

## Il punto giusto - trova i parametri di processo ideali per i tuoi componenti metallici in AM

Marc Saunders, Director of AM Applications in Renishaw, spiega come trovare i parametri di processo ideali per i tuoi componenti metallici stampati in 3D. Questo articolo mostra i fattori che guidano la ricerca di parametri per la fusione laser a letto di polvere (LPBF), e come questi definiscano una 'finestra operativa' all'interno della quale lavorare. Verrà inoltre analizzata la sensibilità del processo ai cambiamenti alla geometria del pezzo che potrebbero spingerci verso determinate scelte in termini di parametri applicativi specifici.

La LPBF è una tecnica di Additive Manufacturing (AM) molto versatile che consente di produrre componenti metallici complessi direttamente da file CAD, senza attrezzature costose e con scarti ridotti al minimo. La scelta dei parametri di processo utilizzati per fondere e solidificare la polvere metallica è fondamentale, poiché sia l'integrità che la resistenza della lega risentono della sua risposta termica. Selezionare parametri adatti al materiale utilizzato e allo specifico componente da costruire è fondamentale per una lavorazione riuscita, specialmente nelle produzioni in serie.

### Panoramica sulla LPBF

La fusione laser a letto di polvere funziona focalizzando un potente fascio laser a fibra di itterbio su un punto di dimensioni ridotte contenente però un'intensità di energia sufficiente a fondere completamente un sottile strato di polvere metallica. Una coppia di specchi galvanometrici articolati consente di spostare il punto laser sul letto di polvere, per fondere la polvere e creare una pista di metallo solido che si salda in modo sicuro al metallo adiacente e allo strato sottostante. Un flusso di gas di schermatura attraversa l'intera piastra di costruzione per proteggere il metallo caldo dall'ossidazione e rimuovere in sicurezza le emissioni di processo.

Ogni pista di fusione è leggermente più ampia del punto laser (fino a 2 - 3 volte il diametro del punto), mentre il calore del laser viene condotto nelle particelle di polvere adiacenti incorporandole nella pozza di fusione in movimento. Le piste di fusione si uniscono e si sovrappongono per creare uno strato solido che corrisponde a una sezione di componente. Le piste di fusione devono inoltre essere abbastanza profonde per rifondere parzialmente lo strato sottostante e formare una struttura solida completamente densa. In questo modo, il componente viene costruito sezione per sezione.

### Fusione laser continua e modulata

Due sono le tecniche principali utilizzate per fondere la polvere: scansione continua o modulata. In modalità continua, come suggerisce il nome, l'energia laser viene erogata continuamente per fondere la polvere, guidando il fascio laser avanti e indietro sulla superficie del letto di polvere per solidificare il metallo. Le linee di scansione si sovrappongono in modo che ogni successivo passaggio del laser rifonda la linea di scansione precedente, creando una massa solida di materiale saldato.

In modalità modulata, i laser operano in modo leggermente diverso. In questo caso il laser viene attivato e disattivato, creando una serie di esposizioni separate da una breve pausa (da 10 a 20 microsecondi). Ogni esposizione è parzialmente sovrapposta a quella precedente. Esse possono formare linee di scansione analoghe, che si spostano con efficienza sul letto di polvere per solidificare gran parte del componente.

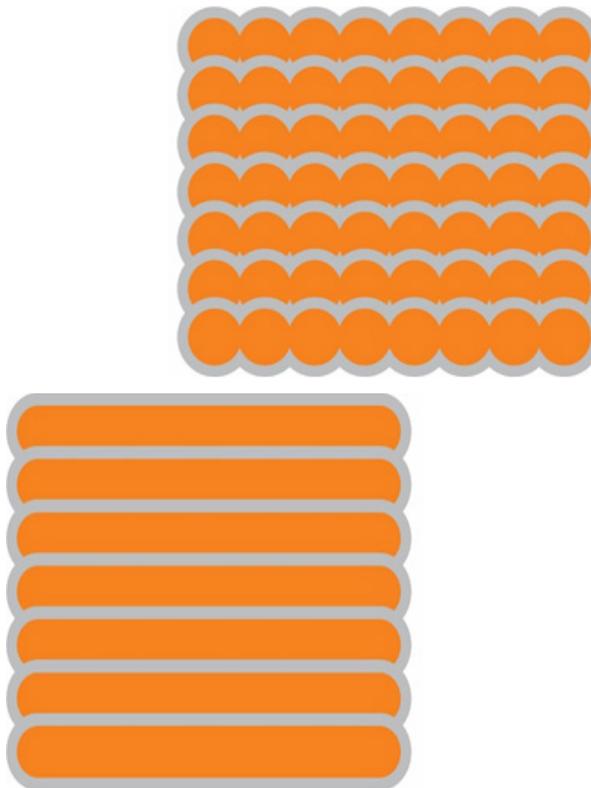


Figura 1 - La scansione laser continua (in basso a sinistra) si avvale di una serie di linee di scansione sovrapposte, ognuna formata con il laser costantemente attivato. I laser modulati ottengono lo stesso effetto con una serie di esposizioni sequenziali (in alto a destra).

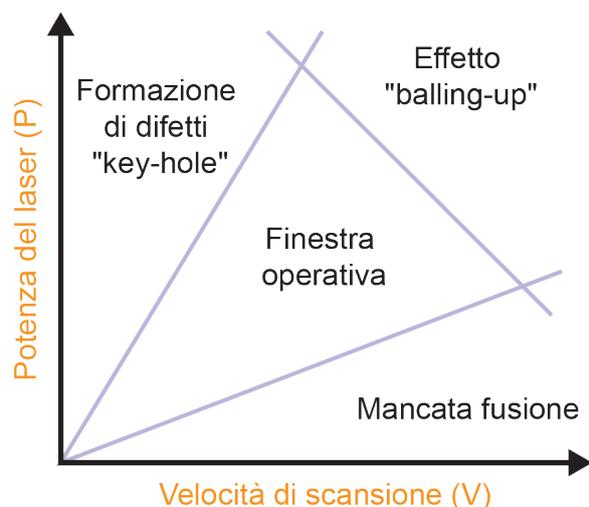


Figura 2 - grafico della potenza laser a fronte della velocità di scansione – variazione dei risultati del processo in funzione dei parametri scelti.

