



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Report Esercitazione 2 - Group6 Fake-Ing - TAM

Marco Giancarli, Julien Schluchter, John Constantin, Marco Casalbore

Sessione 2023/2024

1 Pianificazione della produzione con Selective Laser Melting

Per pianificare la produzione del lotto di 28 eliche con tecnologia SLM, la prima fase ha richiesto la selezione della macchina da utilizzare. Dopo una ricerca online, è emerso che la SLM500 della Solutions era la scelta più idonea e bilanciata per raggiungere gli obiettivi prefissati in questo progetto (il data-sheet del macchinario viene riportato alla fine del documento).

Nel valutare le specifiche più cruciali, sono state prese in considerazione la dimensione della tavola di fabbricazione ($500 \times 260 \times 365 \text{ mm}$), lo spessore del layer compreso nell'intervallo $[20, 90] \mu\text{m}$, e la velocità di costruzione, che può raggiungere fino a $171 \text{ cm}^3/\text{h}$ a seconda del materiale e della geometria del pezzo.

Attraverso l'utilizzo del software Meshmixer, sono state prese decisioni cruciali per la produzione delle eliche, mantenendo come obiettivo primario la massimizzazione dell'accuratezza del foro e la minimizzazione della rugosità sulle pale. Inoltre, come obiettivo specifico di progetto, è stata posta l'attenzione sulla minimizzazione del materiale totale impiegato durante il processo di fabbricazione. Delle immagini esemplificative sono riportate in fondo (figura 3, figura 4).

In particolare le scelte fondamentali sono state:

- Angle thresh = 40°
- Contact tolerance = 11
- y-offset = 3 mm
- Max angle = 40°
- Altezza del layer, $L_t = 0.025 \text{ mm}$
- Diametro post = 1 mm
- Diametro tip = 0.5 mm
- Diametro base = 3 mm

I parametri che influenzano in modo significativo la quantità di materiale utilizzato sono senza dubbio spessore del layer e la quantità di supporti. I valori selezionati mirano a raggiungere un equilibrio ottimale tra robustezza e corretta funzionalità dell'oggetto, cercando contemporaneamente di minimizzare la quantità totale di materiale impiegato.

Per quanto concerne i valori dei diametri di post, tip e base relativi ai supporti, sono state esplorate diverse combinazioni di tali parametri. La combinazione fornita è stata selezionata dopo una serie di

prove in quanto sembrava offrire il miglior risultato in termini di affidabilità del supporto e di efficiente utilizzo del materiale.

Una delle metriche fondamentali per valutare l'efficacia del progetto è il tempo totale di fabbricazione t_p . Per condurre un'analisi dettagliata in merito, sono state acquisite le misure del modello .STL dell'elica e dei suoi supporti mediante l'utilizzo del software 3D-Tool (Figure 1, Figure 2). Questo passo è stato essenziale per applicare le formule fornite e ottenere informazioni cruciali sul tempo di fabbricazione complessivo:

- Superficie modello, $S_m = 4750.54 \text{ mm}^2$
- Volume modello, $V_m = 3228.41 \text{ mm}^3$
- Superficie supporti, $S_s = 6484.97 \text{ mm}^2$
- Volume supporti, $V_s = 1391.23 \text{ mm}^3$
- n° di layer modello, $n_m = 322$
- n° di layer supporti $n_s = 384$

Altri parametri fondamentali sono stati estratti dal data-sheet del macchinario e/o impostati a valori adeguati:

- Hatch spacing, $h_s = 0.1 \text{ mm}$
- Tempo di recoating (per layer), $t_{recoating} = 12 \text{ sec}$
- Velocità massima di scansione, $v_{max} = 10 \text{ m/s}$
- Velocità infilling supporti, $v_{is} = 5 \text{ m/s} = 5000 \text{ mm/s}$
- Velocità infilling modello, $v_{im} = 2 \text{ m/s} = 2000 \text{ mm/s}$
- Velocità contouring supporti, $v_{cs} = 6 \text{ m/s} = 6000 \text{ mm/s}$
- Velocità contouring modello, $v_{cm} = 4 \text{ m/s} = 4000 \text{ mm/s}$

