevole complessità di processo, a causa della produzione degli stampi in gomma, del montaggio degli alberi e della cottura degli stampi refrattari per la colata della lega, oltre ad un notevole impatto ambientale dovuto ai gas di combustione delle cere ed allo smaltimento dei materiali refrattari.
Il superamento di questi svantaggi, insieme alla costante possibilità di migliorare la qualità delle leghe metalliche, rendendole esenti da porosità da gas, ritiro e inclusioni estranee, e all'esplorazione delle nuove possibilità in termini di geometrie e materiali utilizzabili, sono stati la forza motrice che ha indotto Progold S.p.A. a sperimentare la nuova tecnologia di fusione selettiva laser nel settore del gioiello, aprendo nuovi scenari atti a risolvere le tipiche problematiche della microfusione.
Nel corso degli ultimi anni, lo sforzo di Progold S.p.A. nell'integrare la fusione selettiva laser in gioielleria si è svolto attraverso la selezione di parametri ottimali di stampa, la composizione delle leghe preziose e non, delle tipologie di supportazione e tramite studi comparativi tra le prestazioni SLM™ e quelle della microfusione tradizionale nella realizzazione di elementi critici del gioiello, vale a dire articoli con spessori ridotti, oggetti cavi, e dettagli decorativi quali pavé e ajour. Queste tappe del percorso sono state condivise nel corso degli ultimi cinque anni tramite articoli di carattere prettamente tecnico-scientifico, focalizzati su misurazioni e risultati sperimentali.
Quel che a questo punto è stato deciso di fare è di fermarsi, alzare il punto di osservazione, per guardare l'evoluzione tecnologica con un occhio più pratico e operativo, percorrendo un viaggio nell'esperienza maturata negli anni affrontando, punto dopo punto, i plurimi e diversi momenti di confronto tra la fusione laser selettiva e le principali tecniche di produzione.
Un percorso iniziato otto anni fa ed in grado di mettere in luce come l'avvento della stampa SLM™ possa essere ritenuta una delle più importanti rivoluzioni che il settore ha conosciuto negli ultimi decenni, dando una risposta pratica a una domanda che per molti è ancora sospesa: quando e perché ha senso la stampa diretta in metallo prezioso e non di un gioiello? Il primo studio in tale direzione, presentato in questo articolo, mette a confronto la stampa 3D diretta in metallo sia con la tecnica regina del settore orafo per versatilità, la microfusione classica, sia con la microfusione diretta.

2. TECNICHE A CONFRONTO

2.1 Meccanismi di fusione e di modellazione

L'analisi svolta per delineare i punti di forza e di debolezza tra microfusione e fusione laser selettiva non può non passare attraverso una chiara ed immediata comprensione delle rispettive modalità attraverso le quali, entrambe, provvedono alla fase di fusione del materiale e del modellamento nella forma voluta.
Come è possibile, infatti, capire il valore aggiunto dall'una e dall'altra se non si comprendono i meccanismi chiave di entrambi i processi?
In microfusione classica e diretta il processo di fusione è simultaneo per tutto il materiale, il quale deve riempire l'alveo di uno stampo durante la colata. La lega deve essere quindi riscaldata completamente alla temperatura ottimale, processo che viene generalmente ottenuto in ambito industriale tramite l'utilizzo di appositi forni e crogioli.
In fusione selettiva laser (SLM™), invece, l'incremento di temperatura necessario a superare il punto di liquidus della lega viene provocato dall'interazione tra la radiazione di un sottile fascio laser e il materiale da fondere, per cui la fusione in un dato istante è molto localizzata e interessa solo una zona ristretta intorno al punto di irraggiamento del fascio. La solidificazione della lega è estremamente rapida man mano che il laser prosegue nella sua scansione e quindi la quantità di materiale che istante per istante viene coinvolto nel processo fusorio è minima. Gli oggetti crescono tramite l'aggiunta di materiale solido, senza movimento macroscopico di masse di metallo fuso.
Date le differenze appena elencate appare evidente come caratteristiche del materiale impiegato per la creazione del gioiello possono essere cruciali in microfusione e non esserlo in fusione selettiva laser o viceversa. Nel caso della microfusione per esempio, sia essa tradizionale oppure diretta, la temperatura di liquidus delle leghe utilizzate gioca un ruolo fondamentale nella fattibilità e nei costi di processo. Infatti, materiali con alta temperatura di liquidus, come leghe di palladio, platino e titanio richiedono macchine fonditrici con componenti in grado di sopportare l'elevata temperatura e la reattività dei metalli oltre che rivestimenti speciali per la realizzazione degli stampi refrattari.
L'utilizzo di crogioli e stampi ceramici implica inoltre il rischio di contaminazione della lega da fondere, ulteriore fonte di difetti nei pezzi prodotti sotto forma di inclusioni e punti duri. Nel caso di microfusione di leghe a base di titanio, ad esempio, il problema della contaminazione dai crogioli è talmente importante da rendere preferibile l'utilizzo di altre tecniche metallurgiche spesso più costose, come la cold crucible arc melting, per la produzione di gioielli (Dr. Ulrich E. Klotz, 2015). In ogni caso persistono delle problematiche legate alla necessità di elevare in modo rilevante la temperatura di una massa consistente di materiale, come la disomogeneità termica del fuso, l'eterogeneità dovuta a segregazioni allo stato solido, la vaporizzazione di alcuni elementi oppure la loro reazione con l'ossigeno residuo.
Nel caso della fusione tramite laser invece la temperatura necessaria alla fusione della lega è raggiunta attraverso l'interazione localizzata tra la radiazione laser e il materiale. La lega assorbe fotoni emessi da una sorgente laser, la cui energia è poi convertita quasi istantaneamente in calore. Il primo parametro fondamentale per stimare l'efficienza del processo di fusione sarà dunque l'assorbanza del materiale da fondere alla particolare lunghezza d'onda del laser utilizzato. Nel caso di processi di fusione selettiva, il laser in uso è tipicamente nel

vicino infrarosso con lunghezze d'onda centrate a 1064 nm (Nd:YAG) oppure 1070 nm (Yb a fibra). La capacità del materiale di assorbire la radiazione dovrà essere valutata nella regione dell'infrarosso.
L'ostacolo principale alla fusione tramite laser nei metalli è rappresentato dalla loro alta riflettività, per cui la radiazione è riflessa dalle superficie del materiale piuttosto che essere assorbita. Questo effetto, direttamente correlato all'alta conducibilità elettrica dei materiali in considerazione, è particolarmente accentuato nel caso dell'oro, argento e rame. Questi elementi infatti mantengono una riflettività superiore al 97% anche a lunghezze d'onda più vicine al visibile. Altri elementi utilizzati in gioielleria sono da questo punto di vista meno problematici, come per esempio il platino o il palladio che hanno rispettivamente il 74.5% e l'80% di riflettività (A. D. Rakić, 1998).
Un secondo parametro discriminante per l'efficienza del processo di fusione selettiva laser è rappresentato della conduttività termica del materiale. Una volta assorbita parte della radiazione, il campione acquisisce energia termica che può essere dissipata più o meno velocemente per conduzione verso le zone adiacenti. Questo implica un riscaldamento più localizzato per materiali con coefficiente di conducibilità termica inferiore ed uno più diffuso per leghe con più alta conducibilità termica verso zone adiacenti a scapito della temperatura raggiunta dalla zona direttamente investita dal laser.
Nel caso dei metalli è noto in generale che la conducibiltà termica è proporzionale alla conduttività elettrica ed alla temperatura, perciò ancora una volta elementi come l'oro, l'argento e rame sono svantaggiati rispetto ad altri metalli a causa dunque della loro elevata conducibilità termica (Tabella 1), che unitamente alla loro elevata riflettività, comporta complessivamente una maggiore energia laser necessaria per fondere loro leghe piuttosto che leghe di palladio, platino o titanio.
Una delle strategie percorse per aumentare l'efficienza di assorbimento laser nella fusione selettiva di leghe d'oro è stata quella di aggiungere piccole quantità di elementi semiconduttori, quali il germanio oppure il silicio, in grado di abbassare la conducibilità elettrica del materiale (Zito D. , et al., Optimization of SLM Technology Main Parameters in the Production of Gold and Platinum Jewelry, 2014) (Klotz, Tiberto, & Held, 2016).

Elemento	Riflettività a 1070 nm (%)	Conducibilità termica (W/mK)
Argento	98	429
Rame	97	401
Oro	97	318
Palladio	80	71.8
Platino	74.5	71.6
Titanio	61.5	17

Tabella 1. Valori di riflettività e conducibilità termica per alcuni dei metalli utilizzati in gioielleria

Quest'ultima infatti influenza direttamente la riflettività e la conducibilità termica, nella direzione per cui tanto più il metallo è elettricamente conduttivo, tanto più rifletterà la radiazione incidente e condurrà calore. In ogni caso, nonostante il miglioramento qualitativo ottenuto con questo drogaggio composizionale, la differenza di efficienza nella fusione selettiva di leghe d'oro rispetto a quella di metalli intrinsecamente più assorbenti e meno conduttori rimane elevata, anche per metalli

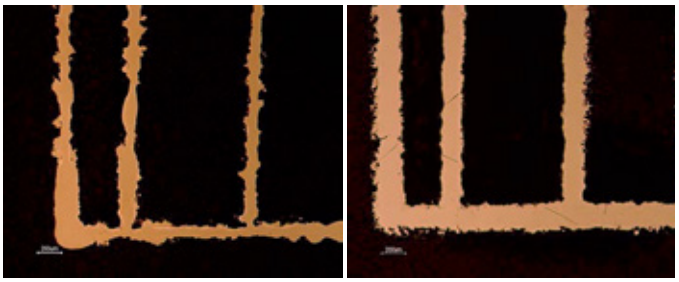


Figura 1. Singole tracce stampate con potenza laser di 62.5 watts e velocità di scan 0.33m/s:oro rosso (sinistra), platino (destra)

Figure 2 Bracciale e anello prodotti in lega di platino 950 tramite stampa SLM™. Heart bracciale e anello (Designer: Xin Xin Zhou, IED Torino—Cprdso di Design dell' Accessorio e del Gioiello)

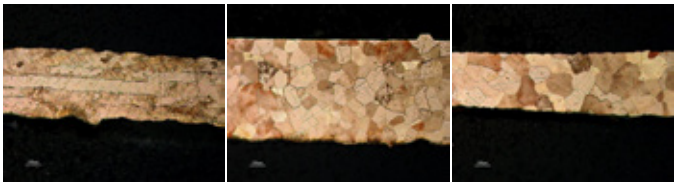


Figura 3. microstruttura di un articolo in lega d'oro giallo, ottenuto con SLM™ (sinistra), con microfusione classica (centro) e microfusione diretta (destra). Nel caso dell'SLM™ la dimensione media rilevata dei grani è di 30 micrometri, in microfusione sull'ordine dei 90 micrometri (Zito, et al., 2012)

che presentano temperature di liquidus nettamente più elevate. Un esempio lampante è dato dalle tracce prodotte da fusione laser con identici parametri in una lega di platino 950 e una lega di oro rosso 18 carati con aggiunta di germanio (Figura 1). In questo caso, la stessa quantità di energia fornita ai materiali produce un risultato profondamente diverso, cioè una traccia sottile e irregolare nel caso dell'oro rosso, una linea più spessa e coerente nel caso del platino. Per tutta l'analisi che verrà in seguito sono state prese come riferimento leghe di oro e platino con caratura rispettivamente pari a 750‰ e 950‰.
velocità di scan 0.33m/s:oro rosso (sinistra), platino (destra)

Con la fusione selettiva laser quindi è possibile assistere ad un ribaltamento nella convenienza energetica della fusione delle leghe rispetto alla microfusione, per cui la stampa di gioielli in platino e titanio risulta energeticamente più efficiente di quella di oggetti in oro oppure argento.
Questa rappresenta una delle grandi peculiarità che rendono la tecnica una vera e propria rivoluzione. Non è infatti banale per qualsiasi produttore di gioielli aver la possibilità di diversificare la propria offerta merceologia nel mercato con collezioni riprodotte in metalli difficilmente lavorabili attraverso le tecniche tradizionali. Un riferimento specifico è il Platino 950 e la difficoltà di realizzare con questo materiale gioielli dalle forme complesse e articolate (Figura 2). Tra i metalli non preziosi è da annoverare il titanio, particolarmente adatto per le sue caratteristiche intrinseche alla fusione laser selettiva, materiale che di recente ha suscitato l'interesse dei gioiellieri per le sue proprietà di durezza, biocompatibilità e per la possibilità di colorazione attraverso il processo di anodizzazione.
Vengono così ad aprirsi nuove e molteplici frontiere per tutte le aziende produttrici di gioielli, sempre alla ricerca di offrire al mercato un prodotto nuovo e all'avanguardia. I designer trovano nuova ispirazione e possono sentirsi più liberi nel concepire forme che fino ad ora erano pressochè irrealizzabili.