## Nozioni di base sui parametri di processo

La modalità con la quale l'energia laser viene trasferita sul letto di polvere è controllata dai parametri di processo. Essi definiscono quanta energia venga applicata e con che velocità. I parametri critici sono:

- Potenza del laser: l'energia totale erogata dal laser nell'unità di tempo.
- Dimensioni del punto: il diametro del fascio laser focalizzato - può essere fisso o programmabile in funzione del sistema di messa a fuoco della macchina.
- Velocità di scansione: la velocità alla quale il punto si sposta sul letto di polvere lungo un vettore di scansione - su un sistema con laser modulato, è definita dalla distanza tra i punti e dal tempo di esposizione.
- Distanza fra linee di scansione: la spaziatura tra vettori di scansione adiacenti, studiata per consentire un certo grado di rifusione del tracciato di saldatura precedente e garantire la piena copertura della regione da fondere.
- Spessore di strato: la profondità di ogni nuovo strato di polvere da fondere.

Ciascuno di questi parametri può essere regolato autonomamente, il che fa della selezione dei parametri un problema a più variabili.

## Individuazione della 'finestra operativa'

La prima considerazione durante la scelta del parametro è ottenere un componente consistente e completamente denso. La densità del componente è un indicatore fondamentale della qualità di fusione: se il componente è poroso, è improbabile che presenti le caratteristiche richieste di resistenza, duttilità, resistenza a fatica e deformazione differita. Ma, con una tale quantità di parametri con cui giocare, come scegliere la combinazione migliore?

La semplificazione può aiutare. Per qualsiasi costruzione data, sia la chimica che la distribuzione delle particelle di polvere sono elementi fissi. È probabile che anche lo spessore dello strato sia prefissato in base alla risoluzione e alla finitura superficiale richiesta per il nostro componente. Se si fissano anche le dimensioni del punto laser, (che su molte macchine non possono essere modificate una volta iniziata la costruzione), restano la potenza, la velocità e la distanza tra linee di scansione.

La seguente spiegazione è adattata dal lavoro presentato in "*Towards optimal processing of additive manufactured metals for high strain rate properties*", Robert M. Suter, He Liu, A.D. (Tony) Rollett, presentato al SSSAP di Chicago nell'aprile del 2017. <sup>[1]</sup>

Può essere utile in questo senso tracciare i parametri scelti in un grafico P-V, con la potenza (V) a fronte della velocità (V). Il risultato del processo risente dei parametri scelti, come mostrato nella figura 2.

Se la scansione è troppo veloce con una potenza troppo bassa, ci saranno regioni del componente che non si fondono completamente, con conseguenti porosità da 'mancata fusione'. Per contro, applicando troppa potenza per la velocità prescelta, la pozza di fusione potrebbe surriscaldarsi, causando una penetrazione dell'energia a maggiore profondità e quindi la formazione di difetti cosiddetti "key-hole".

Tra questi due estremi esiste una 'finestra operativa' nella quale si ottiene una densità soddisfacente del componente. In questo caso, l'energia del laser è sufficiente a fondere completamente la polvere e il metallo sottostante, senza penetrazione eccessiva.

La figura 2 suggerisce che sia possibile aumentare sia la potenza che la velocità per realizzare costruzioni più veloci, e fino a un certo punto questo è vero. Tuttavia, ci sono limiti in questo senso, oltre i quali il comportamento della pozza di fusione diventa instabile e si ottiene un effetto di cordonatura noto come "balling up". Sarà inoltre possibile notare una maggiore formazione di lapilli al crescere della potenza del laser.

## Lavorazione efficiente

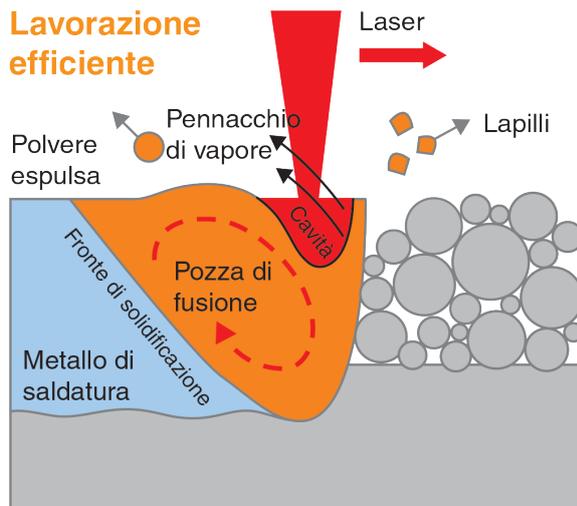


Figura 3 - Lavorazione efficiente con una combinazione ottimale di velocità e potenza, che crea una pozza di fusione stabile in grado di penetrare alla profondità corretta.

## Lavorare all'interno della 'finestra operativa'

All'interno della 'finestra operativa' centrale sul grafico P-V in Figura 3, la giusta combinazione tra velocità e potenza genera una pozza di fusione stabile di dimensioni ottimali. È qui che l'energia del laser viene assorbita con efficienza dalla polvere, creando una pozza di fusione di profondità sufficiente a fare sì che la fusione con lo strato sottostante sia solida, senza rifusioni eccessive.

In questa zona operativa, la pressione differenziale generata dal laser crea una cavità poco profonda. Il laser riscalda la faccia anteriore di questa cavità mentre si sposta, creando un pennacchio di vapori di metallo che viene eiettato perpendicolarmente alla superficie - ovvero verso l'alto e all'indietro. Questa cavità poco profonda non consente riflessioni interne, quindi non c'è ulteriore fusione. L'energia termica viene condotta all'interno della pozza di fusione, dove è presente una certa quantità di flusso turbolento dovuto ai gradienti di temperatura elevati al suo interno e alla tensione superficiale. Questo flusso ha come risultato l'eiezione di una certa quantità di materiale sotto forma di lapilli di saldatura.

