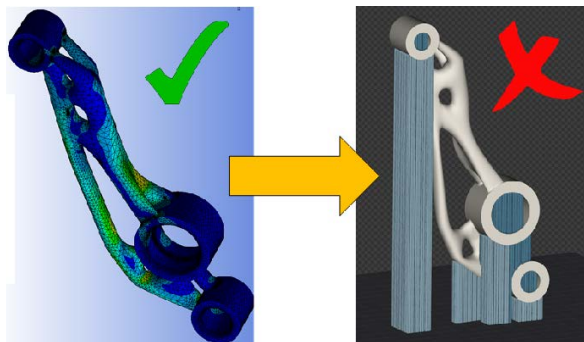


Design per l'AM in metallo – da dove partire

La produzione additiva (AM) dà una grande libertà nella creazione di pezzi con forme libere e caratteristiche intricate provenienti direttamente da CAD, senza richiedere attrezzature costose. Si tratta di forme che sarebbe poco pratico, se non impossibile, produrre con metodi convenzionali. I componenti prodotti in maniera additiva sono spesso più leggeri, efficienti e adatti alla destinazione d'uso.

Tuttavia, tale flessibilità non equivale a una totale libertà nel progettare qualsiasi forma ci venga in mente. Quantomeno, non se vogliamo produrla a un prezzo sensato.

Come qualsiasi processo produttivo, le tecnologie AM hanno capacità e limitazioni specifiche. Ad esempio, i componenti prodotti per fusione laser a letto di polvere progettati con parti sporgenti - ovvero costruite sopra polvere non fusa - potrebbero richiedere supporti sacrificali perché il processo funzioni. Tali supporti aumentano il tempo di costruzione, consumano materiale extra e richiedono lavorazioni successive per la rimozione.



I componenti ottimizzati dal punto di vista funzionale ma non progettati per l'AM possono richiedere molti supporti e rendere così la produzione poco efficiente.

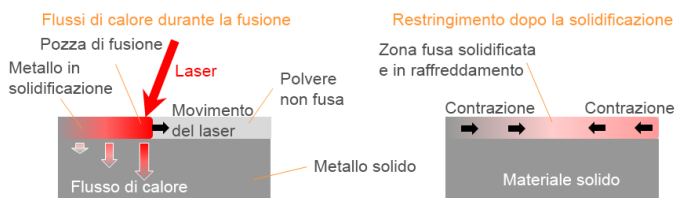
Diventa quindi fondamentale un approccio Design for Additive Manufacturing (DfAM), per produrre pezzi che combinino prestazioni eccezionali e costo efficace. La relazione strettissima tra l'ottimizzazione funzionale e la progettazione mirata al processo è descritta nell'articolo [L'ottimizzazione topologica è realmente ottimizzata?](#)

L'articolo analizza i fattori chiave che stimolano il tasso di riuscita e la produttività dell'Additive, e spiega alcune delle linee guida fondamentali che devono essere rispettate dai progettisti per produrre con efficienza.

Fattore nr. 1 - tensioni residue

Le tensioni residue sono il risultato naturale del riscaldamento e raffreddamento rapido che è parte integrante del processo di fusione laser a letto di polvere. Ciascun nuovo strato viene creato spostando il laser focalizzato sul letto di polvere per fonderne lo strato superiore con quello sottostante. Il calore fluisce dalla pozza di fusione calda al metallo solido sottostante, facendo sì che il metallo fuso si solidifichi raffreddandosi. L'intero processo accade molto rapidamente, nello spazio di microsecondi.

Ogni nuovo strato di metallo mentre si raffredda e consolida sopra lo strato sottostante, si contrae. Il nuovo metallo è vincolato dalla struttura solida sottostante, quindi la sua contrazione genera forze di taglio tra gli strati.



Traccia di fusione laser su un substrato solido (a sinistra). Mentre si sposta lungo il vettore di scansione, il laser fonde la polvere, che si raffredda poi principalmente tramite conduzione del calore attraverso il metallo solido sottostante. Una volta solidificatosi, il metallo si contrae mentre si raffredda (a destra) e crea forze di taglio tra detto metallo e lo strato sottostante.

Le tensioni residue possono essere distruttive. Mentre si aggiungono strati l'uno sull'altro, le tensioni si accumulano e possono generare distorsioni del componente, causandone l'arricciamento sui bordi e allontanandolo dai supporti:



Nei casi più estremi, le tensioni possono superare la resistenza del componente e causarne rotture catastrofiche, oppure distorcere la piastra di costruzione:



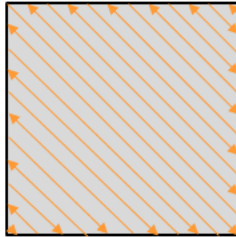
Tali effetti sono assai pronunciati sulle parti con sezioni di grandi dimensioni, poiché queste tendono ad avere tracciati di saldatura più lunghi e la distanza sulla quale le forze di taglio possono agire è maggiore.