Nello specifico esaminiamo meglio le differenze causate dalla fusione selettiva e localizzata tipica dell'SLM™ e la fusione a cera persa. Le dimensioni estremamente sottili degli strati metallici fusi dal laser e l'elevata velocità di solidificazione del metallo comportano nel caso della fusione selettiva una dimensione media dei grani cristallini piccola e generalmente inferiore rispetto a quella ottenibile in microfusione a parità di lega metallica (Figura 3), con conseguente miglioramento della resistenza meccanica (Zito, et al., 2012). I grani intrinsecamente piccoli della fusione laser selettiva non rendono inoltre necessario l'utilizzo di affinatori di grano nella composizione della lega, con conseguente eliminazione di alcuni dei tipici difetti di segregazione e punti duri che possono occorrere in presenza di affinatori.

2.2 Limitazioni geometriche

2.2.1 Oggetti cavi

In aggiunta alle differenze tra microfusione e fusione laser selettiva dettate dai diversi processi metallurgici, la presenza dello stampo refrattario nel processo di microfusione con tutta la catena di operazioni necessarie alla sua realizzazione e riempimento da parte del metallo è fonte di limitazioni geometriche del gioiello, le quali possono essere superate con la fusione laser selettiva. Un esempio è dato dalla impossibilità di produrre gioielli monolitici con interno cavo pressochè isolato dall'esterno.
Nel caso di microfusione classica le limitazioni di questa famiglia

di oggetti scaturiscono già dalla fase di produzione del modello in cera. Con questa tecnica i modi per ottenere gioielli con cavità, sebbene sempre comunicanti con l'esterno, e con pareti di spessore controllabile prevedono l'utilizzo di un'anima di cera idrosolubile nello stampo in gomma, la quale è poi disciolta prima della preparazione dei cilindri (Bell, 2012) (Forno & Actis Grande, 2012) oppure l'iniezione separata delle due metà dell'oggetto cavo e la successiva saldatura delle cere.
La presenza della cera idrosolubile obbliga la progettazione a realizzare delle opportune finestre nella parete del gioiello, per permettere una rapida dissoluzione con l'acqua e creare un supporto robusto in gomma e successivamente in gesso per sopportare le pressioni di iniezione. La presenza di queste aperture nella parete metallica impedisce la creazione di oggetti con cavità completamente chiusa. In microfusione diretta il problema di produzione di articoli cavi persiste, sebbene le resine possano essere costruite con cavità pressochè isolate dall'esterno poiché sono ottenute con una tecnica additiva di stampa, in quanto nella fase successiva di produzione dei cilindri il rivestimento liquido non è in grado di penetrare nella cavità interna se non attraverso un adeguato numero di forature. L'impasto ceramico liquido deve essere infatti in grado di raggiungere tutte le zone non occupate dal modello in cera per assicurarne la perfetta riproduzione. Questo implica anche in questo caso l'obbligo di inserimento di un elevato numero di finestre per permettere un ingresso agevole del refrattario nella parte interna del gioiello. Queste aperture saranno necessarie inoltre per sostenere il nocciolo positivo delle cavità e per la totale eliminazione del refrattario a fusione avvenuta. Una tipica soluzione pratica per aggirare le limitazioni imposte dalla microfusione di gioielli cavi a partire da modelli in materiale combustibile (cera, resina) consiste nella fusione separata di partizioni dell'oggetto, le quali saranno in seguito saldate. La saldatura comporta però la comparsa di problematiche aggiuntive, oltre alla presenza di un'ulteriore fase produttiva. I problemi generati in questo caso sono legati alla necessità di mascherare la zona di giunzione, spesso di colore non corrispondente al materiale adiacente specialmente per l'oro rosso, in cui la conformità cromatica della lega da saldatura stride con la sua necessità di avere temperature di fusione basse. In aggiunta, il riscaldamento causato dall'operazione di saldatura comporta la comparsa di tensioni nella zona termicamente alterata, soprattutto nel caso di leghe autotempranti, che possono portare a deformazioni e rotture dei pezzi. Sussiste infine il rischio reale che nel caso di spessori sottili la saldatura provochi fusioni accidentali di un'ampia zona del gioiello.
In fusione laser selettiva queste problematiche decadono e nella costruzione di articoli cavi l'unica necessità è quella di praticare un numero limitato di minuscoli fori per permettere la fuoriuscita della polvere intrappolata all'interno dell'oggetto ottenendo senza particolari problemi produttivi forme cave pressochè totalmente chiuse, come le fedine in Figura 4 e l'anello in Figura 5, in cui è mostrata la cavità interna che può essere riempita o meno con strutture reticolari per aumentarne la resistenza meccanica. La capacità di produrre articoli con cavità occluse è un punto di forza universalmente riconosciuto nella stampa laser poiché offre la possibilità di ridurre il peso finale del gioiello a parità di ingombro dimensionale complessivo, cioè di uguale volume apparente. Applicazioni pratiche di questa possibilità saranno illustrate nel paragrafo 4.4.

Figura 4. Esempio di fede nuziale cava realizzata tramite SLM™ in oro bianco: modello 3D (sinistra) e oggetto stampato (destra)

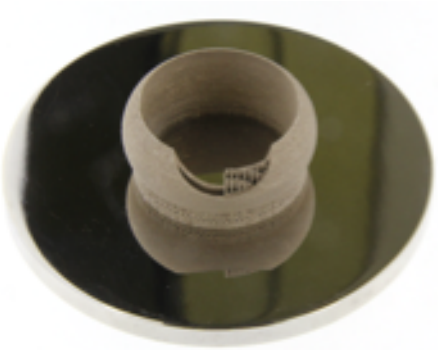


Figura 5. anello in oro bianco con interno cavo realizzato con e senza struttura reticolare di supporto.

2.2.2 Spessori

La presenza delle fasi di realizzazione del modello in cera oppure resina, di produzione dei rivestimenti ceramici e di colata della lega fusa al loro interno comporta inoltre una seconda limitazione in microfusione nella progettazione del gioiello: gli spessori.
La produzione del modello è problematica nel caso di spessori sottili perché l'iniezione di cera all'interno degli stampi in gomma diventa comunemente molto difficile. Il riempimento di spessori sottili richiede spesso delle condizioni di elevata compressione della cera, per cui la gomma tende a rigonfiare e produrre dei modelli più spessi oppure deformati. Gli stampi in gomma possono essere certamente ottimizzati per agevolare il riempimento, diminuendo le perdite di carico e la velocità di raffreddamento delle cere con una struttura degli alimentatori, unitamente all'uso di cere con migliori proprietà di riempimento (Schuster, 2009). Tuttavia, la presenza di spessori sottili comporta poi sempre una notevole difficoltà di estrazione del modello dagli stampi, con frequenti ed irreparabili distorsioni e cambiamenti dimensionali.
Nel caso della microfusione diretta l'utilizzo della manifattura additiva rende il passaggio di produzione del modello molto meno critico, anche se una opportuna scelta dei materiali polimerici, del ciclo di deceratura, della tecnica di stampa e dei parametri saranno fondamentali per ottenere delle fusioni di ottima qualità senza residui di resina che possano ostruire le cavità sottili da riempire (Actis Grande, Forno, Costabeber, Zenere, & Iketani, 2013). In entrambe le tecniche è comunque presente la fase critica della colata metallica nello stampo refrattario, che deve assicurare il riempimento completo fino ai dettagli più sottili del gioiello. Il riempimento è tanto più difficile quanto più sottile ed esteso è l'alveo da occupare a causa dell'inevitabile e drastico scambio termico tra il refrattario e lega fusa, la cui tensione superficiale può ulteriormente ostacolare il flusso metallico.
Il limite inferiore dello spessore di materiale realizzabile in microfusione, aldilà di qualsiasi ottimizzazione nell'architettura dei modelli, è difficile da definire in modo assoluto per la sua dipendenza dall'estensione della zona sottile e dalla geometria globale del pezzo anche se tipicamente viene considerato intorno ai 0.3- 0.4 mm nel caso di filigrane e di circa 0.4-0.6 mm nel caso di pareti per la microfusione classica e di 0.2-0.4 mm per le pareti e 0.2-0.3 mm per filigrane nel caso della microfusione diretta, sempre tenendo presente che tanto più le zone sottili sono estese tanto più difficile risulta il loro riempimento completo. Il raggiungimento e l'eventuale superamento di tali valori limite, ammesso che la geometria globale del pezzo lo renda possibile, richiede comunque uno sforzo tecnico e tecnologico notevole, attraverso l'utilizzo di sistemi di alimentazione complessi, l'innalzamento del sovrariscaldamento del metallo, della temperatura dei gessi e della sovrapressione del gas in colata per incrementare la capacità di riempimento del materiale. Questi cambiamenti di processo però comportano comunque dei risvolti negativi, quali l'aumento di reattività dei gessi con la lega fusa e la possibilità più alta di rottura del rivestimento con sovrapressioni più elevate, con conseguente presenza di inclusioni di refrattario o mancata riproduzione delle forme volute. Inoltre, la presenza di spessori sottili fa aumentare significativamente la percentuale degli scarti di produzione, poiché il numero di pezzi incompleti può aumentare drasticamente all'interno di un albero microfuso contenente molte decine di articoli ed il successo nella produzione di un singolo gioiello non può essere tradotto nel successo della produzione in serie.
Nel caso della fusione selettiva laser gli spessori sottili e le

Figura 6. Modello digitale (sinistra), sezione del modello con estensione delle zone sottili (centro) e fotografia di anello in titanio stampato con spessore di parete 0,2 mm.

Figura 7. Anelli stampati in oro rosso con struttura reticolare tridimensionale estesa, con e senza parete piena interna.

strutture complesse non sono un fattore limitante, poichè non è richiesto un modello in cera e il riempimento di uno stampo refrattario. Il limite inferiore delle pareti metalliche è dato dallo spessore della singola traccia di fusione laser, compatibilmente con la preservazione della congrua robustezza richiesta da un gioiello. Lo spessore minimo della traccia di fusione è ovviamente funzione del tipo di stampante laser, dei parametri di costruzione e della tipologia di polvere metallica. Nella casistica di nostro interesse e per le leghe di oro, platino e titanio lo spessore minimo è nell'intervallo tra 0,1 mm e 0,2 mm. In aggiunta, grazie alla fusione localizzata di materiale, la geometria globale del pezzo ha poca influenza sugli spessori e le sezioni minime, che possono eventualmente avere estensione su tutto il volume occupato dal gioiello.
Questa caratteristica peculiare ha permesso nella nostra esperienza produttiva di stampare con successo anelli con spessori di parete estremamente ridotti, arrivando senza problemi a 0.2 mm per zone estese del gioiello già allo stato grezzo, come nel caso dell'anello stampato in titanio in Figura 6, e strutture reticolari tridimensionali, come nell'anello a reticolo in Figura 7, che rappresentano la naturale estensione delle strutture bidimensionali di una filigrana in assenza dei limiti imposti dal processo di riempimento di uno stampo.

Si provi qui a pensare quanto questa possa essere un ulteriore e rilevante elemento rivoluzionario. Si parla non solo di un nuovo modo di progettare e concepire le forme, ma anche di ottimizzare l'investimento di metallo prezioso presente nell'oggetto. Il gioiello, che per natura rappresenta un elemento fondamentale per il riconoscimento all'interno di quella che viene definita sempre più la società dei consumi, pone da sempre importante rilevanza all'aspetto estetico. Giocare con gli spessori comporta di fatto una determinazione a priori di quanto materiale sia possibile impiegare per il gioiello e dà la possibilità di indossare un ornamento e un accessorio voluminoso e di forte impatto estetico, restituendo autorità alla forma senza pagare l'elevato peso specifico del materiale prezioso. Si tornerà poi più approfonditamente su questa tematica.

2.3 Definizione e coerenza dimensionale

Lo spessore della singola traccia stampata in fusione laser selettiva, oltre a rappresentare lo spessore di parete minimo realizzabile, rappresenta più in generale il limite di risoluzione di questa tecnica sul piano della piattaforma di costruzione (X-Y). In modo del tutto analogo a quanto accade nel disegno artistico di un gioiello, non è possibile creare dettagli con dimensioni inferiori alla traccia della matita adoperata per disegnare. Questo comporta una definizione peggiore sul piano costruttivo (X-Y) con la fusione selettiva rispetto a quella ottenibile con microfusione classica, se la sporgenza dei dettagli decorativi è limitata a pochi decimi di millimetro. Oltre questi valori di sporgenza infatti intervengono nel caso della microfusione i problemi di riempimento delle forme già elencati nel paragrafo 3.2.2, per cui i valori degli spessori minimi, e quindi dei dettagli riproducibili, aumentano inesorabilmente comportando di fatto un peggioramento della risoluzione. Al contrario, nel caso della fusione laser selettiva dipendendo gli spessori minimi ottenibili solamente dalla larghezza della traccia fusa e non dall'estensione della zona sottile la definizione massima ottenibile sul piano costruttivo X-Y rimane costante qualunque sia la geometria del pezzo da riprodurre.

