



Definizione e robustezza di gioielli in oro e platino prodotti con la tecnica della fusione selettiva laser SLM™

Autori:

Damiano Zito, Alessio Carlotto, Alessandro Loggi,
Dr. Patrizio Sbornicchia, Damiano Bruttomesso,
Stefano Rappo

Progold S.p.A
Trissino (VI), Italy

Abstract:

La tecnica SLM™ è attualmente una delle più attraenti e potenziali sostitute della microfusione a cera persa poiché permette la costruzione di oggetti di elevata complessità geometrica, leggerezza e portabilità, oltre alla possibilità di apportare vantaggi ambientali.

Nelle precedenti sperimentazioni il miglioramento della qualità degli articoli è stato ottenuto sia mediante la selezione di opportuni parametri costruttivi, sia attraverso la messa a punto di leghe con maggiore assorbimento laser.

L'obiettivo principale di questo lavoro è valutare l'accuratezza dimensionale degli articoli per gioielleria costruiti mediante la fusione selettiva laser e la possibilità di alleggerire gli oggetti mantenendo le adeguate caratteristiche di robustezza della struttura metallica utilizzando le migliori condizioni di lavoro per leghe metalliche in oro rosso ed in platino.

L'accuratezza dimensionale è stata valutata attraverso la costruzione di una piattaforma metallica e di un anello con lavorazione pavè, analizzando la coerenza geometrica rispetto al disegno originale, la rugosità del profilo metallico, la compattezza e l'omogeneità dei dettagli decorativi e la qualità in funzione dell'orientazione sulla tavola di lavoro.



Infine la deformabilità e la possibilità di ridurre la quantità di materiale prezioso sono state stimate mediante la costruzione di anelli con diversi gradi di svuotamento e con differenti strutture reticolari interne, sottoponendoli a diverse sollecitazioni meccaniche.

Introduzione:

Nei lavori precedenti abbiamo studiato la manifattura di articoli in lega preziosa attraverso l'ottimizzazione della fusione selettiva laser (SLM) delle singole unità costruttive di pezzi, dette vettori. L'obiettivo principale era quello di ottenere una qualità il più simile possibile agli oggetti realizzati con la tecnica di microfusione a cera persa per geometrie molto semplici. Nell'ambito di queste ricerche abbiamo raggiunto una qualità elevata per le leghe in oro inserendo una scansione laser secondaria e selezionando il migliore insieme di parametri laser per evitare il classico difetto di rigonfiamento della superficie dei pezzi in costruzione ed evidenziando l'effetto deleterio di alcuni elementi (Ga) che favoriscono questo inconveniente.

Inoltre abbiamo definito il ruolo dell'architettura del sistema di supporto, andandone a studiare differenti tipologie e caratteristiche, quali la densità della struttura e l'inclinazione delle pareti dei gioielli. Nell'ultimo studio abbiamo evidenziato in particolare l'azione di alcuni elementi che favoriscono l'assorbimento della radiazione laser (Ge, Pt), riducendo inoltre anche il rigonfiamento delle superfici ed altre imperfezioni quali la proiezione di particelle metalliche sul letto di costruzione e la rugosità complessiva dei pezzi.

In questo nuovo lavoro valutiamo sia la definizione geometrica ed estetica dei dettagli decorativi, sia la robustezza di alcuni articoli di elevata leggerezza e complessità di forma, realizzati mediante la tecnica di fusione laser selettiva. L'obiettivo è quello di confrontare e provare a trasferire la versatilità e l'affidabilità della tecnica tradizionale di microfusione a cera persa



per le forme complesse anche nella fusione laser con polveri metalliche, oltre a tentare di produrre degli oggetti piuttosto proibitivi con il metodo classico.

Una lastrina metallica con lavorazione pavé a struttura quadrata compatta e aggruppata nella parte inferiore è stata adoperata per l'analisi della definizione geometrica e dei dettagli decorativi su una superficie piana. Invece, un anello in parte lavorato pavé a struttura esagonale compatta con ajour nella parte interna è stato utilizzato per valutare gli stessi parametri su una superficie curva, quindi con un grado di difficoltà aggiuntiva. D'altra parte, degli anelli nuziali realizzati con in oro rosso ed in platino con diversi gradi di svuotamento, sono gli articoli adoperati per valutare il possibile grado di alleggerimento e di robustezza. L'impiego di differenti strutture reticolari all'interno delle fedie ha permesso di rinforzarle dopo il processo di svuotamento. La realizzazione di queste strutture interne è stata prodotta per mezzo di due software, Magics (Materialise) e RDesigner (Realizer).

Procedura sperimentale:

Le leghe in pasta per saldatura XBRAX sono utilizzate in oreficeria e gioielleria per produrre giunti solidi. Il prodotto è omogeneo ed è utilizzabile a freddo, applicando il giusto quantitativo di materiale nel punto da saldare, solitamente per mezzo di una siringa munita di aghi di vario calibro. Le leghe in pasta sono specifiche per l'utilizzo di saldature in forno oppure a cannello.

In questa nuova ricerca la costruzione degli articoli è stata effettuata con un apparato SLM 50 (Realizer) equipaggiato di un laser a fibra ($W_{max} = 100$ Watt) avente uno spot da $10 \mu m$ ed una tavola di costruzione circolare (70 mm), inserita in una camera ad atmosfera protetta con gas inerte (Ar). Le polveri sono state prodotte nel nostro laboratorio impiegando un atomizzatore a gas, che opera in ambiente completamente protetto con argon e pressione atmosferica, garantendo la produzione di polveri asciutte e costituite da particelle di forma prevalentemente sferica. Queste condizioni sono

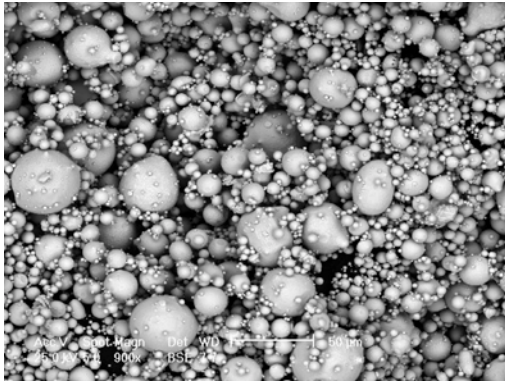


Fig. 1. Lega in polvere d'oro Au 750%

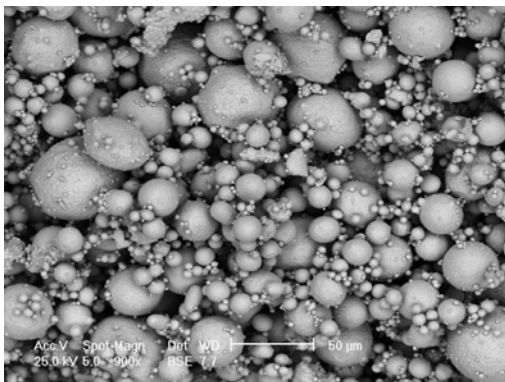


Fig. 2. Lega in polvere in platino 950%

molto importanti ai fini della scorrevolezza della polvere (flowability) sotto l'azione della spazzola di distribuzione sulla tavola di lavoro. Il controllo della scorrevolezza della polvere è stato eseguito attraverso un Hall Flowmeter Funnel (ASTM B213-03) e un Carney Flowmeter Funnel (ASTM B964), la densità apparente è stata rilevata utilizzando una tazza a volume normato (ASTM B212, B329 e B417).

Il lavoro descritto in questo articolo può rappresentare una naturale prosecuzione della precedente ricerca [1], in quanto le polveri metalliche utilizzate, da una parte contengono un elemento semiconduttore differente dal germanio e dall'altra, sono state impiegate nella costruzione analitica di articoli di gioielleria simili alla realtà del mondo orafa.

La prima lega è costituita da un oro rosso 750% (lega 1) contenente la stessa percentuale atomica di germanio, ma questa volta il semiconduttore è costituito da silicio, il quale avendo una resistività elettrica più elevata di quella del germanio dovrebbe garantire un assorbimento laser più efficace. Le due percentuali atomiche del germanio e del silicio sono state mantenute uguali per avere un termine di paragone nel comportamento della lega sotto l'azione del laser.

L'altra lega è costituita da platino 950% (lega 2) avente una composizione chimica leggermente diversa da quella presentata nella precedente pubblicazione, la quale conteneva cobalto. La lega in platino essendo di per sé costituita da una matrice pressoché pura di questo metallo che assorbe efficacemente la radiazione laser non è stata drogata con elementi semiconduttori. Ciascuna lega è stata sottoposta alla fusione selettiva con propri parametri laser ottimali dedotti dalle precedenti ricerche.

L'analisi morfologica delle polveri (figg. 1, 2) è stata controllata per mezzo della microscopia a scansione elettronica (SEM-EDS), mentre la distribuzione granulometrica è stata misurata per mezzo di un granulometro laser Malvern Hydro 2000S (figg. 3, 4). La distribuzione granulometrica

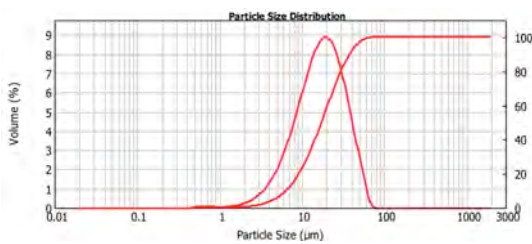


Fig. 3. Distribuzione granulometrica della lega in polvere d'oro 750%

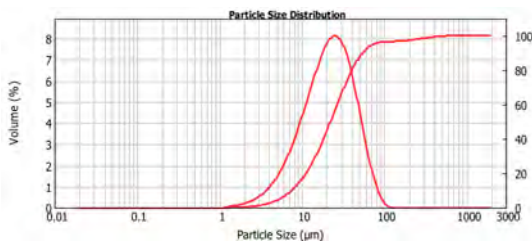


Fig. 4. Distribuzione granulometrica della lega in polvere di platino 950%



delle polveri è stata ottenuta tagliando le particelle più grandi attraverso un setaccio Giuliani a maglia quadrata da 53 micron e mantenendo le particelle più piccole poiché sebbene diminuiscano sensibilmente la scorrevolezza della polvere sotto le spazzole della piattaforma di costruzione (tab. 1), la loro presenza assicura una densità maggiore dei pezzi prodotti e quindi una minore porosità, verificato dagli studi precedenti [2, 3, 4, 5].