Il pennacchio di vapori di metallo in movimento crea un ambiente attorno alla pozza di fusione che è analogo a una perturbazione. Può rimuovere la polvere presso il tracciato di saldatura attraendola verso il fascio laser a causa dell'effetto di Bernoulli, per poi eiettarla verso l'esterno. Parte di questo materiale verrà riscaldata mentre attraversa il laser, mentre il resto viene soffiato attorno dal flusso di gas indotto sotto forma di 'venti' adiacenti al fascio laser.

## Mancata fusione

Utilizzare meno potenza per una data velocità fa sì che la pozza di fusione sia più piccola. Questo ha come probabile conseguenza una diminuzione della turbolenza e dei lapilli generati, grazie alla solidificazione più rapida. Inoltre, il pennacchio di vapore sarà meno vigoroso, quindi anche la rimozione della polvere nelle vicinanze risulterà ridotta.

Purtroppo però, la minore energia del laser potrebbe causare una penetrazione di profondità insufficiente a fondere completamente lo strato di polvere e la superficie superiore del metallo solido sottostante. La conseguenza è la mancata fusione della polvere sottostante, che causa porosità eccessive e rischi di distacco, come da Figura 4.

## Penetrazione insufficiente

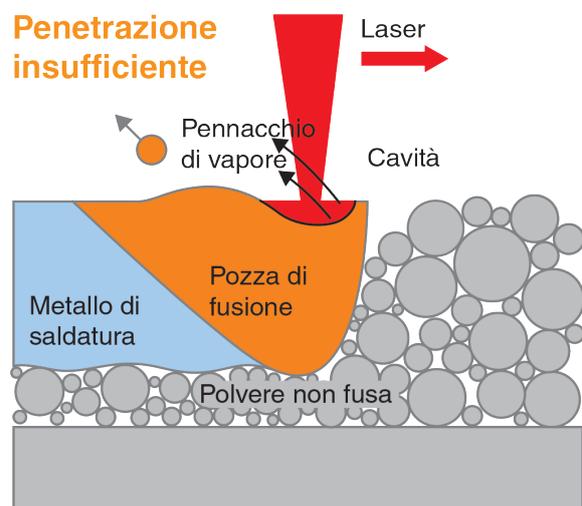


Figura 4 - La penetrazione insufficiente dell'energia laser non fonde il materiale e causa debolezza del componente.

## Formazione di difetti "key-hole"

Quando viene utilizzata troppa energia per una velocità data, si nota una penetrazione eccessiva del laser nel metallo sottostante lo strato di polvere, con formazione di difetti "key-hole". Questa profonda cavità di fusione sulla superficie fa sì che il vapore di metallo venga eiettato ancora più verticalmente che in precedenza. Le riflessioni interne dell'energia laser all'interno della cavità intrappolano più calore a maggiore profondità nel materiale, generando una pozza di fusione più profonda e di maggiore durata. Questo aumento dell'energia erogata aumenta la turbolenza nella pozza di fusione e la formazione di lapilli; nel contempo, la "perturbazione" più forte fa sì che venga rimossa più polvere.

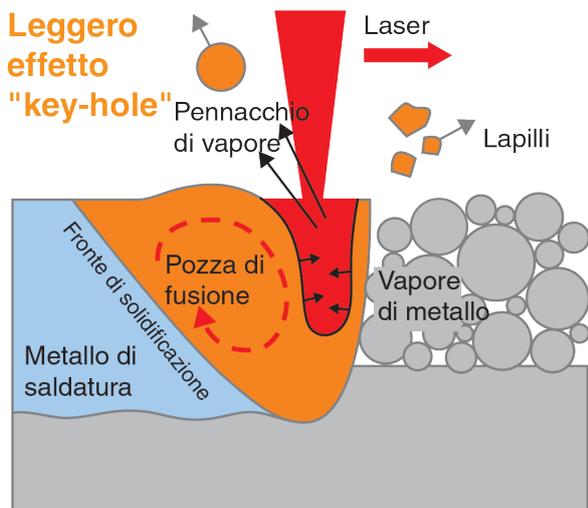
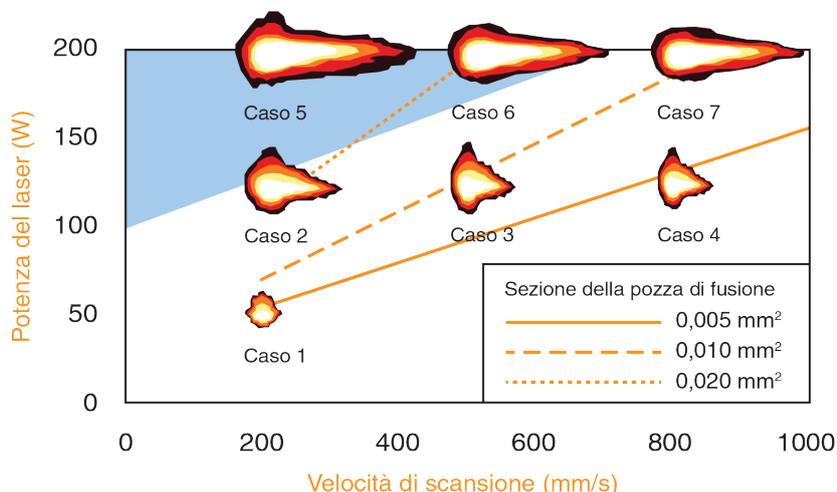


Figura 5 - Effetto "key-hole" modesto - un punto laser intenso crea una profonda cavità.

Se il difetto "key-hole" diventa più instabile (in funzione della potenza, della velocità di scansione e delle dinamiche nella pozza di fusione), la pozza di fusione può collassare all'interno nella cavità e formare un poro di gas inerte alla base. Tali pori potrebbero non chiudersi durante la solidificazione della pozza di fusione, generando porosità sub-superficiali nel metallo saldato. Si avrà inoltre un maggiore tasso di rifusione degli strati sottostanti, e la microstruttura del materiale solidificato ne risentirà.