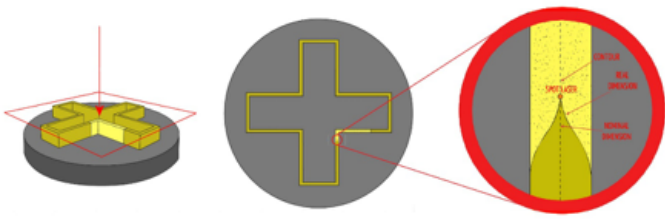


Figura 8. Spessore intrinseco traccia di fusione ed effetti sulle dimensioni reali dei pezzi.

Per quanto riguarda la microfusione diretta, la risoluzione dipende dal sistema utilizzato per la produzione del modello in resina o cera ma in generale, specialmente nel caso di stampanti con resina, la definizione arriva ad essere anche maggiore di quella ottenibile in microfusione classica, sempre considerando dettagli con sporgenza di pochi decimi di millimetro.
Da notare che la definizione in fusione selettiva è molto maggiore se è considerato invece il piano z: in questo caso la risoluzione è infatti dipendente dall'altezza del singolo layer di stampa, che in SLM™ può raggiungere valori di 20 micrometri, 10 volte inferiore alla larghezza di traccia sul piano XY.
A causa dello spessore della traccia fusa inoltre, in SLM™ per ottenere il rispetto delle dimensioni nominali dei pezzi è necessario l'utilizzo da parte del software di stampa di una compensazione, arrestando la costruzione prima di arrivare ai bordi geometrici del pezzo, per evitare il sovradimensionamento dei gioielli (Figura 8). In altri termini, la scansione laser più esterna corrispondente ai contorni dell'oggetto non viene mai effettuata, altrimenti le dimensioni finali dell'oggetto saranno maggiori di quelle desiderate, ma viene svolta più all'interno di una distanza corrispondente alla metà della traccia di fusione, per compensarne lo spessore intrinseco.

La non conformità dimensionale dei pezzi è causata principalmente sia in microfusione che in fusione selettiva dal ritiro del materiale al diminuire della temperatura. Questo avviene però con modalità diverse a seconda della tecnica usata. In microfusione la solidificazione riguarda tutto il pezzo simultaneamente, e implica una certa variabilità dimensionale in funzione della posizione dei pezzi sull'albero di colata, ad esempio, poiché la posizione del centro termico può cambiare sensibilmente. D'altra parte, gli stress meccanici causati dal ritiro vengono parzialmente eliminati dalla permanenza del metallo all'interno degli stampi ad elevata temperatura.
Nel caso fusione selettiva laser, la solidificazione avviene per strati, comportando una direzione preferenziale di sviluppo degli sforzi meccanici residui. Le basse temperature di costruzione non permettono l'eliminazione di questi sforzi che possono arrivare a deformare, sfaldare o strappare i pezzi dalla piattaforma. Un modo per limitare l'effetto di questi sforzi consiste nello stabilire in modo opportuno la posizione degli oggetti sulla piattaforma di costruzione. D'altra parte, la crescita indipendente di ogni pezzo e la gradualità di costruzione garantisco una elevata costanza dimensionale dei pezzi.

2.4 Supporti e alimentatori

Oltre agli esempi appena proposti, un confronto completo tra vantaggi e svantaggi della tecnica di fusione selettiva laser comparata alla microfusione non può prescindere dal considerare la presenza dei supporti in una e degli alimentatori nell'altra. Questi elementi sono indispensabili per fissare la posizione di crescita dei gioielli in un caso ed inviare la lega metallica nelle forme cave nell'altro.
Nella stampa laser, la presenza dei supporti è necessaria anche per sostenere le parti a sbalzo dell'oggetto, che altrimenti potrebbero essere facilmente scalzate via dal movimento della spazzola di distribuzione della polvere metallica e per dissipare il calore generato durante la fusione. La forma dei supporti e la loro posizione è scelta in modo da rendere agevole ed economica la rimozione dei pezzi dalla piattaforma di costruzione. La loro forma assume prevalentemente l'aspetto di reticolati

tridimensionali, con punti di contatto sul pezzo molto sottili. Al pari degli alimentatori in microfusione, le impalcature dei supporti sono una parte preziosa che deve essere eliminata dal gioiello e quindi la loro quantità è un fattore che deve essere considerato nell'economia generale del processo di manifattura, poiché è parte integrante dello scarto di produzione. Rispetto agli alimentatori negli alberi microfusi, l'impalcatura dei supporti costituisce in generale una parte meno importante del metallo prezioso impegnato nel processo produttivo e quindi il calo di lavorazione nella stampa laser è di solito inferiore a quello riscontrato in microfusione. E' comunque d'obbligo notare che geometrie particolari dei gioielli possono richiedere una supportazione tale da rendere svantaggioso il rapporto tra volume dei pezzi e volume dei supporti.
I supporti sono generalmente necessari anche in microfusione diretta per la stampa del modello in cera o resina, ma in questo caso essi vengono eliminati prima della produzione degli stampi ceramici e non sono quindi presenti nell' albero assemblato, influendo sul processo produttivo solo in termini di tempo necessario alla loro rimozione e non sulla qualità del pezzo e sugli scarti di lavorazione.
Una differenza importante tra supporti e alimentatori è la loro dipendenza dai volumi del gioiello da produrre. In microfusione articoli voluminosi richiedono degli alimentatori enormi per spostare il centro termico fuori dal loro volume per evitare le porosità da ritiro, per cui esiste tra l'altro una limitazione nello spessore massimo degli oggetti realizzabile nei classici rivestimenti refrattari date le dimensioni tipiche degli stampi. I contenitori di colata per la microfusioni a cera persa ospitano in genere un massimo di stampo refrattario inferiore ai due chilogrammi, all'interno di cilindri in acciaio di diametro variabile da 10-15 cm e altezza da 10-30 cm, perciò mediamente lo spessore massimo dei pezzi realizzabile è intorno ai 5-10 mm. In questi casi inoltre l'alimentazione del pezzo può rappresentare una frazione elevata della massa totale, causando uno scarto di produzione molto elevato e la produzione di un numero molto ridotto di gioielli per ogni cilindro, abbassando enormemente quella che solitamente è una elevata produttività del processo e di conseguenza alzando il costi di realizzazione. In fusione selettiva laser, la grandezza ed il numero di supporti è legato solo all'estensione superficiale degli oggetti. In questo caso, gli scarti di produzione sotto forma di supporti non subiscono un incremento all'aumentare della massa del manufatto, essendo legati alla superficie complessiva del pezzo invece che al loro volume.
Il principale inconveniente principale legato alla presenza dei supporti in fusione selettiva è dovuto alla loro fase di asportazione. Un residuo della loro presenza può infatti rimanere attaccato al gioiello stampato oppure possono restare minuscoli crateri, dovuti allo strappo di materiale del gioiello attaccato all'estremità dei supporti. L'entità di questi difetti e la possibilità di eliminarli in fase di finitura dipende dal tipo di supporti utilizzati, più questi saranno massicci, più in generale saranno onerosi da asportare, andando inoltre ad incrementare il calo del processo produttivo (Figura 9).

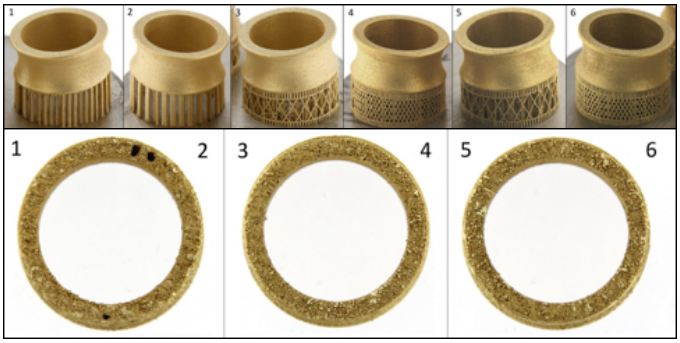


Figura 9. Anelli vuoti stampati con diverse tipologie di supportazione e aspetto della superficie inferiore dopo la rimozione manuale dei supporti. Fori lasciati dalla rimozione dei supporti colonnari sono visibili nelle zone 1 e 2.

La scelta della giusta supportazione è per ogni gioiello un compromesso tra la minore invasività e la maggiore funzionalità possibili in termini di sostegno strutturale e dissipazione termica. Infatti, come in microfusione un'alimentazione non corretta può portare a problemi di ritiro, riempimento e rotture, una supportazione non adeguata in fusione selettiva è fonte di altri problemi produttivi. Ad esempio, in caso di supporti troppo

distanti oppure sottili possono accadere fenomeni di franamento, spostamento e surriscaldamento del pezzo con compromissione della qualità finale del gioiello, se invece la supportazione è eccessiva la rugosità delle superfici da essa interessate può essere elevata e la sua eliminazione difficile.
Ogni materiale possiede un angolo critico rispetto all'orizzontale sopra il quale non è necessario introdurre supporti durante la stampa degli oggetti, poiché l'inclinazione di alcune superfici è abbastanza elevata da funzionare essa stessa da supporto, con risparmio di tempo e materiale. Per questo, l'abilità dell'operatore può assumere un ruolo fondamentale nel raggiungimento della migliore qualità possibile, scegliendo l'orientazione dell'oggetto sulla piattaforma di stampa in grado di minimizzare le superfici interessate dai supporti. Alcuni dei problemi correlati a supporti non adeguati sono presentati negli esempi in foto: in Figura 10 è mostrato un esempio di supportazione troppo debole con conseguente rottura dei supporti stessi e incompletezza dell'oggetto stampato. Nel caso l'area supportata sia insufficiente è osservabile solitamente una mancanza di materiale nelle zone non supportate, con effetti che vanno da superfici dall'apparenza spugnosa a vere e proprie cavità. In Figura 11 è presentato un esempio di gioiello in titanio con supportazione insufficiente con evidenziata la zona carente di materiale, il cui diametro nominale dovrebbe essere in realtà identico a quello della zona supportata.

Figura 10. Esempio di rottura dei supporti in un gioiello in oro bianco

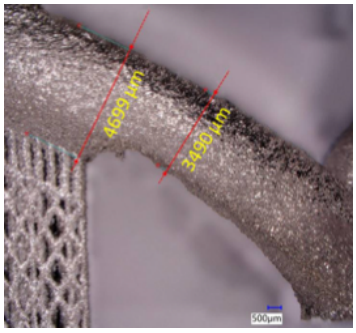


Figura 11. Anello in titanio stampato con supporti insufficienti

La presenza obbligatoria di una certa quantità di supporti influisce ovviamente sulla progettazione degli oggetti stampabili. In presenza di particolari decorativi di dimensione ridotta oppure di incassature, come mostrato nell'esempio in Figura 12 per una incassatura a binario, il residuo lasciato dalla presenza dei supporti è spesso incompatibile con il livello di definizione richiesto dal pezzo, rendendo di fatto la qualità del gioiello stampato insoddisfacente.

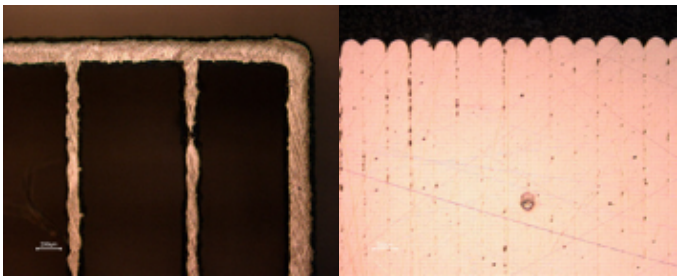
Figura 12. Esempio di anello con incassatura a binario, non adatto alla stampa 3D

Gioielli con geometrie particolarmente adatte alla fusione laser selettiva sono invece quelli in cui tutte le superfici presenti hanno un'inclinazione superiore rispetto all'angolo critico per il materiale utilizzato, in modo da rendere necessaria solo una supportazione minimale. Un esempio di anello corrispondente a questi criteri è presentato in Figura 13, in cui la supportazione è necessaria solo nelle punte inferiori del gioiello, per agganciarlo alla piattaforma di costruzione.