LEGA	Intervallo granulometrico (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)	Scorrevolezza da Hall Flowmeter (s/50 g)	Scorrevolezza da Carney Flowmeter (s/50 g)	Densità apparente (g/cm^3)
1	0-53	17.33	38.12	Non scorre	5.7	8.70 ± 0.05
2	0-53	22.29	54.85	15.2	2.2	11.5 ± 0.05

Tab. 1. Scorrevolezza, dimensioni granulometriche e densità apparente in funzione della distribuzione granulometrica

Le prove di scorrevolezza della polvere ancora una volta hanno evidenziato che la polvere in oro presenta una difficoltà maggiore nel movimento rispetto quella in platino principalmente a causa di una più elevata concentrazione di particelle fini nella distribuzione granulometrica della polvere.

Il controllo della qualità per la tecnica di fusione selettiva laser è stato stavolta effettuato utilizzando delle forme di gioielleria stilisticamente molto vicini agli ornamenti reali, cioè arricchite di volumi e dettagli artistici tipici di un manufatto orafico, senza tuttavia perdere di vista la necessità di razionalizzarne e determinarne la bontà d'esecuzione.

I modelli prescelti sono perciò dotati di alcuni dei principali elementi decorativi presenti in un manufatto di gioielleria classica, quali l'incassatura pavé con predisposizione delle grane per il blocco delle pietre e l'aggiornamento del metallo sul lato opposto. Tuttavia, l'insieme di questa dotazione artistica è resa più semplice e simmetrica in modo da permettere un'analisi dell'accuratezza di costruzione.

La potenziale capacità della fusione selettiva laser nella costruzione di un gioiello densamente incassato con pietre permetterebbe un notevole risparmio nei tempi di esecuzione della foratura e bulinatura della lega metallica, processi che tipicamente sono svolti dagli orafi incassatori. La

lega metallica dovrebbe così richiedere sono un leggero ravvivo manuale prima dell'accostamento finale delle grane attorno alle pietre. Inoltre, lo studio sul controllo di qualità è stato condotto impiegando delle polveri metalliche che in linea di principio dovrebbero garantire un assorbimento della radiazione laser ancora più elevato, con l'intenzione di realizzare dei manufatti con porosità e rugosità superficiale ancora più basse. Questa scelta è stata dettata dalla presenza di un'elevata concentrazione di dettagli decorativi che richiedono la più bassa finitura possibile per mantenere il loro livello di definizione e fedeltà dimensionale, oltre che da una naturale tendenza a ridurre la difettosità generale di un manufatto in lega preziosa. Infine, l'aumento dell'assorbimento energetico da parte delle polveri metalliche consente anche di lavorare con potenze radiative inferiori, aumentando la vita media della sorgente laser.

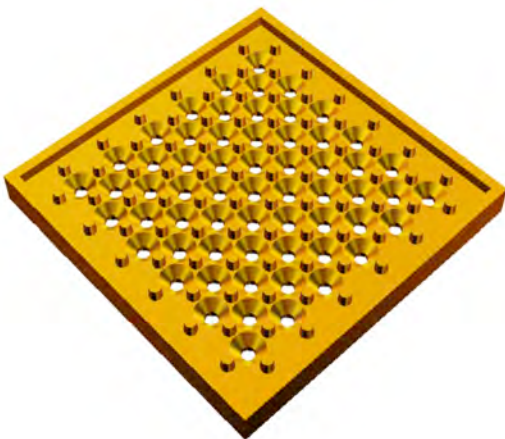


Fig.5. Visione d'insieme della tessera con incassatura pavé

La capacità costruttiva della fusione laser è stata valutata attraverso la costruzione di una tessera quadrata piana preforata di circa quindici millimetri di lato e spessore di un millimetro e mezzo (fig. 5), la quale potrebbe costituire un modulo ornamentale per la realizzazione sia di una vasta serie di manufatti, quali ad esempio pendenti, bracciali oppure orecchini solo cambiando il sistema di sospensione. La tessera è dotata di una distesa compatta di sessantuno pietre aventi un diametro di 1.50 mm e orientate lungo la diagonale, secondo la direzione a maggiore densità di incassatura.

Le pietre sono state disposte secondo una simmetria quadrata compatta per agevolare l'osservazione degli elementi decorativi durante l'analisi metallografica e la foratura dei loro centri presenta già la svasatura per ospitare le gemme. L'angolo di svasatura è stato scelto uguale all'angolo tra il piano di cintura ed il padiglione della pietra indicato dai parametri canonici del taglio Tolkowsky (40.75°) per il taglio brillante, in modo da corrispondere il più possibile ad una situazione reale di manifattura. Le grane per l'incassatura hanno una forma troncoconica con un'altezza di 0.50 mm dal bassofondo della lastrina, un diametro di base di 0.60 mm ed uno superiore di



Fig. 6. Rappresentazione della sezione metallografica per il controllo qualità

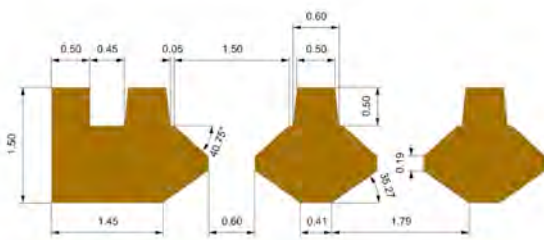


Fig. 7. Dettaglio delle quote generali per il controllo qualità

0.50 mm (fig. 6).

I fori passanti della tessera hanno un diametro di 0.60 mm, mentre il taglio del metallo nella parte inferiore, che costituisce sia l'aggiorno per le pietre, sia una parte della decorazione artistica atta ad aumentare la luminosità delle gemme, la leggerezza del pezzo ed il risparmio di metallo prezioso, presenta un angolo di incisione tale da evitare l'impiego di supporti di costruzione (45°), ridurre le asperità su questa parte del pezzo e quindi l'interferenza di forma dovuta ai residui metallici dopo il recupero dalla tavola di lavoro. Nella quotatura dell'angolo di incisione appare un angolo inferiore (35.27°) perché l'angolo rappresentato è il risultato dell'intersezione di due piani di aggiorno inclinati del valore stabilito (45°), che diventa evidente per effetto della sezione parallela ai lati della tessera (fig. 7).

La qualità della costruzione delle tessere predisposte all'incassatura delle pietre è stata valutata confrontando la sezione metallografica lungo una direzione trasversale e parallela ai lati del pezzo (fig. 6) con la medesima sezione ottenuta virtualmente dal progetto digitale.

Le tipologie di processi produttivi (P_m) prese in considerazione per il controllo della qualità sono la fusione laser selettiva della lega d'oro (P_1) e del platino (P_2) allo stato grezzo, la finitura dei pezzi risultanti nelle rispettive leghe attraverso un trattamento di sabbatura (P_3 , P_4) e infine la microfusione diretta dei medesimi articoli (P_5 , P_6) senza trattamenti di finitura.

PROCESSO	L ₁	L ₂	L _n	l ₁	l ₂	l _n	ΔL ₁ %	ΔL ₂ %	ΔL _n %
P ₁	A ₁	A ₂	A _n	a ₁	a ₂	a _n	ΔA ₁ %	ΔA ₂ %	ΔA _n %
P ₂	B ₁	B ₂	B _n	b ₁	b ₂	b _n	ΔB ₁ %	ΔB ₂ %	ΔB _n %
P ₃	C ₁	C ₂	C _n	c ₁	c ₂	c _n	ΔC ₁ %	ΔC ₂ %	ΔC _n %
P ₄	D ₁	D ₂	D _n	d ₁	d ₂	d _n	ΔD ₁ %	ΔD ₂ %	ΔD _n %
P ₅	E ₁	E ₂	E _n	e ₁	e ₂	e _n	ΔE ₁ %	ΔE ₂ %	ΔE _n %
P _m	F ₁	F ₂	F _n	f ₁	f ₂	f _n	ΔF ₁ %	ΔF ₂ %	ΔF _n %

Tab. 2. Variazioni percentuali DL_n% delle quote in funzione del processo produttivo P_m

Le variazioni dimensionali di ogni processo produttivo delle tessere (P_m) sono state determinate in base alla misura di n quote nominali L_n

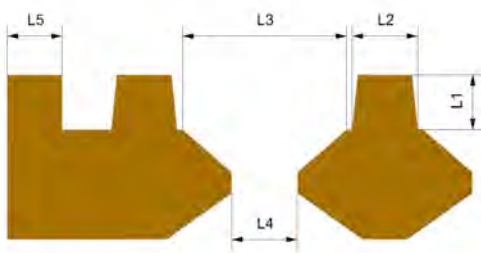


Fig. 8. Rappresentazione della sezione metallografica con le quote analizzate

caratteristiche rispetto alle medesime quote reali l_n ritenute importanti per il controllo di qualità (eqn. 1). I valori A_1, A_2, \dots, A_n rappresentano numericamente le quote nominali caratteristiche del pezzo con le rispettive variazioni ($DA_1\%, DA_2\%, \dots, DA_n\%$), mentre a_1, a_2, \dots, a_n rappresentano le corrispondenti quote reali misurate sul pezzo.

Le quote nominali caratteristiche L_n sono state scelte tra quelle più rappresentative in modo da analizzare nel modo più accurato le trasformazioni geometriche degli articoli (tab. 3), durante il processo costruttivo.

Queste quote sono state ricavate dalle sezioni metallografiche oppure dalle immagini stereografiche a seconda della maggiore affidabilità della tecnica di misura. Il valore elencato è il risultato di una media di cinque misure (fig.8).

SIMBOLO	DESCRIZIONE DELLA QUOTA
L_1	Altezza delle grane di incassatura
L_2	Diametro alla base delle grane
L_3	Diametro della cintura
L_4	Diametro del foro di aggancio
L_5	Ampiezza del bordo della tessera

Tab. 3. Elenco delle quote caratteristiche per il controllo di qualità

$$\Delta L_n \% = \frac{|L_n - l_n|}{L_n} \cdot 100 \quad (\text{eqn. 1})$$

Le variazioni percentuali di ciascuna quota $DL_n\%$ sono state convenzionalmente raggruppate in intervalli al fine di permettere il calcolo del livello di qualità complessivo degli articoli (tab. 4). Ogni intervallo corrisponde ad un punteggio specifico s_i e variabile tra uno e dieci. Alle quote con una variazione percentuale superiore al 35% del valore nominale corrisponde quindi il punteggio più basso, mentre quelle con una variazione percentuale inferiore al 2% del valore nominale corrisponde il punteggio massimo.