Figura 7 - Misura sperimentale delle dimensioni della pozza di fusione in una superlega di nichel, in diverse posizioni nel grafico P-V. Le combinazioni tra potenza e velocità sulla parte superiore sinistra del grafico (specialmente nel caso 5) ricadono nella zona ombreggiata di formazione di difetti "key-hole". Rif: MSEC2017-2942 Measurement of the melt pool length during single scan tracks in a commercial laser powder bed fusion process, J.C. Heigel, B.M. Lane. [2]



Le prove sperimentali eseguite dal NIST (National Institute of Standards and Technology) illustrano l'impatto dei parametri scelti sulle dimensioni della pozza di fusione - vedere la Figura 6.

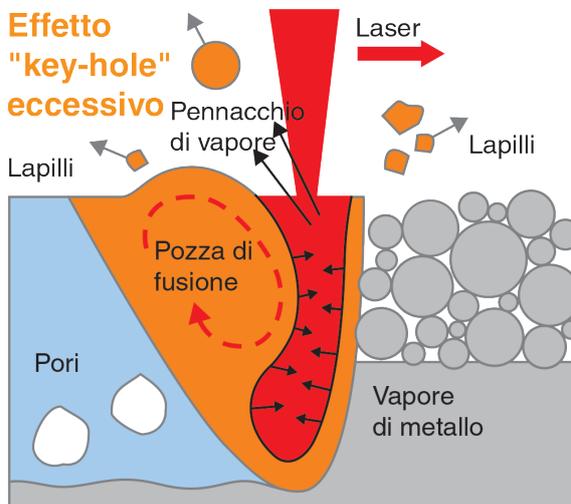


Figura 6 - Effetto "key-hole" eccessivo - una cavità molto profonda può intrappolare gas in un poro sotto la superficie del componente.

Misurando la pozza di fusione di una superlega di nichel dall'alto con una telecamera a infrarossi, si è visto che la lunghezza della pozza di fusione è più o meno costante per diverse velocità di scansione con la stessa potenza del laser. Tuttavia, la larghezza della pozza di fusione, e quindi la sua area, aumenta con la riduzione della velocità. In questo caso, con una potenza laser pari a 200 W, la lunghezza della pozza di fusione è circa 0,6 mm per velocità comprese tra 200 mm/sec e 800 mm/sec. La pozza di fusione più larga (e quindi più profonda) creata con velocità di scansione inferiori contiene più energia termica, quindi richiede più tempo per solidificarsi - fino a 3 ms nel caso più estremo nella seguente Figura 7.

## Effetto "balling-up"

A velocità maggiori, la pozza di fusione può diventare instabile. Gradienti elevati di tensione superficiale possono causare la formazione di vuoti dietro il fascio laser, che si espandono mentre il laser si sposta, determinando la suddivisione della pozza di fusione in isole separate che si solidificano in cordoni, come mostrato nella Figura 8.

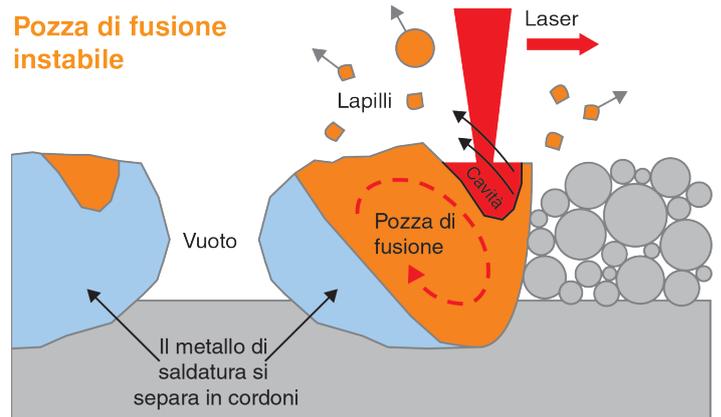


Figure 8 - Pozza di fusione instabile a causa di una velocità di scansione eccessiva.

## Solidificazione e microstruttura

Fino a questo punto, abbiamo considerato gli aspetti relativi alla fusione del processo LBPF e i suoi effetti sulla densità del componente. Tuttavia, è il processo di solidificazione quello più importante nella determinazione delle caratteristiche prestazionali del componente metallico. La solidificazione definisce la microstruttura, che a sua volta determina le proprietà del materiale.

Molte leghe sono complesse e possono esistere in fasi diverse, a diverse temperature e composizioni, quindi la solidificazione non avviene tutta in una volta, né uniformemente all'interno di un tipico tracciato di fusione. Il raffreddamento è più rapido dove il calore può fuggire e gran parte del calore viene condotto all'esterno della pozza di fusione e nel metallo solido circostante. La quantità di calore persa nella polvere circostante non fusa o verso l'alto per irradiazione nella camera è relativamente piccola.

Mentre il metallo fuso si raffredda, la temperatura delle regioni esterne della pozza di fusione scende sotto la temperatura di liquidus, e una o più fasi della lega inizia a solidificarsi. Sul bordo esterno della pozza di fusione si formano cristalli cellulari dendritici, che crescono internamente verso il centro. Le fasi liquide rimaste restano intrappolate tra questi dendriti primari e si solidificano solo una volta raggiunti i loro punti di fusione inferiori. I fronti di crescita cellulare dendritica opposti formano i bordi dei singoli grani, un altro luogo di accumulo per la fase liquida rimanente.

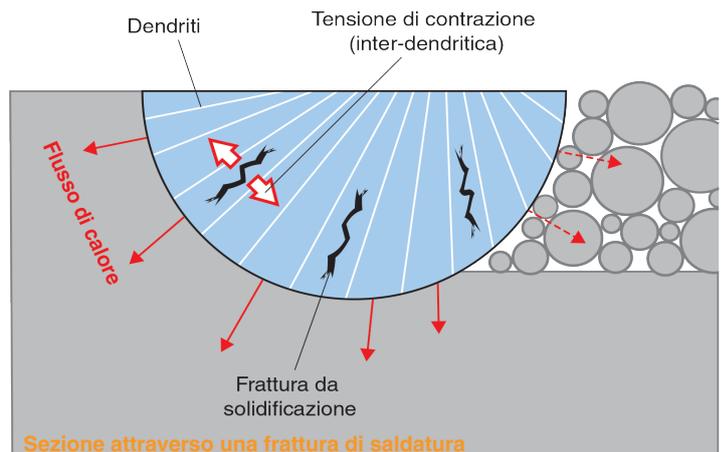


Figure 9 – Le dendriti di raffreddamento creano sollecitazioni sulle regioni "morbide", causando fratture di solidificazione.