Figura 13. Anello con geometria particolarmente adatta alla fusione laser selettiva per la minima quantità di supporti necessari alla sua produzione

2.5 Difettologia

Aldilà delle differenze imposte dai materiali e dalla progettazione del gioiello, il diverso principio fisico connesso alla produzione degli oggetti è la fonte di un'altra importante differenza riscontrabile nei gioielli prodotti con una tecnica oppure l'altra e riguarda la tipologia dei difetti microstrutturali creati nelle leghe metalliche. L'analisi generale dei difetti che possono essere presenti in un oggetto ottenuto per microfusione rivela infatti che la maggior parte di essi è causata da processi prevalentemente chimico fisici che avvengono durante le fasi di produzione, mentre nel caso della stampa laser sono prevalentemente di tipo fisico, mancando l'interazione tra la cera, lo stampo, i crogioli e la lega fusa. Questa è la causa principale della loro notevole diversità, sia in termini di natura, forma e localizzazione all'interno dei gioielli.
Le principali tipologie di difetti microscopici tipici della microfusione classica e della diretta sono le porosità da ritiro e quelle da gas, punti duri dovuti a inclusioni di refrattario, affinatori di grano, composti intermetallici, inclusioni di grafite



(a) (B)

Figura 14: a) Traccia con fusione laser non completa, b) porosità da fusione imperfetta di tracce adiacenti.

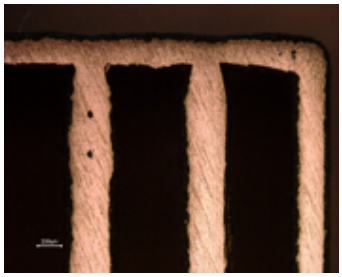


Figura 15. Porosità da gas in singole tracce stampate.

dei crogioli e residui carboniosi delle cere.
La porosità da ritiro è dovuta al cambiamento volumetrico che avviene in seguito alla solidificazione del materiale, poiché allo stato liquido la lega ha una densità sensibilmente diversa da quella allo stato solido. Nel caso in cui a seguito della solidificazione non vi sia la possibilità di apportare nuovo liquido per colmare le cavità lasciate dal cambiamento di volume, queste potranno restare visibili come porosità. L'incidenza di questa complessa difettologia è quindi legata sia alle effettive variazioni di volume, sia alla velocità di raffreddamento delle leghe nello stampo per quanto riguarda la possibilità per il metallo ancora liquido di alimentare le zone critiche. Il ritiro delle leghe metalliche oppure più raramente la loro espansione è un processo intrinseco inevitabile del passaggio di stato da liquido a solido, che può essere limitato formulando opportunamente la composizione della lega oppure concentrandolo principalmente nelle materozze, attraverso una calibrata scelta degli attacchi di colata. Grazie al diverso meccanismo di costruzione in fusione selettiva laser, non simultaneo ma a strati consecutivi, questo tipo di difetto non è generalmente presente.
Nel caso della fusione selettiva laser è possibile riscontrare porosità date da carenza di materiale per fusione incompleta, la cui origine può essere ricercata nella non completa fusione della polvere già nella singola traccia laser (Figura 13a) oppure in una non corretta distanza tra tracce adiacenti (Figura 13b).

Le porosità da gas invece possono essere presenti sia in microfusione che negli oggetti stampati per fusione laser selettiva, ma con origini diverse. Nel caso della microfusione, le porosità da gas sono causate dalla decomposizione del gesso per contatto con la lega fusa ad alta temperatura, e in questo caso sono situate prevalentemente nella zone più superficiali dei pezzi, vicino alla interfaccia tra il gesso e metallo, oppure dall'evaporazione dei componenti della lega stessa. Nel caso della fusione laser selettiva, invece, il gas presente in tale porosità è generalmente argon intrappolato durante il processo di fusione turbolenta oppure scaturisce dalla parziale e momentanea vaporizzazione dei metalli che nelle condizioni di stampa producono una eccessiva tensione di vapore (Kasperovich, G., Haubrich, Gussone, & Requena, 2016). Queste porosità non hanno generalmente una distribuzione specifica ma possono presentarsi in tutto il pezzo. Un esempio di porosità da gas in fusione selettiva laser è visibile in Figura 14, in cui si notano distintamente cavità sferiche al centro di tracce prodotte da singole scansioni laser.

I difetti legati alla presenza di materiali estranei ed incoerenti rispetto alla matrice metallica rappresentano un'altra vasta famiglia di imperfezioni riscontrabili in manifattura orafa. In microfusione a cera persa, le inclusioni di refrattario dovute all'abrasione dei rivestimenti e di grafite causate dalla degradazione dei crogioli sono molto frequenti e deleteri. Questi difetti derivano dal tradizionale utilizzo di stampi e crogioli, perciò sono totalmente assenti nella fusione laser selettiva. Altre tipologie di inclusioni estranee tipiche della microfusione sono date dalla presenza di punti duri di composti intermetallici oppure di affinatori di grano, che sono espulsi dalla matrice a causa di imperfezioni composizionali oppure ad incorretti processi di raffreddamento. Nella stampa laser quest'ultime inclusioni sono abbastanza rare, sia perché la velocità di raffreddamento è estremamente rapida da non permettere una maturazione degli eventuali nuclei cristallini, sia perché gli affinatori sono tipicamenti assenti.

Per quanto riguarda le inclusioni dovute a contaminazione, queste sono potenzialmente presenti sia in microfusione che in fusione selettiva laser. Nel caso della microfusione, oltre ad un non corretto riutilizzo degli sfridi, contaminazioni si possono verificare nel caso vengano utilizzati gli stessi crogioli per la fusione di leghe con diversa composizione, problema che può essere completamente evitato utilizzando crogioli diversi per leghe di composizione diversa. In fusione selettiva laser gestire questa possibilità diventa molto più problematico. Nel caso una stampante laser non venga pulita adeguatamente, cambiando lega inserita in macchina è molto facile che avvengano delle contaminazioni dovute alla polvere precedentemente caricata nella stampante, con conseguenze che vanno dalla fragilità dei pezzi fino alla non conformità del titolo aureo. Il cambio del materiale di lavoro risulta molto più difficile in fusione selettiva laser che in microfusione, a causa dell'onerosità del processo di pulizia delle stampanti. In gioielleria, nella situazione in cui i pezzi vengono usualmente prodotti in leghe differenti, ma di numero limitato e di composizione fissa, una soluzione a questo problema è rappresentato dall'utilizzo di diverse macchine di stampa, ognuna dedicata ad una particolare lega preziosa.

Oltre ai difetti elencati finora, ci sono altri possibili problemi riscontrabili solo in microfusione che derivano dalla presenza di un passaggio in più nel processo produttivo rispetto alla fusione selettiva, cioè la creazione di un modello in cera o in resina utilizzato per la successiva produzione dello stampo. Tra questi ci sono riempimenti non completi, bolle e superfici irregolari del modello in cera, oppure residui legati ad una deceratura non perfetta, specialmente nel caso delle resine.

Passando alle difettologie macroscopiche, in microfusione possono presentarsi concentrazioni del ritiro di solidificazione con formazione di strizioni molto evidenti nella sezione dei pezzi oppure la formazione di cricche dovute alla segregazione a bordo grano di fasi bassofondenti oppure fragili, oltre che mancanze di materiale dovuto a riempimento incompleto degli stampi. Nel caso della fusione selettiva laser è possibile avere invece crolli e mancanza di materiale dovuti a incorretta supportazione oltre che cricche e deformazioni dovute agli stress interni residui dei pezzi.

Questi ultimi sono dovuti al meccanismo di crescita degli oggetti in SLM™, per cui il pezzo cresce a strati consecutivi, accumulando stress meccanici dovuti ai ritiri del materiale in seguito al raffreddamento. In generale questi stress, che possono essere rilasciati sottoponendo i pezzi a trattamento termico di distensione, possono causare rotture dei supporti (effetto già visto in Figura 10), delaminazione dei pezzi o deformazione. Quest'ultima può essere manifestata sia in termini di variazione dimensionale rispetto al disegno sia come curvatura dell'oggetto una volta tolti i supporti.

3. PRESTAZIONI A CONFRONTO

3.1 Versatilità

Nei recenti sviluppi della produzione dei gioielli con la stampa laser,questa ha dimostrato sorprendenti capacità di superare alcuni ostacoli inerenti ai materiali preziosi utilizzabili nella microfusione a cera persa classica. In quest'ultimo caso le limitazioni imposte dalle temperature di fusione e dalla reattività dei materiali limitano il numero di elementi strutturali potenzialmente utilizzabili nelle leghe metalliche preziose a circa una decina di metalli, con l'aggiunti di pochi altri elementi additivi per la regolazione della microstruttura, come l'affinazione del

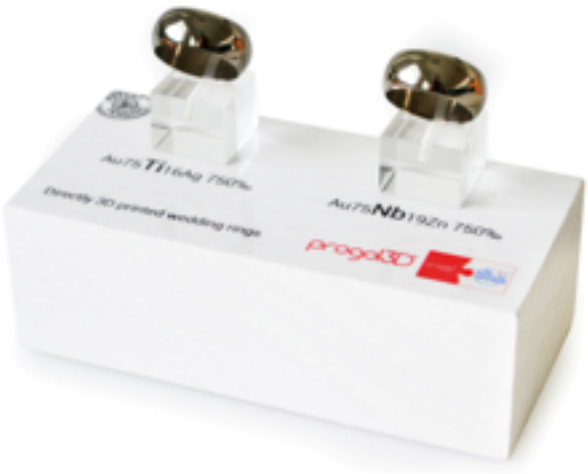


Figura 16.Fedi nuziali in oro bianco (18kt) con il 16%p Ti e 19%p Nb.

grano e l'indurimento.
Questa limitazione restringe notevolmente il livello delle prestazioni meccaniche e ottiche conferibili ad una lega preziosa, ma l'impiego della fusione selettiva laser ha permesso almeno in parte di recuperare nuove caratteristiche grazie alla possibilità di legare elementi, che in microfusione classica sono estremamente reattivi e refrattari (Zito, Allodi, Sbornicchia, Rappo, & Fiorese, 2017). Un esempio è dato dall'utilizzo di niobio ed il titanio a tenori pressochè proibitivi per la microfusione classica (19% e 16%, Figura 15), utilizzando la fusione selettiva laser di miscele di polveri metalliche, raggiungendo così un indice di giallo premium. Nel caso del titanio, inoltre, grazie alla sua bassa densità sono state ottenute leghe d'oro (18kt) di leggerezza eccezionale (12.0 g/cm3), circa il 25% in meno rispetto ad una lega bianca al palladio. Un inconveniente di queste leghe innovative è attualmente nel controllo del loro titolo aureo, poiché molti metalli refrattari interferiscono notevolemente nel saggio a fuoco.

3.2 Qualità: densità e rugosità

Negli ultimi anni, diversi studi sono stati effettutati dal laboratorio di ricerca e sviluppo di Progold S.p.A. con l'obiettivo di comparare il livello qualitativo di gioielli prodotti tramite la fusione laser selettiva, la microfusione classica e la microfusione diretta (Zito, et al., 2012) (Zito D. , Carlotto, Loggi, Sbornicchia, & Maggian, Optimization of the Main Selective Laser Melting Technology Parameters in the Production of Precious Metal Jewelry, 2013) (Zito D. , Carlotto, Sbornicchia, Bruttomesso, & Rappo, 2015). Dai risultati ottenuti è emerso in particolare che le caratteristiche fondamentali per valutare la qualità dei gioielli sono la densità e la rugosità superficiale, parametri che poi sono direttamente connessi con la robustezza e la definizione dei gioielli.
La densità dei pezzi prodotti è in realtà una misurazione, diretta o indiretta, della porosità residua, un difetto fonte di notevoli difficoltà nella realizzazione di superfici esteticamente degne di un gioiello. Al più comune metodo indiretto d'Archimede di misurazione della porosità, sensibile però unicamente ai pori occlusi del materiale, nei nostri studi abbiamo in genere preferito una misurazione diretta, effettuata analizzando digitalmente immagini di sezioni dei campioni effettuate al microscopio ottico o elettronico per valutare l'area occupata dalle porosità in rapporto all'area totale osservata.
I risultati ottenuti dalla comparazione della porosità residua presente in pezzi prodotti tramite la stampa laser rispetto a pezzi ottenuti per microfusione classica o diretta hanno in generale sempre evidenziato a parità di lega utilizzata una densità finale maggiore nel caso della fusione laser selettiva (Zito D. , Carlotto, Loggi, Sbornicchia, & Maggian, Optimization of the Main Selective Laser Melting Technology Parameters in the Production of Precious Metal Jewelry, 2013) (Zito, et al., 2012). A parità di una semplice lega ternaria (AuAgCu), la porosità di un manufatto realizzato con la stampa laser è circa venticinque volte inferiore di quella realizzata con microfusione classica o diretta (Tabella 2). Un importante discostamento da questo andamento è stato osservato nel caso della stessa lega modificata con gallio, il quale ha infatti migliorato le caratteristiche ottenute in microfusione classica e diretta, ma ha significativamente peggiorato la qualità della lega prodotta per fusione selettiva laser, principalmente a causa dell'intensa proiezione di particelle durante la sua costruzione, nefaste per una costruzione ordinata del pezzo. A causa di ciò, la porosità residua misurata in questo caso è minore in microfusione (0.05%) rispetto alla stampa laser, sebbene il

valore misurato rimanga comunque superiore a quello rilevato in fusione laser selettiva con lega esente da Gallio (0,01%).