I punteggi s_i che scaturiscono da ciascuna



Fig. 9. Visione d'insieme dell'anello a banda semincassato pavé



Fig. 10. Rappresentazione della sezione metallografica per il controllo qualità

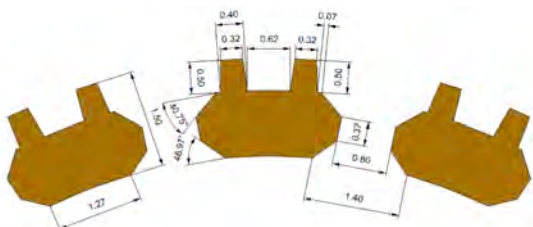


Fig. 11. Quote generali ed essenziali in rosso per il controllo qualità

variazione percentuale di quota $\Delta L_n\%$ sono sommati tra loro per dare un punteggio complessivo S_m , il quale è stato assunto convenzionalmente come un nostro indicatore quantitativo interno della stabilità geometrica globale dei pezzi (eqn. 2) per un dato processo produttivo P_m .

$$S_m = \sum_{i=1}^n S_i \quad (\text{eqn. 2})$$

$\Delta L_n\%$	PUNTEGGIO (S_i)
35 - 30	1.0
30 - 25	2.0
25 - 20	3.0
20 - 15	4.0
15 - 10	5.0
10 - 8	6.0
8 - 6	7.0
6 - 4	8.0
4 - 2	9.0
2 - 0	10.0

Tab. 4. Punteggio in funzione dell'intervallo della variazione percentuale di quota

La seconda parte del controllo dell'accuratezza dimensionale coinvolge un grado di difficoltà costruttivo ulteriore per il fatto che la decorazione a pavé non riguarda più un semplice piano, bensì la superficie curva di un anello.

L'articolo prescelto è costituito da una banda incassata a pavé per metà del suo sviluppo circolare (figg. 9, 10, 11). In modo analogo al caso più semplice della tessera pavé, anche per l'anello sono state determinate le variazioni dimensionali delle stesse quote nominali caratteristiche (L_n).

Nel caso dell'anello pavé la costruzione è stata svolta con quattro diverse orientazioni del pezzo sulla piattaforma di lavoro, al fine di valutare l'eventuale esistenza di una posizione preferenziale che fornisca una migliore qualità. Il pezzo è stato costruito con il pavé rivolto verso l'alto e le orientazioni riguardano la rotazione attorno all'asse



Fig. 12. Le quattro orientazioni dell'anello sulla tavola di lavoro

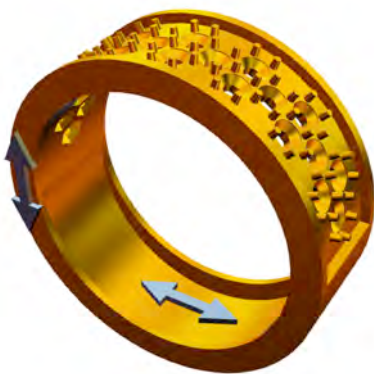


Fig. 13. Zone analitiche per la misura della rugosità nell'anello

verticale dell'anello secondo gli angoli di 0°, 45°, -45° e 90° sulla piattaforma di costruzione (fig. 12). L'influenza dell'angolo di rotazione può derivare ad esempio dal diverso angolo di passata della spazzola di distribuzione della polvere metallica rispetto alla direzione delle facce dei pezzi e dalla diversa lunghezza dei vettori durante la fusione degli strati del percorso macchina.

Nel caso dell'anello i processi produttivi considerati per il controllo di qualità sono la fusione laser selettiva secondo la migliore (R₁) e la peggiore (R₂) orientazione sulla tavola di lavoro per la lega d'oro e parimenti per la lega di platino (R₃, R₄), la microfusione diretta per la lega d'oro (R₅) e quella per la lega di platino (R₆).

La geometria dell'anello ha permesso di perfezionare il controllo di qualità inserendo anche la misura della rugosità superficiale lungo la direzione parallela e perpendicolare all'asse verticale di costruzione (fig.13), caratteristica che era difficilmente valutabile nel caso della tessera pavé dato il suo esile spessore. La misura della rugosità è stata effettuata per mezzo di un rugosimetro Taylor Hobson (Form Talysurf Intra2) dotato di un tastatore in fibra di carbonio con punta di diamante avente un raggio 2.0 µm.

L'analisi della rugosità permette ancora una volta di stilare una tabella di punteggi relativi (r_m) che sono sommati agli altri punteggi ottenuti dalle misure delle variazioni percentuali delle dimensioni (S_m), per dare un punteggio finale S_{tot} , il quale racchiude l'informazione quantitativa analitica della definizione dei pezzi (eqn. 3), ricavati attraverso un determinato processo produttivo (P_m). Il punteggio complessivo della rugosità è una media aritmetica dei punteggi lungo la direzione verticale e orizzontale di costruzione. Nel caso della tessera r_m è nullo.

$$S_{tot} = S_m + r_m \quad (\text{eqn. 3})$$



R_t (μm)	PUNTEGGIO (r_m)
200 - 300	1.0
150 - 200	2.0
100 - 150	3.0
80 - 100	4.0
60 - 80	5.0
40 - 60	6.0
20 - 40	7.0
10 - 20	8.0
2 - 10	9.0
2 - 0	10.0

Tab. 5. Punteggio in funzione della rugosità totale

Oltre a determinare una serie di scostamenti dimensionali quantitativi caratteristici, altri parametri qualitativi sono stati selezionati per stabilire il livello di accuratezza dei pezzi costruiti rispetto al disegno ideale. I parametri qualitativi prescelti riguardano essenzialmente la coerenza, la definizione e la simmetria dei dettagli decorativi dei pezzi nel loro aspetto globale e non localizzato lungo una sezione parzialmente rappresentativa dei gioielli. A ciascun parametro è stato di nuovo attribuito un punteggio numerico, che sancisce il livello di qualità in un intervallo di valori da uno a dieci. Il voto massimo è attribuito virtualmente soltanto al modello costruito per via digitale, per cui la rugosità, la porosità interna al metallo e le alterazioni dimensionali sono nulle.

Il livello di qualità complessivo $Q(P_m)$ per ciascun processo produttivo è stato convenzionalmente calcolato attraverso il prodotto del punteggio S_{tot} relativo agli scostamenti analitici quantitativi e dell'indice qualitativo q_m di aberrazione estetica degli oggetti (eqn.4).

$$Q(P_m) = S_{tot} \cdot q_m \quad (\text{eqn. 4})$$

L'indice qualitativo di aberrazione estetica q_m è dato dal prodotto dei singoli punteggi A_1, A_2, \dots, A_n assegnati a ciascun parametro qualitativo V_i in funzione del processo produttivo P_m per la costruzione degli oggetti (tab. 6). La scelta della produttoria anziché della sommatoria risiede nella maggiore differenza di valori messa evidenza dalla prima al variare dei punteggi assegnati a ciascun



parametro qualitativo e permettere una selezione più severa degli articoli che possono superare il controllo di qualità ed essere ammessi al processo di finitura. L'esigenza di avere una maggiore differenza nei gli indici di aberrazione estetica (q_m) nasce dal fatto che essi scaturiscono da una valutazione soggettiva, con la quale è difficile definire delle sottili differenze tra gli oggetti, diversamente dall'indice analitico (S_{tot}), quindi le situazioni di pareggio dei punteggi potrebbero essere più frequenti, impedendo utili distinzioni.

PROCESSO	V_1	V_2	V_3	V_4	V_n	INDICE DI ABERRAZIONE (q_m)
P_1	A_1	A_2	A_3	A_4	A_n	$q_1 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot \dots \cdot A_n$
P_2	B_1	B_2	B_3	B_4	B_n	$q_2 = B_1 \cdot B_2 \cdot B_3 \cdot \dots \cdot B_n$
P_3	C_1	C_2	C_3	C_4	C_n	$q_3 = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \dots \cdot C_n$
P_4	D_1	D_2	D_3	D_4	D_n	$q_4 = D_1 \cdot D_2 \cdot D_3 \cdot \dots \cdot D_n$
P_m	E_1	E_2	E_3	E_4	E_n	$q_5 = E_1 \cdot E_2 \cdot E_3 \cdot \dots \cdot E_n$

Tab. 6. Indice di aberrazione estetica q_m in funzione delle valutazioni qualitative V_i

Le categorie dei parametri qualitativi V_i riguardano essenzialmente la simmetria delle grane di incassatura attorno al foro delle pietre e la definizione generale della loro costruzione sull'intero pavé, l'aspetto complessivo della svasatura dei fori e della coerenza del taglio di aggiornamento delle pietre, la consistenza del bordo metallico che delimita il pavé (tab. 7). L'adozione di una serie di parametri qualitativi in aggiunta a quelli quantitativi, sebbene di natura relativamente soggettiva, risulta comunque necessaria per una valutazione più completa nel computo generale della qualità di costruzione degli articoli, rispetto al giudizio che potrebbe scaturire da una serie di analisi lungo la sezione metallografica, senza dimenticare che il giudizio visivo rappresenta comunque un passaggio decisivo e spesso insindacabile nel processo di controllo di qualità aziendale e nell'approvazione dei pezzi destinati alla vendita.



PARAMETRO QUALITATIVO	DESCRIZIONE
V ₁	Simmetria delle grane
V ₂	Definizione generale delle grane
V ₃	Aspetto complessivo della svasatura
V ₄	Coerenza dell'aggiorno
V ₅	Consistenza del bordo metallico

Tab. 7. Categorie e descrizione degli indici qualitativi

La classifica dei punteggi dell'indice complessivo di qualità $Q(P_m)$ può essere più comodamente visualizzata attraverso una scala descrittiva, che rappresenta la bontà complessiva degli articoli prodotti. Alle estremità di questa scala descrittiva sono poste la categoria dei pezzi praticamente perfetti e la categoria dei pezzi di scarto, cioè decisamente inaccettabili per il superamento del controllo di qualità interno (tab. 8).

