



Potenzialità e innovazione della tecnica selective laser melting nella produzione di gioielli in platino

AUTHORI

Damiano Zito, Valentina Allodi, Francesco Trevisan
Progold S.p.A. (Progol3D®)
Trissino (VI), Italy

Maria Grazia Malagoli Rossini, Adelio Rossini,
Massimiliano Mazza
Stilnovo s.r.l.
San Salvatore Monferrato (AL), Italy

1. INTRODUZIONE

Nell'articolo presentato al Santa Fè Symposium 2017 (1) abbiamo trattato un confronto generale tra i processi di microfusione e stampa 3D diretta in metallo prezioso (SLM™) per capire quando quest'ultima tecnica sia effettivamente vantaggiosa rispetto alla microfusione, sia classica che diretta.

Tra le casistiche produttive in cui la fusione selettiva laser si rivela vincente abbiamo individuato la produzione di piccole serie, la realizzazione di gioielli cavi o con geometrie complesse e senza saldature oppure nel caso di impiego di materiali difficili o impossibili da utilizzare in microfusione. La produzione di gioielli in lega di platino potrebbe rientrare tra queste casistiche, essendo la microfusione di questo materiale notoriamente più difficoltosa rispetto a quella di gioielli in lega di oro o d'argento (3). Inoltre il mercato della gioielleria in platino, nonostante la rinascita dell'interesse per questo metallo prezioso negli ultimi 20 anni, si mantiene tutt'oggi su volumi sensibilmente inferiori a quello della gioielleria in oro o argento, per cui spesso i macchinari vengono utilizzati molto al di sotto della loro piena capacità produttiva.

Al fine di analizzare se e quanto la tecnica SLM™ sia competitiva rispetto alla microfusione nell'ambito della produzione di gioielli in platino, abbiamo eseguito un reale confronto produttivo tra le due tecniche, effettuato tramite una collaborazione tra Progol3D®, soggetto di riferimento per la fusione laser selettiva, e l'azienda Stilnovo S.r.l. di San Salvatore Monferrato (distretto gioielliero di Valenza Po'), produttore OEM di gioielli e riferimento per la microfusione di platino.

Il segmento di mercato scelto per comparare le due tecniche è stato quello degli anelli nuziali e di fidanzamento, essendo quest'ultimo il più rappresentativo al momento per il platino sia negli USA che in Europa. L'idea di eterno, associata da sempre al platino per la sua resistenza alle alterazioni nel tempo, rende questo metallo particolarmente ricercato per gli anelli nuziali. Questo è dimostrato per esempio dai dati sul mercato USA del 2016, in cui a dispetto di un calo della produzione di gioielli in platino del 10% rispetto all'anno precedente, la spesa degli americani per anelli di fidanzamento in platino è cresciuta del 5% (2), rendendo questo segmento ancora più predominante rispetto al passato.



2 COSA CAMBIA RISPETTO ALLA PRODUZIONE DI GIOIELLI IN ORO

La produzione di gioielli in platino con metodi tradizionali notoriamente presenta problemi aggiuntivi rispetto alla produzione di articoli in oro, in particolar modo in microfusione. Al contrario, la produzione di gioielleria in platino con la tecnica Selective Laser Melting (SLM™) non presenta particolari difficoltà rispetto alla produzione in lega d'oro, fatto che rende questa tecnica particolarmente interessante per la produzione di articoli in platino. In generale si osserva, per i metalli utilizzati in gioielleria, che tanto più è difficile la produzione per microfusione e tanto più è facile la stampa 3D.

La maggior difficoltà produttiva riscontrabile in microfusione deriva da differenze nelle proprietà termofisiche delle leghe di platino rispetto alle leghe d'oro. Prima fra tutti, la temperatura di liquidus sensibilmente più elevata delle leghe di platino comporta l'utilizzo di materiali refrattari differenti per la preparazione dei gessi, in grado di resistere a temperature maggiori. Al posto dei tradizionali refrattari a base di solfato di calcio e cristobalite sono necessari materiali più resistenti alle alte temperature, in cui generalmente la silice è unita ad agenti leganti a base fosfato, che comportano una fase preparativa più lunga e laboriosa (4). Le proprietà del rivestimento variano generalmente in modo più drastico rispetto ai refrattari tradizionali in caso di miscelamento non perfetto, sia nel rapporto tra i componenti che nei tempi di lavorazione, rendendo questi materiali di fatto più sensibili alle condizioni di stoccaggio e all'invecchiamento rispetto ai refrattari tradizionali, causando oscillazioni difficilmente controllabili nella qualità superficiale e nella resistenza meccanica dei cilindri (5).

Anche con l'utilizzo di materiali appositi, la resistenza dei cilindri si rivela critica se scaldati sopra i 900°C (6), limite che comporta una differenza di temperatura molto più elevata tra metallo fuso e cilindro durante la fase di colata rispetto alla fusione di leghe d'oro, con conseguente perdita di calore più rapida da parte del metallo in ingresso. Questo effetto, unito alla viscosità e la tensione superficiale maggiori delle leghe di platino rispetto alle leghe d'oro, rendono più difficile il riempimento completo degli stampi specialmente nelle zone sottili, da cui la necessità di utilizzare fonditrici centrifughe per alleviare parzialmente il problema (7). Incrementare la forza centrifuga aiuta il metallo a riempire lo stampo, aumentando però la probabilità di distacco di frammenti di refrattario che possono venire inglobati nel metallo in raffreddamento. L'insieme di queste problematiche limita la quantità di metallo utilizzabile per singolo albero a quantità molto inferiori rispetto a quelle possibili con leghe d'oro e argento, con conseguente riduzione della capacità produttiva. Le difficoltà di riempimento e il ritiro più elevato nel passaggio tra stato liquido e solido (7) comportano inoltre l'impiego di un sistema di alimentazione più robusto, con conseguente rapporto più sfavorevole tra scarti e pezzi prodotti. Una quantità di scarti maggiore implica un costo produttivo più elevato, ulteriormente incrementato dal costo maggiore del processo di affinazione di leghe di platino rispetto a quella di leghe d'oro, per la maggior difficoltà di processo e di controllo del titolo. La somma di queste difficoltà aggiuntive rende la microfusione di gioielli in platino più suscettibile di variabilità nei risultati, oltre a richiedere un grado di esperienza molto elevato da parte degli operatori.

Considerando invece il processo SLM™, non si riscontrano

particolari problematiche rispetto alla produzione con leghe d'oro, anzi le proprietà fondamentali per l'interazione metallo-laser, in primis la riflettività e la conducibilità termica, sono più favorevoli nel caso di leghe di platino rispetto a leghe d'oro o argento. Questo comporta una minore energia necessaria per la fusione laser ed evita la necessità di inserimento nella composizione della lega di elementi atti a favorire l'assorbimento della radiazione laser.

3. CONFRONTO QUALITATIVO

Il confronto qualitativo tra gioielli in platino realizzati tramite SLM™ e tramite microfusione è stato effettuato producendo alcuni modelli di anelli appartenenti alla serie BRIDAL dell'azienda Stilnovo, collezione che più di tutte incarna il concetto di eterno da sempre associato ai gioielli in platino, poiché è composta da anelli con la soluzione MULTISIZE, coperta da brevetto (Domanda numero 102017000104245 depositata il 18 settembre 2017).

Il brevetto multisize è un sistema che permette di concepire in modo nuovo l'anello, come un oggetto che può facilmente trasformare il proprio diametro, ed essere dunque sempre perfettamente indossabile.

Cambiare la taglia di un anello rappresenta da sempre un problema più o meno grande per il gioielliere, e per l'utilizzatore finale del prodotto. Poiché un gioiello dura a lungo, e magari passa di madre in figlia, è assai probabile che si manifesti l'esigenza, per un anello, di cambiare la misura.

L'operazione è abbastanza semplice se l'anello è formato soltanto da un gambo non incassato e da un centro, ma diviene via via più complessa man mano che le forme si arricchiscono, e massimamente complessa quando tutto il gambo è incassato: la variazione della taglia, cioè la riduzione o l'allargamento del suo diametro si ottiene infatti tradizionalmente tagliando il gambo nella parte opposta al centro, e aggiungendo o togliendo una parte di metallo. Quando si tratta di un anello incassato su tutta la sua superficie, diventa pericoloso allargare o stringere anche solo una taglia poiché si rischia di rendere l'incassatura non sicura: cambiando la curvatura dell'anello infatti si modifica inevitabilmente la sede dei diamanti o delle pietre preziose, evento che compromette l'affidabilità della "tenuta" delle stesse. Con la soluzione MULTISIZE RING il gambo dell'anello presenta nella parte interna alloggiamento per una struttura intercambiabile B con differenti spessori (Figura 1,2 e 3). Nel nostro studio le scocche A sono state realizzate in Platino, mentre per le lastre è stato scelto il Titanio.

Una semplice chiave KEY, un gancio in titanio, cui è stata data la forma di una chiave di violino, serve per far uscire la parte intercambiabile dal suo alloggiamento nella parte fissa, quando si vuole cambiare la misura. Una volta che il binario di alloggiamento nella parte fissa A sarà vuoto, per creare la nuova taglia basterà posizionare facilmente con le mani una diversa parte intercambiabile.

Per il confronto tra microfusione e stampa diretta di metallo sono stati individuati 10 modelli all'interno della collezione BRIDAL, includendo fedi nuziali, solitari e trilogy, le cui scocche sono riprodotte da Figura 4 a Figura 13. La produzione e le caratteristiche delle parti intercambiabili interne non sono state prese in considerazione in questo studio, non essendo realizzate in lega di platino ma preferenzialmente in oro o titanio a causa delle proprietà meccaniche necessarie a permettere ripetuti

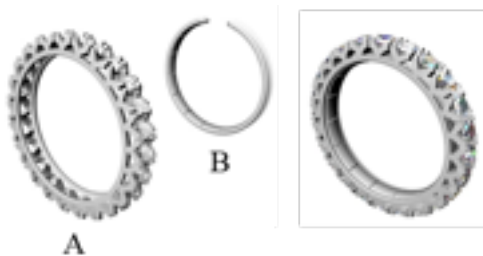


Figura 1. Scocca e parte intercambiabile su modello Eternal



Figura 2. Chiave "KEY" per la sostituzione della molla



Figura 3. Sequenza cambio parte intercambiabile su Trilogy



Figura 4. Scocca fede modello 1



Figura 5. Scocca fede modello 4



Figura 6. Scocca solitario modello 4



Figura 7. Scocca solitario modello 5



Figura 8. Scocca solitario modello



Figura 9. Scocca solitario modello 8



Figura 10. Scocca solitario modello 15



Figura 11. Scocca solitario modello 16



Figura 12. Scocca trilogy modello 1



Figura 13. Scocca trilogy modello 2



Figura 14. Scocca fede modello ETERNAL



inserimenti e rimozioni del pezzo dalle scocche senza subire deformazioni.

Un modello di fede, chiamata ETERNAL, che presenta un pavè a 360° (Figura 14), era stato inizialmente scelto per il confronto ma successivamente scartato per la difficoltà di rimozione della supportazione necessaria alla produzione tramite SLM™.

Per ogni tecnica produttiva in esame sono stati realizzati 6 anelli per modello, di cui 2 sacrificali destinati ad analisi distruttive, con l'eccezione dei due modelli di fedi, di cui sono stati invece realizzati tre campioni in misura maschile e tre in misura femminile. Il totale complessivo degli anelli realizzati per lo studio è di 120 pezzi, di cui 40 sacrificali per analisi distruttive. L'elenco dei pezzi prodotti è riassunto in Tabella 1.

Tabella 1. Elenco dei pezzi prodotti per modello e tecnica produttiva

Modello	Pezzi Microfusi	Pezzi Slm™	Totale
Solitario 4	6	6	12
Solitario 5	6	6	12
Solitario 7	6	6	12
Solitario 8	6	6	12
Solitario 15	6	6	12
Solitario 16	6	6	12
Trilogy 1	6	6	12
Trilogy 1	6	6	12
Fede 1	3U+3D	3U+3D	12
Fede 4	3U+3D	3U+3D	12
TOTALE			120

Per rendere il confronto più aderente ad un reale test produttivo, la realizzazione dei gioielli è stata divisa tra due produttori: Stilnovo per la microfusione e Progol3D® per la fusione laser selettiva. Ognuno dei due produttori è specializzato in una delle due tecniche in esame ed è in grado di ottimizzare il processo per ottenere la migliore qualità possibile.

Al fine di valutare differenze qualitative date esclusivamente dal tipo di percorso produttivo, e non imputabili alla diversa composizione delle leghe utilizzate, sia in SLM™ che in microfusione è stata impiegata la lega 95PtGalnCu. L'utilizzo della stessa composizione per microfusione e SLM™ è possibile senza avvantaggiare una tecnica rispetto all'altra grazie alla relativa facilità di fusione del platino tramite interazione con laser, per cui non sono necessari aggiustamenti composizionali per il processo SLM™ come invece avviene per le leghe d'oro. Infatti tale composizione è in gamma Progold come lega per microfusione ed è contemporaneamente in uso per la produzione SLM™ presso Progol3D®.

Per quanto riguarda la produzione per microfusione, le cere sono state realizzate con una stampante 3D System – ProJet MJP 2500W, utilizzando cera VisiJet M2 Cast. I cilindri sono stati preparati con PRO HT Platinum Gold Star® mantenendo una proporzione acqua/gesso di 33:100. Il ciclo di cottura del refrattario è schematizzato in Figura 15. La temperatura dei cilindri durante la colata è stata di 850°C.

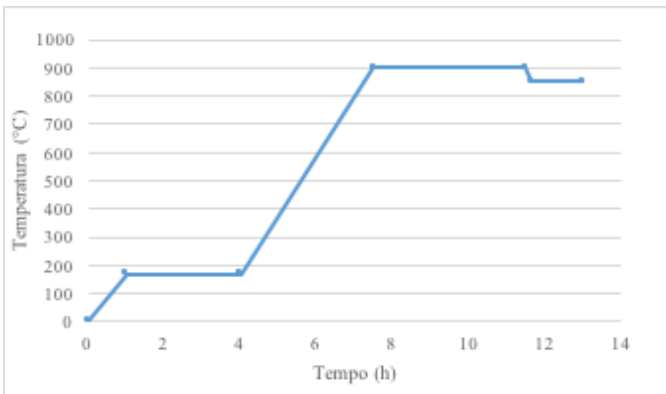


Figura 15. ciclo di cottura dei gessi

Le fasi di gessatura e di cottura dei cilindri sono state raggruppate il più possibile, mediando tra minimizzazione dei tempi produttivi e necessità di recupero degli scarti.

Per il processo di fusione e riempimento dei cilindri è stata utilizzata una fonditrice centrifuga Yasui VCC, con temperatura di colata di 250°C superiore al liquidus della lega.