Si è dedicata particolare attenzione alla selezione delle velocità di scansione, seguendo scrupolosamente le indicazioni fornite dal manuale della stampante, il quale suggerisce una velocità massima di circa 10 m/s. È importante sottolineare che, per la creazione del modello tramite la tecnologia SLM, si è adottato un approccio opposto rispetto a quanto avviene con l'FDM. In questo caso, la velocità di riempimento del modello è stata impostata in maniera inferiore rispetto a quella del contouring. Questa scelta è motivata dal fatto che, trattandosi di un processo metallurgico (si presume l'uso di alluminio), è fondamentale costruire con precisione l'interno del modello prima di accelerare sul contorno.

Poiché un aumento della velocità di stampa può influire negativamente sulla qualità del risultato, si è optato per velocità ridotte nelle parti e nelle fasi di stampaggio che richiedono una maggiore qualità superficiale e funzionale, o che sono più esposte al rischio di rottura in assenza di attenta conformità alle tolleranze geometriche. Basandosi su queste considerazioni, le parti più critiche sono naturalmente legate al modello, in particolare ai contorni, che devono essere eseguiti con estrema precisione. Per quanto riguarda i supporti, invece, si è scelto di aumentare ragionevolmente la velocità al fine di risparmiare tempo di processo, poiché non richiedono una qualità superficiale particolarmente elevata. Attraverso un'analisi del modello .STL, è stato possibile osservare come siano necessari due contorni distinti, per questo motivo:

- Numero contour modello, $np_m = 2$
- Numero contour supporti, $np_s = 2$

La formula di riferimento per il calcolo del tempo totale di fabbricazione t_p è:

$$t_p = t_0^{design} + t_0^{setup} + t_{cm} + t_{im} + t_{cs} + t_{is} + t_{recoatingTOT} + t_{pp} \quad (1)$$

Il tempo di setup del macchinario ed il tempo di design del modello vengono trascurati non avendo a disposizione informazioni sufficienti per effettuarne una stima affidabile.

Per quanto riguarda il tempo di fabbricazione del contour del modello t_{cm} si ha:

$$t_{cm} = \frac{np_m \cdot S_m}{L_t \cdot v_{cm}} = \frac{2 \cdot 4750.54}{0.025 \cdot 4000} = 95.01 \text{ sec} \quad (2)$$

ed invece per quello dei supporti t_{cs} :

$$t_{cs} = \frac{np_s \cdot S_s}{L_t \cdot v_{cs}} = \frac{2 \cdot 6484.97}{0.025 \cdot 6000} = 86.47 \text{ sec} \quad (3)$$

Per quanto riguarda il tempo di fabbricazione dell'infill del modello t_{im} si ha:

$$t_{im} = \frac{(V_m - S_m \cdot np_m \cdot h_s)}{h_s \cdot L_t \cdot v_{im}} = \frac{(3228.41 - 4750.54 \cdot 2 \cdot 0.1)}{0.1 \cdot 0.025 \cdot 2000} = 455.68 \text{ sec} \quad (4)$$

ed il tempo di fabbricazione dell'infill dei supporti t_{is} :

$$t_{is} = \frac{(V_s - S_s \cdot np_s \cdot h_s)}{h_s \cdot L_t \cdot v_{is}} = \frac{1391.23 - 6484.97 \cdot 2 \cdot 0.1}{0.1 \cdot 0.025 \cdot 5000} = 7.54 \text{ sec} \quad (5)$$

Per il tempo di recoating dovuto al passaggio della blade, $t_{recoatingTOT}$, si ha:

$$t_{recoatingTOT} = N_{layer} \cdot t_{recoating} = 384 \cdot 12 = 4608 \text{ sec} \quad (6)$$

