



ALESSIO CARLOTTO
PROGOLD S.p.a.,
TRISSINO (VI), ITALY.

Alessio Carlotto ha conseguito la laurea magistrale in Chimica Industriale a Padova. Dal 2010 fa parte del team di Ricerca & Sviluppo di Progold S.p.A.

La reale possibilità di utilizzo della tecnologia Selective Laser Melting per la produzione di gioielli partendo da leghe in polvere è stata finalmente appurata e si è raggiunto lo standard qualitativo necessario.

Per prendere possesso della tecnologia abbiamo programmato la realizzazione di una serie di campioni sulla quale è stato poi condotto uno studio sistematico.

In particolare per la produzione di questi è stata impiegata una lega in polvere d'oro giallo 18kt in tre differenti intervalli granulometrici, i quali hanno rappresentato una delle variabili della nostra ricerca assieme alla potenza laser, la velocità di scansione e lo spessore dello strato di polvere.

L'obiettivo è stato quello di ottenere dati significativi in termini di rugosità allo stato grezzo, di difettologia e di caratteristiche fisico-meccaniche .

L'analisi è stata effettuata seguendo un approccio DOE (Design Of Experiments), per mettere in evidenza non solo l'effetto delle singole variabili ma anche dell'interazione tra le stesse.

Infine abbiamo posto in relazione i risultati ottenuti con quelli derivanti da campioni prodotti con la tecnica a cera persa.

Ultimi sviluppi della tecnologia Selective Laser Melting nella produzione di gioielli d'oro

Damiano Zito, Alessio Carlotto, Alessandro Loggi, Silvano Bortolamei
Progold S.p.A., Trissino (VI)

Alberto Molinari, Ilaria Cristofolini
Università degli Studi di Trento, Trento (TN)

INTRODUZIONE

La prototipazione rapida è una tecnica presente nel mercato da anni ed è in continua espansione tanto che ha coinvolto rapidamente vari settori industriali tra cui quello della gioielleria e dell'oreficeria in quanto consente di adattarsi bene alla produzione di piccoli lotti. È una tecnologia innovativa che permette di realizzare articoli anche di geometria complessa, a partire da un prototipo realizzato su un modello CAD tridimensionale.

Il concetto su cui si basa tale tecnica parte dal fatto che qualsiasi tipo di oggetto può essere scomposto in una serie di strati di spessore infinitesimo e pertanto ciascun oggetto può essere costruito in modo consequenziale, strato dopo strato.

Poiché gli oggetti sono ottenuti con progressiva aggiunta di materia, la tecnologia RP è anche denominata tecnica di produzione per strati o per piani (layer manufacturing).

La classificazione principale delle tecniche RP è basata sulla natura dei materiali impiegati e tra di essi l'impiego di polveri si sta affermando in modo preponderante poiché utilizzando la medesima macchina e cambiando il tipo di polvere, si possono ottenere oggetti con caratteristiche differenti. Partendo da leghe metalliche in polvere e utilizzando un laser, che opera seguendo un delineato disegno tridimensionale, si riescono a produrre oggetti con caratteristiche di forma e di spessore difficilmente realizzabili con altre tecniche ¹.

Tra le tecniche conosciute che hanno come punto di partenza il disegno di un oggetto tridimensionale, l'SLM ², acronimo di Selective Laser Melting, è senza dubbio la tecnica che più si presta alla produzione di oggetti che richiedono come priorità qualità estetiche superficiali e caratteristiche fisico-meccaniche elevate. La struttura risultante è simile a quella tipica del prodotto della fusione, con l'importante differenza della dimensione molto fine del grano, risultato del forte sottoraffreddamento cui la lega metallica è sottoposta.

Questo lavoro si articola attraverso tre rami principali, ovvero lo studio a livello superficiale degli oggetti grezzi, l'analisi delle difettologie sviluppatesi, e la valutazione e la variazione delle proprietà fisico-meccaniche.

Le variabili in gioco nella nostra ricerca sono la potenza laser, la velocità di scansione, lo spessore dello strato di polvere e l'intervallo granulometrico della polvere.

In particolare in questo studio è stata impiegata una lega in polvere d'oro giallo 18kt in tre differenti intervalli granulometrici e con essa sono stati realizzati una serie di campioni sui quali sono state condotte le analisi.

L'ambizioso traguardo di questo lavoro è riuscire a mettere in evidenza, seguendo un approccio DOE (Design Of Experiments) ^{3,4}, non solo l'effetto delle singole variabili che influiscono e giocano un ruolo determinante ad impartire determinate caratteristiche all'oggetto, ma anche l'interazione tra le variabili stesse. Questa metodologia di analisi, difatti, è efficace per realizzare miglioramenti progressivi nella qualità di un prodotto e nell'efficienza di un processo.

PARTE SPERIMENTALE

Lo studio è stato condotto utilizzando una macchina Realizer - SLM 50, dotata di una tavola di lavoro del diametro di 70 mm e di un'altezza di costruzione massima pari a 40 mm. La macchina monta un fibre laser da 100W, con dimensione dello spot di 10 µm e lavora in atmosfera protetta di gas Argon.

La polvere impiegata per i test è stata prodotta nei nostri laboratori utilizzando un atomizzatore a gas HERMIGA PSI che opera in atmosfera controllata (il ciclo prevede il vuoto assoluto delle camere di atomizzazione e di fusione e successivamente il ripristino della pressione assoluta a 1 bar con gas Argon).

Questo tipo di atomizzatore permette di ottenere particelle con una ristretta distribuzione dimensionale, morfologia sferica, polveri completamente asciutte, tutte condizioni necessarie per le polveri metalliche da utilizzare nel processo SLM. È noto, infatti, che le sopra menzionate caratteristiche influenzano in modo significativo la scorrevolezza (flowability) di una polvere, caratteristica importantissima per una buona qualità del letto di polvere che, in successione durante il ciclo di lavoro, deve essere steso sulla tavola di lavoro.

Per questa ricerca è stata scelta una lega con la seguente composizione: Oro 75%, Argento 11.75 %, Zinco 0.5%, Iridio 0.01%. La lega rispetta il colore 3N definito dalla norma ISO EN 28654.

Lo studio a livello superficiale degli oggetti grezzi è stato preceduto da uno studio del tipo di campione da utilizzare. La messa a punto di una geometria, tale da permettere di analizzare la variazione della rugosità su campioni realizzati con SLM, non è stata semplice. Punto chiave della ricerca, infatti, era progettare un campione con superfici a differente inclinazione per una misurazione delle differenze tra le superfici stesse, nonché di un campione dotato di un volume piccolo al fine di ridurre l'impiego di polvere per la sua realizzazione.

Tutti i campioni prodotti sono stati progettati utilizzando il software Rhinoceros e supportati utilizzando il software Magics di Materialise.

Il campione su cui sono state eseguite le prove di rugosità superficiale e le analisi metallografiche, figura 1, aveva uno spessore di 0.30 mm, un'altezza di 9.21 mm, un volume pari a 200.45 mm³ e superfici diversamente inclinate.

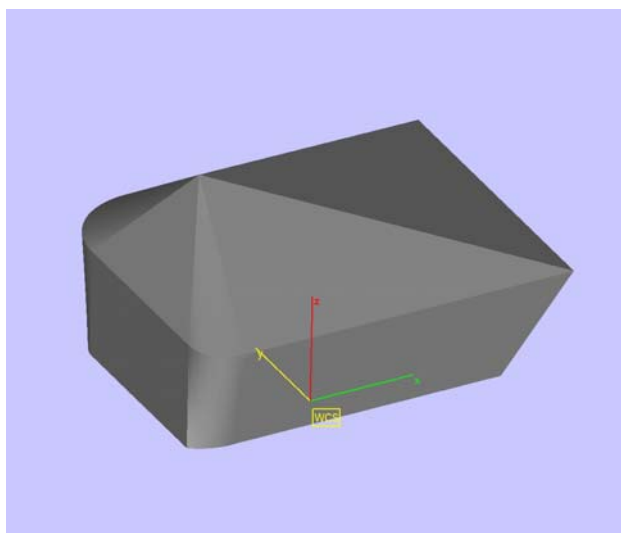


Figura 1 – Disegno tridimensionale del campione, visualizzato mediante il software Magics.

Il campione è stato progettato in modo tale che le superfici avessero un'inclinazione caratteristica rispetto alla tavola di lavoro, al fine di poter studiare la variazione di rugosità superficiale in funzione dell'inclinazione stessa.

In figura 2 è riportata la nomenclatura delle superfici. I valori degli angoli sottesi tra esse e la tavola di lavoro sono i seguenti: a=14°; b=37°; c=33°; d=20°; aa=60°; bb=90°; cc=76°; dd=76°.