Dopo lo spegnimento dei cilindri i residui di refrattario sono stati rimossi dal metallo tramite immersione in acido fluoridrico a temperatura ambiente.

Un trattamento finale di sabbiatura è stato infine eseguito per completare l'eliminazione del refrattario.

Relativamente alla fusione laser selettiva, i gioielli sono stati prodotti usando una stampante laser ReaLizer SLM50, dotata di un laser a fibra da 100 W di potenza, collimato in un raggio da 10 µm. La tavola di costruzione, circolare, ha un diametro di 70 mm. Il layer thickness utilizzato per la stampa è stato di 20 µm, privilegiando la risoluzione di stampa rispetto alla velocità di produzione, considerato il segmento di mercato coinvolto nello studio.

La stampante è stata alimentata con 95PtGaInCu in polvere, ottenuta tramite atomizzazione a gas della lega stessa e successiva setacciatura per la rimozione della frazione grossolana.

La forma delle particelle di polvere è stata osservata con un microscopio elettronico a scansione (SEM) e la distribuzione dimensionale delle particelle è stata determinata mediante un granulometro laser (Malvern, Hydro 2000S).

In seguito alla fase di stampa è stata eseguita una pallinatura dei gioielli per l'eliminazione di una parte della polvere parzialmente fusa sulle superfici, responsabile della elevata rugosità nei pezzi grezzi.

Sia nel caso della microfusione che della stampa diretta di metallo tutti gli anelli sono stati ricotti per solubilizzare la lega e ridurre le tensioni interne tramite trattamento in forno a 1150°C per un'ora seguito da spegnimento rapido in acqua. Nel caso delle fedie i pezzi sono stati in seguito induriti tramite trattamento in forno a 650 °C per un'ora con raffreddamento lento.

Indipendentemente dalla tecnica produttiva, di ogni anello realizzato sono stati valutati i seguenti parametri qualitativi:

- Aspetto delle superfici "as cast" o "as print", impatto dei residui di alimentazione e supportazione
- Individuazione di eventuali difetti macroscopici causa di non conformità.
- Misurazione del diametro interno degli anelli, variazione rispetto al nominale e deviazione nelle misure tra anelli dello stesso modello

Sui due campioni sacrificali per modello è stato inoltre effettuato:

- Misurazione della rugosità superficiale, sia "as cast" o "as sprint" che in seguito ai trattamenti di sabbiatura o pallinatura
- Valutazione della qualità interna, tramite troncatura e lappatura degli anelli

Tutti i gioielli prodotti non destinati all'analisi distruttiva (in totale 40 anelli microfusi e 40 anelli stampati, suddivisi su 10 modelli) sono stati infine lucidati ed eventualmente incassati presso Stilnovo per la valutazione della qualità finale del gioiello. Il giudizio qualitativo sul gioiello completato è stato dato dal reparto di controllo qualità interno di Stilnovo, non a conoscenza

del tipo di tecnica produttiva utilizzata per i singoli anelli da valutare, applicando gli standard normalmente utilizzati per il controllo di articoli per alta gioielleria.

In parallelo sono stati inoltre registrati dati fondamentali per il confronto degli aspetti tecnologici ed economici di microfusione e stampa diretta di metallo, quali:

- Tempi produttivi
- Scarti produttivi
- Impressioni degli operatori nelle fasi di lucidatura
- Impressioni degli operatori sulla facilità di incassatura

Per raccogliere correttamente i dati sulle operazioni di finitura a ciascun anello è stato allegato un foglio di valutazione diviso per fasi, che ciascun operatore ha provveduto a compilare.



Figura 16. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dalle fede modello 1



Figura 21. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 8



Figura 17. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dalle fede modello 4

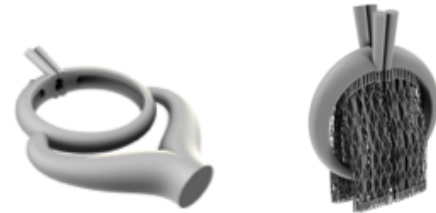


Figura 22. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 15



Figura 18. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 4



Figura 23. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 16

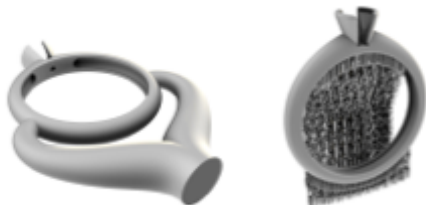


Figura 19. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 5



Figura 24. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello trilogy modello 1



Figura 20. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello solitario modello 7



Figura 25. Alimentatori e supporti utilizzati per la produzione dell'anello trilogy modello 2

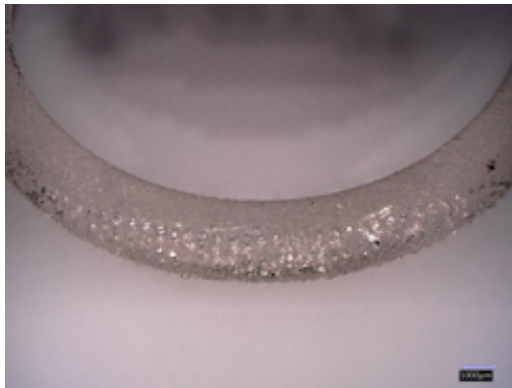


Figura 26. Residuo di supportazione SLM™ sulla superficie di un anello



Figura 27. Residuo di alimentazione sulla superficie di un anello



Figura 28. Supportazione interna nel modello solitario 4

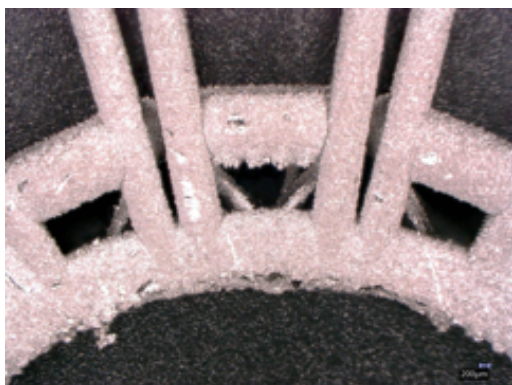


Figura 29. supportazione interna nel modello trilogy 2



Figura 30. Fede modello 4 grezza prodotta per microfusione



Figura 31. Fede modello 4 grezza prodotta per SLM™



Figura 32. Fede modello 4 prodotta per microfusione, dopo sabbatura



Figura 33. Fede modello 4 prodotta per SLM™, dopo pallinatura



4. VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE FISICHE, MECCANICHE E TECNOLOGICHE

Aspetto superficiale

Il primo confronto realizzato tra anelli prodotti per microfusione e per SLM™ riguarda l'aspetto delle superfici sia grezze che dopo i trattamenti di sabbiatura o pallinatura. Questo include la valutazione dell'impatto sulle superfici degli elementi aggiuntivi necessari alla realizzazione del gioiello, vale a dire gli alimentatori nel caso della microfusione e i supporti nel caso SLM™. L'invasività e il peso di questi elementi hanno una ripercussione diretta sia in termini di qualità degli anelli, ad esempio per la necessità di ricostruzione delle superfici coinvolte, sia in termini economici, perché direttamente proporzionali alla percentuale di scarti di produzione e ai tempi di processo.

In questo paragrafo verrà valutata la presenza e l'invasività di alimentatori e supporti, in termini di estensione delle superfici coinvolte e aspetto dei residui mentre nel paragrafo dedicato alla valutazione economica e finanziaria verranno riportati i dati su scarti e tempi produttivi.

Da Figura 18 a Figura 25 sono confrontate le alimentazioni e le supportazioni dei 10 modelli scelti per la produzione.

Dalla comparazione degli elementi aggiuntivi necessari alla produzione con le due tecniche in esame è immediato dedurre come l'effetto sulle superfici sia completamente diverso nei due casi. In microfusione, dove gli elementi aggiuntivi sono massivi, la geometria della zona del gioiello alimentata direttamente è totalmente persa, mentre in SLM™ i residui della supportazione, costruita a reticolo, lasciano generalmente visibili le geometrie sottostanti.

Esempi dei residui di supportazione e alimentazione negli anelli sono presentate in Figura 26 e Figura 27.

La supportazione SLM™ generalmente coinvolge una superficie complessiva più ampia del gioiello, se però si considera l'area effettiva di contatto con i supporti, cioè le zone in cui i denti del reticolo si uniscono effettivamente al gioiello rovinandone la superficie, si ottengono valori inferiori rispetto alle aree effettive coinvolte dall'alimentazione per microfusione.

Ci sono tuttavia casi, come l'esempio della fede ETERNAL, in cui sebbene la geometria di massima del gioiello sia mantenuta, la perdita di dettagli per la massiccia presenza di residui di supportazione rende sconveniente la produzione per fusione laser selettiva.

Per i modelli solitario 4 e trilogy 1 un buon compromesso in SLM™ è stato raggiunto utilizzando una orientazione di crescita che minimizzasse le superfici ad angolo tale da richiedere supportazione, con alcuni supporti però in zone più difficili da raggiungere per l'asportazione rispetto agli altri modelli (Figura 28 e Figura 29). Un opportuno utilizzo dei parametri di supportazione permette in questi casi di creare elementi più facili da distaccare compensando almeno parzialmente la maggior destrezza richiesta per la rimozione.

Per quanto riguarda l'aspetto complessivo delle superfici, gli anelli microfusi appaiono generalmente meno rugosi, sia confrontando i pezzi al grezzo (esempio in Figura 30 e Figura 31) sia dopo trattamento superficiale (Figura 32 e Figura 33). Spesso però si osservano irregolarità superficiali, prime fra tutte bave di materiale in eccesso, non presenti in SLM™. Questi difetti verranno analizzati più approfonditamente nei prossimi paragrafi.

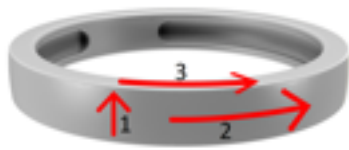


Figura 34. Direzioni di misurazione della rugosità nelle fedie



Figura 35. Direzioni di misura della rugosità nei solitari e trilogy SLM™



Figura 36. Direzioni di misura della rugosità nei solitari e trilogy microfusi

Rugosità

Per una valutazione quantitativa delle differenze tra le superfici sono state eseguite misurazioni di rugosità con un profilometro Taylor Hobson FTS INTRA 02. Come parametro di confronto è stata scelta la rugosità totale (R_t) del profilo, corrispondente alla differenza tra il punto più alto e il punto più basso della superficie. Questo valore rappresenta infatti lo spessore di materiale prezioso che deve essere rimosso in fase di lucidatura per ottenere una superficie esteticamente soddisfacente. I valori sono stati registrati sia su pezzi grezzi (“as cast” nel caso della microfusione ed “as print” nel caso SLM™) che in seguito a trattamento di sabbatura o pallinatura superficiale.

Il trattamento della superficie grezza è infatti prassi produttiva sia in Progol3D®, tramite pallinatura, per diminuire la rugosità ed omogeneizzare l'aspetto della superficie, sia in Stilnovo tramite sabbatura, principalmente per eliminare i residui di refrattario. La rugosità effettiva che l'orecchio incontrerà nelle fasi di sgrassatura è in entrambi i casi quella del gioiello trattato, e sarà da questi valori che dipenderà la quantità di materiale da asportare per raggiungere una superficie omogenea.

Le misurazioni sono state effettuate su più zone dei gioielli, corrispondenti a piani con diverse orientazioni rispetto alla direzione di crescita dei pezzi in SLM™ e di crescita delle cere in microfusione. Sono stati scelti per la misurazione punti esenti da difetti superficiali evidenti, in modo da restituire il valore di R_t medio al netto di irregolarità superficiali macroscopiche.

Per quanto riguarda le fedie le orientazioni di crescita scelte per la stampa 3D delle cere in microfusione e del metallo in SLM™ sono state le stesse, rappresentate in Figura 34. Le misurazioni sono state effettuate nella direzione 1 (piano parallelo alla crescita, direzione perpendicolare a z), nella direzione 2 (piano parallelo alla crescita, direzione parallela a z) e nella direzione 3 (piano perpendicolare alla crescita, direzione perpendicolare a z).

I solitari e i trilogy sono stati invece stampati con uno “standing” diverso in SLM™ rispetto alle cere di microfusione, a causa del diverso tipo di supportazione utilizzabile. In particolare la crescita è avvenuta con i pezzi orientati verticalmente in SLM™ e orizzontalmente per le cere. In questo caso le direzioni di misura sono state nominate secondo l'orientazione rispetto alla crescita dei pezzi, come riportato in Figura 35 per gli anelli SLM™ e in Figura 36 per gli anelli microfusi. La direzione indicata con 4 corrisponde quindi ad un piano parallelo alla direzione di crescita, con misura effettuata perpendicolarmente a z, mentre la 5 ad un piano variabile per inclinazione con misura lungo z.

In Tabella 2 sono riportati i valori medi registrati sui pezzi grezzi divisi per direzione con rispettive deviazioni standard, mentre i valori per i gioielli dopo sabbatura o pallinatura sono riportati in Tabella 3

I risultati sono riassunti nel grafico in Figura 37.

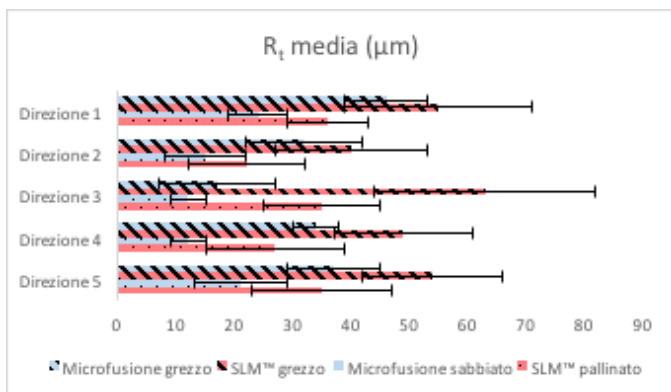


Figura 37. rugosità medie riscontrate nelle diverse direzioni in microfusione ed SLM™

Tabella 2. Rugosità as cast / as print

MICROFUSIONE			SLM™		
Direzione	R_t (µm)	Dev std	Direzione	R_t (µm)	Dev std
1	46	7	1	55	16
2	32	10	2	40	13
3	17	10	3	63	19
4	34	4	4	49	12
5	37	8	5	54	12

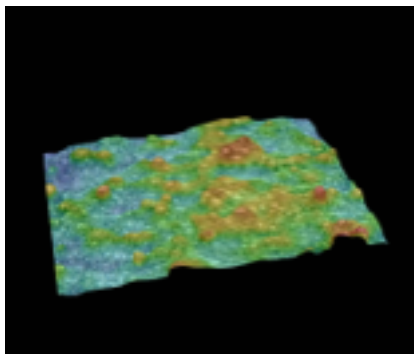


Figura 38. Rugosità superficiale sulla parete verticale di una fede SLM™ grezza, 300X

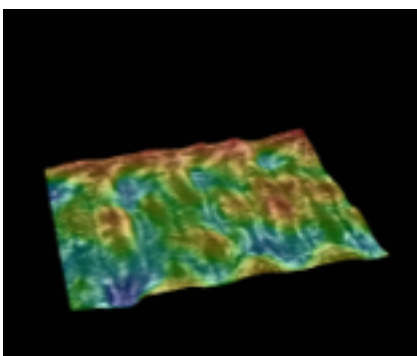


Figura 39. Rugosità superficiale sulla parete orizzontale di una fede SLM™ grezza, 300X. Visibili le tracce parallele lasciate dalle scansioni laser.