Il processo di raffreddamento crea sollecitazioni su tali regioni di confine tra cellule e grani, che possono determinare in alcuni materiali porosità indesiderate, a causa di un processo noto come "cricatura a caldo", o cricatura di solidificazione. La condizione si presenta più grave ove la differenza tra le temperature alle quali le diverse fasi si solidificano sia maggiore.

Come si vede, dimensioni, durata e velocità di raffreddamento sono importanti poiché controllano la risposta termica del materiale. Una pozza di fusione di maggiore durata che si raffreddi più lentamente produrrà una microstruttura più grossolana, con grani più grandi e dendriti più spessi. Per contro, una pozza di fusione più piccola si raffredda più rapidamente e crea una microstruttura più fine.

Una pozza di fusione più profonda determina inoltre più rifusione nel metallo già solidificato, la cui microstruttura ne risente. Una maggiore potenza del laser è direttamente correlata con la formazione di grani verticali a colonna, ognuno esteso su diversi strati. Poiché una pozza di fusione più profonda ha una superficie di contatto maggiore con il metallo solido sottostante, più calore viene condotto verso il basso aumentando l'allineamento dei grani. Questo può determinare una maggiore differenza tra le proprietà meccaniche in direzione perpendicolare alla direzione di costruzione rispetto a quelle ad essa parallela.

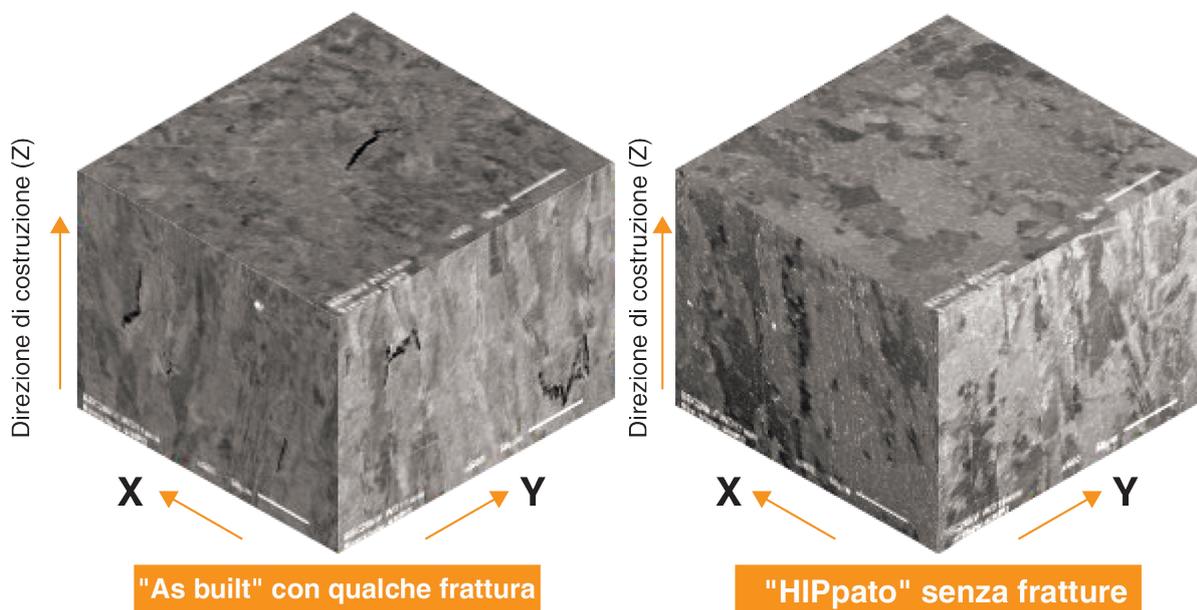


Figura 10 - Formazione di grani a colonna in una superlega di nichel 'as-built' sottoposta a lavorazione LPBF (a sinistra), che mostra grani allungati estesi su più strati, allineati nella direzione di costruzione. Il materiale presenta inoltre alcune cricature di solidificazione e sul bordo dei grani. Il trattamento termico post-lavorazione può chiudere tali porosità, nonché modificare la microstruttura in modo da generare grani equiassici, normalizzando maggiormente anche le proprietà del materiale.

## Il punto giusto

Quindi, stiamo cercando una combinazione tra velocità e potenza in grado di creare una pozza di fusione di profondità, larghezza e durata ottimali. Questo significa erogare al nostro componente una quantità di energia ottimale. Quando ci riusciamo, otteniamo una buona combinazione tra bassa porosità con una microstruttura che ha le proprietà desiderate del materiale e un livello accettabile di produttività.

Possiamo considerare tutto questo in termini di 'densità di energia', ovvero di quantità di energia applicata al materiale per unità di volume. Per una densità di energia costante, la potenza laser e la velocità di scansione sono in relazione inversa, quindi nel grafico P-V i contorni della densità di energia si irradiano dall'origine, con la densità correlata al gradiente del contorno.

Per il materiale e lo spessore di strato prescelti, ci sarà una densità di energia ottimale per la quale la lavorazione sarà più efficiente e darà la microstruttura desiderata. Quando si scelgono i parametri di processo, è bene restare per quanto possibile su questo contorno, in funzione del laser e del gruppo ottico disponibili sulla macchina AM, senza avventurarsi troppo in là nella regione di "balling-up". Le proprietà del materiale saranno così le migliori possibili, proprio come la produttività. Nella Figura 11, la 'X' identifica il punto giusto.

## Distanza fra linee di scansione

Ma l'analisi mostrata sopra non tiene conto di un fattore fondamentale: la distanza fra linee di scansione. Il nostro grafico presuppone che la distanza tra le linee di scansione sia fissa, in modo che la densità di energia dipenda esclusivamente dalla potenza del laser e dalla velocità di scansione.

Naturalmente, anche la distanza tra linee di scansione può variare indipendentemente dalla potenza e dalla velocità, anch'essa influenzando la densità di energia. È quindi possibile mantenere la stessa densità di energia lungo una gamma di contorni P-V variando la distanza tra le linee di scansione. Ci sono molte maniere diverse per erogare nello strato la stessa quantità totale di energia.