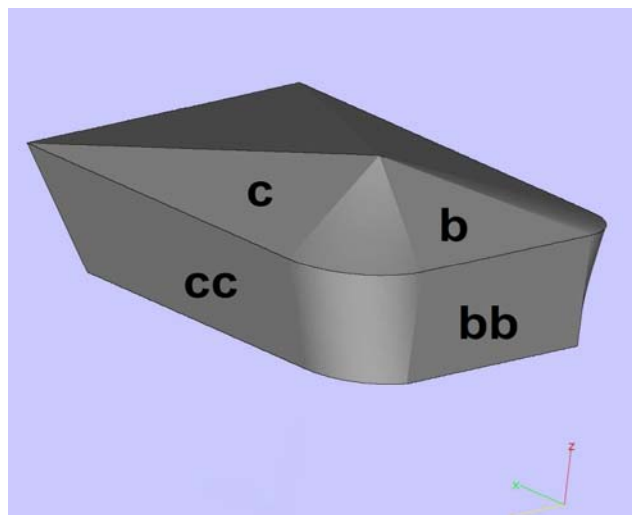
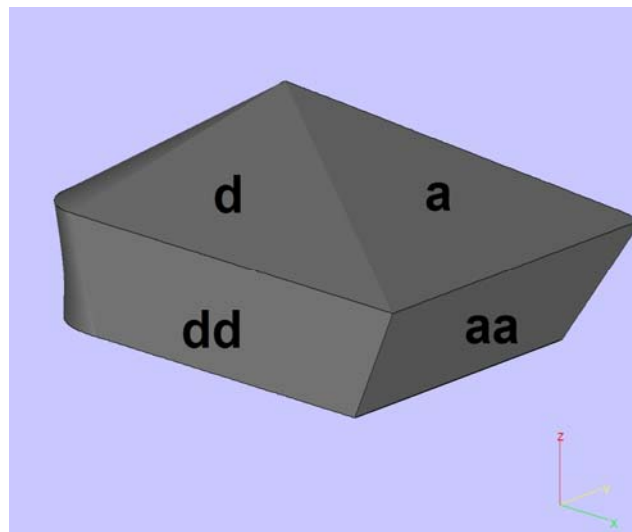
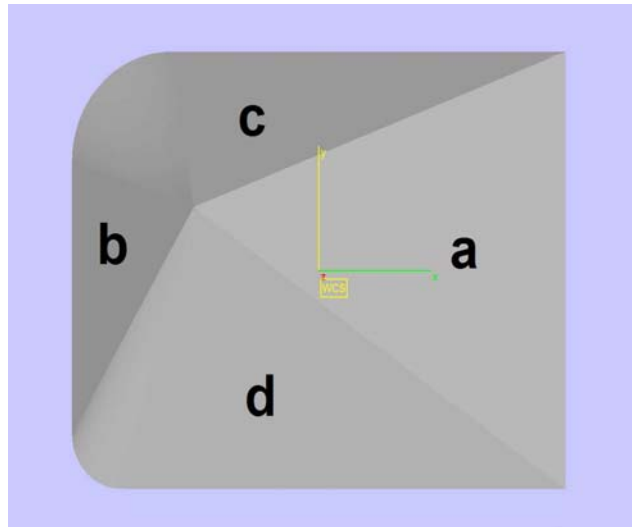


Figura 2 – Superfici del campione, visualizzate mediante il software Magics.

Insieme al campione da sottoporre ad analisi di rugosità, sono stati prodotti cinque provini per la prova di trazione con lo scopo di verificare la “salute” della struttura costruita.

I campioni di trazione hanno le seguenti dimensioni: altezza di 25.90 mm, tratto utile di 15.77 mm, volume 157.73 mm³. Questa determinata geometria è stata scelta dopo una serie di test su campioni caratterizzati da una differente geometria. In figura 3 è illustrato il provino di trazione usato.

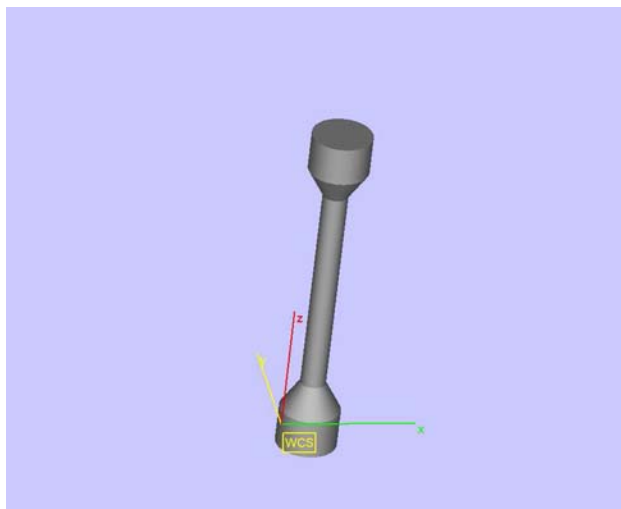


Figura 3 – Disegno tridimensionale del provino di trazione, visualizzato mediante il software Magics.

Tutti i campioni realizzati sono stati disposti sempre in posizioni prefissate sulla tavola di lavoro, ovvero alle coordinate $x=0$ mm e $y=0$ mm il campione in figura 1 mentre alle coordinate riportate nella tabella 1 sottostante i provini di trazione.

Tabella 1 – Coordinate provini di trazione sulla tavola di lavoro		
Provino di trazione	X (mm)	Y (mm)
1	-25	10
2	-12.5	18
3	0	25
4	12.5	18
5	25	10

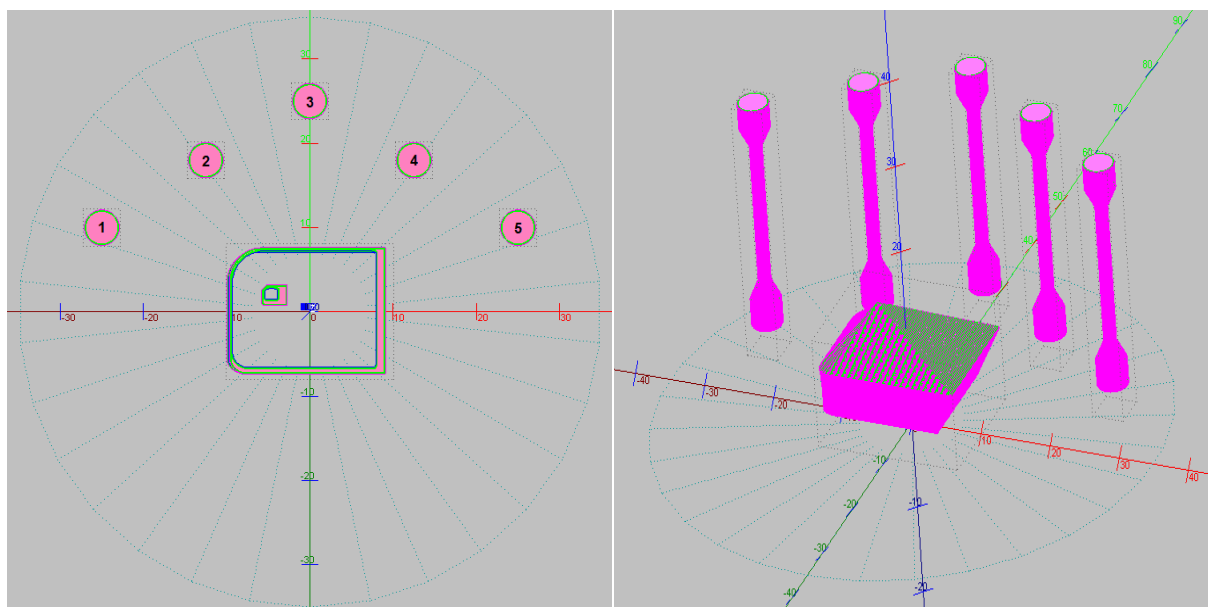


Figura 4 – Rappresentazione 2D e 3D dei campioni costruiti sulla tavola di lavoro, visualizzato mediante il software Realizer.

Sono state programmate 16 prove, a ciascuna delle quali è associabile un determinato intervallo granulometrico della polvere utilizzata, uno spessore del layer, una potenza del laser e una velocità di scansione. Conoscendo quest'ultimi tre fattori è possibile definire l'energia specifica associata. In particolare è stata impiegata polvere in tre differenti intervalli granulometrici ovvero 0-25 μm , 0-53 μm e 25-53 μm (denominati rispettivamente A, B e C). In questo lavoro sono stati inoltre adottati due differenti spessori del layer (40 e 50 μm), due potenze del laser (80 e 90 W) e due velocità di scansione (0.25 e 0.30 m/s), denominando in tutti i casi il valore più basso -1 e il valore più alto +1.

La Tabella 2 riporta il programma sviluppato in questo lavoro. L'intervallo granulometrico B è l'unione dei due intervalli A e C. Lo spessore dello strato è stato variato su due livelli (-1 il livello inferiore, +1 il livello superiore) solo per l'intervallo granulometrico A. Potenza del laser e velocità di scansione sono stati variati su due livelli.

Tabella 2 – Programma di lavoro					
Intervallo granulometrico	Spessore layer	Potenza	Velocità di scansione	Energia specifica (10^6 J/m^2)	Denominazione test
A	-1	-1	-1	8	A1
			+1	6.7	A2
		+1	-1	9	A3
			+1	7.5	A4
	+1	-1	-1	6.4	A5
			+1	5.3	A6
		+1	-1	7.2	A7
			+1	6	A8
B	+1	-1	-1	6.4	B1
			+1	5.3	B2
		+1	-1	7.2	B3
			+1	6	B4
C	+1	-1	-1	6.4	C1
			+1	5.3	C2
		+1	-1	7.2	C3
			+1	6	C4

Lo studio a livello superficiale degli oggetti dopo la costruzione è stato condotto utilizzando il rugosimetro Taylor Hobson FORM TALYSURF INTRA2 dotato di un tastatore con stilo in carbonio e punta in diamante.

Per ciascuna superficie, figura 2, sono state eseguite analisi bidimensionali, 2D, e tridimensionali, 3D. Quest'ultime sono state possibili grazie all'impiego di una tavola di lavoro che ha permesso la mappatura di un'area di 16 mm^2 per le superfici "a", "d", "aa", "bb", "cc", "dd", mentre di 4 mm^2 per le superfici "b", "c".

I provini di trazione sono stati sottoposti ad analisi di densità e successivamente alla prova di trazione per valutare le proprietà fisico-meccaniche.

Le prove di densità sono state condotte utilizzando una bilancia Sartorius dotata del dispositivo per la determinazione della densità mentre le prove di trazione sono state condotte utilizzando un dinamometro universale INSTRON con cella di carico di 2kN.

Dopo lo studio della superficie i campioni sono stati sezionati, come riportato in figura 5, sgrassati, inglobati e lucidati per essere sottoposti ad analisi metallografica. Le sezioni "a", "b", "bb", "aa" sono osservate al microscopio metallografico per la verifica della microstruttura dei 16 test.