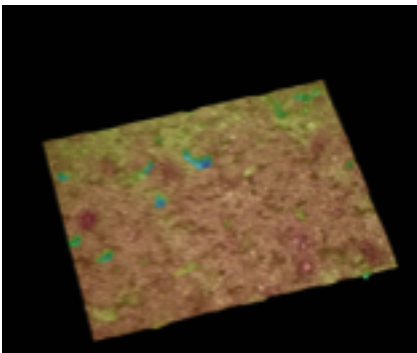


Figura 40. Rugosità superficiale sulla parete orizzontale di una fede microfusa grezza, 300X.

Tabella 3. Rugosità dopo sabbiatura o pallinatura

MICROFUSIONE			SLM™		
Direzione	Rt (µm)	Dev std	Direzione	Rt (µm)	Dev std
1	24	5	1	36	7
2	15	7	2	22	10
3	12	3	3	35	10
4	12	3	4	27	12
5	21	8	5	35	12

Come già notato nell'osservazione delle superfici grezze, i valori di rugosità sono nettamente maggiori in SLM™ piuttosto che in microfusione, risultato non sorprendente essendo la rugosità superficiale uno dei punti deboli della tecnica SLM™. In SLM™ la rugosità registrata è inoltre mediamente superiore a quella solitamente rilevata per le leghe d'oro, dato in linea con i valori riportati nello studio condotto da Progold® nel 2015 (8), in cui era stato notato come rispetto alle leghe d'oro la maggior presenza di particelle di polvere parzialmente fuse sulla superficie comporta una rugosità grezza più elevata (Figura 38). La maggior rugosità grezza registrata in SLM™ in direzione 3 rispetto alle altre misurazioni è imputabile all'andamento superficiale causato dall'accostamento delle linee di fusione, che presentano un effetto menisco accentuato con altezza maggiore al centro della linea e minore ai bordi (Figura 39). Nella stampa delle cere il menisco è molto meno pronunciato (Figura 40), tanto che la rugosità data da questo effetto, misurata in direzione 3, si rivela molto minore di quella causata dalla suddivisione in layer del pezzo lungo z, principale responsabile della rugosità nelle altre direzioni.

La deviazione standard maggiore registrata in SLM™ rispetto alla microfusione deriva da una deviazione più elevata già tra punti diversi dello stesso gioiello appartenenti a zone equivalenti. Queste differenze sono dovute principalmente alla diversa orientazione delle superfici misurate rispetto al movimento effettuato dal "wiper" durante il "recoating" della piattaforma (8) che si traduce in una diversa adesione da parte delle particelle di polvere alle superfici.

Nei gioielli prodotti per microfusione la rugosità è invece più costante, sia sul singolo pezzo, sia considerando modelli diversi. E' infine evidente in tutte e due i metodi produttivi l'effetto che il trattamento superficiale, che sia sabbiatura o pallinatura, ha sulla rugosità dei pezzi, con valori in entrambi i casi ridotti di circa la metà rispetto al grezzo.

La minore rugosità superficiale complessivamente incontrata in microfusione implica in generale una asportazione minore di materiale da parte dell'orefice in fase di sgrossatura per arrivare ad una superficie compatta. Questo è vero però solo se nel pezzo non sono presenti zone con materiale eccedente, come per esempio bave, oppure mancante, come cavità superficiali. In questi casi, osservati di frequente nei gioielli prodotti in questo studio per microfusione, il materiale perso e il tempo di lavorazione aumentano notevolmente.

Difettologia

MICROFUSIONE

Come già accennato nei paragrafi precedenti, i gioielli prodotti per microfusione presentano una incidenza di difetti macroscopici nettamente superiore ai gioielli prodotti per SLM™, anche in seguito all'ottimizzazione dei parametri di fusione.

I difetti più comunemente registrati sono irregolarità superficiali, come bave di materiale in eccesso o mancanze.

Nel primo caso (Figura 41) la causa è la parziale rottura del refrattario, sotto forma di crepe che vengono riempite dal metallo. Questo tipo di difetto è generalmente molto semplice da correggere, essendo materiale in eccesso asportabile facilmente con un dispendio temporale minimo.

In alcuni modelli però, come il trilogy 1, la presenza di dettagli separati da piccoli spazi rende questo tipo di difetto più critico, con casi come quello in Figura 42 in cui la rottura del refrattario ha unito zone differenti del gioiello.

La variabilità nella resistenza del refrattario a base fosfato, data dalla suscettibilità più elevata alle variazioni delle condizioni di staocaggio e alle alte temperature del metallo in colata, sono la fonte più probabile anche di altri tipi di difetti riscontrati.

Il distacco di piccole porzioni di refrattario ha portato in alcuni pezzi alla comparsa di irregolarità, sotto forma di cavità affioranti nei casi in cui i microdistacchi rimangono intrappolati nel metallo (Figura 43 e Figura 44), oppure di avvallamenti più o meno grandi qualora i microdistacchi rimangano esterni al metallo, creando piccoli crateri arrotondati sugli orli (Figura 45).

L'elevata temperatura del metallo, causa di reazioni nel refrattario, è la probabile responsabile delle superfici irregolari e delle porosità osservate in alcune zone dei gioielli microfusi, come quelle in Figura 46 e Figura 48, in cui la rugosità è sensibilmente superiore alla media delle zone circostanti.

In altri gioielli i difetti superficiali paiono causati da una combinazione di microdistacchi e di reazione del refrattario (Figura 48 e Figura 49)

I difetti presentati da Figura 43 a Figura 49 si rivelano più dannosi per il gioiello rispetto ai precedenti, essendo di fatto mancanze di materiale e non eccedenze. Questo infatti obbliga l'operatore a rimuovere più materiale per arrivare ad una superficie regolare, oppure ad eseguire riparazioni nel caso di cavità estese in profondità, con conseguente maggiore calo e tempi più lunghi di lavorazione.

Oltre a difetti riconducibili all'interazione metallo-refrattario sono stati rilevati casi di problemi derivanti da altre fasi produttive.

E' per esempio dovuta ad una probabile tensione nelle cere, oppure a problemi nella fase di colatura dei gessi, l'ovalizzazione riscontrata in uno dei solitari modello 8 microfusi (Figura 50). Benchè il gioiello in questi casi sia deformato basta un rapido intervento dell'orefice per riportare alla forma originale senza praticamente alterare la misura, rendendo quindi il difetto non particolarmente problematico.

Un altro difetto riscontrato è la piegatura delle griffe nei modelli in cui queste hanno una estensione particolarmente marcata, primo fra tutti il solitario modello 4. Questo problema (Figura 51),



Figura 41. Eccesso di materiale su lato di anello microfuso



Figura 42. Esempio di rottura del refrattario

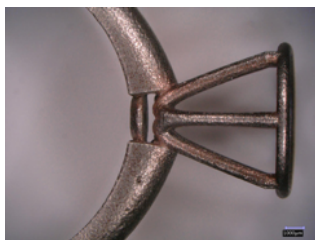


Figura 43. Cavità affiorante sulla superficie di un solitario modello 4, probabilmente causata da un microdistacco di refrattario inglobato nel metallo fuso



Figura 44. Ingrandimento del difetto di Figura 43.

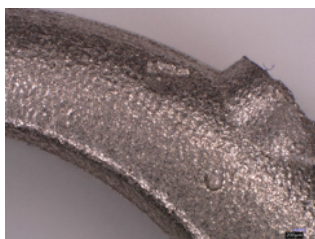


Figura 45. Avvallamenti probabilmente causati da frammenti distaccati di refrattario rimasti sulla superficie del metallo fuso



Figura 46. Superficie irregolare in un solitario modello 7 microfuso

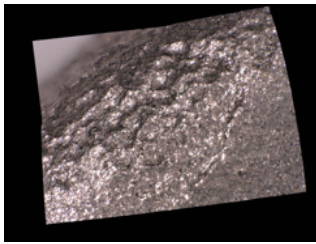


Figura 47. Dettaglio della superfici di Superficie irregolare in un solitario modello 7 microfuso

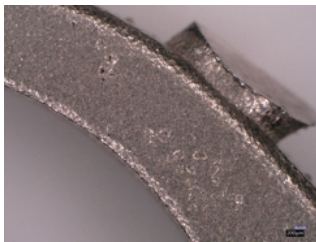


Figura 48. Porosità superficiali in un solitario 8 microfuso

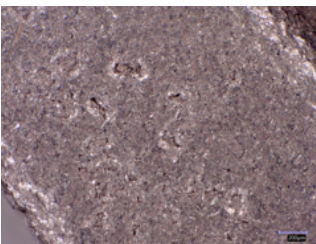


Figura 49. Dettaglio della zona in Figura 48.

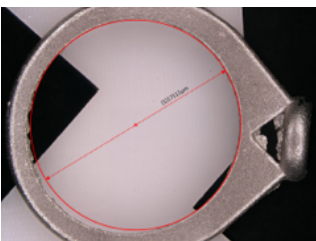


Figura 50. solitario 8 microfuso con evidente ovalizzazione

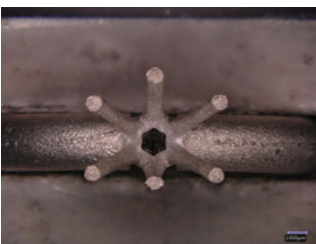


Figura 51. deformazione delle griffe in un solitario 4 microfuso



Figura 52. Anello aggiunto per stabilizzare la posizione delle griffe nei solitari 4 microfusi

dovuto con tutta probabilità alla piegatura delle cere durante la fase di gessatura, è stato risolto aggiungendo un anello terminale per bloccare il possibile movimento delle griffe (Figura 52).

E' infine riconducibile allo stress meccanico sviluppato in fase di spegnimento del cilindro la rottura riportata in Figura 53. In questo caso l'anello è ovviamente non conforme.

Per investigare più approfonditamente le cause della rottura la fede è stata sezionata orizzontalmente e analizzata al microscopio elettronico.

Nella parte interna della fede, in corrispondenza della frattura, è stata rilevata una cavità dovuta con tutta probabilità ad una inclusione di refrattario, dati i risultati dell'analisi EDX sui residui interni che hanno evidenziato la presenza di silice.

La cavità, estesa ad entrambe le metà della fede ottenute in seguito alla sezione (Figura 54 e Figura 55), ha ridotto la sezione effettiva dell'anello abbassandone drasticamente la resistenza meccanica, per cui lo stress causato dal ritiro in fase di spegnimento ha superato il carico ultimo di rottura, causando una frattura nell'anello.



Figura 53. rottura presente in una delle fedi microfuse

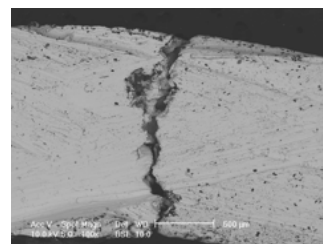


Figura 54. Cavità interna in fede microfusa. Si nota la corrispondenza con la zona di frattura del pezzo.

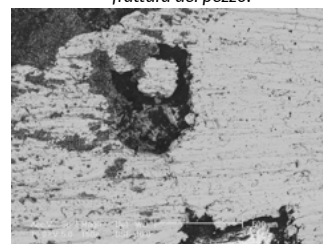


Figura 55. Estensione della cavità nell'altra metà della fede sezionata.

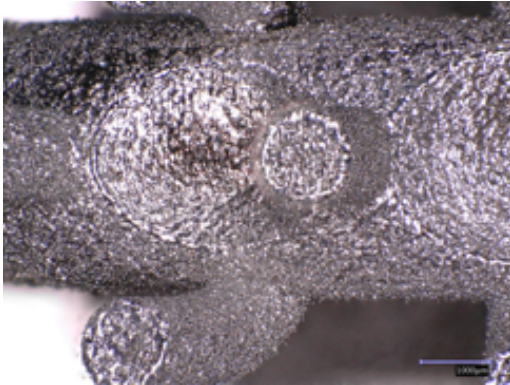


Figura 56. rigonfiamento superficiale in un trilogy modello 2 prodotto per SLM™

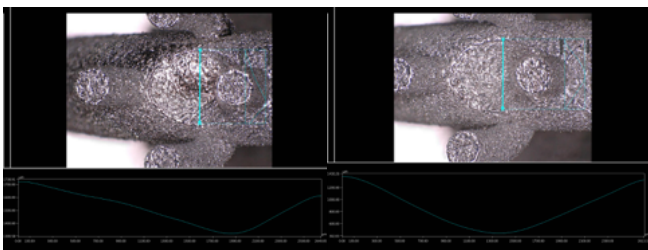


Figura 57. Rigonfiamento superficiale nel trilogy modello 2 in Figura 56 comparato con profilo standard

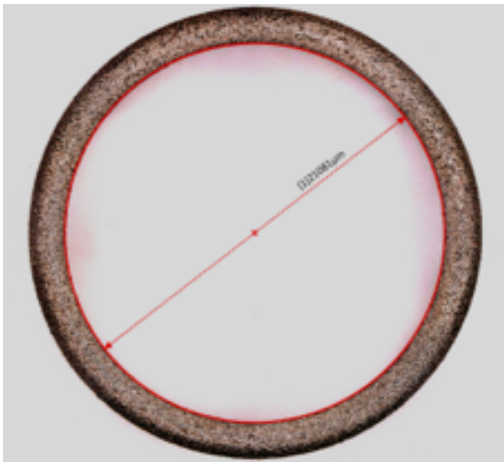


Figura 58. Esempio di misurazione digitale

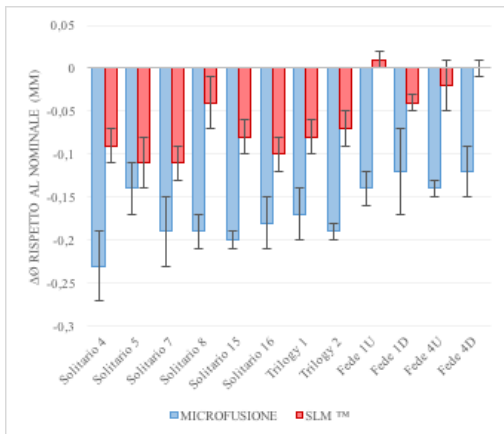


Figura 59. Scostamento rispetto alla misura nominale del diametro interno con deviazioni standard

SLM™

I difetti macroscopici osservati sui gioielli prodotti per SLM™ sono stati nettamente inferiori a quelli riscontrati in microfusione. Infatti sebbene le superfici presentino una rugosità più elevata, solo nel caso di uno degli anelli prodotti si è potuta constatare una irregolarità vera e propria, nella forma di rigonfiamento in una zona del pezzo (Figura 56 e Figura 57).