Tutti e tre i contorni indicati dalle frecce arancioni in questo grafico hanno la stessa densità di energia. Se si adotta un rapporto potenza/velocità maggiore (scegliendo un contorno più ripido, più prossimo alla zona di formazione dei difetti "key-hole"), aumentare la distanza tra linee di scansione permette di mantenere costante la densità d'energia. Questo è ragionevole: creando una pozza di fusione più larga e profonda con un fascio laser più penetrante, è possibile allontanarle fondendole comunque l'una all'altra.

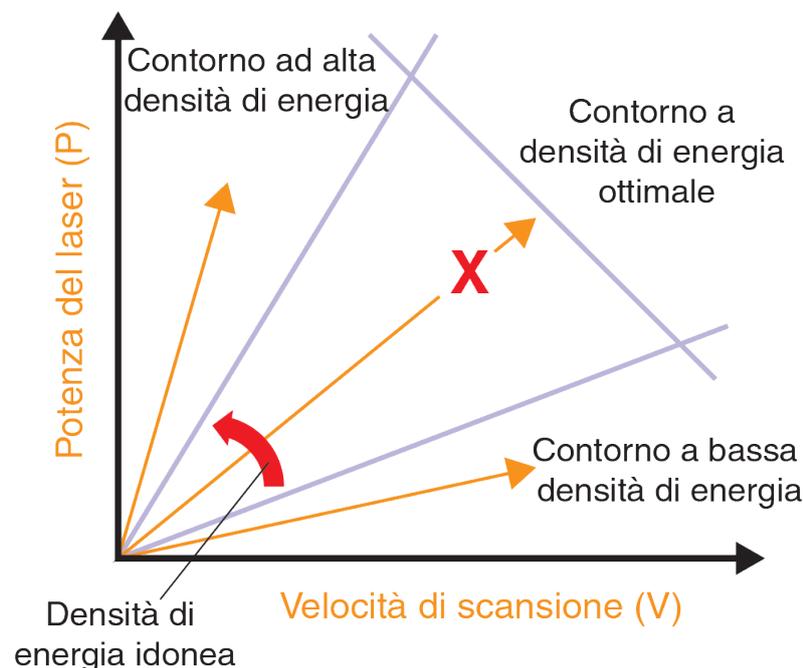


Figura 11 - la X identifica il punto di lavorazione ottimale per questo materiale.

$$\text{Densità di energia} = \frac{\text{Potenza del laser}}{\text{Velocità di scansione} * \text{Distanza fra linee di scansione} * \text{Spessore strato}}$$

Figura 12 - Formula della densità di energia.

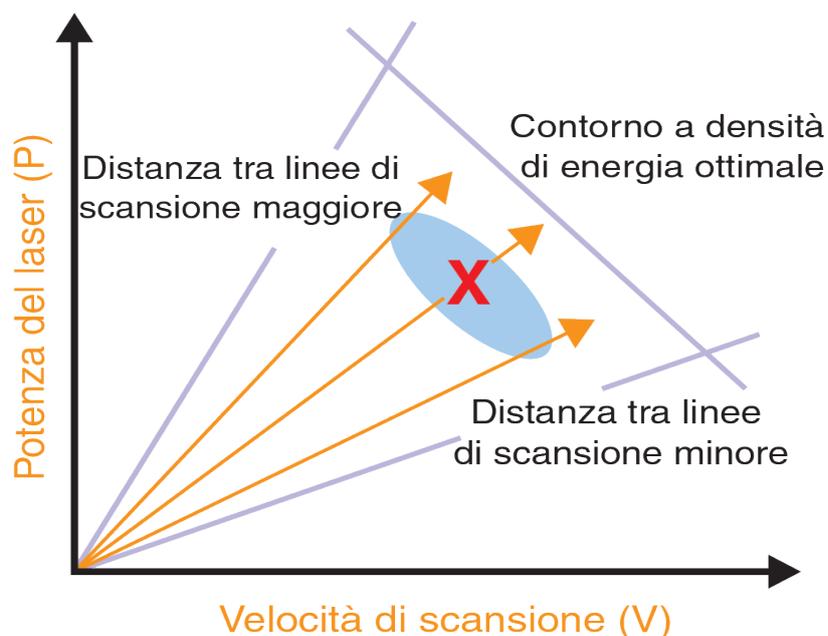


Figura 13 – Impatto della distanza tra le linee di scansione sui risultati del processo di fusione.

Tuttavia, così facendo si noterà una caduta nelle proprietà del materiale, proprio per le ragioni descritte sopra. Avventurandosi in prossimità della zona di formazione dei difetti "key-hole", si riduce anche il fattore di sicurezza del processo, il che può limitare l'applicabilità di questi parametri ad alcune geometrie. È importante scegliere una distanza tra linee di scansione che consenta di rimanere in un contorno P-V- centrale, ben distante sia dalla zona di mancata fusione che da quella di formazione di difetti "key-hole".

I parametri all'interno della zona evidenziata in blu dovrebbero fornire comunque risultati accettabili, ma il punto ideale resta quello identificato dalla 'X'. Poiché gran parte dell'energia erogata dal fascio laser viene assorbita nel punto laser al centro del tracciato di fusione, una distanza tra linee di scansione che sia analoga alle dimensioni del punto (o circa la metà della larghezza del tracciato di fusione) è solitamente la più efficace.

Tuttavia, così facendo si noterà una caduta nelle proprietà del materiale, proprio per le ragioni descritte sopra. Avventurandosi in prossimità della zona di formazione dei difetti "key-hole", si riduce anche il fattore di sicurezza del processo, il che può limitare l'applicabilità di questi parametri ad alcune geometrie. È importante scegliere una distanza tra linee di scansione che consenta di rimanere in un contorno P-V- centrale, ben distante sia dalla zona di mancata fusione che da quella di formazione di difetti "key-hole".