Metodo di produzione	Porosità lega Au-Ag-Cu (%)	Porosità lega Au-Ag-Cu-Ga (%)
Microfusione classica	0.25	0.05
Microfusione diretta	0.25	0.05
SLM™	0.01	0.47

Tabella 2. Porosità residua in lega d'oro 18kt da microfusione classica, diretta e SLM™ (Zito D. , Carlotto, Loggi, Sbornicchia, & Maggian, Optimization of the Main Selective Laser Melting Technology Parameters in the Production of Precious Metal Jewelry, 2013).

In modo analogo alla densità, anche la rugosità è stata oggetto di ampli studi, coinvolgendo negli anni leghe diverse e oggetti con superfici a inclinazioni differenti. Nei nostri studi abbiamo scelto di considerare il parametro della rugosità totale (Rt) del profilo, corrispondente alla differenza tra il punto più alto e il punto più basso della superficie, in qualità di valore di riferimento per la comparazione tra le tecniche. Questo parametro rappresenta infatti lo spessore di materiale prezioso che deve essere rimosso in fase di lucidatura per ottenere una superficie perfettamente liscia ed esteticamente soddisfacente.
I risultati delle varie analisi effettuate hanno sempre rivelato una rugosità maggiore negli oggetti prodotti tramite stampa laser, dovuta al metodo di crescita degli oggetti intrinseco di questa tecnica. La rugosità è inoltre decrescente passando da oggetti prodotti per microfusione diretta a classica. Va sottolineato però come nel caso della microfusione diretta la rugosità finale dipende dal tipo di prototipatrice utilizzata. In questo studio questa era una stampante multijet per cera, preferita rispetto alle stampanti per resina per la minore incidenza di residui carboniosi in seguito alla deceratura con rugosità finale maggiore rispetto a stampanti stereolitografiche. I risultati ottenuti per una lega di oro giallo 18 carati, con rugosità misurata in superfici a diverso angolo rispetto al piano orizzontale, sono riassunti in Tabella 3.

Metodo di produzione	Rt min (µm)	Rt max (µm)	Rt media (µm)
Microfusione classica	10.8	39.9	22.0
Microfusione diretta	18.6	44.9	27.3
SLM™	22.1	59.1	31.3

Tabella 3. Rugosità minima, massima e media di campioni d'oro giallo 18 carati da microfusione classica, diretta e SLM™ (Zito, et al., 2012) .

3.3 Caratteristiche meccaniche

Le proprietà meccaniche, ottenute tipicamente attraverso prove di trazione e di durezza, influenzano alcune delle caratteristiche chiave per la produzione dei gioielli e per il processo di finitura, oltre che le performance finali degli articoli. In generale, un elevato valore di allungamento e di carico a rottura implicano una buona plasticità del materiale e permettono una facile incastonatura delle gemme. Una buona durezza inplica invece una resistenza più alta all'usura ed ai graffi, unitamente ad una incastonatura delle gemme più sicura.
Nei nostri precedenti lavori di ricercar abbiamo presentato una

confronto tra le proprietà meccaniche di oggetti prodotti con SLM™ e microfusione classica in oro giallo, rosso e platino. In tabella 4 presentiamo I risultati per una lega di oro bianco 18 kt al palladio dopo produzione, senza ulteriori trattamenti termici. I campioni usati per questo confronto hanno caratteristiche chimiche e lo stesso contenuto di palladio, ma sono ottimizzati per ognuna delle tecniche produttive in esame. Per esempio, la lega per microfusione contiene un affinatore di grano. Entrambe le leghe utilizzate sono disponibili sul mercato e sono attualmente usate per le produzione di gioielli in oro bianco a 18 kt.

Metodo di produzione	Carico di snervamento (MPa)	Carico a rottura (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Durezza (HV)
SLM™	344 ± 28	460 ± 39	21 ± 8	154 ± 2
Microfusione	283 ± 14	480 ± 25	33 ± 9	174 ± 5

Tabella 4. Proprietà meccaniche per leghe di oro bianco al palladio 18 kt nel caso di microfusione e SLM™

Il confronto tra i campioni testati rileva una durezza leggermente inferior per produzione tramite SLM™ mentre i valori del carico di rottura sono simili. L'allungamento a rottura è invece più alto per oggetti prodotti tramite microfusione, come già osservato in passato per leghe di oro giallo e rosso e per leghe di platino. Questi valori evidenziano un materiale più malleabile ne lcaso di produzione per microfusione, con possibile riduzione di rischi di rottura, ad esempio, durante l'incassatura di pietre.

3.4 Calo di finitura

Figura 17. Modello digitale dell'anello utilizzato per il calcolo dei cali di finitura.

Il calo di finitura è principalmente connesso alla rugosità superficiale totale dei pezzi prodotti, che rappresenta appunto lo spessore minimo di materiale da asportare per ottenere una superficie compatta e brillante. Nel caso della microfusione la rugosità massima è nell'intervallo 40 e 45 micrometri rispettivamente per microfusione classica e diretta, mentre nel caso SLM™ il valore di rugosità è maggiore, comportando di conseguenza uno spessore maggiore da eliminare in fase di lucidatura.
Un confronto tra i cali di finitura in oggetti identici stampati con SLM o microfusi non è in realtà molto lecito, poiché la fusione laser selettiva è una tecnica utilizzata per oggetti che normalmente non possono essere microfusi. Tuttavia, per dare un'idea, un calcolo teorico del metallo prezioso perso in finitura è presentato in Tabella 5, effettuato considerando la fede in Figura 16 in oro rosso con densità 14.84 g/cm^3.

Metodo di produzione	Spessore perso in lucidatura (mm)	Volume relativo (cm^3)	Calo (g)
Microfusione classica	0.040	0.055	0.8
Microfusione diretta	0.045	0.062	0.9
SLM™	0.060	0.082	1.2

Tabella 5. Cali di lucidatura calcolati in microfusione e in SLM™, in volume e peso.

Da notare che i cali indicati sono calcolati per eccesso, in quanto il volume tolto è considerato totalmente pieno, mentre nella realtà la presenza di rugosità superficiale fa si che solo le

creste saranno materiale effettivamente tolto nei primi strati, i quali aumenteranno di densità scendendo verso la parte piena dell'oggetto.
I dati evidenziano come nel caso della microfusione classica e diretta il calo sia inferiore a quello in fusione selettiva. Va inoltre considerato in quest'ultima l'impatto dei supporti, variabile a seconda delle dimensioni delle superfici supportate. Come spiegato in precedenza, le superfici interessate dalla supportazione possono presentare dei difetti superficiali in termini di materiale aggiuntivo o mancante, che spesso rendono necessaria una lucidatura più profonda in tali zone. Nel caso della microfusione è invece da rilevare come la presenza di porosità sotto pelle, più probabile rispetto al caso di produzione con fusione laser selettiva, possa comportare la necessità di una ulteriore lucidatura per raggiungere la qualità richiesta in alta gioielleria, con conseguente perdita di una maggiore quantità di metallo prezioso.

Figura 18. Modello digitale dell'anello utilizzato per i calcoli riportati in Tabella 6

Figura 19. Modello digitale di anello a vari livelli di svuotamento

3.5 Spessori, volumi e controllo pesi in fusione selettiva laser

In precedenza è stato messo in evidenza come uno dei valori aggiunti della tecnica di fusione selettiva laser rispetto alla microfusione sia rappresentato dalla possibilità di produrre oggetti cavi, con pareti sottili e reticoli. Un breve riassunto delle geometrie limite nelle diverse tecniche produttive, già discusse in precedenza, è presentato in Tabella 6.

Tecnologia	Spessore limite pareti (mm)	Spessore limite filigrane (mm)	Pezzi cavi
Microfusione classica	0.4-0.6	0.3-0.4	No
Microfusione diretta	0.2-0.4	0.2-0.3	No
SLM™	0.1-0.2	0.1-0.2	Si

Tabella 6. Riassunto delle geometrie limite in microfusione e in SLM™

Nel caso sia utilizzata la fusione SLM™ possono quindi essere pensati gioielli che a parità di volume apparente siano molto più leggeri rispetto a quelli ottenibili con microfusione classica o diretta, grazie allo svuotamento del loro interno, con conseguente risparmio di metallo prezioso. Inoltre grazie alla possibilità di realizzazione di reticoli tridimensionali, strutture di rinforzo a minimo impatto sul peso possono essere inserite all'interno delle cavità per aumentare la resistenza meccanica dei pezzi. Un esempio delle riduzioni di peso ottenibili producendo oggetti cavi anziché pieni è presentato in Tabella 7 per l'anello in Figura 18.
Nel caso di struttura interna vuota, senza aggiunta di reticoli di rinforzo, la variazione di peso calcolata passando da un anello pieno (come può essere ottenibile in microfusione classico o diretta) ad anelli con pareti via via più sottili è presentata in Tabella 7 nel caso di una lega di platino.

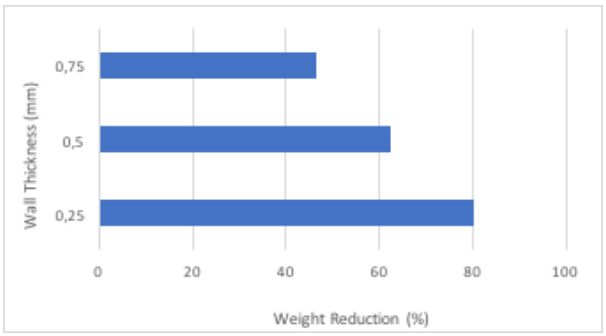


Figura 20. Riduzione del peso in seguito a svuotamento progressivo dei pezzi in SLM™

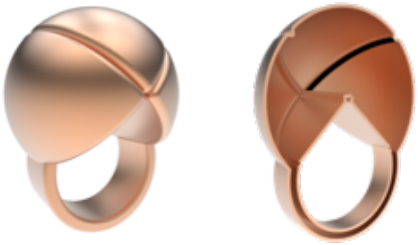


Figura 21. Modello di anello a volume elevato

Figura 22. Variazione dello spessore di parete a seconda della misura dell'anello.

Lega	Spessore parete (mm)	Peso (g)	Riduzione di peso (%)
Pt	2.5	33.2	0.00
	0.75	17.7	46.5
	0.5	12.5	62.3
	0.25	6.6	80.2

Tabella 7. variazioni di peso in funzione dello spessore di parete per anelli in platino.

Dai dati è possibile notare come per il platino sia ottenibile una riduzione di peso di circa 50% utilizzando una parete di 0.75 mm, arrivando ad un risparmio in peso di oltre l'80% con pareti di 0.25 mm.
Lo svuotamento può inoltre rappresentare un modo per rendere più indossabili gioielli ad elevato volume che pieni avrebbero un peso eccessivo. In microfusione, come già spiegato, un gioiello con cavità quasi completamente chiusa può essere ottenuto solo producendo separatamente le due metà e unendole successivamente con una saldatura. Esempi di anelli ad elevato volume, cavi all'interno, realizzabili in SLM™ senza l'utilizzo di saldature sono presentati in Figura 19.

Oltre alla riduzione del peso per aumentare l'indossabilità, lo svuotamento degli anelli può essere usato anche per un altro scopo, cioè modulare lo spessore delle pareti esterne del pezzo in modo da ottenere lo stesso peso finale in misure diverse dello stesso modello. Questo rappresenta un vantaggio quando il prezzo al pubblico dell'anello è fisso per un dato modello e non calcolato in base al peso, come accade in alta gioielleria: producendo l'articolo in microfusione infatti o si incorre in un aumento della quantità di materiale prezioso utilizzato per anelli di misura maggiore, oppure si devono ridurre gli spessori all'aumentare della misura, cambiando però l'aspetto esterno dell'anello. Nel caso SLM™ è possibile invece modificare gli spessori interni dell'anello, compensando il volume totale in più nel caso di misure maggiori con l'aumento della cavità interna al pezzo e ottenendo oggetti a peso e volume metallico costante per tutto il range di misure disponibili.
In Tabella 8 è riportato un possibile esempio per l'anello in Figura 20 stampato in oro giallo: quest'ultimo è stato svuotato e lo spessore delle pareti è stato modificato in funzione alla misura dell'anello stesso, ottenendo un peso praticamente costante (Figura 21). Per riferimento è stato riportato anche il peso al variare delle misure per anelli pieni.