Questo tipo di difetto si presenta in SLM™ quando la fusione della polvere non è ottimale, per cui permangono particelle non completamente fuse che disturbano la distribuzione della polvere nei “layer” di stampa successivi.

In particolare in questo caso, siccome il difetto interessa solo una piccola parte della zona superiore del pezzo, la fusione incompleta è probabilmente causata da una variazione della granulometria media della polvere nella zona di crescita del pezzo, dovuta per esempio all’accumularsi degli agglomerati di particelle parzialmente fuse all’interno della polvere distribuita dai “wiper” con l’avanzare del processo di stampa.

Essendo un eccesso di materiale, e non una mancanza, la correzione di un difetto di questo genere non comporta particolari problemi. Può capitare però che al rigonfiamento si associ una porosità diffusa nella zona interessata, sempre causata dalla fusione imperfetta.

Coerenza dimensionale

L’analisi del rispetto delle quote nominali e delle deviazioni riscontrabili tra anelli diversi dello stesso modello è stata effettuata su tutti i pezzi prodotti per quanto riguarda il diametro interno, direttamente correlabile alla misura effettiva dell’anello. Per una maggiore precisione i diametri sono stati misurati sia tramite l’utilizzo di un calibro (Mitutoyo), mediando tre valori presi in posizioni diverse, sia tramite l’analisi fotografica realizzata con un microscopio digitale Keyence, opportunamente calibrato per massimizzare l’accuratezza di misura.

In Tabella 4 sono riportati i dati relativi al diametro interno degli anelli. Nelle medie calcolate per i microfusi non è stato considerato l’anello ovalizzato riportato in Figura 50, data la difficoltà nello stabilirne il diametro effettivo.

Tabella 4. Diametri interni misurati per modello comparati con diametri nominali

Modello	DIAMETRO INTERNO (mm)				
	nominale	microfusione	Dev std microfusione	SLM™	Dev std SLM™
Solitario 4	17.66	17.43	± 0.04	117.57	± 0.02
Solitario 5	17.66	17.52	± 0.03	17.55	± 0.03
Solitario 7	17.67	17.48	± 0.04	17.56	± 0.02
Solitario 8	17.65	17.46	± 0.02	17.61	± 0.03
Solitario 15	17.66	17.46	± 0.01	17.58	± 0.02
Solitario 16	17.65	17.47	± 0.03	17.55	± 0.02
Trilogy 1	17.59	17.42	± 0.03	17.51	± 0.02
Trilogy 2	17.72	17.53	± 0.01	17.65	± 0.02
Fede 1 U	21.10	20.96	± 0.02	21.11	± 0.01
Fede 1 D	17.65	17.53	± 0.05	17.61	± 0.01
Fede 4 U	21.10	20.96	± 0.01	21.08	± 0.03
Fede 4 D	17.65	17.53	± 0.03	17.65	± 0.01

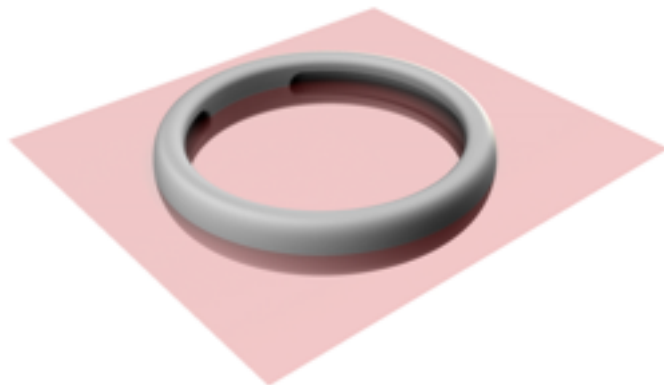


Figura 60. Piano di sezione A

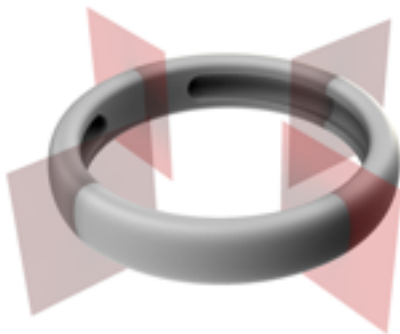


Figura 61. Piani di sezione B

Dai dati ottenuti si evince come il discostamento nella misura dei diametri interni rispetto al nominale sia sempre minore in SLM™ rispetto alla microfusione per ognuno dei modelli di anello prodotti.

L'origine della riduzione dei diametri interni è ovviamente diversa nelle due tecniche: in SLM è causata da una correzione non perfetta dalla larghezza della singola traccia laser, in microfusione dalla combinazione del ritiro del refrattario durante la fase di firing, dal ritiro del metallo da fase liquida a solida e dalla contrazione del pezzo durante il raffreddamento a temperatura ambiente. Nel caso SLM™ l'utilizzo di platino piuttosto che di oro non rappresenta una variabile che possa influire sui discostamenti dimensionali, mentre al contrario in microfusione le temperature più elevate ed il ritiro più marcato nel cambiamento di fase possono essere causa di una discrepanza maggiore con le quote nominali per anelli in platino piuttosto che in oro.

Anche la ripetibilità su anelli dello stesso modello è generalmente maggiore nel caso SLM™, con deviazioni standard massime di ± 0.03 mm in confronto agli ± 0.04 mm e oltre rilevati in alcuni modelli in microfusione. Data l'oscillazione più ampia osservata in microfusione l'eventuale correzione a monte delle dimensioni interne, agendo per esempio sul disegno, si rivelerà meno efficace.

effective.

Porosità interna

Per l'analisi della porosità interna ai pezzi è stata valutata inizialmente la tomografia computerizzata, tecnica che presenta il vantaggio di non essere distruttiva ed in grado di investigare tutto il volume del gioiello. I risultati ottenuti non sono stati però ritenuti soddisfacenti in termini di risoluzione delle immagini, problema dovuto all'alta densità del platino, che causa un assorbimento del fascio talmente elevato da rendere estremamente imprecisa l'analisi di pezzi dello spessore degli anelli in esame.

In alternativa alla tomografia si è quindi optato per l'analisi diretta delle sezioni degli anelli, troncando due anelli per modello per tecnica produttiva, sui sei prodotti in totale. Per avvicinarsi ad una valutazione più completa dei volumi interni agli anelli sono state analizzate sezioni di zone diverse dei gioielli. In particolare un anello della coppia dei sacrificali è stato sezionato nel piano



Figura 62. Fede 1 microfusa

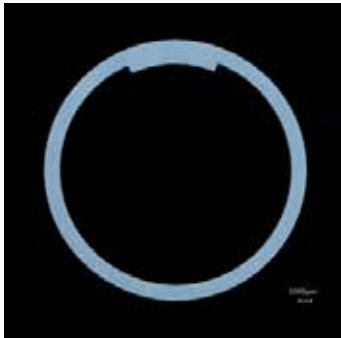


Figura 63. Fede 1 SLM™

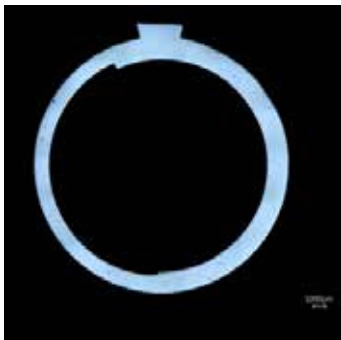


Figura 64. Fede 4 microfusa



Figura 65. Fede 4 SLM™

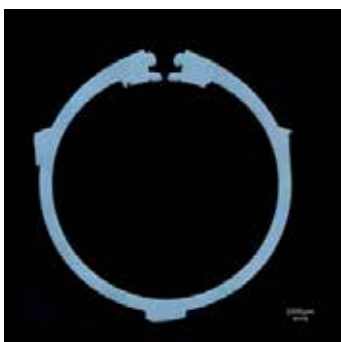


Figura 66. Solitario 4 microfuso



Figura 67. Solitario 4 SLM™



Figura 68. Solitario 5 microfuso



Figura 69. Solitario 5 SLM™

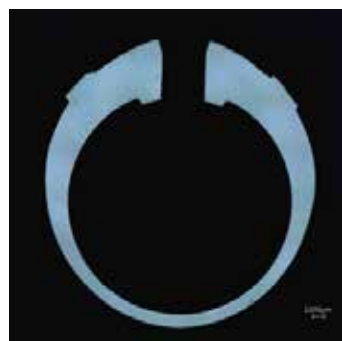


Figura 70. Solitario 7 microfuso



Figura 71. Solitario 7 SLM™



Figura 72. Solitario 8 microfuso



Figura 73. Solitario 8 SLM™



Figura 74. Solitario 15 microfuso

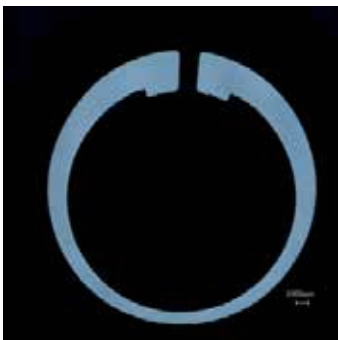


Figura 75. Solitario 15 SLM™

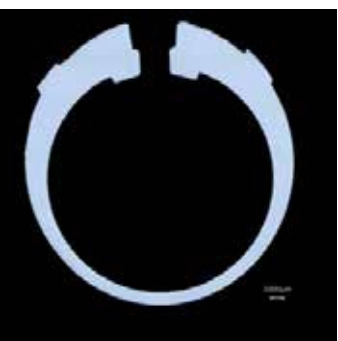


Figura 76. Solitario 16 microfuso

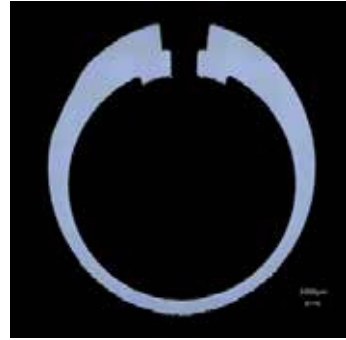


Figura 77. Solitario 16 SLM™



Figura 78. Trilogy 1 microfuso



Figura 79. Trilogy 1 SLM™



Figura 80. Trilogy 2 microfuso



Figura 81. Trilogy 2 SLM™

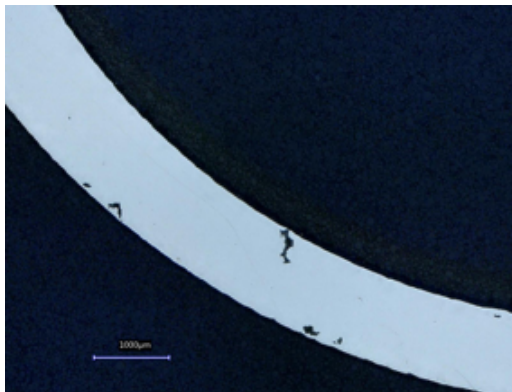


Figura 82. cavità in sezione di anello microfuso

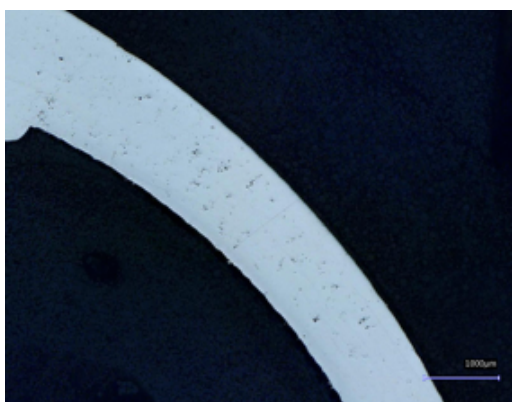


Figura 83. porosità da ritiro in sezione di anello microfuso

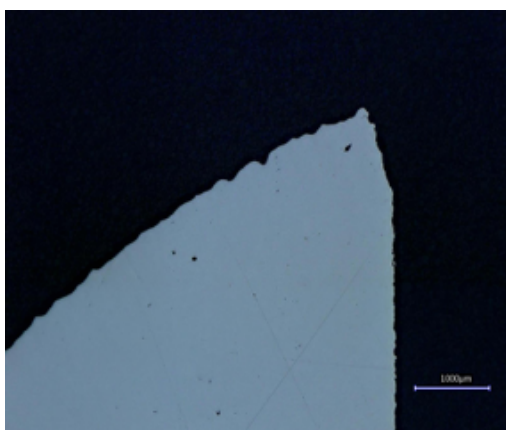


Figura 84. Porosità da gas in sezione di anello SLM™

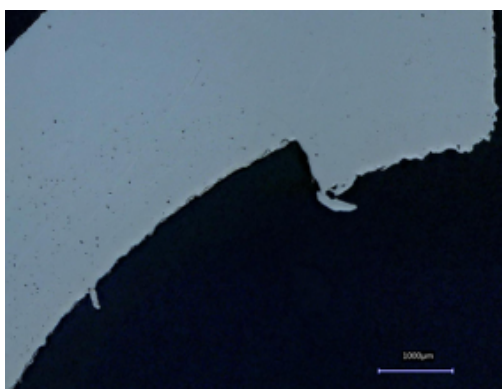


Figura 85. Porosità inter-hatches in sezione di anello SLM™

A rappresentato in Figura 60, mentre l'altro è stato sezionato nei piani B (Figura 61), perpendicolari al primo, in quattro zone distinte del gioiello. Dopo inglobatura in resina e lappatura le sezioni sono state fotografate a 50X per l'analisi digitale delle porosità tramite il software interno al microscopio Keyence utilizzato per l'acquisizione delle immagini.

Le sezioni degli anelli lungo il piano A, che presentano superfici nettamente più estese rispetto alla sezioni B, sono riportate da Figura 62 a Figura 81, mentre in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. sono riportati i valori di porosità percentuale riscontrati nei vari modelli considerando la porosità sia nei piani A che B di ogni anello, pesata per l'estensione superficiale di ogni sezione analizzata.