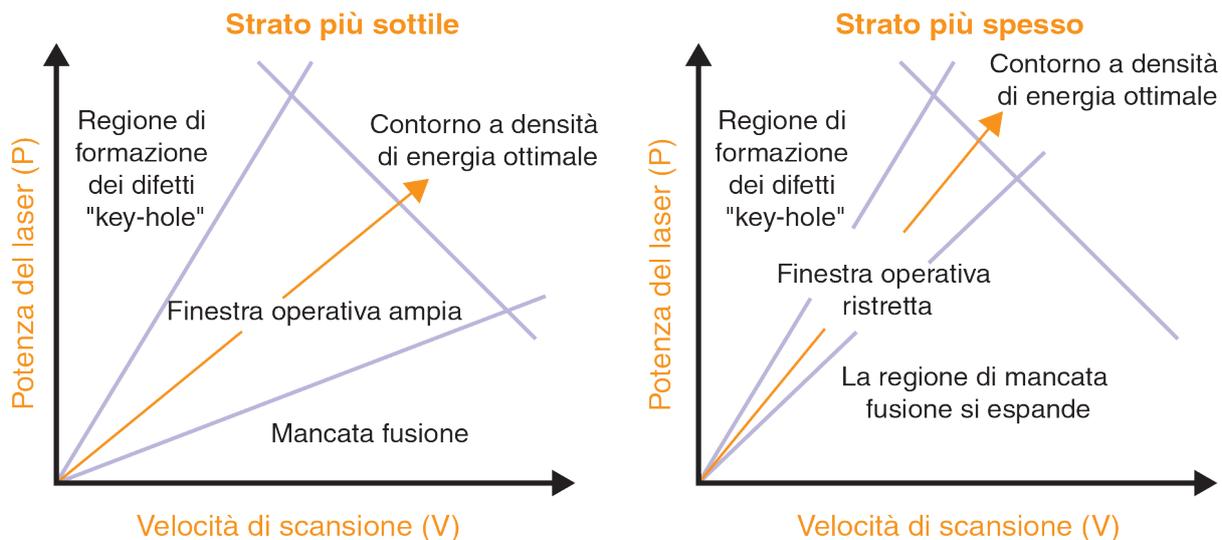


Figure 14 – Gli strati più spessi riducono la finestra operativa

## Spessore strato

Nella discussione precedente, lo spessore di strato era fisso. E variando anche questo fattore? Se la finitura superficiale non è un problema, è possibile aumentare lo spessore di strato per accrescere le velocità di costruzione?

La risposta è sì, fino a un certo punto. Chiaramente, gli spessori elevati richiedono una maggiore penetrazione dell'energia laser per garantire la completa fusione del metallo sottostante. Per ottenere un'erogazione d'energia volumetrica ottimale che possa fondere completamente il materiale all'aumento dello spessore di strato, è necessario aumentare anche l'erogazione di energia per strato. Il profilo di densità d'energia diventa quindi più ripido.

Aumentare lo spessore di strato espande la regione di 'mancata fusione' nella Figura 14, restringendo il varco tra tale zona e quella di formazione di difetti "key-hole". La zona di formazione di difetti "key-hole" di per sé stessa potrebbe non variare eccessivamente in funzione dello spessore di strato, poiché questo comportamento dipende dall'intensità e dalla velocità del punto laser e come questo interagisca col materiale.

La finestra operativa quindi si restringe, eventualmente fino a raggiungere uno spessore di strato ove non è possibile ottenere una penetrazione sufficiente mantenendo nel contempo una pozza di fusione stabile e una fusione sufficiente nel metallo sottostante.

Lo spessore di strato più pratico che offre una finestra operativa ragionevole varia da un materiale all'altro, ma è generalmente compreso tra 30 e 90 micron per punti laser di diametro variabile tra 70 e 100 micron con potenze laser fino a 500 W.

È possibile utilizzare strati più spessi aumentando la dimensione del punto per ridurre l'intensità a potenze laser maggiori. Tuttavia, tale modifica implica una perdita di fedeltà, un aumento nelle dimensioni della pozza di fusione e nella formazione di lapilli, con conseguenze sulla microstruttura e le proprietà del materiale.

### Impatto della geometria sul calore trattenuto

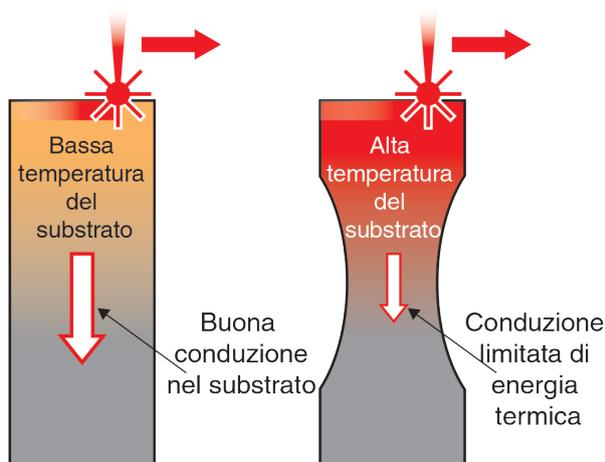


Figura 15a – Impatto della geometria sul calore trattenuto

### Perché tenere conto di un fattore di sicurezza?

Il desiderio di lavorare sempre al centro di un'ampia finestra operativa è giustificato dal fatto che non ci si trova sempre ad affrontare condizioni termiche costanti in tutte le regioni della costruzione. All'aggiunta di ogni nuovo strato, il calore viene condotto verso il basso negli strati sottostanti, costruiti in precedenza. Riuscire più o meno bene a disperdere tale calore dipende dalla geometria locale del componente e dalle proprietà del materiale.

Se la connessione termica al substrato sottostante è buona, il calore verrà dissipato efficacemente. Per contro, se la geometria del componente include pareti sottili o la presenza di regioni massicce direttamente sopra una sezione molto più sottile, il calore non riuscirà a fluire con facilità verso il basso, e più calore verrà trattenuto nella parte superiore del componente. L'effetto è particolarmente evidente nei materiali con una conducibilità termica relativamente bassa, ad esempio il Ti6Al4V. Vedere la figura 15a.