$Q(P_m)$	CATEGORIA
6000000-4000000	Eccellente
4000000-2000000	Ottimo
2000000-1000000	Buono
1000000-500000	Discreto
500000-0	Inaccettabile

Tab. 8. Scala descrittiva in funzione dell'indice complessivo di qualità $Q(P_m)$

L'analisi comparativa tra la qualità realizzata attraverso la fusione laser selettiva e la microfusione a cera persa diretta è stata effettuata mediante l'impiego medesimo delle tessere e degli anelli pavè costruiti in una resina dotata di un comportamento simile alla cera tradizionale iniettata negli stampi in gomma. Questo materiale è stato preferito alle comuni resine acriliche di prototipazione rapida poiché possiede una fusione distinta e lascia una trascurabile quantità di residui nello stampo refrattario, evitando la formazione di

ingenti quantità di difetti che impedirebbero un confronto con le cere tradizionali.

Gli articoli per la microfusione a cera persa sono stati realizzati con una prototipatrice 3D System CPX 3500 plus a getto di materiale, che in questo caso è costituita dalla resina VisiJet M3 Hi-Cast. Il percorso macchina è stato scelto in modo da corrispondere alle condizioni migliori di prototipazione che il fornitore esterno tipicamente impiega nella sua produzione.

Nel caso della lega d'oro non è stata utilizzata la stessa lega della polvere per la fusione laser selettiva poiché l'elevato contenuto in silicio avrebbe sicuramente compromesso l'integrità dei pezzi perciò la lega designata è stata quella che presenta il più alto livello qualitativo nella nostra produzione, cioè la GENIA172 (752‰). L'alligazione degli elementi è stata effettuata attraverso una fusione aperta preventiva di omogeneizzazione della prelega con l'oro puro in atmosfera protetta di argon (5 NL/min) a 1100°C, seguita dalla microfusione vera e propria in macchina di vuoto pressofusione Indutherm VC480 V alla temperatura di 1020°C

Gli alberi in oro rosso sono stati costruiti con due livelli, ciascun livello contiene cinque articoli e nel caso dei pezzi pavé le lastre dotate di un numero maggiore di pietre sono state messe in cima per favorire il riempimento dei canali (fig.14).



Fig. 14. Rendering dell'albero con gli anelli e tessere pavé

Nel caso della lega in platino il materiale usato per la microfusione è identico a quello adoperato per la fusione laser selettiva. Oltre agli articoli pavé e ai provini di trazione alcune fedi nuziali classiche sono state aggiunte nella produzione per effettuare delle successive prove comparative di resistenza meccanica. Questa microfusione è stata effettuata esternamente dallo stesso fornitore delle cere il quale ha impiegato una lega preventivamente omogeneizzata nella nostra azienda. Il refrattario utilizzato è PRO-HT PLATINUM, nel quale è stato colata la lega alla temperatura di 1770 °C all'interno di una macchina centrifuga Yasui VCC. Le cere per la microfusione diretta e le fusioni in platino sono state condotte presso il fornitore

Stilnovo S.r.l. di Valenza.

La qualità degli articoli prodotti con fusione laser selettiva è stata anche valutata a livello di prestazioni meccaniche, indossabilità e di impatto economico, valutando sia l'opportunità di aumentare la duttilità degli articoli che tipicamente sono più fragili dei pezzi microfusi, sia di ridurre il più possibile il peso degli ornati mantenendone il volume, le proprietà estetiche ed artistiche, ma al contempo cercando di mantenerne la resistenza meccanica e la stabilità di forma.

Le caratteristiche meccaniche dei pezzi costruiti attraverso la fusione laser selettiva presentano tipicamente una maggiore durezza e una minore deformabilità degli stessi articoli ottenuti con la microfusione poiché durante il processo costruttivo esistono le condizioni di indurimento della lega e la possibilità di creare dei microscopici difetti strutturali che diminuiscono la resistenza alla rottura e la deformabilità a freddo del materiale. Queste proprietà possono eventualmente essere modificate in base alle esigenze di produzione attraverso dei trattamenti termici di ricottura che sono stati valutati nel corso del presente lavoro.

Le caratteristiche meccaniche sono state determinate mediante delle prove di trazione utilizzando un dinamometro universale INSTRON con cella di carico di 2kN. I provini di trazione hanno la classica forma di osso di cane con altezza di 25.90 mm, tratto utile di 15.77 mm e volume 157.73 mm³. Questa determinata geometria è stata scelta dopo una serie di test su campioni caratterizzati da una differente geometria (fig. 15).

I provini di trazione sono stati realizzati sia attraverso fusione selettiva laser sia attraverso microfusione diretta per valutare le differenze nel comportamento meccanico.

La possibilità di ridurre il peso dei gioielli, per aumentare la loro indossabilità mantenendone il volume e la valenza estetica, è stata studiata sottoponendo una classica fede nuziale a diversi gradi di svuotamento. Questo processo è reso possibile grazie alla peculiare modalità di costruzione dei pezzi della fusione laser selettiva, altrimenti non realizzabile con la microfusione a cera persa (fig. 16). La fede nuziale considerata ha

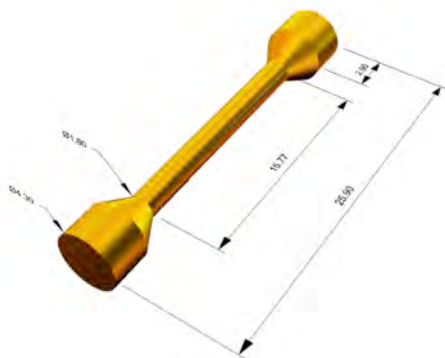


Fig. 15. Provino di trazione a forma di osso di cane con quote



Fig. 16. Fede nuziale intera e sezioni svuotamento con quote

un diametro interno di 16.00 mm ed uno esterno di 21.00 mm. La larghezza dell'anello è di 5.00 mm e la sua sezione semicircolare ha un diametro di 2.50 mm.

Lo svuotamento di un oggetto massiccio quale può essere una fede nuziale comporta al contempo una riduzione della sua resistenza alla deformazione, perciò nel presente lavoro è anche introdotta e valutata la possibilità di rinforzare il pezzo mediante l'inserimento di varie strutture di rinforzo nella cavità prodotta al suo interno.

Alcune tipologie di reticoli metallici sono stati introdotti all'interno delle varie cavità in modo di aumentare la resistenza meccanica, modulare l'indossabilità e il peso dell'anello (tab. 9). La prima tipologia reticolo è costituita da una impalcatura tridimensionale a struttura quadrata (M_x) realizzata con il software Materialise Magics 18.02, mentre la seconda tipologia ha una struttura ottaedrica (R_x) creata con il software Realizer RDesigner 0.6. Le tipologie di reticolo sono state provate con due livelli di densità, cioè una con trama più fine (R_1 , M_1) avente una maglia da 0.5mm, e l'altra con trama più grossolana (R_2 , M_2) avente una maglia da 1.0mm (figg. 17, 18).

Il primo livello di svuotamento senza reticolo interno produce un anello cavo con una parete di spessore uniforme pari a 0.75 mm, la cui massa teorica è circa del 25.7%p in meno rispetto all'articolo massiccio. Il secondo ed il terzo grado di svuotamento producono un alleggerimento teorico molto più consistente, vale a dire rispettivamente del 45.4%p e dello 69.8 %p.



Fig. 17. Struttura interna a maglia quadrata M_2 realizzata con Magics (Materialise)

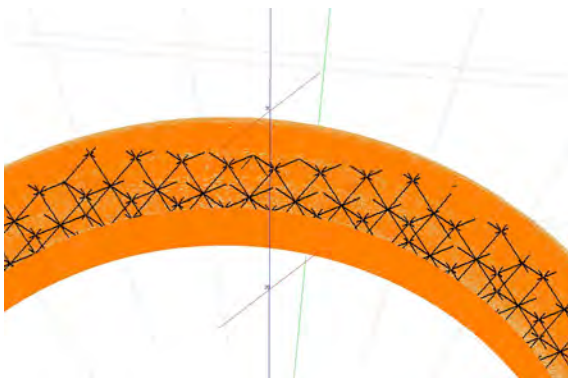


Fig. 18. Struttura interna ottaedrica R_2 realizzata con RDesigner (Realizer)



ID	Spessore parete (mm)	Tipologia di reticolo
1	2.5	pieno
2	0.75	vuoto
3		R ₁
4		R ₂
5		M ₁
6		M ₂
7		vuoto
8	0.5	R ₁
9		R ₂
10		M ₁
11		M ₂
12	0.25	vuoto
13		R ₁
14		R ₂
15		M ₁
16		M ₂

Tab. 9. Gradi di svuotamento e tipologia di reticolo per la fede nuziale

Gli anelli nuziali massici realizzati in platino 950‰ sia mediante la fusione laser selettiva, sia attraverso la microfusione diretta sono stati sottoposti a una prova di deformazione plastica, per stabilire l'influenza che il processo produttivo esercita sulla resistenza meccanica e la deformabilità del materiale. La prova è stata effettuata per mezzo di un dispositivo manuale per il ridimensionamento degli anelli seguendo l'incremento del loro diametro interno.

Risultati e Discussione:

Le analisi al microscopio ottico ed elettronico hanno messo in luce degli aspetti piuttosto rilevanti nel confronto tra gli articoli prodotti con la fusione laser selettiva e quelli realizzati con la microfusione diretta a cera persa. La superficie dei pezzi prodotti attraverso la fusione selettiva laser mostra nel complesso una lucentezza significativamente superiore, soprattutto nel caso dell'oro. Questo fenomeno è ascrivibile alla minore rugosità dei pezzi costruiti mediante fusione selettiva laser, tuttavia la stabilità della geometria sembra essere più forte nel caso dei pezzi ottenuti con la microfusione diretta. Un esempio di questo aspetto è osservabile lungo il bordo del pavè planare (figg.