Per determinare il tempo dedicato al post-processing, t_{pp} , si effettua una stima dei tempi totali attraverso un'analisi qualitativa. Le operazioni chiave prese in considerazione includono la rimozione dei supporti, la levigatura, la rifinitura superficiale e la sabbiatura (azioni particolarmente necessarie per la parte in down-skin, data la criticità prodotta da questa tecnologia e la presenza dei supporti) ed infine il controllo qualità del lotto e la pulizia finale.

$$t_{pp} \simeq t_{rs} + t_l + t_s + t_{cq} + t_{pf} \simeq 7200 + 3600 + 7200 + 1800 + 1800 \simeq 15120 \text{ sec} \quad (7)$$

Sfruttando i dati ottenuti, è possibile procedere al calcolo di una stima del tempo totale di processo. È importante notare che i tempi individuali di fabbricazione devono essere moltiplicati per 28, poiché il lotto di produzione consiste in 28 eliche. Pertanto, l'equazione diventa:

$$\begin{aligned} \Rightarrow t_p &\simeq t_{cm} \cdot 28 + t_{im} \cdot 28 + t_{cs} \cdot 28 + t_{is} \cdot 28 + t_{recoatingTOT} + t_{pp} \simeq \\ &\simeq 95.01 \cdot 28 + 455.68 \cdot 28 + 86.47 \cdot 28 + 7.54 \cdot 28 + 4608 + 15120 = \\ &= 37779.6 \text{ sec} = 10 \text{ ore } 50 \text{ min} \end{aligned} \quad (8)$$

2 Confronto SLM - FDM

Per valutare i due processi di produzione, consideriamo diversi criteri.

Il tempo di produzione mediante FDM è sicuramente più lungo rispetto a quello in SLM: si parla di poco meno di 11 ore per la seconda contro i 3g 8h 21m della prima. Si prevede dunque che FDM richiederà più tempo per completare il lotto di eliche rispetto a SLM.

Il costo del materiale per FDM è generalmente inferiore rispetto a SLM. Tuttavia, dovremo considerare il tempo di produzione aggiuntivo di FDM e il consumo di energia associato. Un'analisi dettagliata dei costi dovrebbe essere condotta per determinare quale processo è più economico per la produzione in questione (al quale ovviamente va aggiunto il costo dell'acquisto del macchinario nel caso in cui non fosse già presente in azienda).

La qualità superficiale e la precisione dimensionale delle eliche prodotte con SLM sono spesso superiori rispetto a FDM: SLM offre una maggiore risoluzione e dettaglio, mentre FDM potrebbe mostrare strati visibili sulla superficie del prodotto.

In conclusione, entrambi i processi di produzione hanno vantaggi e svantaggi. SLM offre una maggiore precisione e qualità, ma a un costo maggiore e con tempi di produzione più brevi. FDM è più economico ma può sacrificare la qualità. La scelta tra i due dovrebbe basarsi sulle esigenze specifiche del progetto e sui requisiti di qualità del prodotto finale.