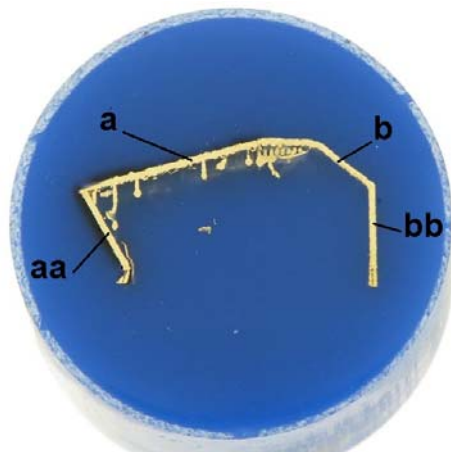


Figura 5 – Sezione campione B3 dopo attacco metallografico.

Al fine di confrontare la tecnologia SLM con le odierne tecnologie di produzione di gioielli sono stati realizzati gli stessi campioni utilizzando la tecnica della fusione a cera persa, partendo sia da modelli in cera iniettata che modelli prototipati con resina. I due alberini fusi contenevano ciascuno sei provini di trazione e tre campioni da sottoporre all'analisi rugosimetrica (quest'ultimi con spessore di 0.5 mm ciascuno anziché di 0.3 mm come nel caso dei campioni realizzati attraverso SLM). La procedura seguita è stata la seguente:

1. Prefusione con una macchina fonditrice ad induzione. Il metallo è stato colato in staffa ad una temperatura di 150°C superiore alla temperatura di liquidus. Successivamente, il lingotto è stato laminato e tagliato per facilitare la fase successiva di lavorazione.
2. La fusione è stata eseguita in una macchina fonditrice ad induzione sottovuoto. La temperatura di colata è stata di 150°C superiore alla temperatura di liquidus. La temperatura dei cilindri è stata di 700°C e i cilindri sono stati spenti dopo 300 secondi rapidamente in acqua.

Analogamente ai test eseguiti sui campioni realizzati con SLM, i campioni realizzati in microfusione sono stati sottoposti ad analisi di rugosità, a prove di trazione, ad analisi metallografica.

Sulla base dei risultati ottenuti dalle 16 prove è stata pianificato un ultimo test con l'SLM impiegando la polvere di intervallo granulometrico B e utilizzando valori di spessore del layer, potenza del laser e velocità di scansione opportunamente ottimizzati al fine ottenere i migliori risultati in termini di rugosità e di densità.

I risultati ottenuti sono stati quindi confrontanti con i campioni realizzati con la tecnica della fusione a cera persa.

RISULTATI E DISCUSSIONE

DENSITA'

La densità dei campioni di trazione è riportata in Tabella 3.

Tabella 3 – Densità dei provini di trazione			
Denominazione test	Densità (g/cm³)	Denominazione test	Densità (g/cm³)
A1	15.19	B1	15.14
A2	15.18	B2	15.20
A3	15.23	B3	15.21
A4	15.22	B4	15.21
A5	15.11	C1	14.79
A6	15.14	C2	14.94
A7	15.20	C3	15.23
A8	15.19	C4	15.14

Tutti i campioni A e B hanno densità compresa fra 15,11 e 15,23 g/cm³, molto prossima alla densità reale della lega. Le differenze all'interno di queste due classi granulometriche e fra le due classi sono molto modeste e si può concludere che per gli intervalli granulometrici A e B non si osservano effetti dei parametri di processo sulla densità.

Nel caso dei campioni C, i due prodotti con potenza del laser al livello inferiore (C1 e C2) hanno densità più bassa, indicativa di una porosità residua dell'ordine del 2-3%. I risultati dell'analisi statistica della densità sono riportati in figura 8 solo per evidenziare l'effetto della granulometria confrontando i campioni A (livello -1) e C (livello +1) a parità di spessore. La scala delle ordinate è ingrandita per evidenziare le piccole, ma significative differenze rilevate. Si nota l'interazione fra la granulometria e la potenza del laser nel determinare la densità.

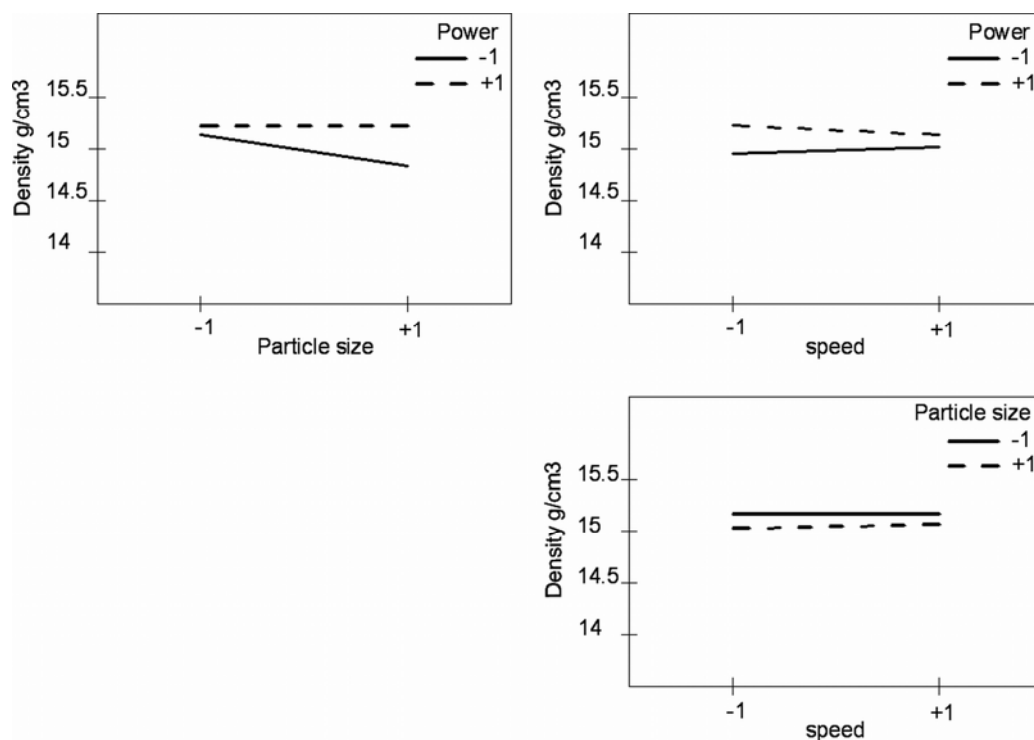


Figura 8 – Effetto dei parametri di processo sulla densità dei campioni prodotti con l'intervallo granulometrico A e C.

RISULTATI DELLA PROVA DI TRAZIONE

Le prove di trazione sono state effettuate per valutare la solidità (soundness è il termine tecnico specifico) del materiale. Nel caso di materiali duttili, sono di interesse il carico di rottura (Ultimate Tensile Strength - UTS) e l'allungamento a rottura (percent elongation at fracture - ϵ), significativo della duttilità. I valori sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4 – Risultati delle prove di trazione					
Denominazione test	UTS (MPa)	ϵ (%)	Denominazione test	UTS (MPa)	ϵ (%)
A1	444.0	23.3	B1	435.6	20.8
A2	438.0	25.7	B2	404.9	20.6
A3	464.0	28.2	B3	402.4	28.5
A4	474.0	31.1	B4	457.6	23.7
A5	427.0	19.5	C1	347.8	12.9
A6	372.0	16.2	C2	333.6	14.7
A7	399.0	30.6	C3	390.4	29.6
A8	442.0	25.0	C4	393.3	16.5

Da un punto di vista generale si può concludere che i campioni A hanno proprietà tendenzialmente superiori ai campioni B solo se prodotti con lo spessore sul livello inferiore, mentre i campioni C prodotti con la potenza del laser sul livello inferiore (C1 e C2) sono i peggiori. Quest'ultima osservazione trova riscontro nella densità, come discusso in precedenza. Negli altri casi, invece, le densità sono molto simili e quindi è interessante valutare l'effetto dei parametri di processo sperimentati. I risultati dell'elaborazione statistica sono mostrati nelle figure 9 e 10. La figura 9 fa riferimento ai campioni A, per evidenziare l'effetto dello spessore dello strato, della potenza del laser e della velocità di scansione sulla resistenza e sulla duttilità ottenute utilizzando l'intervallo granulometrico A.