Tabella 5. Porosità media percentuale riscontrata per le due tecniche produttive in esame

MODELLO	POROSITA' (%)	
	MICROFUSIONE	SLM™
Fede 1	0.05	0.016
Fede 4	0.15	0.13
Solitario 4	0.17	0.03
Solitario 5	0.03	0.04
Solitario 7	0.16	0.07
Solitario 8	0.11	0.06
Solitario 15	0.32	0.04
Solitario 16	0,01	0.03
Trilogy 1	0.05	0.14
Trilogy 2	0.19	0.05
MEDIA	0.13	0.06

Il livello di porosità riscontrato nei pezzi è quantificabile come medio-basso in entrambe le tecniche produttive, con valori inferiori per l'SLM™ rispetto alla microfusione, che presenta una porosità media due volte più elevata. Per tutti e due i casi è presente una notevole variabilità tra pezzi diversi e tra zone diverse dello stesso campione, con sezioni che presentano una densità praticamente totale e altre sofferenti di una porosità più elevata.

In microfusione sono state osservate sia zone con singole porosità di volume elevato, come ad esempio le cavità in Figura 82, sia con nuvole di porosità di numero elevato e volume ridotto, come nel caso della porosità da ritiro in Figura 83.

Le porosità riscontrate in SLM™ non si presentano sotto forma di cavità, ma come singoli pori di forma sferica (Figura 84), probabili porosità da gas, o zone di piccole mancanze disposte regolarmente (Figura 85), dovute a fusione non perfetta tra tracce laser adiacenti.

Oltre alla porosità percentuale sulla totalità del pezzo è però estremamente importante in gioielleria la localizzazione dei pori: pezzi con interno denso ma sofferenti di porosità superficiale sono di più difficile finitura in gioielleria rispetto a pezzi complessivamente più porosi, ma con superficie più compatta.

Da questo punto di vista si nota come le porosità riscontrate in alcune zone dei gioielli SLM™ si presentino prevalentemente all'interno dei pezzi, e più raramente nelle zone superficiali. Questo effetto deriva direttamente dalle modalità di fusione e

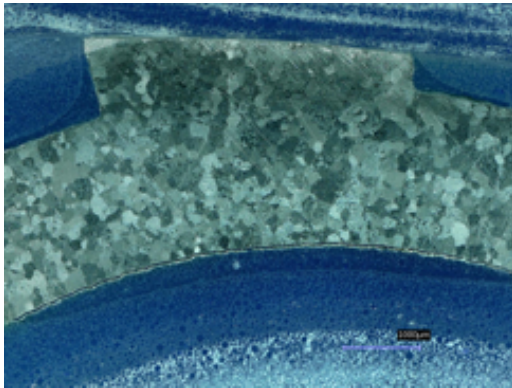


Figura 86. Fede microfusa "as cast" dopo attacco metallografico, 50x

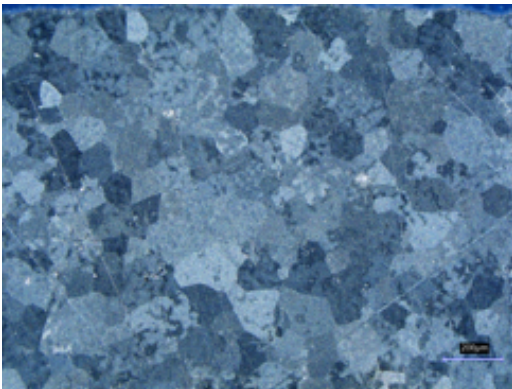


Figura 87. Fede microfusa "as cast" dopo attacco, 200x

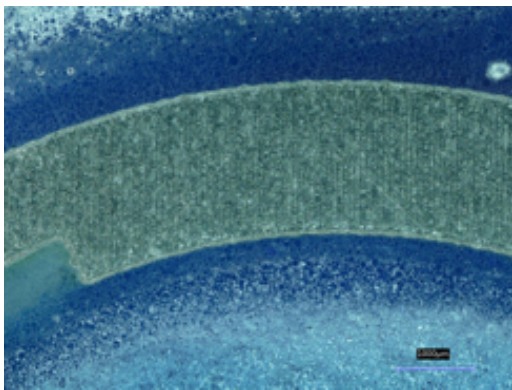


Figura 88. Fede SLM™ "as print" dopo attacco metallografico, 50x



Figura 89. Fede SLM™ "as print" dopo attacco, 200x

crescita del gioiello. All'interno di un singolo "layer" la superficie esterna è infatti fusa come un unico contorno, e i parametri laser sono ottimizzati in modo da garantire una quasi totale assenza di porosità nella singola traccia laser. L'interno viene successivamente fuso con scansioni laser parallele. Nei punti di congiunzione tra le scansioni interne oppure tra contorno ed interno tendono a concentrarsi le porosità, che si trovano quindi generalmente ad almeno 150-200 µm dalla superficie, in una zona che difficilmente verrà asportata in fase di lucidatura. In microfusione la distribuzione delle porosità è più varia: si notano cavità superficiali, visibili anche macroscopicamente sulle superfici esterne e prevalentemente dovuti a microdistacchi di refrattario, e porosità da ritiro, che paiono più concentrate all'interno dei pezzi. Infine è da considerare il caso della frattura riscontrata in una delle fedi microfuse: in questo caso la porosità, sebbene concentrata all'interno, è talmente estesa da compromettere la tenuta meccanica del pezzo.

Aspetto metallografico

Per la valutazione della dimensione dei grani cristallini negli anelli microfusi ed in quelli stampati con SLM™ sono stati eseguiti attacchi acidi su fedi modello 1 "as cast" ed "as print".

Il confronto conferma quanto già visto in passato per campioni sia in lega d'oro che di platino: la dimensione media dei grani cristallini è drasticamente superiore per i pezzi microfusi (Figura 86 e Figura 87) rispetto ai pezzi SLM™ (Figura 88 e Figura 89), per cui in realtà si riescono a distinguere i segni delle tracce di fusione ma non i singoli grani, neanche ad elevato ingrandimento.

Nel campione SLM™ è stata notata la presenza di microcricche, rese visibili dall'attacco acido (Figura 90). I test meccanici, presentati nel prossimo paragrafo, sono stati eseguiti anche per valutare l'effettivo impatto di questo difetto sulle proprietà dei pezzi SLM™.



Figura 90. Microcricche osservabili nella fede SLM(tm) in seguito ad attacco metallografico.



Figura 91. Provino per test di trazione

Caratteristiche meccaniche

Le caratteristiche meccaniche dei gioielli, come durezza, allungamento e carico ultimo a rottura, hanno una diretta ripercussione non solo sulla pura resistenza meccanica del pezzo ma anche su parametri tecnologici come la facilità di incassatura e di lucidatura.

Per questo motivo le performance meccaniche di pezzi prodotti tramite microfusione e tramite SLM™ sono state confrontate a parità di lega utilizzata. Le prove di microdurezza sono state effettuate su fedeli modello 1 sia “as print” o “as cast”, sia in seguito a ricottura (1 ora a 1150°C) che dopo indurimento (1 ora a 650°C), utilizzando un microdurometro Vickers FUTURE-TECH. I valori di carico ultimo a rottura (UTS) e allungamento (A %) sono stati invece ricavati da prove di trazione effettuate con un dinamometro INSTRON su provini realizzati appositamente, rappresentati in Figura 91. In questo caso i valori sono stati misurati sia su provini “as cast” o “as print” sia su provini sottoposti a trattamento di ricottura, per valutare possibili differenze meccaniche che possono influire sulla fase di incassatura.

Tabella 6. Microdurezze Vickers su fedeli modello 1 microfuse e stampate

	DUREZZA [HV0,5]		
	As cast / print	Ricotto	Indurito
MICROFUSIONE	199 ± 3	188 ± 3	295 ± 2
SLM™	222 ± 4	180 ± 4	265 ± 6

La durezza maggiore riscontrata per i pezzi “as print” rispetto agli “as cast” è con tutta probabilità imputabile alle dimensioni più piccole del grano cristallino nel caso SLM™ e alla presenza di maggiori tensioni interne nei pezzi stampati. Il trattamento di ricottura, che nel caso della lega utilizzata ha il duplice effetti di abbassare le tensioni interne ai campioni e di solubilizzare, permette in entrambi i casi di abbassare la durezza sotto i 190 HV, rendendo possibile l'incassatura. In seguito all'invecchiamento in entrambi i casi la durezza aumenta sensibilmente, sebbene in misura maggiore per i pezzi microfusi, per i quali la resistenza all'usura dovuta all'indossamento potrebbe quindi rivelarsi maggiore rispetto ai pezzi SLM™. La differenza osservata potrebbe essere causata dalla presenza delle micro cricche osservate nelle fedeli SLM™ in seguito ad attacco acido, che favoriscono la penetrazione dell'indentatore nel campione.

Tabella 7. Caratteristiche meccaniche

	UTS (MPa)	A %
Microfuso as cast	531	19,5
Microfuso ricotto	498	21
SLM™ as print	582	14,5
SLM™ ricotto	513	29,5

Riguardo alle prove di trazione, i provini stampati tramite SLM™ presentano nella condizione “as print” un carico a rottura maggiore rispetto ai provini “as cast”, a scapito però di una duttilità minore.

In seguito al trattamento termico di ricottura il carico a rottura si abbassa per entrambe le tipologie di campioni, rimanendo comunque più elevato nel caso SLM™. I risultati degli allungamenti a rottura evidenziano invece una inversione tra SLM™ e microfusione. Sebbene infatti in entrambi i casi la duttilità aumenti col trattamento termico, l'incremento nel caso SLM™ è sensibilmente maggiore.

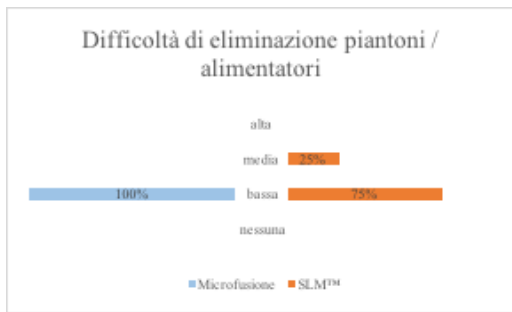


Figura 92. Valutazione della difficoltà di rimozione supporti/alimentatori

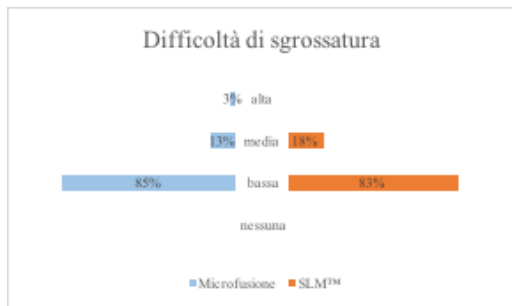


Figura 93. Valutazione difficoltà in sgrossatura

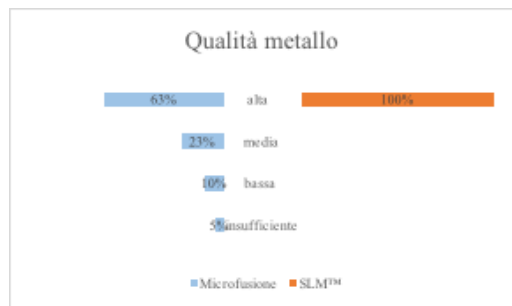


Figura 94. Valutazione della qualità superficiale dopo sgrossatura

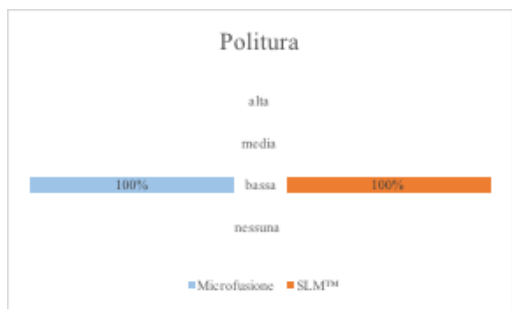


Figura 95. Valutazione difficoltà di politura

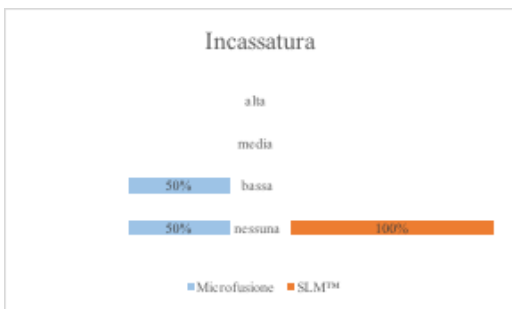


Figura 96. Valutazione difficoltà di incassatura

Dopo la ricottura i provini prodotti tramite SLM™ presentano quindi sia un carico che un allungamento a rottura più elevati, dato che indica come probabilmente le microcricche osservate in seguito ad attacco metallografico sui campioni stampati si ripercuotano sulle proprietà meccaniche meno della dimensione dei grani e dei possibili difetti interni dei provini microfusi. Performance migliori in seguito a ricottura suggeriscono un comportamento migliore dei pezzi durante la fase di incassatura.

Finitura: impressioni degli operatori

Le impressioni degli operatori del settore giocano un ruolo fondamentale nel possibile successo di una nuova tecnica produttiva. La produzione di gioielli non sfugge a questa regola: per quanto la qualità di un prodotto possa sembrare eccellente ad una analisi tecnica, se durante le fasi di lavorazione il prodotto non 'convince' gli addetti con tutta probabilità la tecnica produttiva non verrà adottata in futuro. Per questo motivo abbiamo ritenuto fondamentale raccogliere il parere degli "orefici" addetti alla finitura dei gioielli, in modo da accostare a dati più quantitativi, come i tempi e i cali dovuti alla finitura, anche valutazioni più soggettive, ma ugualmente importanti nella valutazione complessiva di una nuova via produttiva. Gli 80 anelli realizzati e non sottoposti a prove distruttive sono stati quindi sottoposti a finitura e valutati. Ognuna delle fasi di lavorazione è stata effettuata dallo stesso operatore sia per microfusione che per SLM™, in modo da mantenere lo stesso metro di giudizio per entrambe le tecniche.

La prima fase del processo di finitura è rappresentata dall'eliminazione dagli anelli dei residui degli elementi aggiuntivi necessari alla produzione ma non facenti parte del gioiello, vale a dire alimentatori in microfusione e supporti in fusione laser selettiva. Come si vede dai giudizi espressi, riassunti in Figura 87, la tecnica SLM™ da questo punto di vista paga la presenza in alcuni modelli di supporti più complessi da rimuovere, come quelli presenti nel solitario modello 4 in Figura 29 e nel trilogy modello 1 in Figura 30. Rimuovere supportazioni in zone interne del gioiello rende necessaria una destrezza maggiore da parte dell'operatore e aumenta la probabilità che il pezzo possa essere rovinato in questa fase.