3 Immagini

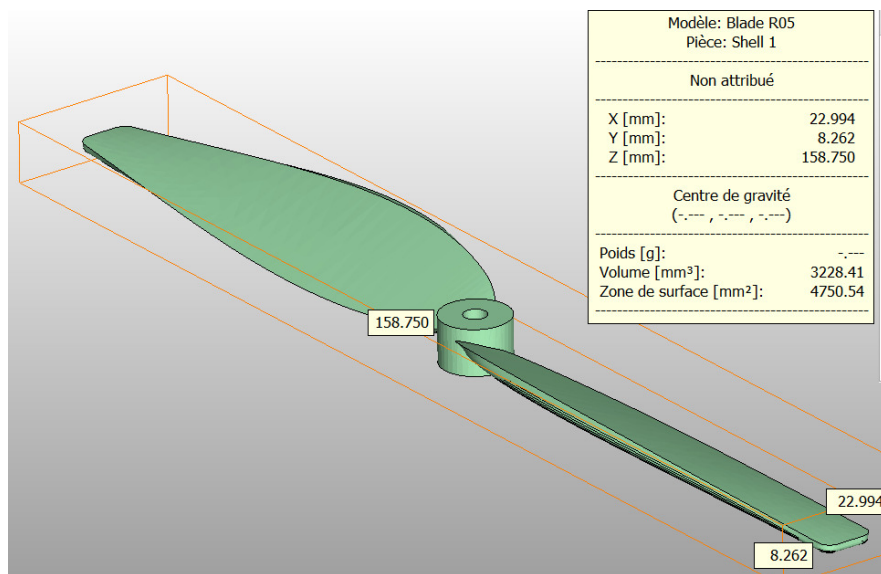


Figure 1: Misure effettuate con software 3D-Tool per il modello.

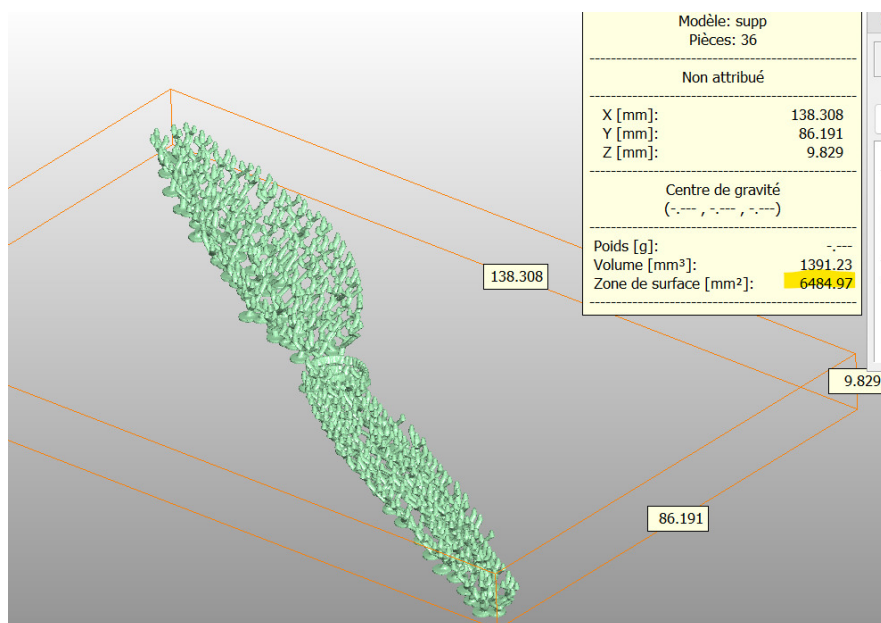


Figure 2: Misure effettuate con software 3D-Tool per i supporti.

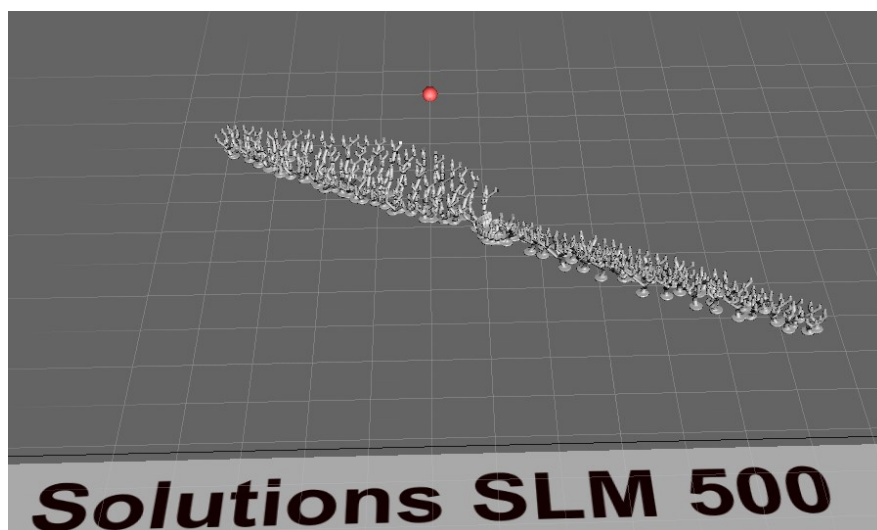


Figure 3: Creazione dei supporti per modello della singola blade mediante Meshmixer.