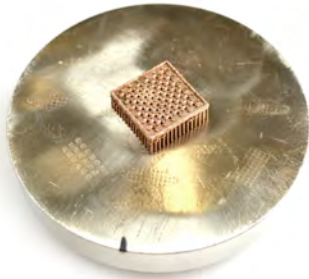


Fig. 19. Pavè planare in oro rosso 750‰ drogata con silicio sulla piattaforma di lavoro

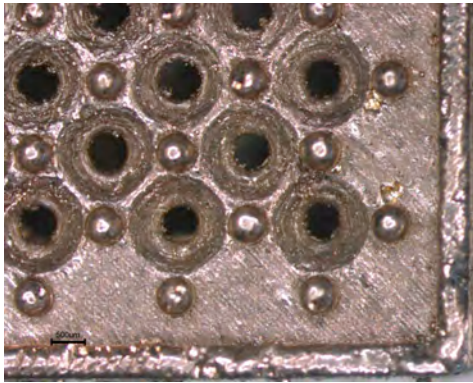


Fig. 20. Pavè planare in oro rosso 750‰ drogata con silicio allo stereoscopio (20X)

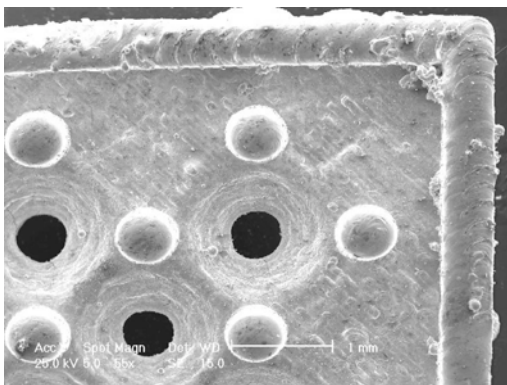


Fig. 21. Micrografia elettronica del pavè planare in oro rosso 750‰ drogata con silicio

20, 24, 28, 31). Inoltre, altre differenze importanti sono state osservate tra gli articoli in oro (fig. 19) e quelli in platino (fig. 23), ad esempio la rugosità superficiale molto più accentuata per quest'ultimo metallo (figg. 24, 25, 26) e l'arrotondamento degli spigoli più forte nel caso delle leghe d'oro (figg. 20, 21, 22).

La vista superiore dei pavè nelle stereografie ottiche (fig. 33) ha permesso di determinare il diametro alla cintura (L_3) e del foro di aggancio (L_4) delle pietre, nonché il diametro alla base delle grane di incassatura (L_2), mentre la vista in sezione trasversale dei pavè osservata al microscopio metallografico (fig. 34) ha consentito di determinare l'altezza delle grane di incassatura (L_1) e la larghezza del bordo metallico (L_5). Le misure di variazione dimensionale delle quote caratteristiche sono comprese in genere all'interno di un intervallo tra circa lo 0.0% ed il 35.2% rispetto alle quote nominali (tabb. 10, 11). Nel caso dei pavè planari, la lega in oro rosso drogato al silicio mostra una maggiore fedeltà dimensionale rispetto al progetto, quindi presenta un punteggio dell'indice quantitativo delle variazioni dimensionali S_{tot} più alto dei pavè planari in platino. Nel caso degli anelli pavè, la situazione è analoga. In generale, le leghe prodotte in microfusione presentano un punteggio S_{tot} più basso nel caso dei pavè planari, mentre nel caso degli anelli, solo la lega in platino risulta migliore rispetto agli articoli prodotti con la fusione laser selettiva.

PROCESSO	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	$\Delta L_1\%$	$\Delta L_2\%$	$\Delta L_3\%$	$\Delta L_4\%$	$\Delta L_5\%$	S
SLM _{oro}	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.51	0.59	1.42	0.61	0.46	2.80	1.33	5.33	1.33	7.20	44.0
SLM _{pi}	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.45	0.58	1.40	0.57	0.56	10.00	3.67	6.93	5.33	12.40	35.0
SLM _{oro} + SB	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.50	0.46	1.33	0.54	0.50	0.40	23.67	11.60	10.00	0.00	34.0
SLM _{pi} + SB	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.32	0.45	1.33	0.54	0.56	35.20	25.67	11.60	10.00	12.80	19.0
MD _{oro}	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.47	0.58	1.42	0.54	0.48	6.00	3.33	5.47	9.67	4.00	40.0
MD _{pi}	0.50	0.60	1.50	0.60	0.50	0.46	0.53	1.30	0.54	0.52	8.40	11.00	13.47	9.33	3.20	31.0

Tab. 10. Variazioni delle quote in funzione processo produttivo (SLM, MD, SLM + SB) per il pavè planare

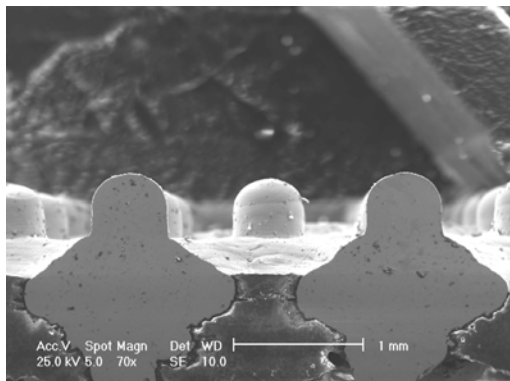


Fig. 22. Micrografia elettronica trasversale del pavé planare in oro rosso 750% drogata con silicio

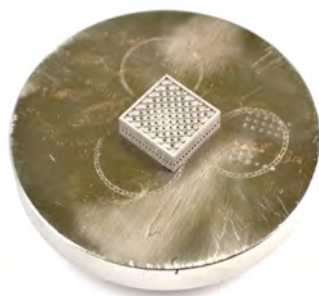


Fig. 23. Pavé planare prodotto da fusione laser selettiva in platino 950%

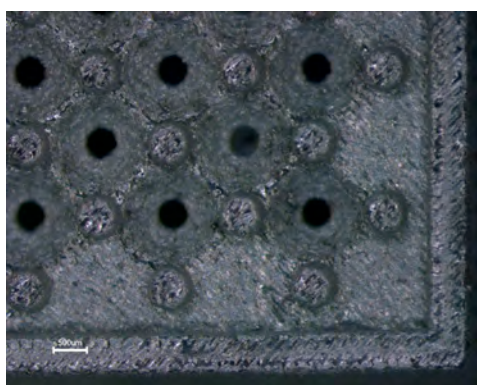


Fig. 24. Pavé planare prodotto in platino 950% allo stereoscopio (20X)

PROCESSO	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	L ₆	L ₇	L ₈	L ₉	L ₁₀	L ₁₁	ΔL ₁ %	ΔL ₂ %	ΔL ₃ %	ΔL ₄ %	ΔL ₅ %	S ₁
SLM _{in} 90°	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.47	0.45	1.46	0.58	0.52	6.00	12.00	2.67	27.25	3.20	33.0	
SLM _{in} 0°	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.48	0.49	1.46	0.61	0.48	3.20	23.50	2.67	24.25	4.80	32.0	
SLM _{in} 0°	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.46	0.45	1.41	0.55	0.60	8.80	13.50	5.87	30.75	19.20	24.0	
SLM _{in} 90°	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.47	0.52	1.43	0.57	0.60	5.20	30.00	4.80	29.00	19.20	24.0	
MD _{in}	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.47	0.37	1.33	0.66	0.49	6.80	8.00	11.60	18.00	2.40	32.0	
MD _{in}	0.50	0.40	1.50	0.80	0.50	0.45	0.37	1.41	0.60	0.53	9.60	8.00	6.00	25.00	5.60	32.0	

Tab. 11. Variazioni delle quote in funzione processo produttivo (SLM, MD) per l'anello pavé

Nel caso degli anelli pavé le misure di rugosità per le leghe d'oro e di platino hanno indicato che in entrambe le leghe i valori lungo la superficie verticale (fig.27) sono distintamente inferiori ai valori lungo la superficie orizzontale (tabb.12, 13).

D'altra parte, la lega d'oro presenta valori di rugosità che sono generalmente più bassi di circa 13 µm per la direzione verticale e di circa 23 µm lungo quella orizzontale, rispetto ai valori medi misurati sugli anelli in platino. Questo fenomeno è confermato anche dalle micrografie elettroniche, le quali evidenziano una superficie degli articoli in platino più rugosa per effetto di una significativa adesione di pulviscolo metallico (figg. 25, 26) durante la solidificazione dei vettori.

Angolo (°)	R _t verticale (µm)	R _t orizzontale (µm)	r _m
0	36,28	60,27	6.0
45	43,64	56,84	6.0
-45	37,96	53,51	6.5
90	26,14	53,19	6.5

Tab. 12. Rugosità per l'anello in oro in funzione dell'orientazione e relativo punteggio medio

Angolo (°)	R _t verticale (µm)	R _t orizzontale (µm)	r _m
0	41.44	70.53	5.5
45	55.60	85.84	5.0
-45	54.13	76.52	5.5
90	46.08	81.41	5.0

Tab. 13. Rugosità per l'anello in platino in funzione dell'orientazione e relativo punteggio medio

Gli indici di aberrazione estetica q_m, che rappresentano qualitativamente la bontà complessiva della geometria del pezzo e dei suoi dettagli decorativi deducibile dall'osservazione

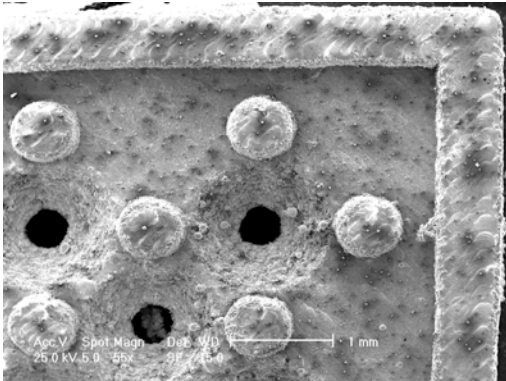


Fig. 25. Micrografia elettronica del pavè planare prodotto in platino 950%

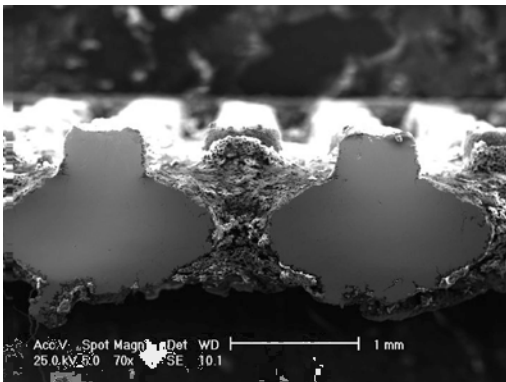


Fig. 26. Micrografia elettronica trasversale del pavè planare prodotto in platino 950%



Fig. 27. Alberino in oro rosso 750% da microfusione diretta

diretta dei pezzi semilavorati, hanno in primo luogo evidenziato un punteggio significativamente più alto per i pavè planari realizzati con la tecnica di fusione laser selettiva rispetto al punteggio dei medesimi articoli realizzati mediante la microfusione diretta (MD) a cera persa (tab. 14). Il vantaggio della fusione selettiva laser sulla microfusione sembra essere parimenti condiviso tra le due tipologie di leghe, tuttavia il livello qualitativo di definizione all'interno delle microfusioni è maggiore nel caso dell'oro rosso. Inoltre, nel caso dell'oro rosso questo indice tende ad aumentare in modo sensibile dopo il trattamento di sabbatura (SB), soprattutto a causa di un miglioramento nella qualità dei fori di svasatura, dell'aggiorno e del bordo dei pavè planari. La sabbatura sul platino sembra influenzare poco l'indice di aberrazione estetica.