Risultati sostanzialmente simili sono stati invece osservati nelle valutazioni della difficoltà di sgrossatura (Figura 90). Il giudizio infatti, generalmente dipendente sia alla rugosità che dalla compattezza delle superfici del gioiello, si rivela di bassa difficoltà nel 80% circa degli anelli prodotti sia per SLM™ che in microfusione. L'unica importante differenza è la presenza di un anello microfuso non conforme individuato già in questa fase, che ha dato una particolare difficoltà di sgrossatura prima di essere definitivamente accantonato. I risultati ottenuti con questa valutazione sono particolarmente interessanti se si considera che uno dei punti deboli della fusione laser selettiva è rappresentato dalla elevata rugosità superficiale. L'impressione riportata dagli operatori su questo punto ha rivelato che, almeno nel caso del platino, basta l'applicazione di una pressione leggermente maggiore o di una carta più grossa durante questa

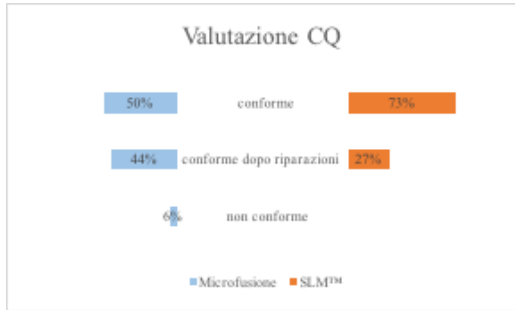


Figura 97. Valutazione del controllo qualità interno di Stilnovo s.r.l. sui gioielli prodotti per SLM™ e per microfusione

fase preliminare per riuscire ad eliminare la rugosità superficiale aggiuntiva con poco sforzo aggiuntivo rispetto ai pezzi microfusi. Questo sforzo aggiuntivo è però ampiamente compensato dalla qualità del metallo SLM™ trovato dall'orefice (Figura 94): la percentuale di superfici valutate come ottime in SLM™ dal punto di vista della compattezza è infatti prossima al totale, mentre in microfusione le valutazioni sono più varie, con solo un 60% circa di superfici considerate ottime, il 25% di qualità media, il 10% circa di qualità bassa, in cui cioè sono evidenti porosità già in questa fase e due anelli giudicati come non conformi.

Nessuna particolare differenza è stata osservata nelle fasi di pulitura (Figura 95), mentre in incassatura le valutazioni complessive si attengono in entrambi i casi a difficoltà di lavorazione bassa o nulla (Figura 96). Le proprietà meccaniche del metallo di sono quindi rilevate più che buone sia per la lega microfusa che per la lega stampata.



Figura 98. Solitari microfusi



Figura 99. Trilogy microfusi



Figura 100. Fedi microfuse



Figura 101. Solitari SLM™



Figura 102. Trilogy SLM™



Figura 103. Fedi SLM™



VALUTAZIONE ECONOMICA E FINANZIARIA

Tempi di produzione dei semilavorati

I processi produttivi sono stati organizzati rispecchiando le tempistiche e la suddivisione in fasi tipiche della reale produzione, sia per la microfusione che per la fusione laser selettiva. La produzione in microfusione è stata suddivisa su 11 alberini, elencati in Tabella 8. I cicli di cottura dei cilindri, che rappresentano la fase più lunga della produzione per microfusione, sono stati raggruppati in modo da ottenere il miglior compromesso tra tempi produttivi e recupero degli scarti. Per imitare quello che succede in una produzione reale infatti è stato deciso di riutilizzare gli scarti di fusione, unendoli a lega nuova per compensare la percentuale di materiale utilizzata per la produzione dei gioielli veri e propri. Questa procedura è normalmente utilizzata per limitare la quantità di metallo prezioso necessario, sia per il costo della materia prima in se, sia per il costo di affinazione degli scarti. In particolare per il primo gruppo di quattro alberini è stata utilizzata lega nuova, per i secondi tre e gli ultimi quattro gli scarti delle fusioni precedenti uniti a lega nuova per arrivare al peso dell'alberino da fondere.

Tabella 8. Suddivisione fusioni

N° cilindro	Pezzi fusi	Ciclo di cottura gessi
1	3 solitari 4	1
	2 solitaire 4 + 2 solitaire 5 + 1 solitaire 15	1
2	2 solitari 4 + 2 solitari 5 + 1 solitario 15	1
3	2 solitari 5 + 3 solitari 16	1
4	2 solitari 16 + 3 solitari 15	1
5	5 fedo donna+ 1 solitario 5	2
6	1 fede D+ 6 fedo U	2
7	1 solitario 5 + 2 solitari 8	2
8	2 solitari 8 + 1 solitario 7 + 3 trilogy	3
9	1 solitario 7 + 4 trilogy	3
10	2 solitari 8 + 4 solitari 7	3
11	5 trilogy + 1 solitario 16	3

In SLM™ la produzione è stata distribuita su 7 tavole di stampa (Tabella 9), realizzate in ordine decrescente di altezza degli oggetti da realizzare. Questo permette infatti di ottimizzare l'utilizzo della polvere producendo per primi gli oggetti più alti, per cui la quantità di polvere necessaria per riempire lo spazio di stampa è più elevato.

Tabella 9. Suddivisione stampe e relativo tempo di produzione

N° tavola	Pezzi stampati	Tempo di stampa (h)
1	06 solitari 4 + 06 solitari 15	12:40
2	06 trilogy 1 + 06 trilogy 2	14:00
3	06 solitari 5 + 06 solitari 8	11:30
4	06 solitari 7 + 06 solitari 16	14:10
5	03 fedì 1D + 02 fedì 1U	4:45
6	03 fedì 4D + 02 fedì 4U	4:30
7	01 fede 1U + 01 fede 4U	2:30

I tempi medi per singolo cilindro e il tempo complessivo di utilizzo dei macchinari, suddivisi per fase, sono riportati in Tabella 10 per la microfusione. La Tabella 11 presenta invece i tempi medi per tavola stampata e i tempi complessivi di utilizzo macchinari suddivisi per fase nel caso SLM™. È stato inoltre registrato quanto tempo degli operatori è stato necessario per la produzione. Un totale più alto nelle ore uomo infatti non solo aumenta i costi di produzione ma implica anche una minore possibilità di automazione del processo produttivo.

Tabella 10. Tempo macchina ed operatori medio e complessivo per la produzione degli anelli in microfusione

TEMPI PRODUTTIVI MICROFUSIONE [min]				
Fase produttiva	Tempo macchina a cilindro	Tempo	Operator time per flask	Total operator time
macchina totale	Tempo operatore a cilindro	120	11	120
	Tempo	420	2	15
operatore	33	360	2	20
totale	10	110	10	110
Disegno alimentatori	11	120	11	120
Stampa cere	38	420	2	15
Eliminazione supporti	33	360	2	20
Montaggio alberi	10	110	10	110
Preparazione cilindri	-	-	10	110
Gessatura	6	65	6	65
Cottura gessi	188	2075	-	-
Fusione	15	165	15	165
Rimozione gessi	20	220	20	220
Sabbatura	2	20	2	20
Spionatura	-	-	10	110
Ricottura di solubilizzazione	10	120	10	15
Indurimento	6	60	6	5
TOTALE (approx.)	330 (5,5 h)	3750 (62,5 h)	90 (1,5 h)	990 (16,5 h)

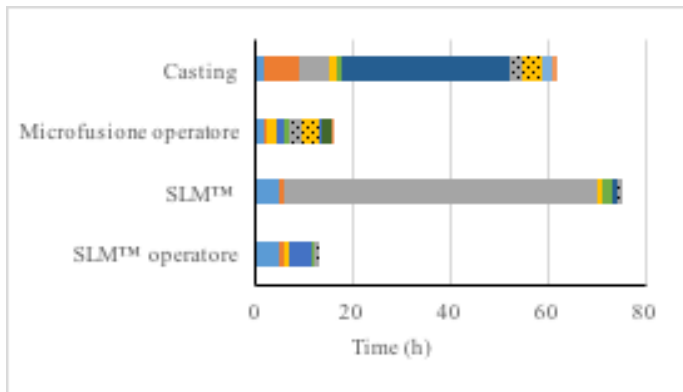


Figura 104. Tempi macchina complessivi per tecnica utilizzata e ore uomo totali

Tabella 11. Tempo macchina ed operatori medio e complessivo per la produzione degli anelli con SLM™

SLM™ PRODUCTION TIME				
Fase produttiva	Tempo macchina a tavola	Tempo	Operator time per table	Total operator time
macchina totale	Tempo operatore a tavola	290	40	290
Tempo				
operatore	10	70	10	70
totale	550	3840	-	-
Supportazione	40	290	40	290
Attrezzaggio stampante	10	70	10	70
Stampa	550	3840	-	-
Pulizia macchina	10	70	10	70
Eliminazione supporti	-	-	36	250
Ricottura di solubilizzazione	17	120	2	15
Indurimento	7	60	1	5
Pallinatura	11	75	11	75
TOTALE (approx.)	645 (10,75 h)	4530 (75,5 h)	110 (1,8 h)	780 (13 h)

Dai dati riportati è possibile notare come i tempi di utilizzo dei macchinari siano inferiori (- 20%) in microfusione rispetto alla stampa diretta di metallo. In entrambi i casi una fase produttiva ha richiesto un impiego temporale dei macchinari più lungo rispetto alle altre: in microfusione la cottura dei gessi richiede il 55% del tempo produttivo totale, mentre in SLM™ la fase di stampa richiede addirittura l'85% del tempo complessivo. Entrambe queste fasi però non richiedono l'intervento di operatori, pesando sui costi produttivi solo in termini di utilizzo dei macchinari e consumo di energia elettrica.

Guardando ai tempi uomo la situazione però si inverte: nonostante i tempi macchina complessivamente più lunghi, la tecnica SLM™ richiede meno tempo operatore rispetto alla microfusione (-20%), prestandosi quindi di più ad una eventuale automazione.

Un altro dato importante per la valutazione di una tecnica produttiva è senz'altro il tempo totale di produzione, considerato come tempo reale per la realizzazione del lotto di gioielli. Questa tempistica tiene conto delle effettive ore lavorative giornaliere (8 ore suddivise in due gruppi da 4 intervallate da una pausa di 1 ora), dei giorni lavorativi settimanali (5) e di quali processi possono proseguire durante la notte perché non richiedono supervisione da parte degli operatori. Vanno inoltre considerati i processi che possono essere portati avanti in contemporanea e i tempi di attesa, come i tempi di decapaggio in acido o di parziale asciugatura dei cilindri, che non coinvolgono macchinari o operatori ma sono comunque presenti nel processo produttivo. Le suddivisioni oraria delle fasi produttive della microfusione e dell'SLM™ sono presentate rispettivamente in Tabella 12 e Tabella 13, considerando la sequenza produttiva effettivamente utilizzata per la realizzazione degli anelli. Questo comprende la suddivisione della microfusione in 3 gruppi di cilindri, per poter utilizzare meno materiale prezioso rifondendo gli scarti, e la



realizzazione delle 3 tavole SLM™ più basse per ultime, invece che interposte alle altre risparmiando tempo, per poter utilizzare meno polvere in macchina in partenza.

Table 12 Time division of the casting production phases

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	LUN
Disegno alimentatori	█					
Stampa cere	█	█				
Eliminazione supporti		█				
Montaggio alberi		█	█	█		
Preparazione cilindri		█	█	█		
Gessatura		█	█	█		
Asciugatura		█	█	█		
Cottura gessi		█	█	█	█	
Fusione			█	█	█	
Frangigessi			█	█	█	
Decapaggio			█	█	█	
Sabbiatura			█	█	█	
Spiantonatura				█	█	
Ricottura					█	█
Indurimento						█

Table 13 Time division of the production phases in SLM™

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	LUN
Disegno supporti	█					
Attrezzaggio SLM	█	█	█	█	█	█
Stampa	█	█	█	█	█	█
Pulizia stampante		█	█	█	█	█
Eliminazione supporti		█	█	█	█	█
Pallinatura		█	█	█	█	█
Ricottura			█			█
Indurimento						█

Il tempo totale di produzione è pari a 5 giorni lavorativi per la microfusione e di 5 giorni e mezzo con SLM™, che si rivela quindi leggermente più lento. Da considerare però che le operazioni portate avanti nel sesto giorno in SLM™ non precludono l'inizio della produzione di un secondo lotto, perché possono essere portate avanti in parallelo. Questo significa che nel caso di lotti consecutivi di 60 anelli pari a quelli realizzati per questo studio la capacità produttiva, con la suddivisione tra fasi utilizzata, può essere considerata identica nei due casi.



Tempi di finitura

Il totale complessivo dei tempi di finitura è stato riportato separatamente rispetto ai tempi di produzione dei semilavorati perché consta degli stessi passaggi sia nel caso di pezzi microfusi che SLM™. La caratteristica discriminante in questa fase è quindi la facilità di rimozione dei residui di alimentazione e supportazione e la qualità dei pezzi, in termini di rugosità e compattezza delle superfici e di porosità residua. In generale infatti superfici esterne porose o particolarmente irregolari obbligano l'operatore ad una maggiore rimozione di materiale per raggiungere zone del gioiello più compatte, con conseguente aumento dei tempi di lavorazione e dei cali di finitura.

Tabella 14. Tempi (indicati in minuti) delle operazioni di finitura per gli anelli prodotti per microfusione

TEMPO FINITURA PEZZI MICROFUSI						
	Eliminazione alimentatori	Sgrossatura	Prepolitura	Incassatura	Politura	Totale
Fede 1	1	50	-	-	10	60
Fede 4	1	45	-	-	10	60
Solitario 4	1	85	5	60	10	160
Solitario 5	1	70	5	20	10	105
Solitario 7	1	45	5	30	10	90
Solitario 8	1	80	5	30	10	130
Solitario 15	1	110	5	30	10	155
Solitario 16	1	60	5	20	10	100
Trilogy 1	1	170	5	90	10	275
Trilogy 2	1	110	5	90	10	215

Table 15 Time (in minutes) of the finishing operations for SLM™ rings

TEMPO FINITURA PEZZI SLM™						
	Eliminazione alimentatori	Sgrossatura	Prepolitura	Incassatura	Politura	Totale
Fede 1	-	50	-	-	10	60
Fede 4	-	45	-	-	10	60
Solitario 4	2	90	5	45	10	150
Solitario 5	2	55	7	20	10	100
Solitario 7	2	55	7	30	10	100
Solitario 8	3	100	7	30	10	150
Solitario 15	1	75	5	30	10	120
Solitario 16	2	60	8	20	10	95
Trilogy 1	4	200	5	90	10	310
Trilogy 2	1	125	5	90	10	230

Analizzando i tempi di rimozione dei residui di alimentatori e supporti si nota che mediamente la prima si rivela una operazione più veloce da compiere, date anche la relativa semplicità delle geometrie degli anelli nelle zone alimentate da ricostruire. Il tempo medio necessario in questa fase è inoltre più omogeneo nel caso della microfusione, mentre in SLM™ la variabilità aumenta a seconda del posizionamento della supportazione, con tempi più lunghi per modelli in cui la rimozione dei residui era stata indicata come più complessa dagli operatori nella valutazione della difficoltà lavorativa. Osservando invece i tempi di sgrossatura, appare come, tranne in pochi casi, gli anelli prodotti per SLM™ richiedano tempi di lavorazione simili o addirittura



più brevi rispetto alla microfusione. Questo dato è in accordo con le impressioni sulla complessità di questa fase riportate in Figura 93, che vedono gli anelli SLM™ mediamente semplici da lavorare come i microfusi ma con qualità della superficie migliore. fasi di politura non hanno rivelato differenze sostanziali tra le tecniche neanche riguardo ai tempi di lavorazione, e lo stesso si può concludere per le incassature, con l'eccezione del solitario modello 4 che ha registrato un tempo leggermente più lungo con la microfusione.