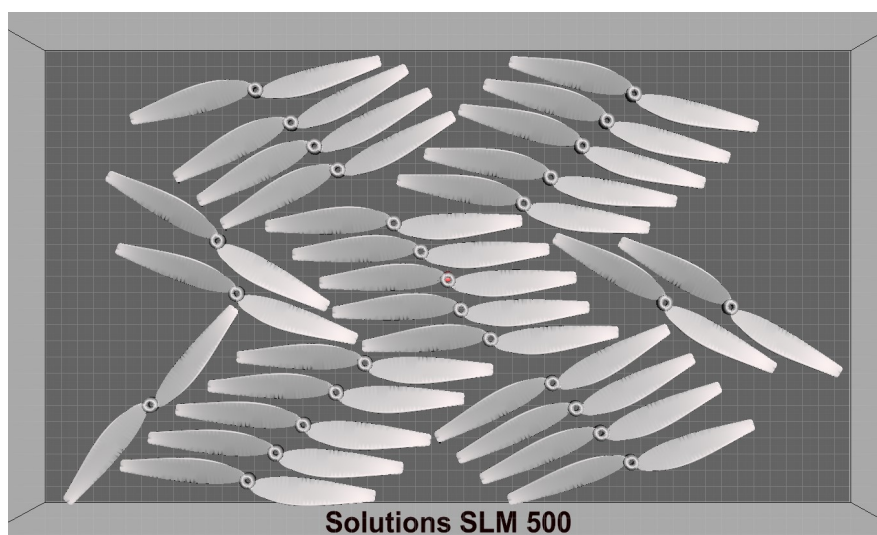


Figure 4: Intavolazione dell'intero lotto di eliche (28 pezzi) mediante software Meshmixer.

Selective Laser Melting

**Sistema multilaser ottimizzato
per volumi elevati**



SLM[®] 500

Selective Laser Melting Machine

Produzione additiva metallica ad alto volume

Produttività quadruplicata

dai pionieri della tecnologia multi-laser

Alto rendimento

grazie alle funzioni automatizzate

Gestione della polvere automatizzata

in atmosfera inerte

Le prestazioni più alte e sicure disponibili nella sua categoria con riduzione dei costi

SLM®500 è progettata per garantire la sicurezza dell'operatore e ridurre i costi operativi complessivi.

Il materiale e l'operatore sono separati grazie al sistema di movimentazione della polvere a circuito chiuso che include un setaccio automatico.

I tempi di inattività della macchina sono ridotti al minimo grazie al doppio cilindro di costruzione per massimizzare la produttività e ridurre il costo-pezzo.

La SLM®500, primo sistema quad-laser sul mercato, è l'ammiraglia per la produzione additiva metallica ad alto volume.

Tecnologia di stratificazione multilaser brevettata per un'alta qualità dei materiali

In qualità di leader nel campo della fusione laser selettiva, SLM Solutions si concentra sia sull'aumento della produttività che sulle caratteristiche dei materiali.

I brevetti SLM includono una strategia di scansione che minimizza l'interferenza dei fumi con il laser e un metodo specifico per la zona di overlap.

I test dimostrano che la densità e le proprietà meccaniche restano invariate e ottimali in ogni zona della tavola.

L'esatta sovrapposizione laser viene studiata strato per strato per evitare segni visibili o punti meccanicamente deboli nel componente finito.