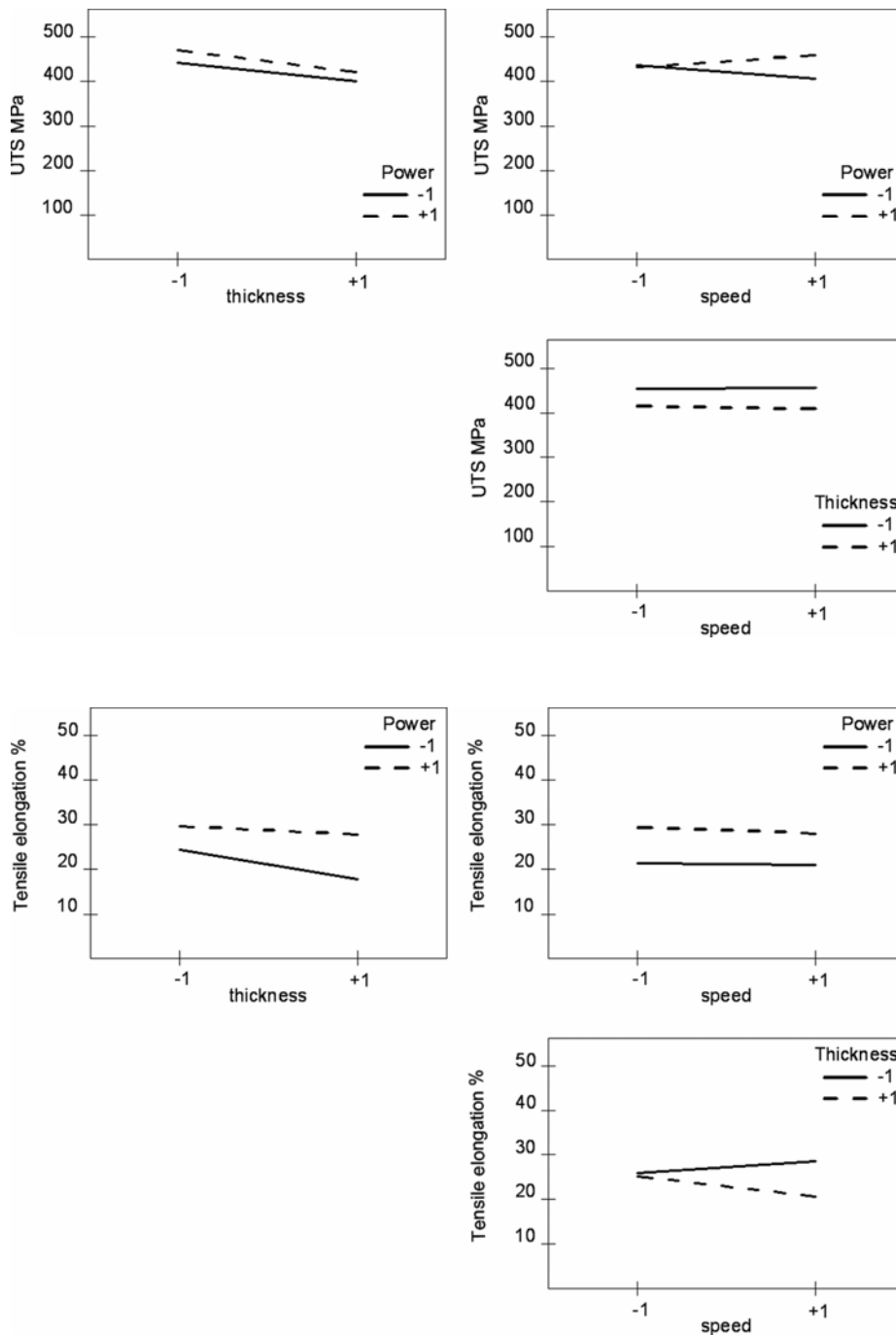


Figura 9 – Effetto dei parametri di processo sulla resistenza a trazione e l'allungamento a rottura dei campioni prodotti con l'intervallo granulometrico A.

Si osserva che:

- a) aumentando la potenza aumenta leggermente la resistenza a rottura e più significativamente la duttilità;
- b) lo spessore dello strato influenza la resistenza a rottura (aumentando lo spessore diminuisce la resistenza) e, solo al livello più alto della velocità, la duttilità (aumentando lo spessore diminuisce la duttilità).

La figura 10 mostra invece l'elaborazione dei dati ottenuti utilizzando lo spessore dello strato al livello superiore, per evidenziare l'effetto della potenza del laser, della velocità di scansione e dell'intervallo granulometrico confrontando gli intervalli A (-1) e B (+1).

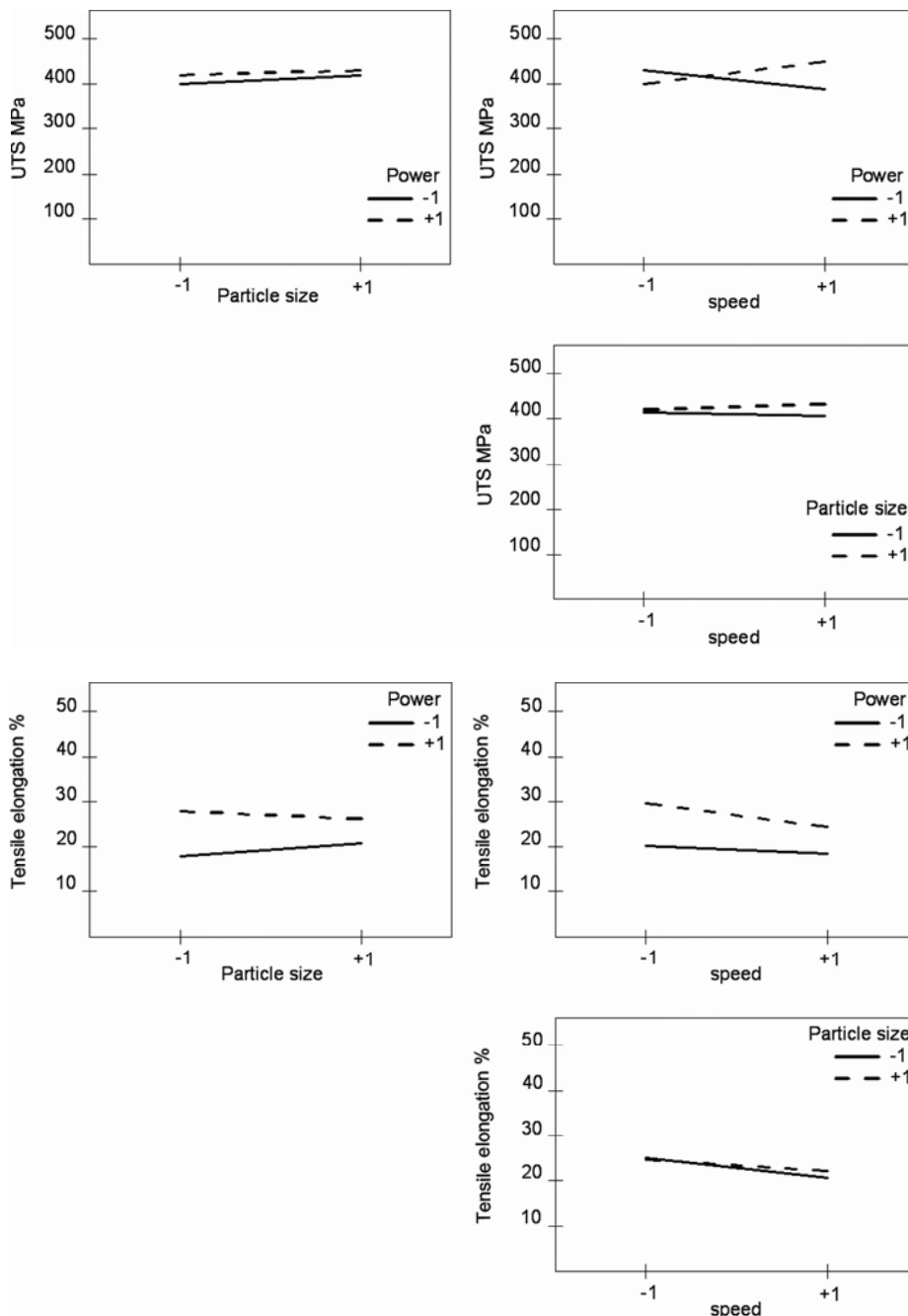


Figura 10 – Effetto dei parametri di processo sulla resistenza a trazione e l'allungamento a rottura dei campioni prodotti con gli intervalli granulometrici A e B.

Si osserva che la granulometria non influenza le caratteristiche meccaniche e l'effetto della potenza del laser e della velocità di scansione si conferma essere quello già evidenziato.

L'elaborazione statistica con i campioni C non ha senso in quanto due di essi hanno una densità decisamente inferiore agli altri, il che sovrasta l'eventuale effetto dei parametri di processo.

MORFOLOGIA DELLE SUPERFICI

Le superfici dei campioni hanno una morfologia dipendente dall'inclinazione rispetto alla tavola. La figura 11 mostra, come esempio, le superfici "a", "b", "c" e "bb" del campione A1. Su tutte le superfici si osserva una morfologia ondulata, riconducibile al cordone (pool) fuso e solidificato durante la costruzione del pezzo. La diversa altezza del rilievo delle superfici è chiaramente visibile. Si osservano anche particelle di polvere non fuse che sono rimaste legate alla superficie per sinterizzazione allo stato solido.

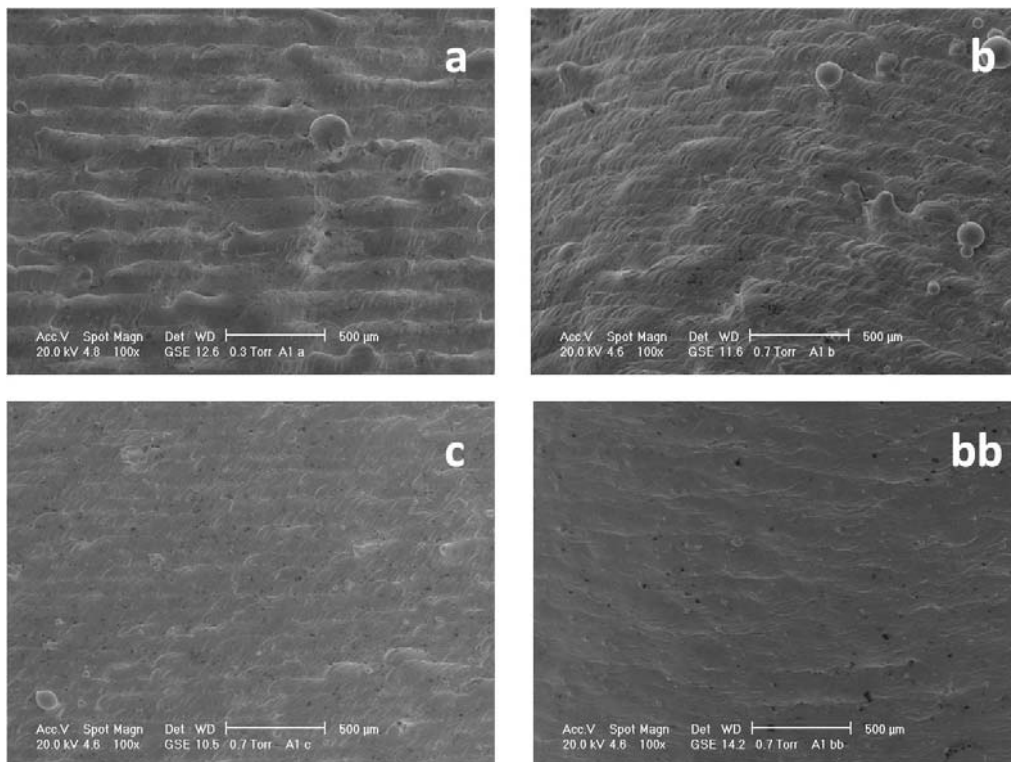


Fig. 11 – Morfologia delle superfici "a", "b", "c" e "bb" del campione A1.