Gli interventi di riparazione, necessari in misura maggiore sui pezzi microfusi ma comunque di breve durata, comportano un tempo complessivo leggermente più lungo sui gioielli fusi.

Cali di finitura

Il materiale asportato dagli anelli nelle fasi di finitura ha una ricaduta immediata sui costi di produzione, non potendo essere recuperato totalmente dalle affinazioni dei materiali provenienti dalle lavorazioni. Per il calcolo di tali costi è stata stimata una perdita media del 5% del metallo prezioso proveniente dalle finiture. In Tabella 16 sono presentati i valori medi dei cali per modello e per tecnica durante tutte le operazioni di finitura.

Tabella 16. Cali complessivi di finitura

CALI DI FINITURA (g)		
	MICROFUSIONE	SLM™
Solitario 4	1.36	0.92
Solitario 5	0.62	0.56
Solitario 7	0.92	1.09
Solitario 8	0.92	0.98
Solitario 15	2.18	1.75
Solitario 16	0.87	0.96
Trilogy 1	0.88	0.93
Trilogy 2	1.08	1.05
Fede 1D	0.86	1.37
Fede 1U	1.18	1.47
Fede 4D	1.00	0.93
Fede 4U	1.07	1.33

I cali complessivi sono maggiori in SLM™ o in microfusione a seconda del modello in lavorazione. Analizzando le singole fasi si nota però che è nelle fasi di eliminazione degli alimentatori che la microfusione presenta cali sempre maggiori rispetto all'SLM™, mentre nelle fasi di sgrossatura è sempre la fusione laser selettiva a perdere più materiale. Questi risultati si spiegano facilmente con la maggior quantità di residui lasciati dagli alimentatori rispetto ai supporti nel primo caso, e nelle maggiore rugosità superficiale in SLM™ nel secondo caso. L'impatto dei cali registrati in termini di costi produttivi, assumendo una perdita del 5% in fase di recupero dei pulimenti, è riassunto in Tabella 17.

Tabella 17. Costi relativi ai cali registrati in fase di finitura, assumendo una perdita del 5% nelle fasi di recupero.

COSTO CALI		
	MICROFUSIONE	SLM™
Solitario 4	1.7 €	1.2 €
Solitario 5	0.8 €	0.7 €
Solitario 7	1.2 €	1.4 €



Solitario 8	1.2 €	1.2 €
Solitario 15	2.7 €	2.2 €
Solitario 16	1.1 €	1.2 €
Trilogy 1	1.1 €	1.2 €
Trilogy 2	1.4 €	1.3 €
Fede 1D	1.1 €	1.7 €
Fede 1U	1.5 €	1.8 €
Fede 4D	1.2 €	1.2 €
Fede 4U	1.3 €	1.7 €

Costo produzione materia prima

Per una corretta valutazione del costo finale dei pezzi abbiamo considerato anche le differenze nei costi delle materie prime. Le due strade produttive infatti si differenziano per il prezzo della materia prima e per il numero di affinazioni necessarie per realizzare una stesso quantitativo di gioielli. Riguardo al costo della materia prima abbiamo stimato, valutando i prezzi di mercato, un importo per l'acquisto di materia prima 'nuova' più elevato di 0,3 €/g per la polvere necessaria al processo SLM™ rispetto alla lega per microfusione, a causa del costo di atomizzazione. La stessa differenza di costo è stata considerata tra la sgranatura e l'atomizzazione di materia prima nuova ricavata dal platino affinato. Per la valutazione dell'impatto delle affinazioni sono state per prima cosa calcolate le diverse rese dei due processi produttivi, in termini di rapporto tra pezzi prodotti e scarti di fusione. I pesi registrati e le rese produttive percentuali sono elencati in Tabella 18 per al microfusione ed in Tabella 19 per la fusione laser selettiva.

Tabella 18. Resa percentuale della produzione tramite microfusione

RESA PRODUTTIVA MICROFUSIONE			
N° cilindro	Peso complessivo (g)	Peso netto pezzi (g)	Resa percentuale
1	125.17	16.08	13%
2	158.46	30.76	19%
3	150.18	38.25	25%
4	179.82	48.22	27%
5	140.39	42.57	30%
6	150.45	59.31	39%
7	180.98	42.46	23%
8	185.35	52.84	29%
9	180.13	54.06	30%
10	190.29	63.58	33%
11	196.59	54.49	28%
TOTAL	1837.81	502.62	27%



Tabella 19. Resa percentuale della produzione tramite SLM™

RESA PRODUTTIVA SLM™			
N° tavola	Peso complessivo (g)	Peso netto pezzi (g)	Resa percentuale
1	150.06	91.5	61%
2	173.28	113.52	66%
3	138.18	84.30	61%
4	181.5	125.58	69%
5	59.7	42.49	71%
6	52.74	40.3	76%
7	24.1	18.04	75
75%	779.56	515.73	68
TOTAL	779.56	515.73	68%

La differente resa riscontrata nei due processi produttivi ha una diretta ripercussione sulle affinazioni necessarie nei due casi, con conseguente effetto sui costi di produzione. Il calcolo dei costi produttivi dovuti alle affinazioni è stato eseguito assumendo che:

- I 60 anelli prodotti per questo studio siano il lotto tipico produttivo, pari a circa 500g di gioielli grezzi. Per la realizzazione dei 60 anelli microfusi per questo studio gli scarti produttivi sono stati rifusi 2 volte, partendo da 1 Kg di lega iniziale. Consideriamo di dover affinare tutto dopo un lotto produttivo.
- Per considerare una situazione in SLM™ simile alla microfusione assumiamo che anche in questo caso si debba affinare tutto dopo aver rifuso due volte gli scarti. Per questo studio inoltre la stampante è stata inizialmente caricata con 2.8 kg di polvere, una condizione produttiva standard.
- I costi di affinazione, sia fissi che dipendenti dalla quantità di materiale, sono calcolati dalla media dei prezzi applicati da 6 diversi fornitori nel mercato italiano (Tabella 20).

Tabella 20. Costi medi di affinazione sul mercato italiano

COSTI MEDI DI AFFINAZIONE		
Prezzo €/Kg	Prezzo fisso analisi	Calo
331 €	90 €	12 ‰

Focusing on SLM™, given the initial quantity of powder in the Focalizzandosi sull'SLM™, la quantità di polvere inizialmente nella stampante per la produzione del lotto di gioielli è di 2.8 kg. Durante la realizzazione del singolo lotto non è necessario rifondere nessuno scarto, e alla fine della stampa la quantità di polvere in macchina è di circa 2 Kg, essendo stato il resto usato per la produzione dei pezzi (500g) e dei supporti (300g circa). Anche il secondo lotto può essere realizzato senza rifusioni, mentre per poter realizzare un terzo lotto produttivo è necessario rifondere gli scarti (rappresentati principalmente dai supporti) e aggiungere polvere nuova per 1000g, in modo da poter riempire la piattaforma di stampa di polvere per tutta l'altezza dei pezzi da stampare. L'utilizzo di materiale rifuso due volte è necessario solo alla produzione del quinto lotto, e sarà solo dopo il sesto lotto che tutta la polvere dovrà essere affinata. Per iniziare la produzione di un settimo lotto, 1000 g di polvere nuova dovranno essere aggiunti a quella realizzata con il materiale affinato.

I dati relativi alla polvere necessaria per la produzione tramite SLM™ e al materiale da affinare sono riportati in Tabella 21, i costi relativi in Tabella 22.



Tabella 21. Materiale da affinare producendo con SLM™

	1° lot	2° lot	3° lot	4° lot	5° lot	6° lot
Polvere da materiale affinato [g]	0	0	0	0	0	0
Polvere da scarti [g]	0	0	600	0	600	0
Polvere da acquistare [g]		0	1000	0	1000	0
Polvere totale prima della produzione [g]	2800	2000	2800	2000	2800	2000
Pezzi prodotti [g]	500	500	500	500	500	500
Scarti riutilizzabili [g]	300	300	300	300	0	0
Scarti da affinare [g]	0	0	0	0	300	300
Polvere totale dopo produzione [g]	2000	1200	2000	1200	2000	1200
N° di rifusioni degli scarti [g]	0	0	1	1	2	2
Totale pezzi prodotti				3000		
N° totale di affinzioni				1		
Totale polvere affinata [g]				1800		
Totale polvere acquistata [g]				2000 + 1000		

Tabella 21. Materiale da affinare producendo con SLM™

COSTI SLM™	
Affinazione	1 x 598 €
Analisi	1 x 90 €
Calo	1 x 540 €
Totale costi di affinazione	1228 €
Atomizzazione polvere affinata	1440 €
Atomizzazione polvere acquistata	2400 €
Totale	5065 €
€/g	1.69

Per confronto sono stati calcolati i costi di affinazione per la produzione di 3 Kg di gioielli in microfusione, tenendo conto che dopo ogni lotto da 500 g è necessario riaffinare 0,5 Kg circa di scarti (Tabella 23 e Tabella 24).



Tabella 23. Materiale da affinare producendo con microfusione

	1° lot	2° lot	3° lot	4° lot	5° lot	6° lot
Lega da materiale affinato [g]	0	500	500	500	500	500
Lega da scarti [g]	0	0	0	0	0	0
Lega da acquistare [g]		500	500	500	500	500
Lega totale prima della produzione [g]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Pezzi prodotti [g]	500	500	500	500	500	500
Scarti riutilizzabili [g]	0	0	0	0	0	0
Scarti da affinare [g]	500	500	500	500	500	500
Lega totale dopo produzione [g]	0	0	0	0	0	0
N° di rifusioni degli scarti [g]	2	2	2	2	2	2
Totale pezzi prodotti [g]			3000			
N° totale di affinzioni			6			
Totale lega affinata [g]			6 x 500			
Totale lega acquistata [g]			2500 + 500			

Tabella 24. Costi di affinazione producendo con microfusione

COSTI MICROFUSIONE	
Affinazione	6 x 165 €
Analisi	6 x 90 €
Calo	6 x 150 €
Totale costi di affinazione	2434 €
Atomizzazione polvere affinata	1500 €
Atomizzazione polvere acquistata	1500 €
Totale	5434 €
€/g	1.81

Nonostante i costi minori della materia prima, il costo per grammo di gioielli prodotti è più elevato del 7% nel caso della microfusione, principalmente a causa alle quote fisse che si hanno per ogni affinazione, che corrispondono principalmente ai costi per il saggio del titolo. Queste spese sono naturalmente da aggiungere alle ore di utilizzo macchinari, alle ore degli operatori e ai consumi energetici per avere un quadro complessivo del costo effettivo per grammo di gioielli prodotti con le due tecniche in esame.

Costi complessivi di produzione degli anelli

I dati presentati nei paragrafi precedenti, comprensivi di tempi di produzione, lotti di produzione e rese, permettono di calcolare i costi industriali finali per la produzione di ogni singolo modello. Per poter far ciò e per rendere il confronto quanto più possibile aderente alla realtà sono state fatte le seguenti assunzioni:

1. La capacità produttiva è stata calcolata per le due tecniche in base all'effettivo utilizzo di entrambi gli impianti, considerando



il lotto di anelli realizzato per questa ricerca come quantitativo settimanale prodotto.

2. Abbiamo considerato un tempo totale di ammortamento dei macchinari di cinque anni, tenendo conto del periodo di ammortamento fiscale medio vigente in Italia. Non abbiamo considerato la potenziale durata degli impianti in ore di lavoro perché molto probabilmente tutti i macchinari diventerebbero obsoleti prima del termine effettivo della loro vita.

3. I costi legati ai materiali di consumo sono stati ripartiti uniformemente tra gli oggetti realizzati, calcolando un costo medio e non quello specifico di ogni oggetto prodotto.

4. Nelle ipotesi di calcolo abbiamo intenzionalmente omesso gli spazi necessari per svolgere l'attività industriale che, per ciò che riguarda la stampa 3D, sono decisamente inferiori allo spazio occupato da un impianto di fusione a cera persa. Lo stesso vale per il capitale investito negli impianti, elettrico e idraulico, a servizio della microfusione.

5. Non abbiamo considerato i costi di smaltimento rifiuti (crogioli, gesso, acidi ecc.) derivanti dal processo di fusione a cera persa.

6. Abbiamo inoltre basato il benchmark considerando due ipotetiche aziende che fanno esclusivamente produzione di platino. Questo significa un minor sfruttamento di risorse che potrebbero essere comuni nei processi di del platino, dell'oro e dell'argento.

7. La ripartizione dei costi di utilizzo dei macchinari e degli operatori per i singoli modelli è stata effettuata in base alla percentuale in peso che ogni anello prodotto ha rispetto al totale del cilindro fuso o della tavola stampata.

8. Il costo orario degli operatori è considerato identico in SLM™ e microfusione, e simili per ogni operatore coinvolte nelle fasi produttive e di finitura.

I materiali di consumo considerati necessari alla produzione in SLM™ ed in microfusione sono elencati in Tabella 25.

Tabella 25. Materiali di consumo necessari alla produzione

RISORSA	COSTO UNITARIO	MICROFUSIONE	SLM™
Cera per stampa 3D degli anelli	€ 0,70 / pezzo	€ 41,30	
Cera per stampa 3D dei supporti	€ 0,51 / pezzo	€ 30,09	
Alcol isopropilico per eliminazione supporti	€ 0,97 / pezzo	€ 57,23	
Cera per piantoni	€ 0,02 / pezzo	€ 1,18	
Refrattario	€ 0,80 / pezzo	€ 47,20	
Acido fluoridrico	€ 0,20 / pezzo	€ 11,80	
Crogioli	€ 60,00 l'uno	€ 100,00	
Argon	€ 1,70 / m3	€ 2,81	€ 65,28
Energia elettrica	€ 0,14 / kWh	€ 32,16	€ 5,86
Totale		€ 323,76	€ 71,14



I risultati del calcolo dei costi produttivi per ogni modello sono stati suddivisi in costi di realizzazione dei semilavorati, costi di finitura (comprensivi anche delle perdite di materiale in lavorazione) e costi di affinazione, rispettivamente riportati in Tabella 26, Tabella 27 e Tabella 28.