Efficiente, affidabile, ripetibile

SLM[®] 500

Selective Laser Melting Machine



Specifiche tecniche:

Volume di costruzione	500 x 280 x 365 (h) mm ridotti dallo spessore della tavola
Configurazione laser	Doppia (2x 400W o 2x 700W) Quad (4x 400W o 4x 700W) IPG laser a fibra
Velocità di costruzione	fino a 171 cm ³ /h*
Spessore layer	20 µm - 90 µm, altri disponibili a richiesta
Dimensione minima	150 µm
Diametro raggio laser	80 - 115 µm
Velocità massima di scansione	10 m/s
Consumo medio di gas inerte nel processo	16 l/min (Argon)
Consumo medio di gas inerte in scarico	250 l/min (Argon)
Tensione di alimentazione/Potenza assorbita	400 Volt 3NPE, 63 A, 50/60 Hz, 8 - 10 kW
Requisiti aria compressa	ISO 8573-1:2010 [1:4:1] 7 bar
Dimensioni	6080 x 2530 x 2620 mm

*in base al materiale e alla geometria del pezzo

Dimensioni camere



1 SLM®500 per produzioni in serie

La SLM®500 è ottimizzata per componenti di alta qualità con particolare attenzione alla ripetibilità e all'eliminazione dei tempi morti. Il sistema brevettato di flussaggio del gas, ottimizzato attraverso una parete sinterizzata, previene distorsioni del fascio laser per avere qualità costante.

Una maggiore produttività è fondamentale per le macchine orientate alla produzione e SLM®500 è disponibile con due o quattro laser che operano in modo indipendente o in parallelo.

Gli utenti hanno la possibilità di scegliere la potenza del laser (400W o 700W) e lo spessore dello strato per una maggiore produttività.

2 Il filtro permanente migliora le prestazioni e riduce i costi

Il filtro permanente intrappola la polvere di scarto che viene rivestita con un inibitore e conservata in un bidone per lo smaltimento a secco, mentre il gas pulito ritorna alla camera di processo, stabilizzando il flusso, per garantire la qualità delle parti anche nelle lavorazioni più lunghe.

L'eliminazione dei filtri consumabili, utilizzati in precedenza, aumenta la sicurezza migliorando i tempi di attività delle macchine e riducendo i costi.

Gli operatori non hanno più bisogno di lavare i filtri e la gestione dei rifiuti a secco è semplificata.

3 PSV - unità di movimentazione della polvere a ciclo chiuso

L'unità PSV_Powder Supply Vacuum protegge l'operatore dall'esposizione alla polvere e mantiene il materiale sotto un'atmosfera di gas inerte durante tutto il processo di movimentazione.

La PSV è dotata di un serbatoio da 90 litri per il precaricamento e lo stoccaggio di polvere metallica.

Il sistema automatico setaccia il materiale prima del trasporto alla macchina, raccoglie la polvere di overflow da restituire al setaccio durante il processo e si collega anche alla stazione di estrazione PRS per la rimozione della polvere dopo il completamento di un processo.

4 Unità di estrazione PRS

La PRS_Part Removal Station riduce i tempi di inattività della macchina consentendo l'estrazione di un pezzo finito mentre il processo successivo è già avviato.

I cilindri di costruzione con i pezzi finiti vengono trasportati fuori dalla SLM®500 per il raffreddamento e la rimozione della polvere in un'atmosfera di gas inerte.

I guanti integrati permettono di rimuovere il materiale senza esporre gli operatori alla polvere metallica.

Un tubo sottovuoto, situato direttamente nella camera PRS, restituisce la polvere inutilizzata alla PSV per setacciarla e utilizzarla nel processo successivo.



Garanzia di qualità del processo di fusione laser selettiva

Il sistema avanzato di controllo & qualità permette di avere una documentazione dettagliata sulla verifica dei processi. Temperatura della camera, ossigeno, flusso di gas e altre variabili sono costantemente misurati e registrati. Questo elevato livello di controllo si traduce in particolari di alta qualità e dalle caratteristiche meccaniche omogenee.