Un esempio del profilo rugosimetrico registrato sulle quattro superfici di figura 11 è mostrato in figura 12. I profili sono elaborati per ottenere i parametri caratteristici del profilo rugosimetrico: Ra, Rv, Rp, e Rt. Questi parametri hanno un significato diverso e sono utilizzati preferenzialmente in relazione alle specifiche applicazioni dei pezzi prodotti. Ad esempio, nel caso di superfici esposte ad usura, Ra viene universalmente utilizzato per caratterizzare la rugosità; nel caso di usura lubrificata, Rv è molto significativo perché rappresenta la profondità delle valli del profilo, che possono fungere da "serbatoio" del lubrificante; Rp rappresenta l'altezza dei picchi emergenti rispetto alla linea media del profilo, e rappresenta il materiale che viene rimosso nelle fasi di rodaggio. Nel caso in esame, si ritiene più opportuno fare riferimento a Rt, che rappresentando l'altezza totale del profilo, rappresenta lo spessore che deve essere rimosso per ottenere una superficie perfettamente liscia e, quindi, esteticamente accettabile.

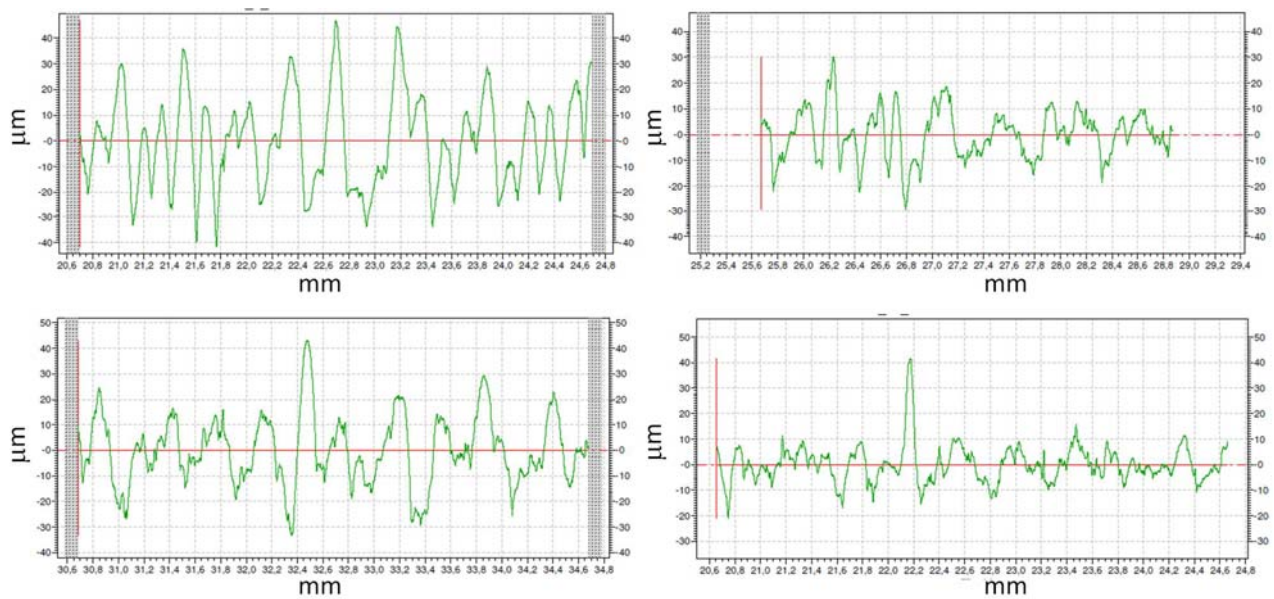


Fig. 12 - Profilo delle superfici "a", "b", "c" e "bb" del campione A1.

L'influenza dell'inclinazione della superficie rispetto alla tavola di costruzione è quindi mostrata con riferimento a questo parametro nella figura 13: qui, R_t è riportato in funzione dell'angolo di inclinazione per i campioni A5, B1 e C1 che sono stati prodotti con gli stessi parametri di processo, a parte l'intervallo granulometrico della polvere utilizzata. Si osserva che:

- esiste una dipendenza diretta fra inclinazione e valore di rugosità (R_t più elevati misurati su superfici meno inclinate);
- differenze maggiori sono riscontrate tra le superfici meno inclinate;
- a parità di spessore di strato, i valori di R_t sono simili per tutte le granulometrie.

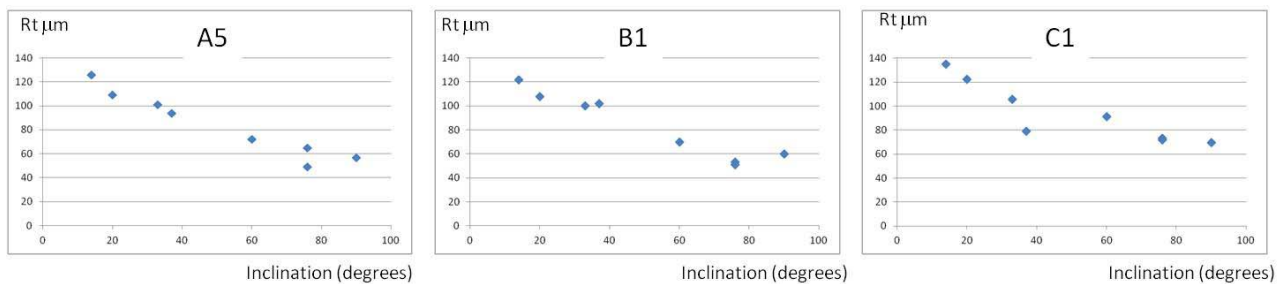


Fig. 13 – Influenza dell'inclinazione della superficie sulla rugosità totale R_t .

I valori di R_t sono stati elaborati statisticamente per mettere in evidenza l'effetto dei parametri di processo. L'elaborazione è stata effettuata per tutte le otto superfici misurate e i risultati sono illustrati di seguito. Nelle figure 14-17 sono riportati i risultati dell'elaborazione per i campioni prodotti con l'intervallo granulometrico A, per evidenziare l'effetto della potenza del laser, dello spessore dello strato e della velocità di scansione.

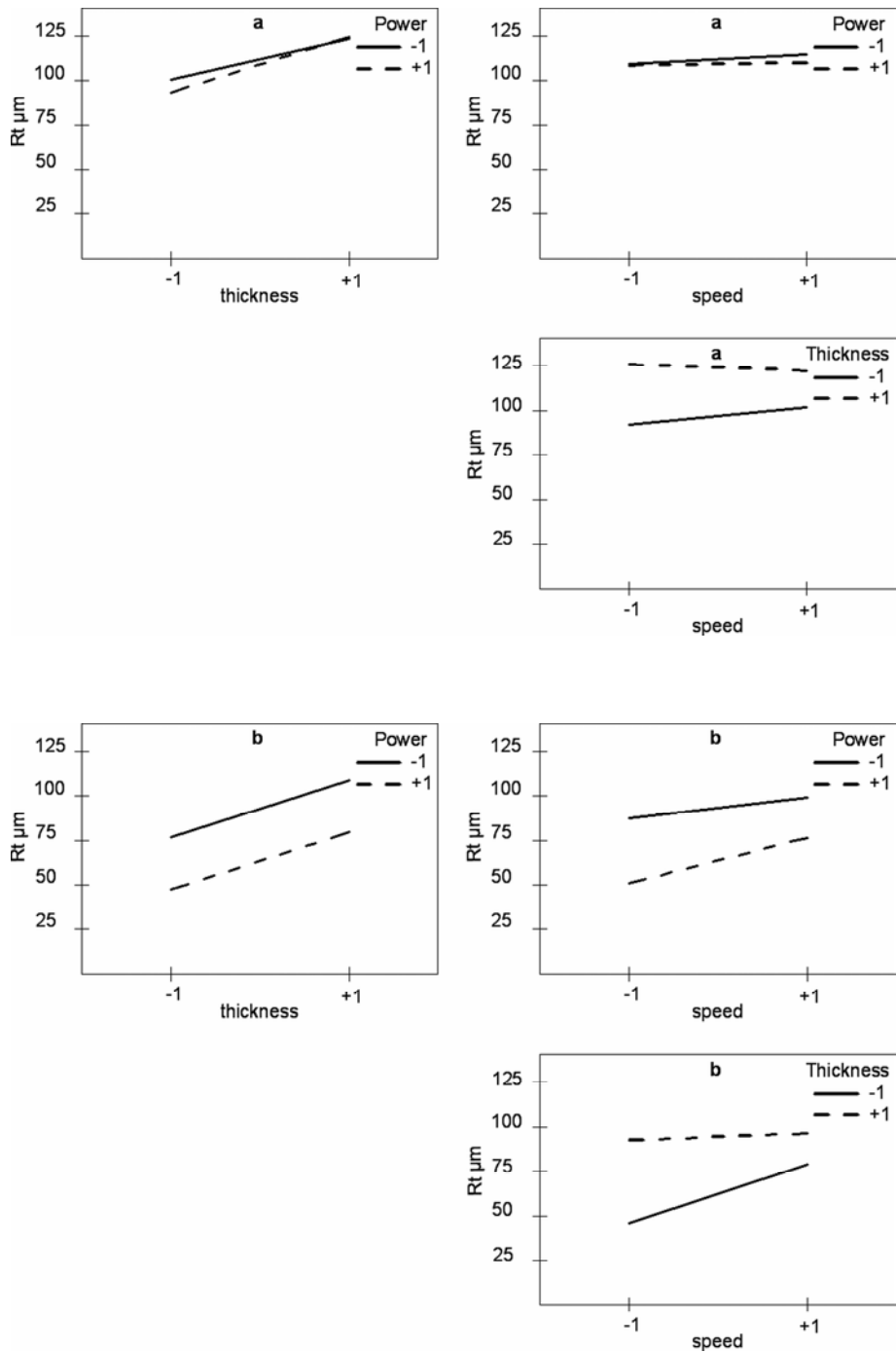


Figura 14 – Effetto dei parametri di processo sulla rugosità totale R_t delle superfici “a” e “b” dei campioni prodotti con l’intervallo granulometrico A.