Misura	Volume anello pieno (mm^3)	Peso anello pieno (g)	Volume anello SLM (mm^3)	Peso anello SLM (g)
48	1454	22.2	1454	22.2
50	1527	23.3	1454	22.2
52	1603	24.4	1454	22.2
54	1680	25.6	1454	22.2
56	1757	26.8	1454	22.2
58	1837	28.0	1454	22.2
60	1919	29.3	1454	22.2

Tabella 8. Variazioni nel peso dell'anello con misure crescenti, nel caso di anello pieno e di anello con pareti a spessore variabile.

3.6 Lead time produttivo

Il tempo necessario alla consegna di un ordine è naturalmente funzione del numero e della tipologia di pezzi da produrre. Dal confronto di tecniche produttive diverse però appare subito evidente come non solo il tempo di produzione per un dato numero di pezzi sia differente, ma considerando lotti di grandezza diversa il tempo di produzione calcolato per una tecnica è molto diverso rispetto a quello di un'altra.
La comparazione tra microfusione classica, diretta e fusione laser selettiva è stata quindi svolta considerando tre casistiche, vale a dire la produzione di uno, dieci e cento anelli di riferimento in oro. I pezzi utilizzati per il confronto dei tempi di produzione hanno in ogni caso, a parità di lega, un volume e conseguentemente una massa identica intorno ai dieci grammi, mentre la forma considerata cambia in funzione della tecnica usata. Le forme sono state scelte impiegando una geometria tipica tra quelle generalmente prodotte con ognuna delle tecniche in esame, nello specifico un anello a fascia per la microfusione classica e diretta e un anello cavo per la fusione laser selettiva. In questo modo la simulazione dei tempi di produzione è effettuata su gioielli che per le loro caratteristiche di forma verrebbero realmente prodotti con una tecnica piuttosto che un'altra tra quelle esaminate.
Il calcolo del lead time è stato effettuato considerando i tempi produttivi tipici della alta gioielleria, segmento del mercato orafo in cui la produzione tramite fusione laser selettiva è particolarmente adatta per le proprie potenzialità innovative. L'analisi di capacità produttiva presentata nel paragrafo seguente è parimenti effettuata considerando questo settore.
I tempi di progettazione e disegno del modello di partenza non sono stati considerati ai fini del calcolo essendo un passaggio in comune alle tre tecniche considerate. La disponibilità dei macchinari di produzione è stata considerata unitaria per ciascuna tipologia, per cui il calcolo sui tempi di produzione e produttività dei processi è stato approntato ammettendo la presenza di un solo esemplare di macchina per ogni fase di lavorazione per azienda, quindi un iniettore per le cere, una stampante a getto di cera, un macchinario per la preparazione dei cilindri, un forno di ricottura, una fonditrice, una stampante laser e così via. La capacità produttiva per ogni apparecchiatura corrisponde a quella media presente nel mercato orafo, quindi nel compunto delle differenze tra le varie tecniche sono escluse le macchine di prestazioni eccezionali per tenere conto dei vari poteri d'acquisto delle aziende in esercizio.
Per ognuna delle tecniche in esame sono stati calcolati i tempi necessari per completare i singoli passaggi produttivi, riassunti nelle tabelle riportate di seguito. La fase di realizzazione del prototipo in microfusione classica comprende la creazione del modello in cera, la sua microfusione in metallo non prezioso e la fase di finitura della superficie. In particolare per la creazione del modello in cera è stato considerato l'utilizzo di una stampante a getto di cera.
Nella fase di preparazione delle cere sono stati sommati i tempi di iniezione della cera, raffreddamento ed estrazione e controllo dei pezzi, che ammontano complessivamente a circa un minuto per una forma di bassa complessità. Analogamente al caso precedente, le forme complesse oppure massicce richiedono dei tempi di preparazione molto più lunghi. Infine, il tempo di preparazione delle cere può essere ulteriormente ridotto se un secondo stampo in gomma è realizzato per essere usato durante il tempo di raffreddamento della cera nel primo stampo. Tuttavia, nel caso in esame, anche per la produzione di cento pezzi, il tempo risparmiato nella preparazione delle cere è più che consumato dalla preparazione di un secondo stampo in gomma, che quindi è stato escluso dal calcolo dei

tempi di produzione. I tempi di stampa nella microfusione diretta sono stati stimati prevedendo l'utilizzo di una stampante multijet Projet CPX 3500 plus (3D Systems).

Microfusione classica

Fase produttiva	Tempo di lavoro 1 pezzo (min)	Tempo di lavoro 10 pezzi (min)	Tempo di lavoro 100 pezzi (min)
Realizzazione prototipo	1150	1150	1150
Preparazione stampo in gomma	120	120	120
Iniezione delle cere	1	10	100
Assemblaggio dell'alberino	1	3	33
Preparazione del cilindro	30	30	45
Cottura cilindro	720	720	720
Prefusione Lega	15	15	15
Fusione e colata	15	15	60
Decapaggio	5	5	20
Spiantonatura	0.25	1	10
TOTALE (approx)	**2050 (34.0 h)**	**2070 (34.5 h)**	**2270 (37.5 h)**

Tabella 9. Stima dei tempi di produzione in microfusione classica.

Microfusione diretta

Fase produttiva	Tempo di lavoro 1 pezzo (min)	Tempo di lavoro 10 pezzo (min)	Tempo di lavoro 100 pezzo (min)
Stampa delle cere	260	270	710
Rimozione supporti	60	60	90
Assemblaggio dell'alberino	1	3	33
Preparazione del cilindro	30	30	45
Cottura cilindro	720	720	720
Prefusione Lega	15	15	15
Fusione e colata	15	15	60
Decapaggio	5	5	20
Spiantonatura	0.25	1	10
TOTALE (approx)	**1100 (18.5 h)**	**1120 (18.5 h)**	**1700 (28.5h)**

Tabella 10. Stima dei tempi di produzione in microfusione diretta.

Fusione selettiva laser

Fase produttiva	Tempo di lavoro 1 pezzo (min)	Tempo di lavoro 10 pezzo (min)	Tempo di lavoro 100 pezzo (min)
Supportazione modello digitale	15	15	15
Stampa e pulizia macchina	110	440	4400
Distacco pezzi e supporti	3	30	300
TOTALE (approx)	130 (2.0 h)	480(8.0 h)	4700 (78.5 h)

Tabella 11. Stima dei tempi di produzione in fusione laser selettiva

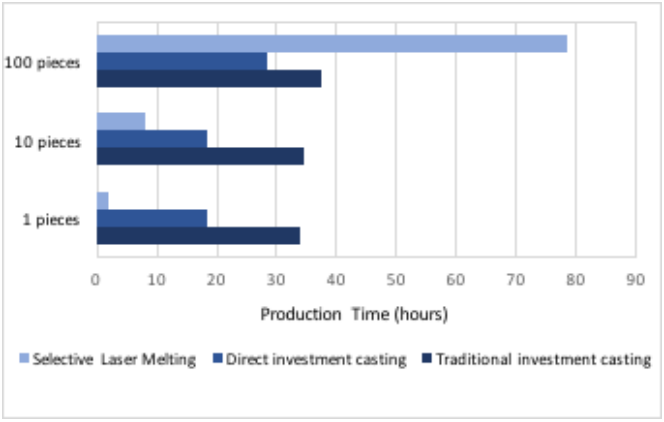


Figura 23. Lead time produttivi per le tre tecniche in funzione del numero di pezzi da produrre.

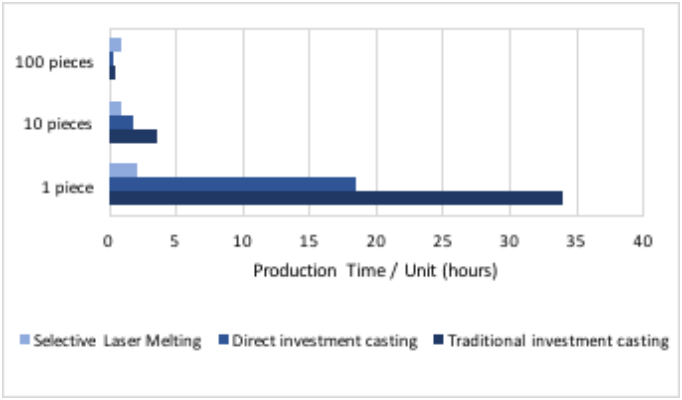


Figura 24. Tempi di produzione per singolo oggetto a seconda della tecnica di produzione e del numero di pezzi da produrre.

Tecnica produttiva	1 pezzo (ore)	10 pezzi (ore)	100 pezzi (ore)
MICROFUSIONE CLASSICA	34.0	34.5	37.5
MICROFUSIONE DIRETTA	18.5	18.5	28.5
SLM™	2.0	8.0	78.5

La fusione a cera persa è diventata negli ultimi decenni la tecnica principe nella produzione orafa grazie alla sua flessibilità produttiva. Tuttavia, confrontando il tempo di produzione nel caso di microfusione classica, diretta e stampa laser salta subito all'occhio che per produzioni limitate all'ordine della decina di unità di pezzi, il tempo di produzione con la fusione selettiva è nettamente inferiore rispetto alle altre tecniche. Per pochi pezzi i tempi più lunghi sono riscontrati con la microfusione classica, perché la produzione del prototipo ha un impatto molto importante nel conto complessivo delle ore di lavoro. È quindi evidente il motivo per cui nella realtà la realizzazione di un solo pezzo in microfusione classica è un evento raro, giustificabile solo per gioielli di enorme rilevanza artistica, ed in genere si opti in questo caso per la microfusione diretta. Nel caso di ripresa di una vecchia produzione in serie, per cui prototipi e stampi in gomma sono già presenti, i tempi di realizzazione di uno o dieci pezzi per la microfusione classica sono sensibilmente più brevi, risultando inferiori a quelli della microfusione diretta ma sempre più elevati rispetto al caso di utilizzo della fusione selettiva laser a causa dei lunghi tempi di ricottura dei rivestimenti in refrattario. La situazione è opposta nel caso di produzione di un numero di pezzi più alto, vicino al centinaio. In questo caso, il lungo tempo di stampa laser diventa superiore al tempo di realizzazione del prototipo, alla cottura dei rivestimenti ceramici e di stampa delle cere, rendendo la microfusione in complesso un processo produttivo più rapido rispetto alla fusione selettiva laser. Per un centinaio di pezzi i tempi di microfusione classica risultano ancora superiori a quelli della microfusione diretta, a causa dei lunghi tempi di preparazione del prototipo. Aumentando ulteriormente il numero di pezzi prodotti i rapporti tra i tempi si invertono: il tempo di produzione del prototipo in microfusione classica viene infatti ammortizzato e i tempi di stampa delle cere, più lunghi rispetto all'iniezione, vanno a svantaggio della microfusione diretta. Nel caso analizzato già per la produzione di 225 pezzi, pari a nove cilindri completi, i tempi di produzione sono di 43.5 ore per microfusione classica e 45 ore per microfusione diretta, differenza in crescita aumentando il numero di pezzi per simulare la realizzazione di una grande serie di gioielli.

Il vantaggio in velocità produttiva rilevato per un numero relativamente basso di pezzi può essere molto utile in un mondo in cui il desiderio di originalità e personalizzazione del pubblico è diventata un capo saldo per ogni azienda, basti guardare il settore automobilistico, abbigliamento e orologeria. Questo fenomeno di massa porta inevitabilmente anche al settore dell'oreficeria e dell'alta gioielleria. In passato, gli artigiani orefici di fiducia realizzavano saltuariamente un gioiello unico per un singolo committente, mentre oggi con la stampa laser è possibile offrire costantemente lo stesso servizio in modo più rapido. Infatti, la fusione laser selettiva diversamente dalla microfusione diretta, permette di realizzare direttamente in lega preziosa un articolo unico e originale senza mettere in moto un ciclo intero di produzione. Inoltre, la capacità di realizzare gioielli di elevata leggerezza mantenendo oppure addirittura aumentando il

loro volume complessivo, la fusione selettiva laser permette di produrre dei gioielli molto appariscenti senza rendere scomodo e pesante il loro indossamento.
Nel caso invece di gioielli da produrre in serie il vantaggio produttivo della microfusione è ancora evidente rispetto alla fusione selettiva. In questo caso l'utilizzo della tecnica di fusione laser selettiva può essere giustificato nel caso di geometrie critiche dei pezzi (i.e. pareti sottili, reticoli estesi, cavità) o di materiali problematici in microfusione, come il platino e il titanio, oppure nel caso di particolari vantaggi economici, come lo svuotamento dei gioielli per la riduzione del peso oppure la possibilità di mantenere costante il peso variando la misura di anelli e bracciali.
Se fosse considerato ad esempio le necessità dei designer o dei creativi, vi è ora la possibilità di ricevere dei test effettivi della produzione in serie nel giro di poche ore. È certamente rivoluzionario pensare ad una velocità tale nella realizzazione e influisce fortemente su tutta la catena distributiva del gioiello. Si pensi solo alla necessità di rifornire stores e punti vendita di serie limitate di gioielli in poco tempo. Per collezioni caratterizzate da un limitato numero di pezzi, pezzi unici e di nicchia, la fusione laser selettiva sconvolge qualsiasi tradizionale ciclo di lead time, accorciando in modo sensibile la più time-intensive fase produttiva.