Nel caso degli anelli pavè la situazione è molto diversa, poiché innanzitutto gli anelli migliori hanno un punteggio invertito rispetto ai pavè planari, vale a dire che l'anello in oro rosso drogato al silicio ha un punteggio nettamente più basso dell'anello in platino (tab. 15). Questo fenomeno può essere attribuito al diverso assorbimento della radiazione laser da parte della lega in platino, che permette di avere una maggiore accuratezza nella definizione di superficie curve e sottosquadri. Tuttavia, l'aspetto qualitativo degli articoli può peggiorare in modo significativo, poiché una certa influenza dell'indice di aberrazione estetica (q_m) in funzione dell'orientazione dei pezzi sulla tavola di costruzione è stata osservata e può variare di qualche migliaio di punti. Gli anelli in oro ottenuti in microfusione sono nettamente migliori dal punto di vista qualitativo rispetto a quelli costruiti mediante fusione laser selettiva, mentre quelli in platino microfuso sembrano evidenziare un livello di aberrazione estetica simile a quello degli anelli in platino realizzati con la fusione laser.

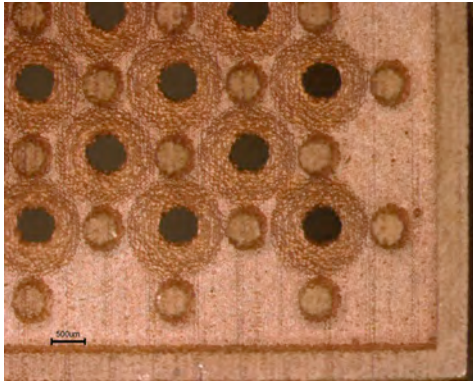


Fig. 28. Pavè planare in oro rosso 750‰ da microfusione diretta a cera persa (20X)

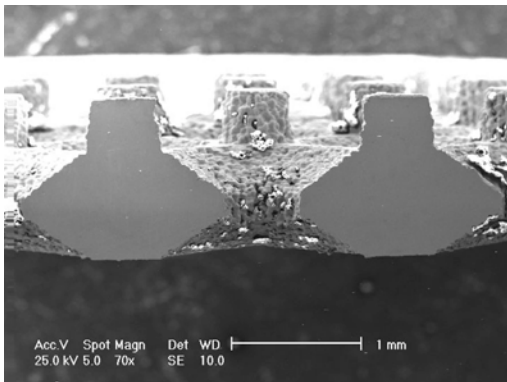


Fig. 29. Micrografia elettronica del pavè planare in oro rosso 750‰ da microfusione diretta



Fig. 30. Alberino in platino 950 ‰ da microfusione diretta

PROCESSO	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	INDICE DI ABERRAZIONE (q _m)
SLM _{Au}	9.5	8.0	8.5	7.0	7.5	33915
SLM _{Pt}	9.5	7.0	8.5	7.0	7.5	29676
SLM _{Au} + SB	9.5	8.0	9.0	8.5	8.0	46512
SLM _{Pt} + SB	9.5	5.5	9.0	8.0	8.0	30096
MD _{Au}	9.0	7.5	7.0	7.0	7.5	24806
MD _{Pt}	9.5	7.0	6.5	6.5	7.0	19667

Tab. 14. Indice di aberrazione estetica q_i in funzione delle valutazioni qualitative V_i dei pavè planari

PROCESSO	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	INDICE DI ABERRAZIONE (q _m)
SLM _{Au} (90°)	9.0	8.0	8.0	5.0	7.0	20160
SLM _{Au} (0°)	8.0	8.0	7.0	5.0	7.0	15680
SLM _{Pt} (0°)	9.0	7.0	8.0	6.0	9.0	27216
SLM _{Pt} (90°)	8.5	7.0	7.0	6.0	9.0	22491
MD _{Au}	9.0	7.0	8.5	7.0	8.5	31862
MD _{Pt}	9.0	7.0	7.0	7.5	8.5	28113

Tab. 15. Indice di aberrazione estetica q_i in funzione delle valutazioni qualitative V_i degli anelli pavè

La somma dei punteggi ricavati dalle variazioni percentuali delle quote (S_i) e dalla rugosità (r_m) costituisce il punteggio analitico quantitativo totale dei pezzi (S_{tot}), che moltiplicato per l'indice di aberrazione estetica (q_m), fornisce l'indice complessivo di qualità degli articoli Q(P_m). Nel caso dei pavè planari, l'indice complessivo di qualità dei pezzi in oro rosso è molto più elevato di quello ottenuto per il platino, sia perché il punteggio delle variazioni analitiche delle quote è maggiore, sia

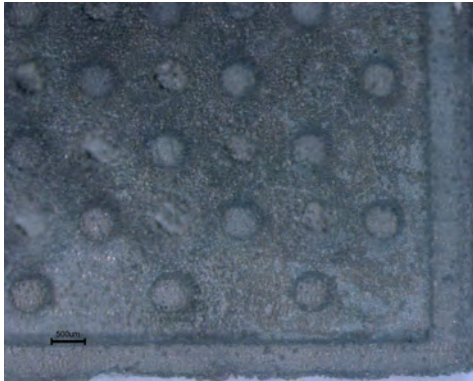


Fig. 31. Pavé planare in platino 950 ‰ da microfusione diretta a cera persa (20X)

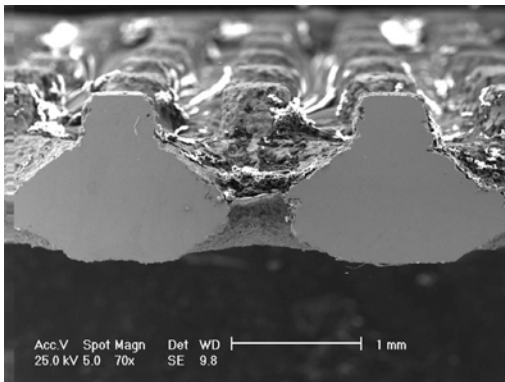


Fig. 32. Micrografia elettronica del pavé planare in platino 950 ‰ da microfusione diretta

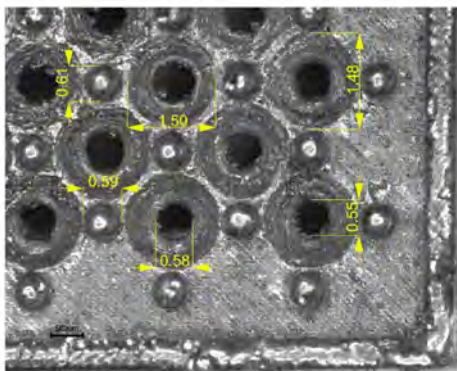


Fig. 33. Schema di misurazioni per i pavé planari al microscopio stereografico

perché il fattore di aberrazione estetica è più alto nel caso dell'oro drogato al silicio (tabb. 16, 17). Il processo di sabbiatura ha l'effetto positivo di migliorare l'aspetto visivo degli oggetti (q_m), tuttavia presenta il serio problema della diminuzione di accuratezza dimensionale (S_{tot}). Nel complesso, la sabbiatura innalza solo leggermente l'indice complessivo di qualità nel caso dell'oro rosso, mentre addirittura ne provoca una significativa riduzione nel caso del platino. La sabbiatura tende a influenzare meno l'accuratezza dimensionale (S_{tot}) nel caso dell'oro probabilmente grazie alla forma più aerodinamica (figg 35, 36) delle grane che sviluppa meno attrito nel flusso di particelle abrasive, rispetto alla forma delle grane di platino (figg. 37, 38). Le microfusioni dei pavé planari pavé hanno per entrambe le leghe, soprattutto nel caso dell'oro, un indice complessivo di qualità inferiore agli articoli ottenuti mediante fusione laser selettiva, sia perché il fattore di aberrazione estetica è minore, sia perché le variazioni dimensionali rispetto al valore nominale è più accentuato (fig. 39).

PROCESSO	Si	r_m	S_{tot}	q_m	$Q(P_m)$	CATEGORIA
SLM _{Au}	44.0	0.0	44.0	33915	1492260	Buono
SLM _{Pt}	35.0	0.0	35.0	29676	1038660	Buono
SLM _{Au} + SB	34.0	0.0	34.0	46512	1581408	Buono
SLM _{Pt} + SB	19.0	0.0	19.0	30096	571824	Discreto
MD _{Au}	40.0	0.0	40.0	24806	992240	Discreto
MD _{Pt}	31.0	0.0	31.0	19667	609677	Discreto

Tab. 16. Indice di qualità complessivo $Q(P_m)$ per la pavé planare pavé in funzione del processo produttivo

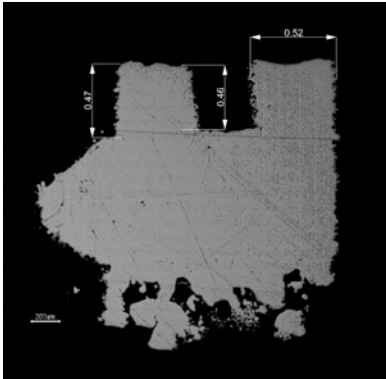


Fig. 34. Schema di misurazioni per i pavé planari al microscopio metallografico



Fig. 35. Dettaglio di una grana del pavé planare in oro rosso prima della sabbiatura



Fig. 36. Dettaglio di una grana del pavé planare in oro rosso dopo della sabbiatura

PROCESSO	S_i	r_m	S_{tot}	q_m	$Q(P_m)$	CATEGORIA
$SLM_{Au} (90^\circ)$	33.0	6.5	39.5	20160	796320	Discreto
$SLM_{Au} (0^\circ)$	32.0	6.0	38.0	15680	595840	Discreto
$SLM_{Pt} (0^\circ)$	24.0	5.5	29.5	27216	802872	Discreto
$SLM_{Pt} (90^\circ)$	24.0	5.0	29.0	22491	652239	Discreto
MD_{Au}	32.0	6.0	38.0	31862	1210756	Buono
MD_{Pt}	32.0	5.0	37.0	28113	1040181	Buono

Tab. 17. Indice di qualità complessivo $Q(P_m)$ per gli anelli pavé in funzione del processo produttivo

Nel caso degli anelli pavé, l'indice complessivo di qualità mostra un comportamento diverso, ma per effetto di differenti cause. L'anello migliore in oro drogato al silicio presenta una fedeltà dimensionale leggermente più bassa del migliore anello in lega di platino, tuttavia il fattore di aberrazione estetica per questa lega è decisamente più alto di quello della lega d'oro, perciò nell'insieme l'aspetto complessivo del pezzo in platino appare migliore, come indicato dal suo indice complessivo di qualità (tab. 15). Nei pezzi con l'orientazione che fornisce una qualità dei pezzi rispettivamente peggiore, la differenza tra le due leghe è ancora più accentuata (fig. 40).