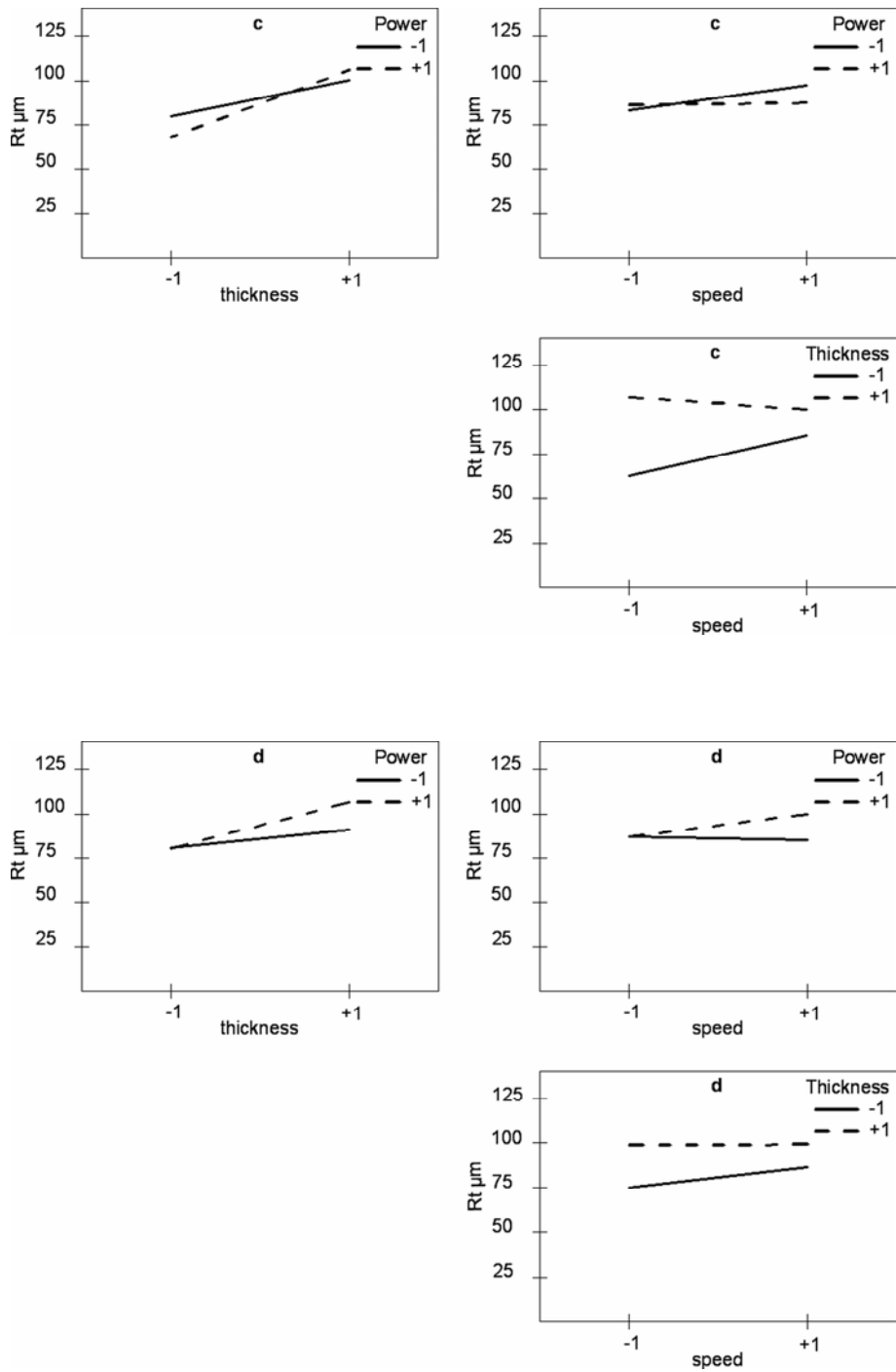


Figura 15 – Effetto dei parametri di processo sulla rugosità totale Rt delle superfici “c” e “d” dei campioni prodotti con l’intervallo granulometrico A.

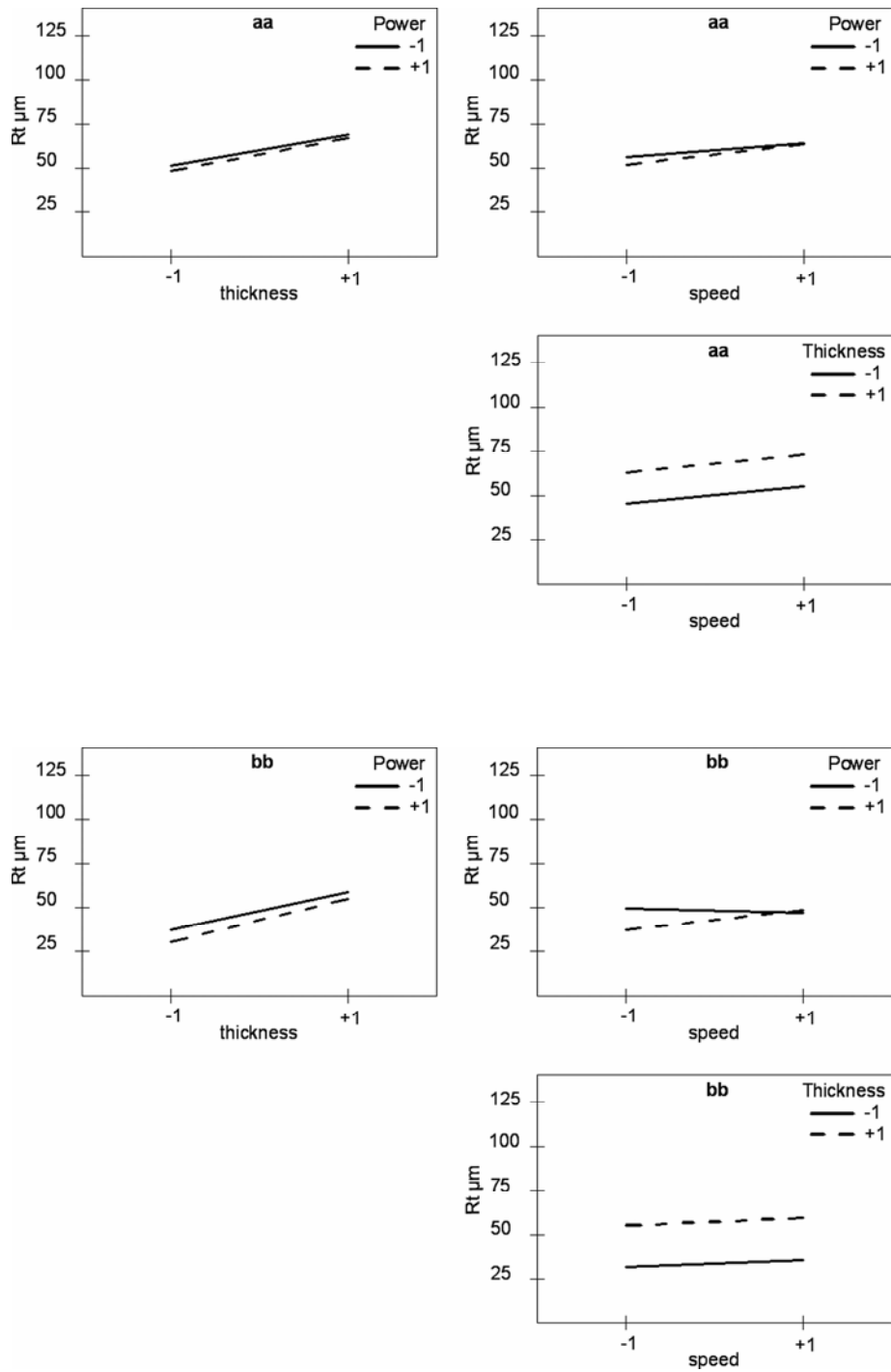


Figura 16 – Effetto dei parametri di processo sulla rugosità totale R_t delle superfici “aa” e “bb” dei campioni prodotti con l'intervallo granulometrico A.