3.7 Capacità produttiva

Uno degli aspetti più rilevanti per un corretto benchmark è la capacità produttiva. Con capacità produttiva è intesa la quantità di gioielli prodotti ogni giorno ed è stata definita pari alla massa di pezzi prodotti quotidianamente, come stabilito dai canoni industriali tradizionali. Le strumentazioni messe a disposizione sono ancora una volta considerate unitarie per tipologia e di media capacità produttiva, mentre le ore lavorative giornaliere sono state fissate a otto, senza usufruire dei turni notturni da parte delle risorse umane. Inoltre è stato considerato un singolo operatore per ogni reparto produttivo, per cui ad esempio nel caso della microfusione classica, il cerista sarà in grado di preparare cere, alberi e gessi ed in contemporanea il fonditore potrà avviare la cottura dei gessi, effettuare le fusioni e le spiantonature. Nel caso di operazioni coinvolgenti macchinari automatici questi sono stati considerati in grado di lavorare fino alla fine di un ciclo produttivo anche al di fuori dell'orario lavorativo regolare.
Nel caso della microfusione classica, un solo forno di ricottura riesce a completare mediamente un solo ciclo di cottura durante la giornata lavorativa a causa della lunga durata del processo di deceratura dei rivestimenti. Tuttavia, un forno tipico del settore riesce a contenere simultaneamente all'incirca quindici cilindri e questo comporta un significativo recupero della produttività. Data la strumentazione a disposizione e considerando per la produzione delle cere più di uno stampo in gomma, come realisticamente avviene nel caso di produzione in serie, il tempo stimato per l'iniezione di una singola cera è di 30 secondi. A questo vanno sommati dieci minuti per il montaggio di ciascun albero di peso complessivo pari a 500g, di cui il 50% è scarto produttivo dovuto a materozza ed alimentatori. Con queste tempistiche in 8 ore lavorative è possibile realizzare il numero massimo di cilindri ospitabili nel forno di ricottura considerato.
In contemporanea, il fonditore è in grado di fondere, decapare e spiantonare i 15 alberini realizzati il giorno precedente. In definitiva, ogni giorno lavorativo è possibile ottenere 3.75 kg di gioielli. Per quanto riguarda la microfusione diretta, il passaggio

limitante del processo è la fase di stampa delle cere. Nell'ipotesi che la stampante sia in grado di produrre circa 220 pezzi da 10 grammi al giorno e considerando che in contemporanea alla stampa possono venire assemblati gli alberini con le cere già preparate, ed effettuate le fusioni dei cilindri ricotti, la capacità produttiva potenziale stimata è di circa 2.2 Kg al giorno di gioielli, valore però estremamente suscettibile del tipo di stampante utilizzata. Per questa analisi è stato supposto di usare una stampante una multijet CPX 3500 plus (3D Systems).
Infine, nel caso della stampa laser, la produttività è direttamente collegata ai tempi di stampa. Nel caso di anelli di circa 10 g una singola tavola di stampa con 7 pezzi per livello ed un totale di 5 livelli sovrapposti viene completata in circa 24 ore, per un ammontare di 350 g di gioielli giornalieri.

Tecnica produttiva	Microfusione classica (kg/giorno)	Microfusione diretta (kg/giorno)	SLM™ (kg/giorno)
Produttività giornaliera	3.75	2.2	0.35

Tabella 12. Capacità produttive delle tre tecniche esaminate.

La Tabella 12 mette in evidenza come in termini di capacità produttiva le tradizionali tecniche di produzione sono ancora superiori rispetto alla fusione laser selettiva. Va però sottolineato come questa alta capacità produttiva potenziale non è sempre necessaria e sfruttata a pieno nel campo dell'alta gioielleria, in cui spesso gli impianti di microfusione vengono sotto utilizzati.
In ogni caso, la produzione di grandi lotti di articoli in centinaia e migliaia di pezzi non è conveniente se si guarda solamente al puro lato economico in termini di costi utilizzando la stampa laser, ma per serie con un medio-basso volume produttivo. Ad oggi, pezzi unici e collezioni di nicchia rimangono i protagonisti indiscussi della tecnologia SLM™, a meno di particolari forme realizzabili solamente con questa tecnologia.

3.8 Prezzi di mercato

Al fine di riportare nella pratica di tutti i giorni l'incidenza dei costi nell'attuazione di una nuova tecnica produttiva come la fusione laser selettiva, ci addentriamo ora nell'aspetto economico del tema.
Un'analisi dei prezzi di mercato e della convenienza economica aiuta molto gli operatori del settore a capire quanto una nuova tecnologia, sia di fatto una implementazione efficace e quanto essa possa essere tenuta in considerazione nella scelta della più idonea tecnica produttiva da utilizzare. È altresì vero che tale scelta dipende da molti fattori, come anticipatamente approfondito, ma sicuramente è rilevante l'attenzione agli investimenti e al bilancio aziendale.
Per una corretta valutazione dei prezzi di mercato è importante considerare come alcuni fattori che influenzano i prezzi, ad esempio il costo orario degli operatori e dell'energia elettrica utilizzata per l'alimentazione degli impianti, varino in base alla zona geografica considerata. Per questo motivo la nostra analisi si riferisce al mercato italiano, i cui prezzi si collocano tra i più bassi in Europa, prevalentemente a causa del basso costo della manodopera comparato ad altri mercati europei come quello francese o tedesco.
Per ogni tecnica è stata individuata una forbice di prezzo, dipendendo il valore finale dalla resa produttiva, quali

l'occupazione dei cilindri nel caso microfusione e della tavola di stampa laser, dal tipo di oggetto da realizzare e dallo scarto produttivo, in termini di pezzi danneggiati ed alimentatori in microfusione e supporti nel caso della fusione selettiva laser.

Tecnica produttiva	Prezzo di mercato (€/g)
Microfusione classica	0.2-1
Microfusione diretta	2 - 6
SLM™	4 – 12

Tabella 13. Prezzo di mercato per gioiellli prodotti con le tre tecniche in esame.

In generale, la microfusione classica è evidentemente al momento la tecnica produttiva più economica rispetto alle altre due, utilizzando macchinari singolarmente meno costosi rispetto alle stampanti laser, e abbattendo i costi di alcune fasi grazie all'alto numero di pezzi trattati in contemporanea. I costi e i prezzi di mercato della microfusione diretta al contrario sono molto più vicini a quelli della fusione laser selettiva.
Dall'analisi combinata di lead time, capacità produttiva e prezzi di mercato è possibile evincere come i punti di forza della fusione laser selettiva siano quindi la realizzazione di pezzi unici o serie limitate, i cui tempi di produzione rispetto alla microfusione sono sostanzialmente minori, e la realizzazione di oggetti che per geometria o materiale impiegato non siano possibili da produrre con le tecniche classiche di microfusione, come ad esempio pezzi cavi, a spessore estremamente ridotto o con reticoli tridimensionali.
Per concludere lo studio della convenienza in termini economici e produttivi della fusione laser selettiva rispetto ad altre tecniche utilizzate in gioielleria, un interessante confronto è quello dell' SLM con una tecnologia diversa rispetto alla microfusione, rappresentata dalla produzione di catene.
I macchinari per la realizzazione di catene, similmente alle stampanti per fusione laser selettiva, vengono utilizzati per produrre articoli non ottenibili con microfusione. Con entrambe le tecniche una produzione realistica è affidata ad un numero elevato di macchine in grado di lavorare contemporaneamente. Questo per ottenere nel caso SLM un aumento della produttività giornaliera, mentre nel caso della produzione di catene a questa motivazione va aggiunta la possibilità di realizzazione di più modelli nello stesso tempo. Contrariamente alla stampa SLM infatti, in cui diverse tipologie di oggetti possono essere prodotte in contemporanea sulla stessa tavola, una macchina per catene lavora in continuo un solo tipo di oggetto alla volta, mentre ogni modifica richiede la riconfigurazione dello strumento da parte di un operatore.
L'acquisto e il mantenimento di un elevato numero di macchinari per la produzione implica però un consistente investimento iniziale ed un grosso capitale immobilizzato.
Dall'analisi dei prezzi di mercato delle catene, compresi approssimativamente tra 0.4 e 0.6 €/g, è però subito evidente come il ritorno del capitale investito, nonostante una capacità produttiva giornaliera per macchinario di circa 2 Kg, sia basso rispetto alla produzione con fusione selettiva laser, in grado di produrre 0.35 Kg al giorno con prezzi di vendita medi di 8 €/g. Quest'ultima quindi dimostra di essere competitiva se comparata alla tecnologia utilizzata nella produzione di catene, specializzata nella realizzazione di oggetti complementari a quelli ottenibili per microfusione, garantendo di fatto al produttore margini di guadagno più elevati ed un ritorno dei capitali investiti in tempi molto più brevi, oltre che una versatilità di

impiego agli antipodi rispetto ai macchinari per catene.

3.9 Impatto ambientale

L'impatto ambientale rappresenta sempre di più una delle aree di interesse per ogni azienda. Il rispetto dell'ambiente e del territorio contribuiscono fortemente ad una crescita sostenibile non solo dell'organizzazione e del settore, ma di tutto il sistema mondo. É ormai noto come le aziende all'avanguardia riconoscano l'importanza di investire sulla sostenibilità monitorando i propri impatti. Questo permette di gestire le performance in modo consapevole ma anche ridurre notevolmente dei costi definiti "vivi".
Uno dei parametri universalmente riconosciuti per la valutazione dell'impatto ambientale di un processo produttivo è il cosidetto Carbon Footprint (CF), che si riferisce alla quantità di gas serra (GHG) emessi durante il processo in esame espressi in termini di massa di CO_2 equivalente.
Il confronto dei GHG emessi dalle tre tecniche in analisi è stata effettuata considerando tutte le fasi ed i materiali presenti in azienda necessari per completare la produzione di 1 Kg di gioielli, facendo riferimento agli stessi passaggi e tempi produttivi utilizzati per il calcolo dei lead time in Tabella 9, Tabella 10 e Tabella 11. Per il calcolo dell'emissione causata dalla produzione e dallo smaltimento dei materiali utilizzati i dati sono stati ricavati dal database EcoInvent 2.2, mentre per l'energia elettrica i dati impiegati sono riferiti alla rete elettrica italiana (Istituto Superiore per la Protezione e la difesa Ambientale , 2015). Nel confronto non sono stati inseriti i processi considerati comuni alle tre tecniche, nello specifico la fusione della madrelega per la microfusione e la prefusione dei materiali prima dell'atomizzazione per la fusione laser selettiva. Inoltre non è stata calcolata l'emissione causata dalla produzione delle materie prime metalliche nè le emissioni causate dalla costruzione e dalla manutenzione dei macchinari e degli impianti collaterali, quali ad esempio impianto idrico e di aspirazione, ma solo le emissioni causate dal loro utilizzo produttivo.
Nel caso della microfusione classica e diretta le emissioni in tabella per le fasi di ricottura dei cilindri sono state calcolate nel modo più vantaggioso, cioè considerando il forno pieno e riscalando l'emissione della fase per il numero di cilindri necessario per fare 1 Kg di prodotto, vale a dire quattro cilindri su quindici.