D'altra parte, gli anelli microfusi presentano in ogni caso una maggiore qualità complessiva rispetto ai pezzi costruiti mediante fusione laser selettiva e questo può essere attribuito alla più facile formatura degli oggetti con superficie curve con la tecnica di microfusione. La difficoltà produttiva di oggetti planari in microfusione è di fatto un fenomeno tradizionalmente riconosciuto in campo metallurgico, mentre con la fusione selettiva laser opportunamente predisposta, il problema può essere sorpassato. L'indice complessivo di qualità dell'oro in microfusione risulta addirittura più alto di quello del platino, probabilmente a causa della sua migliore capacità di riempimento e della sua più bassa temperatura



Fig. 37. Dettaglio di una grana del pavè planare in platino prima della sabbiatura



Fig. 38. Dettaglio di una grana del pavè planare in platino dopo della sabbiatura

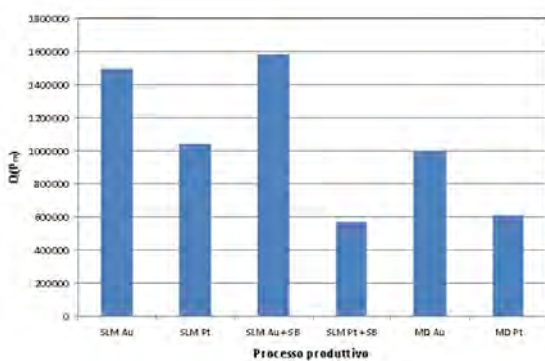


Fig. 39. Indice complessivo di qualità in funzione del processo produttivo dei pavè planari

di fusione rispetto alla temperatura dello stampo (tab. 15).

Le prove di resistenza meccanica hanno dato altresì degli interessanti risultati riguardo il comportamento dei pezzi realizzati con la fusione selettiva laser e successivamente sottoposti a trattamenti termici di miglioramento meccanico. In genere, gli articoli fabbricati con questa tecnologia hanno ottime prestazioni meccaniche, tuttavia possono soffrire di una ridotta deformabilità a rottura, fatto che costringe a mantenere fisse le dimensioni di un anello, ad esempio, senza la possibilità di potere ritoccare nel tempo la sua misura in funzione dell'aspetto fisico del suo indossatore. A causa di questo tipo di inconveniente, alcune prove di resistenza meccanica su provini di trazione ottenuti direttamente dalla fusione selettiva laser e su altri sottoposti successivamente a trattamenti di ricottura di distensione sono state effettuate sia per l'oro rosso drogato al silicio, sia per la lega di platino, per valutare la possibilità di aumentare la deformabilità senza dare luogo a rotture precoci (tab. 18).

Nel caso dell'oro l'aumento della duttilità è stato notevole, pari all'incirca al 34% più alto del valore iniziale ($e_r = 29.4\%$), mentre la lega di platino ha mostrato un aumento di deformabilità pari alla metà, vale a dire solo il 16% in più rispetto al valore della lega appena costruita e che comunque in valore assoluto è nettamente più bassa di quella dell'oro per un fatto di composizione intrinseca del materiale. Il carico di rottura diminuisce in modo sensibile per ambedue le leghe per un naturale fenomeno di ricottura, probabilmente associato anche alla segregazione a bordo grano di elementi che indeboliscono la struttura delle leghe.

LEGA	UTS (MPa)	e_r (%)
SLM _{Au}	455	29,4
SLM _{Au} Annealed	420	39,4
SLM _{Pt}	511	4,11
SLM _{Pt} Annealed	441	4,77

Tab. 18. Carico e deformazione a rottura per le leghe appena prodotte e dopo ricottura

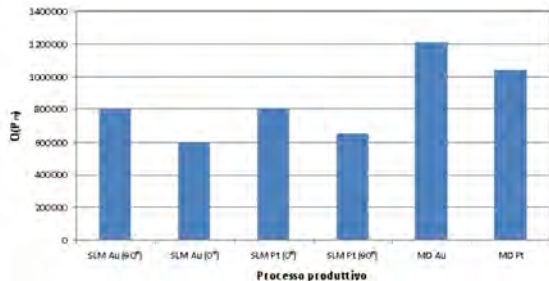


Fig. 40. Indice complessivo di qualità in funzione del processo produttivo degli anelli pavè

Infine, lo studio diretto all'aumento dell'economicità e dell'indossabilità degli articoli di gioielleria, cercando di mantenere la loro robustezza meccanica, attraverso un processo di svuotamento prima e di inserimento di strutture alveolari al loro interno più avanti, è stato condotto determinando il risparmio di materiale estratto dalle fedie nuziali massicce attraverso semplici misure ponderali, sia in presenza, sia in assenza di reticoli di rinforzo all'interno della cavità di alleggerimento.

Nel caso di assenza di strutture interne di rinforzo è naturalmente il massimo grado di alleggerimento e quindi di risparmio di metallo prezioso, che aumentano progressivamente man mano che la parete dell'anello diminuisce di spessore (tab. 19). Uno spessore di 0.75 mm fornisce un alleggerimento dell'anello d'oro rosso di circa il 25%p, mentre una parete di soli 0.25 mm comporta un forte risparmio di materiale pari a circa il 63%p. L'anello di platino fornisce valori analoghi con piccole variazioni percentuali.

A parità di lega utilizzata, l'introduzione di una struttura reticolare interna comporta necessariamente una riduzione del risparmio in metalli preziosi, tuttavia implica anche un aumento della resistenza meccanica dell'anello, ad esempio sotto l'azione di uno schiacciamento accidentale. In pratica, la situazione ideale dovrebbe essere quella in cui un gioiello è svuotato della massima quantità possibile di lega, garantendo al contempo la massima resistenza meccanica alle tipiche sollecitazioni a cui un ornamento è quotidianamente sottoposto, quali ad esempio la caduta a terra e la pressione della massa corporea.

In generale, un reticolo con una trama più sottile (R_1, M_1) implica una maggiore densità di materiale di supporto, perciò il livello di svuotamento risulta inferiore al caso di reticoli con una trama più larga (R_2, M_2). Tuttavia, a parità della trama del reticolo, la struttura a maglia quadra può dare un minore grado di svuotamento se la parete dell'anello è molto grande (0.75 mm), mentre lo svuotamento è tipicamente superiore quando lo spessore di parete è sottile (0.25 mm).

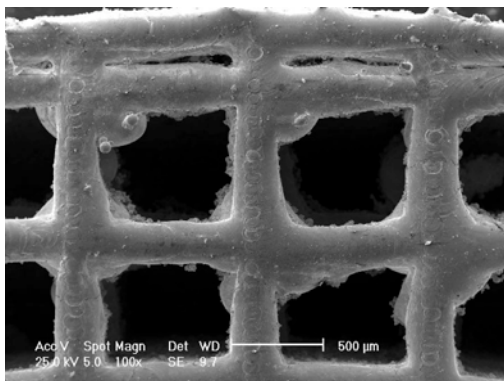


Fig. 41. Micrografia elettronica della struttura di struttura di supporto quadrata Magics M2

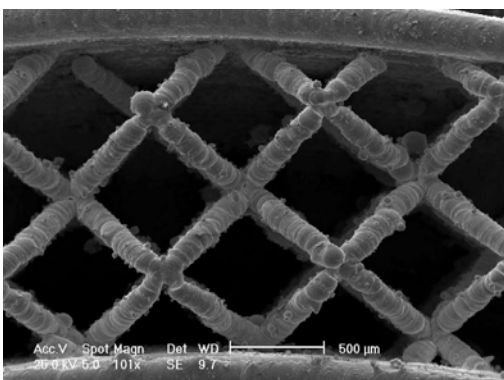


Fig. 42. Micrografia elettronica della struttura di struttura di supporto ottaedrica RDesigner R2

LEGA	SPESSORE PARETE (mm)	TIPOLOGIA DI RETICOLO	PESO DA SLM (g)	RIDUZIONE DEL PESO (%p)
SLM _{Au}	2.50	massiccio	8.30	0.00
	0.75	nessuna	6.20	25.30
		R ₁	7.04	15.18
		R ₂	6.28	24.34
		M ₁	8.15	1.81
		M ₂	6.94	16.39
	0.50	nessuna	4.38	47.23
		R ₁	5.15	37.95
		R ₂	4.92	40.72
		M ₁	8.25	0.60
		M ₂	4.98	40.00
	0.25	nessuna	3.10	62.65
		R ₁	4.20	49.40
		R ₂	3.25	60.84
		M ₁	6.80	18.07
		M ₂	3.70	55.42
SLM _{Pt}	2.50	massiccio	11.31	0.00
	0.75	nessuna	8.66	23.43
		R ₁	9.20	18.66
		R ₂	8.86	21.66
		M ₁	11.05	2.30
		M ₂	9.40	16.89
	0.50	nessuna	6.72	40.58
		R ₁	7.60	32.80
		R ₂	6.80	39.88
		M ₁	10.90	3.63
		M ₂	7.88	30.33
	0.25	nessuna	4.40	61.10
		R ₁	5.46	51.72
		R ₂	4.84	57.21
		M ₁	8.90	21.31
		M ₂	5.74	49.25

Tab. 19. Schema delle tipologie di alleggerimento delle fedine con le rispettive variazioni ponderali

Questo fenomeno accade poiché nonostante il passo sia costante nel caso dei reticoli ottaedrici (R₁, R₂) lo spessore delle strutture di supporto è considerevolmente più sottile a causa della diversa modalità di costruzione del software impiegato (figg. 41, 42).