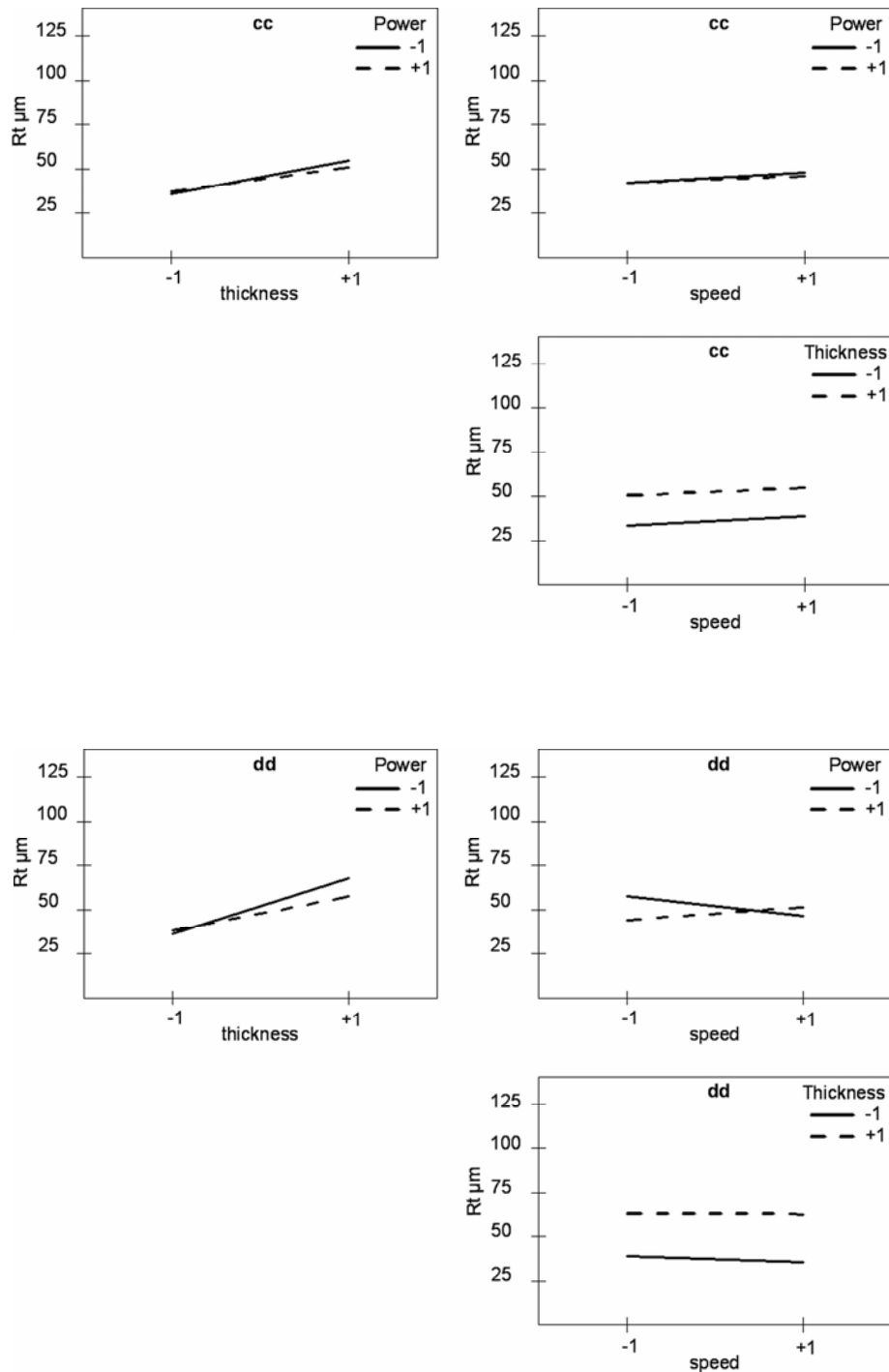


Figura 17 – Effetto dei parametri di processo sulla rugosità totale R_t delle superfici “cc” e “dd” dei campioni prodotti con l’intervallo granulometrico A.

Dall’analisi delle figure si può concludere che R_t aumenta all’aumentare dello spessore dello strato su tutte le superfici e all’aumentare della potenza sulla superficie “b”.

Nella figura 18 sono riportati i risultati dell’elaborazione statistica dei campioni A e C per evidenziare l’effetto dell’intervallo granulometrico, della potenza del laser e della velocità di scansione (in questo caso lo spessore dello strato è costante sul livello superiore).

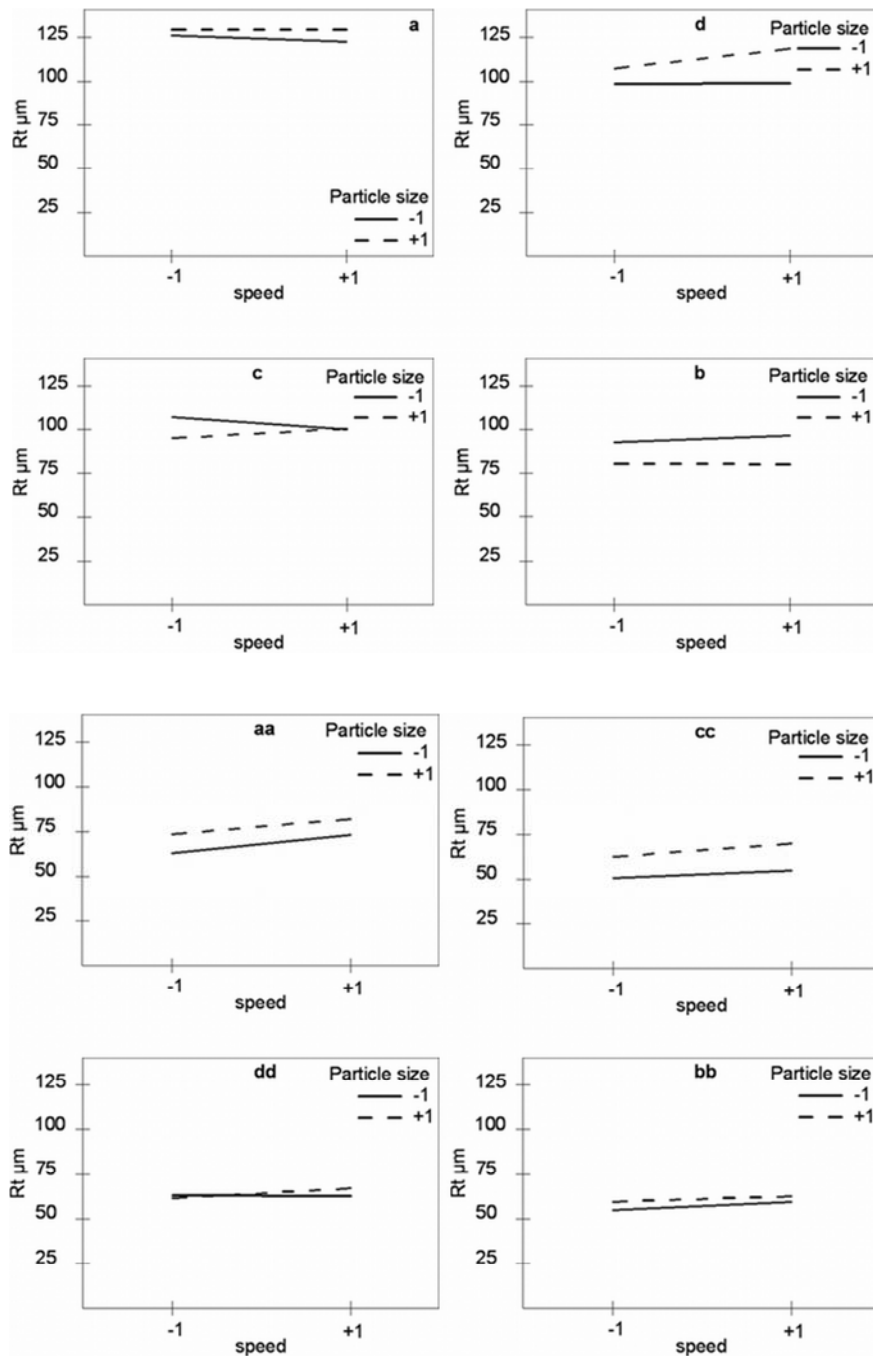


Figura 18 – Risultato dell’analisi statistica della rugosità totale dei campioni A e C.

Si può osservare che:

- i valori di Rt mostrano l’effetto della granulometria: sono in genere minori per i campioni A, salvo per le superfici che hanno un’inclinazione di 33° e 37° (“b” e “c”);
- l’effetto della granulometria è meno marcato per le superfici poco inclinate (“a”) e molto inclinate (“dd” e “bb”);
- velocità e potenza hanno un’influenza trascurabile. Si rileva un effetto della potenza sulle superfici “b” e “bb”.

Nella figura 19 sono riportati i risultati dell'elaborazione statistica dei campioni A e B per evidenziare l'effetto dell'intervallo granulometrico, della potenza del laser e della velocità di scansione (anche in questo caso lo spessore dello strato è costante sul livello superiore).