Carbon footprint microfusione classica	
Fase produttiva	kg CO_{2eq}/kg
Realizzazione prototipo	7.39
Preparazione stampo in gomma	1.62
Iniezione delle cere	0.31
Assemblaggio dell'alberino	0.07
Preparazione del cilindro	0.72
Cottura cilindro	15.90
Prefusione Lega	0.44
Fusione e colata	1.85
Decapaggio	0.42
Spiantonatura	0.06
TOTALE (approx)	**28.8**

Tabella 14. Carbon footprint della microfusione classica

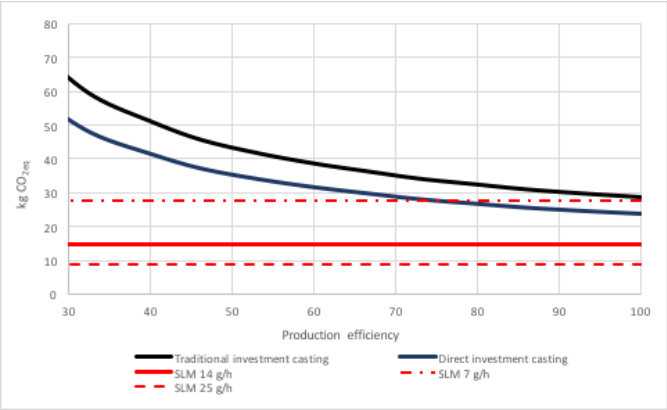


Figura 25. Andamento della produzione di CO2 equivalente al variare dell'efficienza produttiva

Carbon footprint microfusione diretta	
Fase produttiva	kg CO_{2eq}/kg
Stampa delle cere	3.70
Rimozione supporti	0.64
Assemblaggio dell'alberino	0.07
Preparazione del cilindro	0.72
Cottura cilindro	15.90
Prefusione Lega	0.44
Fusione e colata	1.85
Decapaggio	0.42
Spiantonatura	0.06
TOTALE (approx)	**23.80**

Tabella 15. Carbon footprint della microfusione diretta

Carbon footprint fusione laser selettiva	
Fase produttiva	kg CO_{2eq}/kg
Atomizzazione	1.64
Stampa	13.2
Rimozione pezzi e supporti	0.03
TOTALE (approx)	14.70

Tabella 16. Carbon footprint della fusione laser selettiva

La stima della produzione di gas serra derivanti dall'utilizzo della tre diverse tecniche produttive evidenzia come i valori delle emissioni causate dalla fusione laser selettiva siano sensibilmente inferiori a quelle causate dalle altre due tecniche. Risulta inoltre evidente che la maggior parte dell'emissione di gas serra è imputabile per tutte e tre le tecniche ai passaggi produttivi che utilizzano energia elettrica per lungo tempo: la ricottura dei rivestimenti in microfusione classica e diretta, la fase di stampa per la fusione laser selettiva. L'impatto fondamentale del passaggio di ricottura dei gessi in microfusione sull'emissione è causa di una impennata nella produzione di gas serra per Kg di gioielli se il forno non viene utilizzato completamente pieno. In questo caso infatti le emissioni non sono più ripartite sul numero massimo di cilindri trattabili, ma su un quantitativo inferiore. L'andamento delle emissioni al variare dell'efficienza di utilizzo del forno è presentato in Figura 25, con i dati presentati in tabella corrispondenti al 100% di efficienza.
Nel caso SLM l'emissione varia invece con il variare della velocità di stampa, a sua volta dipendente dalla geometria dei pezzi e dai parametri di stampa utilizzati. In Figura 25 è riportata l'emissione del caso studiato in Tabella 16, corrispondente ad una velocità di stampa di 14 g/h, e i valori corrispondenti a 7g/h e 25 g/h, che rappresentano il range di velocità tra cui oscilla la fusione laser selettiva.

Dal confronto grafico è immediato notare come solo in presenza di velocità di stampa molto basse e microfusioni ad alta efficienza produttiva l'emissione di gas serra sia inferiore con microfusione classica e diretta. Generalmente infatti la CO_2 equivalente prodotta in fusione laser selettiva è nettamente inferiore, arrivando ad essere oltre la metà rispetto a microfusione classica e diretta nel caso queste abbiano scarsa efficienza produttiva, cioè con forni fortemente sotto utilizzati.

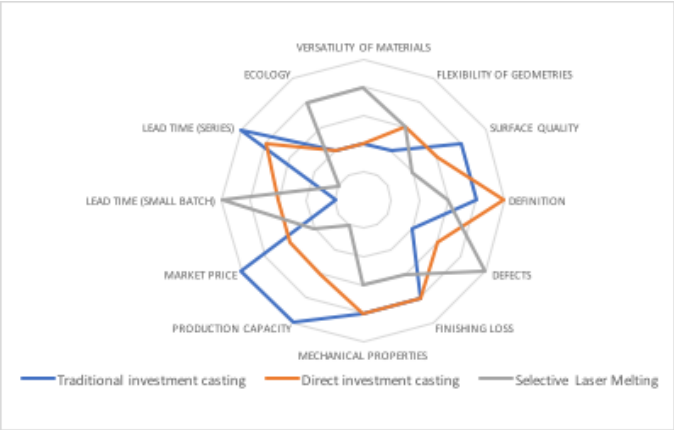


Figura 26. Comparazione delle tecniche

Nel complesso è quindi possibile concludere che la tecnica SLM è vantaggiosa rispetto alle microfusioni per quanto riguarda l'impatto ambientale produttivo.

4. CONCLUSIONI

Il percorso e la ricerca svolta ci hanno permesso di delineare in modo critico e oggettivo vantaggi e svantaggi di tre delle principali tecniche produttive nel mondo del gioiello: microfusione classica, diretta e fusione laser selettiva.
Vengono riportati a questo punto (Tabella 17), in modo grafico sintetico, le performance generale analizzate. Ad ogni caratteristica è associato un punteggio, espresso con un dato numero di asterischi, tanto maggiore quanto più la tecnica risulta vincente sotto l'aspetto considerato. Ad esempio, un numero di asterischi maggiore nella definizione indica una risoluzione massima migliore nei pezzi prodotti, mentre un numero maggiore di asterischi negli scarti di lavorazione indica una quantità di materiale scartato minore. Il radar in Figura 24, riportante il punteggio attribuito ad ogni caratteristica esaminata, è di aiuto per comprendere quando l'utilizzo della fusione laser selettiva può rappresentare realmente un vantaggio rispetto alla microfusione classica e diretta.

TECNICA PRODUTTIVA	MICROFUSIONE CLASSICA	MICROFUSIONE DIRETTA	FUSIONE SELETTIVA LASER
VERSATILITÀ DEI MATERIALI	**	**	****
FLESSIBILITÀ GEOMETRIE	**	***	***
QUALITÀ SUPERFICIALE	****	***	**
DEFINIZIONE	****	*****	***
DIFETTOLOGIA	**	***	*****
CALO DI FINITURA	**	**	****
CAPACITÀ PRODUTTIVA	*****	***	*
PREZZO DI MERCATO	*****	***	**
LEAD TIME PICCOLE QUANTITA'	*	***	*****
LEAD TIME SERIE	*****	****	*
ECOLOGIA	**	**	***

Tabella 17.Confronto fra le prestazioni generali delle tre tecniche manifatturiere.

E' evidente come la tecnica di fusione selettiva laser sia in generale una tecnica produttiva più veloce rispetto alla microfusione nel caso di produzione di pochi pezzi, mentre passando alla produzione in serie la maggiore capacità produttiva rende la microfusione, specialmente quella classica, più competitiva in termini di tempo. I prezzi di mercato sono inoltre decisamente minori con quest'ultima tecnica, mentre microfusione diretta e stampa laser presentano valori quasi paragonabili. La fusione selettiva può essere comunque vantaggiosa, anche nel caso di produzioni in serie, per la realizzazione di geometrie particolarmente complesse oppure nel caso di impiego di materiali difficili o impossibili da utilizzare in microfusione, grazie

alla sua maggiore versatilità. Il suo costo produttivo più alto può essere inoltre compensato dalla possibilità di svuotare gli oggetti, portando in questo caso il prezzo finale dei gioielli a livelli che possono essere anche inferiori rispetto a quelli della microfusione classica. L'aspetto più grezzo delle superfici ottenute con la fusione selettiva laser è causa però di un maggiore calo di finitura. In definitiva, almeno dal punto di vista generale, senza entrare in merito a una particolare geometria oppure esigenza produttiva, la fusione laser selettiva è attualmente una tecnica che offre una versatilità potenzialmente più alta rispetto alle altre tecniche più tradizionali.

Per concludere questa comparazione non rimane che esprimere quella che al momento è la nostra visione del futuro. Anni fa siamo partiti nell'esplorazione dei possibili utilizzi della tecnica di fusione selettiva laser nel campo della gioielleria spinti da un sogno e affascinati da una tecnica innovativa. Dopo anni di ricerca, test ed effettiva produzione siamo tuttora convinti più che mai delle potenzialità dell'SLM™ come tecnica produttiva in gioielleria. E' importante però utilizzare la tecnica giusta a seconda del tipo di produzione: non in tutti i casi la produzione tramite SLM™ è la tecnica più conveniente. Come abbiamo detto infatti, ci sono casi in cui la microfusione classica è più conveniente in termini di tempo e costi, come per esempio nella produzione in serie di gioielli non tecnicamente problematici.

Se al momento la tecnica SLM™ è ancora vista come sperimentale e limitata alle grandi firme, nella nostra visione del futuro il mondo orafo utilizzerà in pari misura microfusione classica e fusione laser selettiva. Infatti, il costo maggiore del gioiello e il tempo produttivo mediamente più lungo possono spesso essere superati dalle maggiori possibilità geometriche della fusione selettiva laser rispetto alla microfusione classica. Riguardo alla microfusione diretta, la sua versatilità in termini di geometrie rispetto alla tecnica classica è già al momento superata dalle potenzialità dell'SLM™. La fusione selettiva laser inoltre non presenta risvolti negativi rispetto alla microfusione diretta tali da risultare svantaggiosa rispetto a quest'ultima, per cui non è utopico pensare che nel prossimo futuro possa arrivare progressivamente a sostituirla.

In conclusione, la microfusione classica con il suo retaggio proveniente dalla notte dei tempi e la fusione selettiva laser frutto della tecnologia contemporanea potrebbero arrivare a convivere in modo integrato in un futuro molto vicino, aumentando le possibilità offerte ai produttori di gioielli in termini di risparmio economico e soluzioni tecniche.

RIFERIMENTI

1. A. D. Rakić, A. B. (1998). Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. Appl. Opt. 37, 5271- 5283.
2. Actis Grande, M., Forno, I., Costabeber, M., Zenere, S., & Iketani, S. (2013). Going Thinner and Thinner: When Jewelry Needs Weight Watchers®! Santa Fè Symposium (p. 1-16). Eddie Bell.
3. Bell, E. (2012). Casting Lightweight Hollow Jewelry Using 21st Century Technology. Santa Fè Symposium (p. 47 - 68). Eddie Bell.
4. Dr. Ulrich E. Klotz, T. H. (2015). Investment casting of titanium alloys by induction melting. Santa Fè Symposium 2015 (p. 169-179). Eddie Bell, Jessica Cast, Janet Haldeman.
5. Forno, I., & Actis Grande, M. (2012). "I Have Your Back"—How Innovative And Advanced Materials Cover Design And

Advanced Materials Cover Design . Santa Fè Symposium (p. 203-225). Eddie Bell.
6. German, R. (2005). Powder Metallurgy and particulate materials processing. Princeton: MPIF.
7. Istituto Superiore per la Protezione e la difesa Ambientale . (2015). Fattori di Emissione Atmosferica di CO2 e Sviluppo delle Fonti rinnovabili nel settore elettrico. ISPRA - settore editoria.
8. Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., & Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. Materials and Design, 160-170.
9. Klotz, U., Tiberto, D., & Held, F. (2016). Additive Manufacturing of 18-karat Yellow-Gold Alloys. The Santa Fè Symposium on jewelry manufacturing technology (p. 255-272). Eddie Bell.
10. Schuster, H. (2009). Innovative Mold Preparation And Cutting for Very Thin And High Precision Items. Santa Fè Symposium (p. 359-377). Eddie Bell.
11. Zito, D., Allodi, V., Sbornicchia, P., Rappo, S., & Fiorese, L. (2017). Stampa 3D Diretta in metallo: Un viaggio attraverso nuove opportunità e leghe innovative. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. Eddie Bell.
12. Zito, D., Bortolamei, S., Carlotto, A., Cristofolini, I., Loggi, A., & Molinari, A. (2012). Latest developments in Selective Laser Melting production of gold jewellery. Santa Fè Symposium (p. 537-562). Eddie Bell.
13. Zito, D., Carlotto, A., Loggi, A., Sbornicchia, P., & Maggian, D. (2013). Optimization of the Main Selective Laser Melting Technology Parameters in the Production of Precious Metal Jewelry. The Santa Fè symposium on Jewelry MAnufacturing Technology (p. 1-20). Eddie Bell.
14. Zito, D., Carlotto, A., Loggi, A., Sbornicchia, P., Maggian, D., Unterberg, P., . . . Cristofolini, I. (2014). Optimization of SLM Technology Main Parameters in the Production of Gold and Platinum Jewelry. The Santa Fè Symposium on jewelry manufacturing technology. Eddie Bell.
15. Zito, D., Carlotto, A., Sbornicchia, P., Bruttomesso, D., & Rappo, S. (2015). Definition and Solidity of Platinum Jewelry Produced Using Salective Laser Melting (SLM™) Technology. The Santa Fè Symposium on jewelry manufacturing technology (p. 455-492). Eddie Bell.