In aggiunta, le prove di espansione delle fedine in platino hanno evidenziato un fenomeno alquanto interessante, che contrasta



Fig. 43. Microstruttura di una fede massiccia in platino 950‰ microfusa

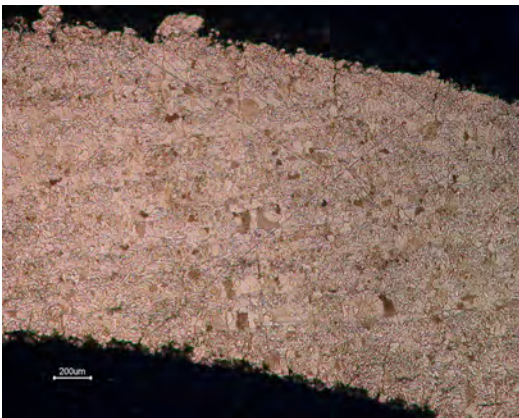


Fig. 44. Microstruttura di una fede massiccia in platino 950‰ da fusione laser selettiva

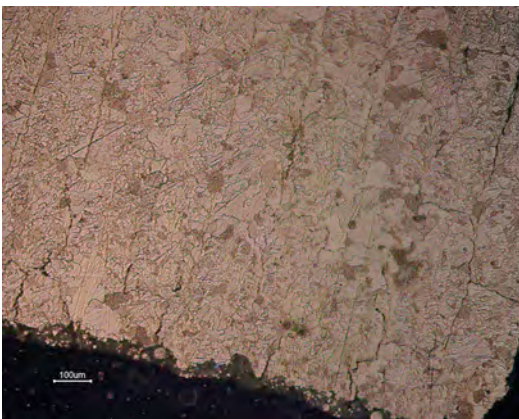


Fig. 45. Dettaglio delle fratture intervettoriali in una fede sottoposta ad espansione

apparentemente con quanto osservato in precedenza, per cui il trattamento di ricottura tende a rendere più deformabile questa lega. Tuttavia, le fedi massicce ottenute con la fusione laser selettiva, sia allo stato appena prodotto, sia allo stato ricotto (980°C, 25 minuti), non resistono a nessun grado di espansione dimensionale e sono fratturate immediatamente all'inizio della deformazione. Una situazione pressoché identica è stata osservata per le fedi massicce prodotte per microfusione e sottoposte alla medesima ricottura, che sono state spezzate proprio al principio della prova di espansione. Al contrario, le fedi massicce microfuse non sottoposte a ricottura resistono in modo sorprendente all'espansione dimensionale, potendo portare il loro diametro interno iniziale di 16.00 mm fino alla misura di circa 20.35 mm senza rottura. La microstruttura di una tipica fede massiccia in platino ottenuta mediante microfusione senza ricottura indica la presenza di grani equiassici parzialmente dendritici, con una dimensione di circa 300 µm (fig. 43). Il bordo grano è netto e sembra non presentare segregazioni, che possano comportare un infragilimento della struttura. D'altra parte, una fede massiccia costruita mediante fusione laser selettiva mostra una microstruttura a grana estremamente più fine di circa 30 µm, dovuta al rapido raffreddamento del cordone fuso di costruzione. La rottura immediata che subisce un pezzo di questo tipo sotto l'azione di uno sforzo di trazione è dovuta principalmente alla propagazione di microfessure intervettoriali, cioè di difetti di volume presenti tra un vettore di costruzione e l'altro (fig. 44, 45). In seconda misura, il cedimento strutturale è anche di tipo intergranulare. La formazione delle microfessure è un fenomeno che deve essere ancora investigato e probabilmente dipende da una parziale interruzione della giunzione di vettori adiacenti, ma fortunatamente la loro presenza in fase di lucidatura non comporta la creazione di difetti evidenti.

Questo fenomeno di rottura potrebbe essere ascrivito alla segregazione a bordo grano di fasi infragilenti ($GaPt_3$) dovute al riscaldamento, sia nel caso degli anelli ottenuti da fusione laser selettiva, sia degli anelli ricotti, mentre nel caso degli anelli microfusi probabilmente questi composti

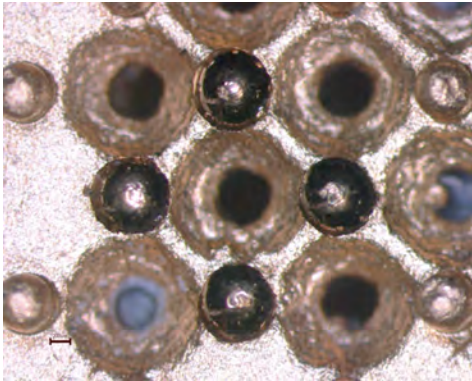


Fig. 46. Formatura delle grane nel pavé planare di oro ottenuta dalla fusione selettiva laser

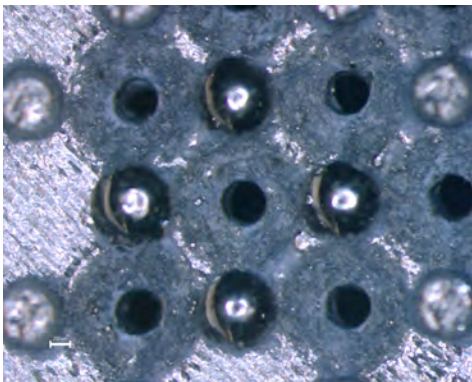


Fig. 47. Formatura delle grane nel pavé planare di platino ottenuta dalla fusione selettiva laser

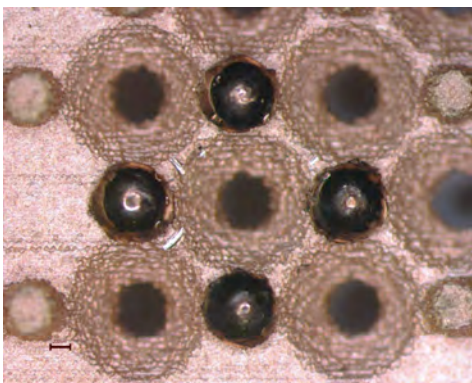


Fig. 48. Formatura delle grane nel pavé planare di oro ottenuta dalla microfusione diretta

intermetallici non hanno avuto ancora il tempo di essere formati a causa del rapido spegnimento degli stampi in acqua dopo la colata centrifuga (3 minuti).

Infine, una breve prova di formatura delle grane di incassatura è stata effettuata sul pavé delle lastre di ogni lega per valutare il loro eventuale grado di tenuta attorno alle pietre. Questa prova è stata effettuata per verificare la rottura in compressione delle leghe impiegate, vista la loro scarsa deformabilità in trazione, soprattutto per quanto concerne il platino. Le quattro grane di un foro sono state formate con un granitore di opportuna dimensione (n.15) per poi esaminare allo stereoscopio la loro forma e la loro tenuta laterale, spingendo con la punta dello strumento. L'aspetto interessante risiede nel fatto che anche la lega in platino più rigida produce delle grane di incassatura resistenti e adeguatamente sagomate per il blocco di una pietra (figg. 46, 47, 48, 49).

Conclusioni:

Il risultato generale dedotto dalle ultime analisi sperimentali è stato abbastanza promettente per quanto concerne la qualità degli articoli prodotti attraverso la fusione laser selettiva. Gli articoli planari presentano un livello di qualità complessivo sensibilmente più alto rispetto agli articoli dotati di superfici curve e questo può essere estrapolato osservando la differenza tra gli indici di qualità complessivi $Q(P_m)$ delle tessere e degli anelli pavé, che ammonta a qualche centinaio di migliaia di punti. La situazione è invertita nel caso delle medesime geometrie ottenute attraverso la microfusione diretta, un processo che tipicamente presenta difficoltà nella realizzazione di superfici planari.

La lega di oro drogata al silicio nella realizzazione delle tessere pavé, quindi di una geometria planare, fornisce un indice di qualità complessivo distintamente più alto rispetto alla lega di platino, sia perché è dimensionalmente più fedele, sia perché l'aspetto globale dei suoi dettagli decorativi risulta più coerente con il progetto. Nel caso degli anelli, la lega di platino è

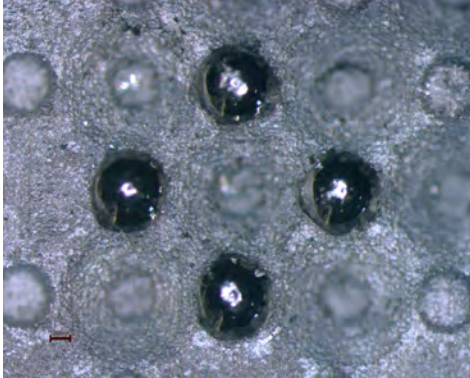


Fig. 49. Formatura delle grane nel pavé planare di platino ottenuta dalla microfusione diretta

invece significativamente migliore per quanto concerne la coerenza complessiva dei dettagli decorativi, ma l'accuratezza analitica delle dimensioni è inferiore. In definitiva, il livello di qualità generale nel caso degli anelli è relativamente simile per le due diverse leghe preziose.

Dal punto di vista meccanico, la lega di oro rosso drogata al silicio presenta una maggiore duttilità rispetto alla lega in platino, tuttavia, le prove di formatura delle grane sulle tessere pavé hanno dimostrato per tutte le leghe una buona tenuta agli sforzi di compressione e di taglio, che tipicamente sono sviluppati durante un tipico processo di incassatura delle pietre preziose.

Bibliografia:

SFS Paper

1. D. Zito et al., "Optimization of SLM Technology Main Parameters in the Production of Gold and Platinum Jewelry", *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2014*, ed. Eddie Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, 2014).
2. D. Zito et al., "Optimisation of the Main Selective Laser Melting Technology Parameters in the Production of Gold Jewellery", *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2013*, ed. Eddie Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, 2013).
3. D. Zito et al., "Latest developments in Selective Laser Melting production of gold jewellery", *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2012*, ed. Eddie Bell (Albuquerque: Met-Chem Research, 2012).

Journal Article

4. Kruth, J., Mercelis, P., Froyen, L. and Rombouts, M. (2004), "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting", *Proceedings of the Solid Freeform*



Fabrication Symposium, pp. 44-59.

Yadroitsev et al., "Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks", *Rapid Prototyping Journal*, 3(18)(2012)201-208.