Layer Control System (LCS)

Per garantire una qualità costruttiva ripetibile e affidabile, il Sistema LCS controlla la precisione di ogni strato monitorando il letto di polvere e rilevando possibili irregolarità sulla superficie.

Melt Pool Monitoring (MPM)

Melt Pool Monitoring (MPM) è uno strumento opzionale che rileva anomalie e difetti di fusione nei componenti. I dati estrapolati possono essere utilizzati per sviluppare e ottimizzare i parametri di processo. Nella produzione di parti critiche per la sicurezza, i dati raccolti servono come documentazione per la garanzia della qualità.

Laser Power Monitoring (LPM)

Laser Power Monitoring (LPM) è un sistema opzionale di monitoraggio che misura e documenta costantemente la potenza laser emessa durante tutto il processo produttivo.

L'innovazione è di serie

SLM Solutions è conosciuta come leader dell'innovazione nella fusione laser selettiva, essendo stata la prima a introdurre sistemi di produzione multi-laser. Il sistema di distribuzione bi-direzionale della polvere per ridurre i tempi di produzione, la gestione aperta che consente l'uso di materiali di qualsiasi fornitore e l'accesso completo ai parametri di processo per lo sviluppo personalizzato sono di serie su ogni macchina SLM Solutions.

Materiali altamente qualificati

SLM offre un know-how che consente di ottenere specifiche esclusive e proprietà meccaniche uniche attraverso la combinazione di macchina, parametri e polveri certificate per composizione e qualità. I nostri esperti dei materiali collaborano costantemente con i clienti per sviluppare nuove leghe ottimizzate per la fusione laser selettiva.

Condivisione delle conoscenze degli esperti

Il team di ingegneria, formazione e assistenza di SLM Solutions mette il successo dei clienti al primo posto per garantire che il loro ritorno sull'investimento sia massimizzato. I nostri esperti lavorano a fianco dei clienti in ogni fase del loro percorso additivo, dall'identificazione e sviluppo delle applicazioni alla produzione seriale completa.



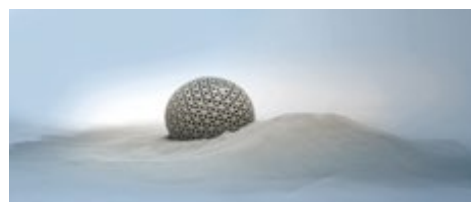
SLM Solutions - Pionieri della tecnologia, leader nell'innovazione

SLM Solutions ha contribuito a inventare il processo di fusione laser selettiva a letto di polvere, ed è stata la prima ad offrire sistemi multi-laser con caratteristiche brevettate di qualità, sicurezza e produttività.

Gli esperti di SLM Solutions lavorano con i clienti in ogni fase del processo per fornire supporto e condivisione delle conoscenze che elevano l'uso della tecnologia e garantiscono ai clienti un successo a lungo termine e un ritorno massimizzato sull'investimento.

Grazie al software SLM Solutions e alla garanzia di qualità della polvere, la tecnologia SLM® apre nuove libertà geometriche che possono consentire la costruzione alleggerita, integrare canali di raffreddamento interni o ridurre il time-to-market.

SLM Solutions Group AG, società quotata in borsa, si occupa esclusivamente di produzione additiva in metallo e ha sede in Germania con uffici in Cina, Francia, India, Italia, Russia, Singapore e Stati Uniti e una rete globale di partner commerciali.



Rivenditore SLM Solutions per l'Italia

OVERMACH

www.overmach.it
additive@overmach.it

SLM Solutions Group AG | Estlandring 4 | 23560 Lübeck | Germany
+49 451 4060 - 3000 | info@slm-solutions.com | slm-solutions.com

SLM is a registered trademark by SLM Solutions Group AG, Germany