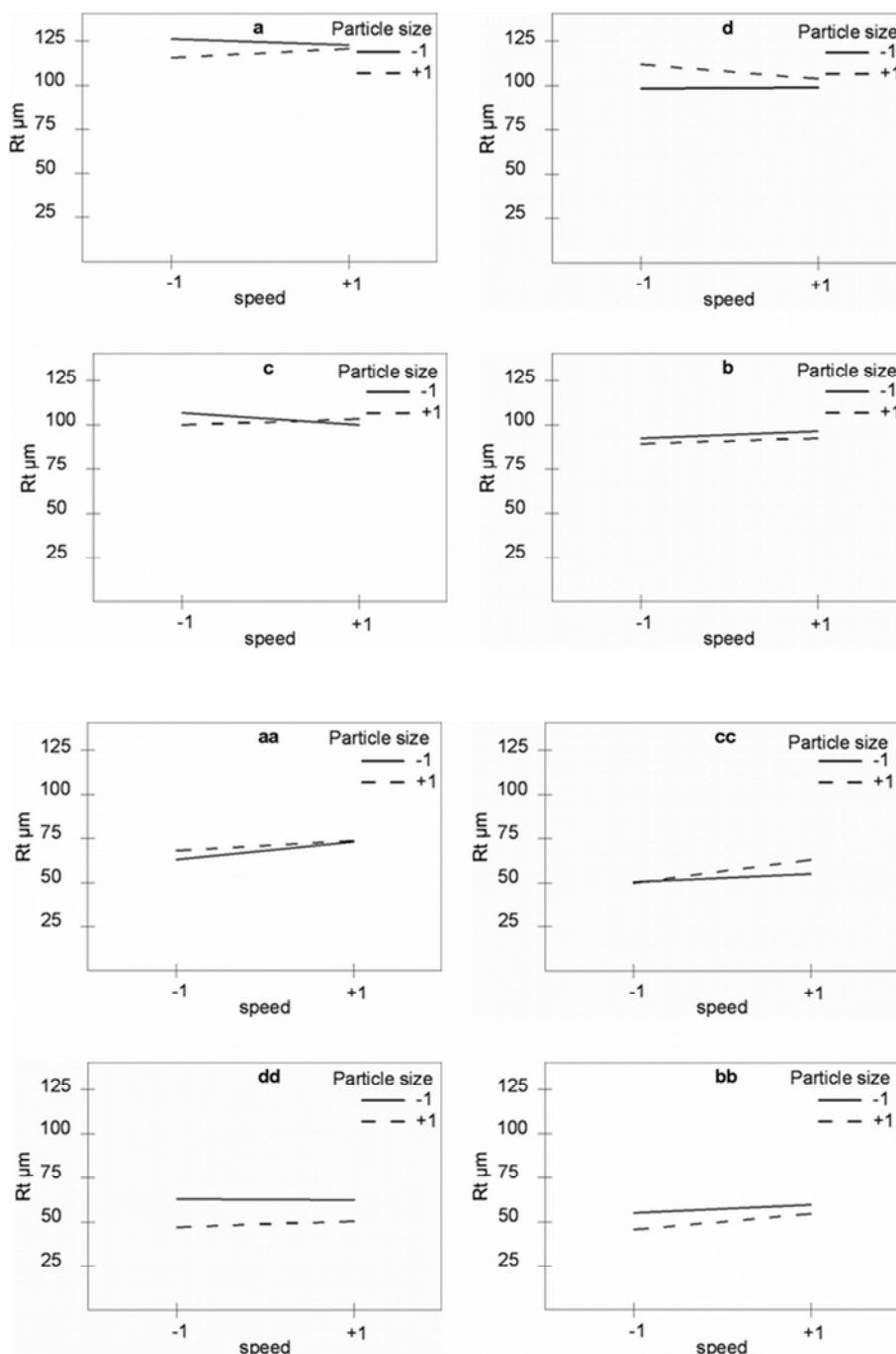


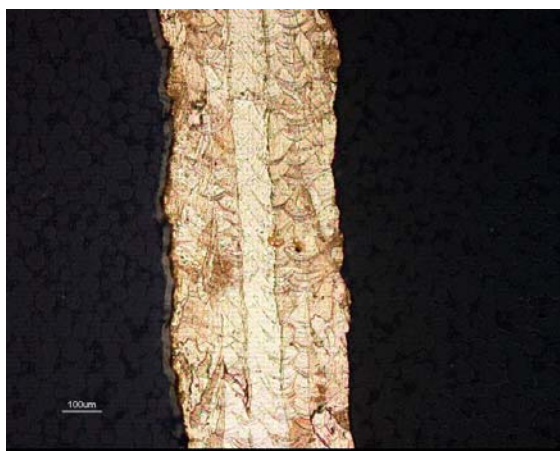
Figura 19 – risultato dell'analisi statistica della rugosità totale dei campioni A e B

Si può osservare che:

- i valori di rugosità R_t sono simili per A e B e sembrano scarsamente influenzati dalla granulometria;
- solo per le superfici più inclinate ("dd", "bb") si evidenzia un effetto della granulometria;
- su tali superfici inoltre i valori di rugosità siano inferiori per i campioni B;
- velocità e potenza hanno un'influenza trascurabile. Si rileva un effetto della potenza sulla superficie "b", verosimilmente relativo a quanto già osservato in sede di analisi dei campioni A singolarmente.

CONFRONTO FRA SLM E MICROFUSIONE

Al fine di apprezzare la differenza in termini di microstruttura tra gli articoli realizzati con l'SLM e gli articoli realizzati con le odierne tecnologie di produzione di gioielli vengono riportate di seguito la micrografia del campione B3 come esempio della superficie osservata in seguito a un processo SLM.



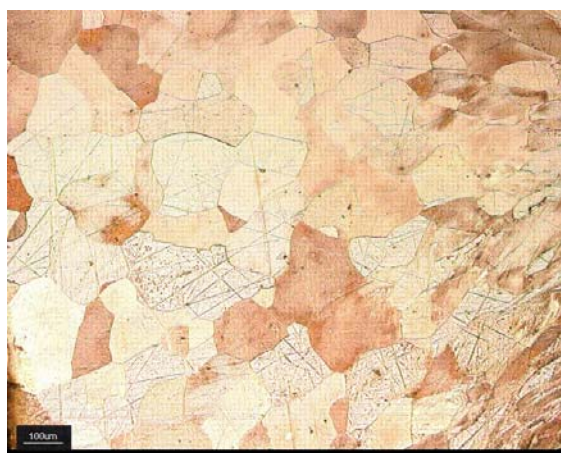
Sezione "bb"

Figura 20 – Sezione campione B3 dopo attacco metallografico.

Non risulta evidente la differenza del grano cristallino tra i 16 test.

In tutte le sezioni dei campioni analizzati si osserva che con la tecnologia SLM la dimensione del grano è piccola conseguenza dell'utilizzo di un laser con spot di 10 µm che fonde un layer di polvere di spessore infinitesimo e dunque la fusione coinvolge un volume molto piccolo di materiale.

Riportiamo anche le foto al microscopio metallografico di quanto osservato per i campioni realizzati in microfusione.



Sezione "bb" cera



Sezione "bb" resina

Figura 21 – Sezioni dopo attacco metallografico.

Risulta evidente la differenza del grano cristallino dei campioni realizzati con la tecnica SLM e il grano cristallino degli oggetti realizzati in microfusione. La dimensione del grano nei campioni realizzati con l'SLM è mediamente sull'ordine dei 10 micron mentre grano nei campioni realizzati in microfusione è mediamente sull'ordine dei 90 micron. La forma del grano delle leghe realizzate con l'SLM risulta essere colonnare.

Vengono quindi riportati in Tabella 5 i dati relativi al campione SLM realizzato nel test finale, con i parametri risultanti dall'analisi statistica effettuata, e ai campioni realizzati con la tecnica della fusione cera persa, in termini di rugosità superficiale.

	Microfusione Classica	Microfusione Diretta	SLM test finale
Superficie	Rt	Rt	Rt
a	14.6	35.7	59.1
b	13.0	20.4	22.1
c	10.8	23.0	25.2
d	15.9	20.4	33.7
aa	23.5	23.5	27.5
bb	26.6	18.6	26.5
cc	39.9	31.8	27.1
dd	31.9	44.9	29.1

Confrontando i valori di rugosità si denota che con la tecnica SLM si raggiungono valori di Rt prossimi ai campioni realizzati con la tecnica della fusione cera persa con modelli prototipati in resina e per alcune superfici quali “aa” “bb” “cc” e “dd” la rugosità superficiale può essere comparata ai campioni realizzati con la tecnica della fusione cera persa con modelli in cera.

Infine, in Tabella 6, sono riportati i dati relativi al confronto tra il campione SLM realizzato nel test finale e i campioni realizzati con la tecnica della fusione cera persa, in termini di densità, il carico di rottura e l’allungamento a rottura.

	Microfusione Classica	Microfusione Diretta	SLM test finale
Densità (g/cm³)	15.26	15.22	15.24
UTS (MPa)	414.9	395.9	474.2
ε (%)	42.4	38.5	33.5

Tutti i campioni hanno densità compresa fra 15.22 e 15.26 g/cm³, molto prossima alla densità teorica della lega e pertanto possiamo dedurre che la porosità residua sia molto ridotta. Dai dati ricavati dalle analisi appare chiaro che i campioni realizzati con la tecnica SLM manifestano una resistenza a rottura maggiore ma una duttilità inferiore rispetto i campioni realizzati con la tecnica della fusione cera persa.

CONCLUSIONI

Il presente studio mostra chiaramente la fattibilità della produzione di gioielli in lega di oro con la tecnica SLM. La selezione dei parametri di processo ottimali e dell’intervallo granulometrico consente di ottenere prodotti con densità molto prossima a quella reale e, quindi, privi di porosità anche micrometrica. Questo ha un effetto importante non solo sulla soundness del materiale, come dimostrato dalle prove di trazione, ma anche sulla possibilità di ottenere superfici esteticamente ottime, dopo avere eliminato l’inevitabile strato superficiale rugoso. E’ infatti impossibile ottenere una superficie liscia dopo SLM, per il peculiare meccanismo di produzione dei pezzi.

La morfologia superficiale risente dell’inclinazione della superficie rispetto al tavolo di lavoro, e dei parametri di processo. Mediante l’approccio del DOE è stato possibile individuare non solo l’effetto dei parametri di processo, ma anche selezionare quelli che consentono di ottenere la minore rugosità superficiale.

Un risultato importante è relativo all’effetto della granulometria della polvere utilizzata. A parità di energia specifica, la granulometria influenza la quantità di materiale interessata dall’apporto termico e, conseguentemente, la forma del cordone (pool) liquido, che ha riflessi importanti sulla morfologia della superficie.

Dal confronto tra la tecnologia SLM e la tecnica della fusione a cera persa si rileva una dimensione del grano inferiore nei campioni realizzati con SLM e questo può spiegare l'aumento del carico di rottura rilevato nel test finale. Si denotano, inoltre, valori di densità sullo stesso ordine di grandezza e valori di rugosità comparabili su superfici con un'inclinazione sotto un determinato angolo.

Questo lavoro rappresenta pertanto solo il punto di partenza nello studio e nell'approfondimento della tecnologia SLM applicata al settore della gioielleria che vedrà in futuro lo sviluppo di nuove indagini in relazione a nuove variabili quali, per esempio, la composizione chimica delle polveri.

BIBLIOGRAFIA

1. 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
2. I. Yadroitsev, Selective Laser Melting. Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders, 2009, ed. Lambert Academic Publishing (Germany)
3. J. P. Kruth and S. Kumar, Advanced Engineering materials 7(8)(2005)750
4. J. Antony, "Design of Experiments for Engineers and Scientists", ed. Butterworth-Heinemann, (United Kingdom), 2003