Tabella 26. Costi di produzione del semilavorato del singolo anello suddivisi per modello

COSTO PRODUZIONE SEMILAVORATI		
MODELLO	MICROFUSIONE	SLM™
TRILOGY - 1	19.36 €	16.86 €
TRILOGY - 2	26.62 €	22.42 €
SOLITARIO - 4	20.43 €	11.60 €
SOLITARIO - 5	15.39 €	11.33 €
SOLITARIO - 7	26.81 €	17.88 €
SOLITARIO - 8	21.90 €	18.86 €
SOLITARIO - 15	28.13 €	22.46 €
SOLITARIO - 16	24.95 €	14.66 €
FEDE - 1D	20.84 €	18.05 €
FEDE - 1U	20.12 €	20.93 €
FEDE - 4D	21.96 €	17.71 €
FEDE - 4U	19.66 €	20.68 €

Tabella 27. Costi di finitura, comprensivi dei cali, per singolo anello suddivisi per modello

COSTO FINITURA		
MODELLO	MICROFUSIONE	SLM™
TRILOGY - 1	91.14 €	102.26 €
TRILOGY - 2	69.96 €	74.92 €
SOLITARIO - 4	52.52 €	49.97 €
SOLITARIO - 5	34.96 €	33.64 €
SOLITARIO - 7	37.08 €	35.57 €
SOLITARIO - 8	43.54 €	49.81 €
SOLITARIO - 15	51.12 €	40.70 €
SOLITARIO - 16	33.11 €	32.75 €
FEDE - 1D	20.52 €	19.21 €
FEDE - 1U	21.89 €	19.66 €
FEDE - 4D	19.07 €	14.44 €
FEDE - 4U	15.91 €	22.40 €

Tabella 28. Costi di affinazione per singolo anello suddivisi per modello

COSTI AFFINAZIONE E MATERIE PRIME		
MODELLO	MICROFUSIONE	SLM™
TRILOGY - 1	6.45 €	5.69 €
TRILOGY - 2	8.61 €	7.36 €
SOLITARIO - 4	4.34 €	3.66 €
SOLITARIO - 5	4.13 €	3.69 €
SOLITARIO - 7	9.35 €	7.95 €
SOLITARIO - 8	7.06 €	6.00 €
SOLITARIO - 15	7.97 €	6.87 €
SOLITARIO - 16	7.57 €	6.49 €
FEDE - 1D	6.15 €	5.53 €
FEDE - 1U	7.08 €	6.37 €
FEDE - 4D	6.02 €	5.22 €
FEDE - 4U	6.89 €	6.08 €



Tabella 29. Costi totali di produzione, comprensivi dei costi di realizzazione dei semilavorati, di finitura e di affinazione

COSTI TOTALI			
MODELLO	MICROFUSIONE	SLM™	DIFFERENZA
TRILOGY - 1	124.91 €	133.07 €	8.2 €
TRILOGY - 2	115.82 €	115.37 €	-0.4 €
SOLITARIO - 4	82.65 €	70.53 €	-12.1 €
SOLITARIO - 5	59.58 €	54.01 €	-5.6 €
SOLITARIO - 7	86.40 €	72.92 €	-11.9 €
SOLITARIO - 8	82.83 €	83.37 €	2.2 €
SOLITARIO - 15	97.06 €	79.97 €	-17.1 €
SOLITARIO - 16	74.98 €	63.31 €	-11.7 €
FEDE - 1D	55.10 €	50.80 €	-4.30 €
FEDE - 1U	57.83 €	56.19 €	-1.64 €
FEDE - 4D	54.48 €	44.93 €	-9.55 €
FEDE - 4U	50.96 €	57.97 €	7,01 €

Ciò che emerge dai costi di produzione dei semilavorati è il grande impatto del sottoutilizzo degli impianti di microfusione, da cui deriva una ammortizzazione dei costi svantaggiosa rispetto alla tecnica SLM™. Questo comporta un costo produttivo più alto per quasi tutti i modelli di anello, con l'eccezione delle taglie da uomo delle fedì.

Il sottoutilizzo degli impianti è dovuto alla pratica comune a molte aziende di internalizzare la fase di fusione del platino principalmente per ragioni strategiche più che economiche, piuttosto che affidarsi a terzi. Inoltre il segmento dei gioielli in platino è una nicchia nel settore dei gioielli in metallo prezioso, con domande produttive circa 60 volte inferiori rispetto alla domanda di oro, ulteriore elemento che contribuisce ad un utilizzo non ottimale degli impianti.

I costi complessivi di finitura presentano invece un andamento più vario, con un generale vantaggio della tecnica SLM™ tranne nei pezzi che presentano una maggiore difficoltà di rimozione e sgrassatura della zona supporti.

Per quel che riguarda i costi di affinazione tutti i modelli si rivelano vantaggiosi in SLM™, a causa del costo maggiore per grammo di gioiello in microfusione.

Guardando infine i costi complessivi (Tabella 29), la produzione SLM™ si presenta come nettamente meno cara rispetto alla microfusione per 5 modelli di solitario e per le misure da donna delle fedì, mentre il trilogy 1 e la fede 4 misura da uomo si rivelano meno care in microfusione. Infine in tre casi, il solitario modello 8, il trilogy modello 2 e la fede 1 da uomo, i costi sono praticamente identici, dato che la differenza riscontrata è facilmente annullabile da piccole variazioni in fase di produzione. Da sottolineare inoltre che non è stato preso in considerazione nel calcolo il costo aggiuntivo legato alla rifusione delle due fedì non conformi rilevate in microfusione, per cui su 60 anelli totali solo 57 dei microfusi sono realmente vendibili, contro i 60 in SLM™.



Capitale investito

Il capitale investito necessario per iniziare l'attività produttiva del semilavorato oggetto di questo confronto, al netto delle risorse necessarie per le fasi di finitura che sono identiche in microfusione ed in SLM™, si rivela leggermente più alto nel caso SLM™. Infatti la maggior quantità di macchinari necessari ad avviare l'attività di microfusione è compensata solo parzialmente dal costo elevato di una stampante di fusione laser selettiva e dalla necessità di più materiale prezioso per poter stampare i gioielli in tutta la loro altezza, stimato in 2,8 Kg di polvere contro 1 Kg di lega necessario in microfusione.

Tabella 30. Capitale investito per iniziare la produzione tramite microfusione e tramite SLM™

RISORSA	COST	
	CASTING	SLM®
Rhinoceros	1.800 €	
Magics materialise		17.000 €
Stampante cere 3d systems projet mjp	58.500 €	
Vasche + agitatore	840 €	
Iniettore ewing star	11.500 €	
Mixer st. Louis 2001	13.500 €	
Forno tibaldi fc-m	9.200 €	
Fonditrice tasui vcc	68.000 €	
Frangigessi royaljet	2.000 €	
Forno carbolite	5.000 €	5.000 €
Sabbiatrice	4.500 €	
Mdm 60n-g.m.-h2100	4.500 €	
Stampante		13.000 €
Slm50 realizer		125.000 €
Pallinatrice comco		13.000 €
Platino	26.500 €	75.000 €
CAPITALE INVESTITO	201.340 €	235.000 €

È inoltre vero che per la microfusione esiste un'offerta maggiore di macchinari che potrebbe richiedere un capitale investito inferiore, mentre per la stampa 3D, il capitale investito qui calcolato è il minimo necessario per sfruttare questa tecnica. Altra differenza importante è che nella microfusione il capitale investito è tutto di natura strumentale mentre nella stampa 3D parte del capitale è di natura finanziaria. Questo favorisce un'azienda SLM™ nel caso di liquidazione, grazie alla maggiore facilità nel vendere metallo prezioso piuttosto che macchinari usati.

Da notare però che, come precedentemente segnalato, non abbiamo considerato il maggior costo degli impianti necessari per il buon funzionamento dei macchinari per la microfusione, che comprendono un impianto elettrico più complesso, un impianto idraulico che deve servire ogni macchinario con acqua refrigerata e un impianto di aspirazione per la convogliazione e lo smaltimento dei fumi delle fasi di cottura dei cilindri.

Va inoltre aggiunto che per un impianto di fusione a cera persa servono almeno 50 m² di spazio lavorativo, che al costo di mercato in Italia valgono circa 100,000 €, mentre per la stampa 3D è potenzialmente necessario meno di 1 m².

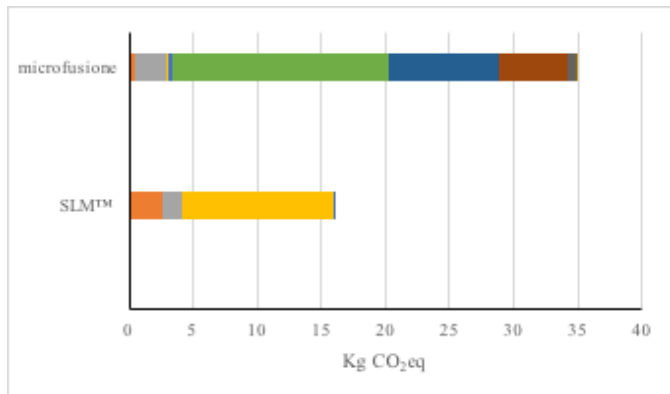


Figura 105. Kg di CO₂ equivalente prodotti con ognuna delle due tecniche

Impatto ambientale produttivo

L'impatto ambientale è un parametro che sta acquisendo sempre più importanza nella valutazione complessiva di un processo produttivo. Per questo confronto l'impatto sull'ambiente è stato quantificato per ognuna delle tecniche produttive utilizzate tramite il calcolo del Carbon Footprint (CF), che si riferisce alla quantità di gas serra (GHG) emessi durante la produzione espressi in termini di massa di CO₂ equivalente,

Il confronto dei GHG emessi è stato effettuato considerando tutte le fasi ed i materiali necessari per completare la produzione dei gioielli. Il calcolo dell'emissione causata dalla produzione e dallo smaltimento dei materiali utilizzati è stato realizzato utilizzando i dati ricavati dal database Ecolnvent 2.2, mentre i gas serra derivanti dalla produzione di energia elettrica necessaria al funzionamento dei macchinari sono stati ricavati dai dati dell'Istituto Superiore per la Protezione e la difesa Ambientale, basati sulla produzione di energia elettrica per la rete italiana (9). Non sono stati considerati ai fini del calcolo i gas serra causati dall'estrazione delle materie prime e dalla costruzione di impianti e macchinari.

Tabella 31. Kg di CO₂ equivalente prodotti in microfusione

CARBON FOOTPRINT MICROFUSIONE	
FASE PRODUTTIVA	Kg CO ₂ eq
Disegno alimentatori	0.06
Stampa delle cere	0.4
Rimozione supporti	2.5
Assemblaggio dell'alberino	0.07
Preparazione del cilindro	0.35
Cottura cilindro	16.9
Prefusione Lega	8.5
Fusione e colata	5.5
Decapaggio	0.5
Sabbiatura	0.15
TOTALE (approx)	35

Tabella 32. Kg di CO₂ equivalente prodotti in SLM™

CARBON FOOTPRINT SLM™	
FASE PRODUTTIVA	Kg CO ₂ eq
Disegno supporti	0.04
Prefusione	2.5
Atomizzazione	1.64
Stampa	11.7
Pallinatura	0.08
TOTALE (approx)	16

Dai risultati si nota come il totale dei gas serra liberati nell'ambiente durante la produzione dei 60 anelli in SLM™ sia la metà di quelli generati con la microfusione. Pesano in particolare su quest'ultima il consumo elettricopiù elevato, i gas sprigionati nelle fasi di cottura dei gessi e l'utilizzo in generale di materiali di con alto impatto ambientale.



Conclusioni

Dallo studio presentato possiamo concludere che dal punto di vista qualitativo i gioielli prodotti tramite SLM™ si rivelano migliori, sia in termini di macrodifetti superficiali, sia di porosità interna. Questo dato viene confermato dalla valutazione degli operatori e dal numero di pezzi per cui si è dovuti ricorrere alla correzione laser, oltre che dalla mancanza di non conformità, in confronto con le tre riscontrate nelle fedi microfuse. La potenziale rifusione di un pezzo non conforme è inoltre più svantaggiosa in termini di tempo e costi rispetto ad una ipotetica ristampa.

I tempi produttivi sono leggermente più lenti in SLM™, tecnica che però riesce ad essere sfruttata più efficacemente con i piccoli lotti produttivi del platino rispetto ad un impianto di microfusione. La resa produttiva maggiore in fusione laser selettiva limita inoltre il ricorso alle affinzioni, con vantaggi sui costi.

I costi complessivi sono significativamente a favore della tecnica SLM™ per molti dei modelli realizzati, con solo due casi di vantaggio evidente per la microfusione. Tutto questo a fronte di un investimento iniziale di avviamento dell'attività leggermente più alto e di un impatto ambientale dimezzato.

In conclusione dai dati raccolti, considerando aziende produttrici di solo platino e con lotti settimanali di circa 500g di gioielli grezzi, la tecnica SLM™ si rivela decisamente vantaggiosa rispetto alla microfusione, essendo più adatta alle piccole quantità produttive del settore dei gioielli in platino e presentando una qualità mediamente migliore rispetto ai pezzi omologhi prodotti per microfusione.

Possiamo quindi confermare che, come solo ipotizzato nel nostro lavoro presentato al Santa Fè Symposium 2017, la produzione di gioielli in platino rientra nelle casistiche in cui la tecnica SLM™ presenta realmente un valore aggiunto rispetto alla tradizionale microfusione.

Riferimenti

1. Damiano Zito et al., "Why Should We Direct 3D Print Jewelry? A Comparison between Two Thoughts: Today and Tomorrow," *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2017*, ed. E. Bell et al. (Albuquerque: Met-Chem Research, Inc., 2017).
2. Teresa Fryé and Joerg Fischer-Buehner, "Platinum Alloys in the 21st Century: A Comparative Study," *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2011*, ed. E. Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, Inc., 2011).
3. GFMS Platinum Group Metals Survey 2017, Thomson Reuters Eikon™.
4. G. Ainsley et al., "Platinum Investment Casting Alloys," *Platinum Metals Review* 22, no. 3 (London: Johnson Matthey & Co. Limited, July 1978): 78.
5. P. Lester et al., "The Effect of Different Investment Powders and Flask Temperatures on the Casting of Pt Alloys," *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2002*, ed. E. Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, Inc., 2002): 321-334.
6. U.E. Klotz and T. Drago, "The Role of Process Parameters in Platinum Casting," *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2010*, ed. E. Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, Inc., 2002): 287-326.
7. Damiano Zito et al., "Definition and Solidity of Gold and Platinum Jewelry Produced Using Selective Laser Melting (SLM™) Technology," *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2015*, ed. E. Bell et al.



(Albuquerque: Met-Chem Research, Inc., 2015): 455-492.
8. Istituto Superiore per la Protezione Ambientale, "Fattori di Emissione Atmosferica di CO2 e Sviluppo delle Fonti rinnovabili nel settore elettrico", (2017).