In queste condizioni, il substrato e la polvere vengono preriscaldati, quindi richiedono meno erogazione di energia a parità di effetto di fusione. L'impatto di questo preriscaldamento sul processo di fusione è di espandere la regione di formazione dei difetti "key-hole", riducendo la potenza alla quale si hanno porosità da "key-hole". Il nuovo contorno a densità di energia ottimale è più basso di prima, e la finestra operativa è più stretta. Vedere la figura 15b.

Un possibile rimedio è utilizzare la simulazione per identificare le regioni del componente che saranno probabilmente soggette a surriscaldamento, e ridurre l'energia laser erogata in queste regioni per controbilanciare tale effetto di preriscaldamento.

La combinazione di questo punto con quello precedente riguardante lo spessore di strato porta a concludere che la creazione di componenti a pareti sottili con strati più spessi possa risultare particolarmente difficile.

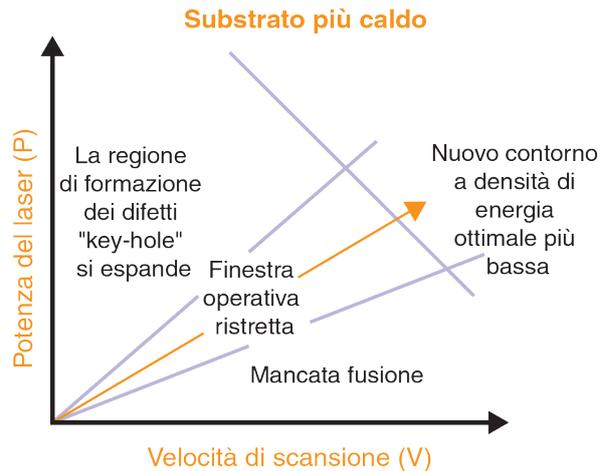


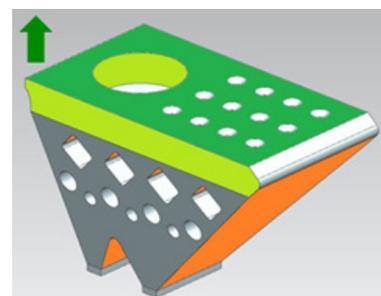
Figura 15b - Il calore trattenuto restringe la finestra operativa.

### Set di parametri nominali e specifici

Fino ad ora, ci siamo focalizzati sull'identificazione dei parametri di lavorazione massivi per un materiale, per poter produrre metallo di buona qualità con la massima rapidità possibile. Ma a un set di parametri di lavorazione non basta una sola impostazione, poiché s'incontrano diverse condizioni di fusione e di raffreddamento in diverse regioni dello stesso componente. Per poter produrre componenti funzionali, è necessario completare i parametri di massima con impostazioni specifiche per le diverse geometrie da produrre.

Ogni componente includerà sia regioni massicce che superfici orientate in diverse direzioni. Nelle regioni massicce l'obiettivo è ottenere una densità elevata, costruzioni rapide e buone proprietà del materiale. Le priorità per i bordi saranno diverse: l'obiettivo primario potrebbe essere la finitura superficiale, o ancora l'eliminazione di difetti superficiali che possano causare danni durante gli interventi post-lavorazione. Tipicamente, le superfici 'down-skin' si raffreddano più lentamente poiché sono prive di substrato sottostante; in questo caso l'obiettivo è evitare distorsioni e scarti.

Figura 16 - I bordi delle regioni massicce e quelle 'upskin' e 'downskin' richiedono solitamente parametri diversi rispetto al resto del componente.



Solitamente, vengono utilizzati parametri assai diversi in queste regioni, quindi anche i set di parametri nominali includono una gamma di impostazioni e strategie di scansione per le diverse regioni di un componente. Per ottenere una qualità ottimale in tutte le regioni del componente, potrebbe essere necessario sviluppare ulteriori parametri specifici per l'applicazione.

## Riepilogo

La selezione dei parametri di processo è fondamentale per la riuscita di una costruzione in AM, poiché governa come il materiale si fonderà e si solidificherà per formare il componente. Poiché ogni polvere di lega assorbe l'energia del laser, trasmette calore, fluisce e si solidifica in modi diversi, le scelte devono essere effettuate in base alle caratteristiche della lega da fondere.

Le capacità della macchina AM devono essere sfruttate in modo da trovare un punto di funzionamento al centro di un'ampia finestra operativa. Questo garantisce un margine di sicurezza che consente di adattarsi a diverse condizioni locali di fusione.

Ciò nonostante, alcune geometrie del componente potrebbero richiedere parametri modificati per adattarsi a variazioni del calore trattenuto.

Anche i bordi e le regioni 'down-skin' richiederanno parametri di lavorazione diversi e strategie di scansione specifiche, per ottenere la qualità superficiale richiesta.

## Passi successivi

Visita la Guida all'AM di Renishaw, un hub informativo il cui obiettivo è proprio educare e informare sia gli utenti AM che la comunità ingegneristica allargata con video, case study, articoli divulgativi, notizie dal settore e opinioni. La guida è accessibile gratuitamente dal sito Web di Renishaw.

[www.renishaw.it/amguide](http://www.renishaw.it/amguide)

## Informazioni sull'autore

### Marc Saunders, Director of AM Applications

Marc Saunders vanta più di 25 anni di esperienza nella produzione high-tech. In Renishaw, ha già avuto in precedenza un ruolo fondamentale nello sviluppo della piattaforma di lavorazione automatica RAMTIC e nell'offrire soluzioni metrologiche chiavi in mano a importanti clienti del settore aerospaziale.

Marc gestisce la rete globale di Solution Center per la stampa 3D di Renishaw, che consente ai clienti che stanno prendendo in considerazione il passaggio a questo metodo di produzione di provarlo nella pratica, prima di impegnarsi in una nuova struttura.

[www.renishaw.it/additive](http://www.renishaw.it/additive)

## Riferimento

<sup>[1]</sup> Robert M Suter, He Liu and AD (Tony) Rollett, 'Towards optimal processing of additive manufactured metals for high strain rate properties', SSAP Chicago, 12-13 aprile 2017

<sup>[2]</sup> J.C. Heigel, B.M. Lane, 'Measurement of the melt pool length during single scan tracks in a commercial laser powder bed fusion process', ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 4-8 giugno 2017, Los Angeles, USA (MSEC2017- 2942)