Minimizzare le tensioni residue

Un modo per affrontare il problema è variare la strategia di scansione, scegliendo un metodo che sia più adatto alla geometria del pezzo. Quando stiamo riempiendo il centro del nostro componente, ovvero lavorando sulle linee di scansione, il laser si sposta solitamente avanti e indietro. Lo schema prescelto influenza la lunghezza dei vettori di scansione, quindi anche i livelli di tensione che probabilmente si accumuleranno nel componente. Le strategie con vettori di scansione più corti genereranno meno tensioni residue:

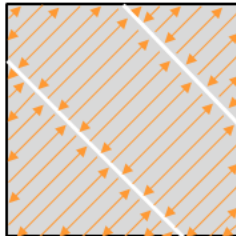
Schema Meander

- Rotazione di 67° dopo ciascuno strato
- Maggiore velocità di costruzione
- Maggiori tensioni residue
- Adatto a dettagli piccoli e sottili



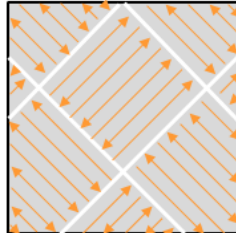
Schema Stripe

- Distribuzione uniforme delle tensioni residue
- Adatte a componenti più grandi
- Più veloce rispetto allo schema Chessboard



Schema Chessboard

- Ciascuno strato è diviso in isole da 5 x 5 mm
- Rotazione di 67° dell'intero pattern e di ciascuna isola da uno strato all'altro
- Distribuzione uniforme delle tensioni residue
- Adatto a componenti più grandi



Immagini sopra - strategie di scansione e loro idoneità per diversi tipi di componenti. Le due strategie più comuni sono 'Meander' per le parti con pareti sottili (anche detto 'Rastering') e 'Stripe' per quelle con sezioni maggiori. Anche le strategie 'Chessboard' o a 'isola' possono essere efficaci. Le scansioni tipo 'Stripe' e 'Chessboard' riducono la lunghezza delle singole linee di scansione, quindi anche l'accumulo di tensioni residue.

Possiamo anche ruotare l'orientamento dei nostri vettori di scansione da uno strato all'altro, in modo che le tensioni non siano allineate sullo stesso piano. Tra ogni strato viene solitamente utilizzata una rotazione di 67 gradi, per garantire che la stessa direzione di scansione venga ripetuta esattamente solo dopo molti strati.

Il riscaldamento della piastra di costruzione è un'altra tecnica utilizzata per ridurre le tensioni residue, e si possono usare trattamenti termici post-processo per ridurre le tensioni.

Fattore nr. 2 - orientamento

Con qualsiasi processo di produzione additiva a strati, la direzione di costruzione è definita come asse Z, vale a dire

Suggerimenti di progettazione nell'ottica delle tensioni residue

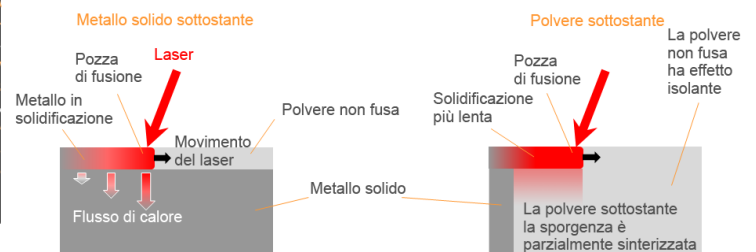
Quando possibile, eliminare le tensioni residue già in fase di progettazione:

- Evitare **aree estese di fusione ininterrotta**
- Prestare attenzione ai **cambiamenti di sezione**
- Le **costruzioni ibride** incorporano una piastra di costruzione più spessa in un componente AM
- Usare **piastre di costruzione più spesse** quando è probabile che le tensioni siano elevate
- Selezionare una **strategia di scansione appropriata**

verticalmente rispetto alla piastra di costruzione. Si noti che l'orientamento di costruzione non corrisponde sempre a quello di utilizzo del pezzo. Dovrebbe essere scelto mirando alla massima stabilità di processo, con supporti ridotti al minimo o assenti.

Sporgenze e processo di fusione

Nei processi a letto di polvere, nei quali le forme vengono costruite strato su strato, la relazione tra uno strato e l'altro è fondamentale. Ogni strato fuso si affida a quello sottostante per supporto fisico e per smaltimento del calore.



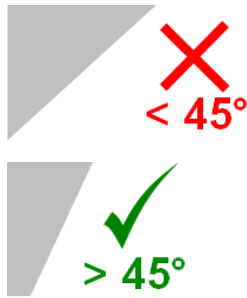
La fusione sul metallo solido consente un raffreddamento rapido (a sinistra). In caso di fusione di una regione sporgente al di sopra di polvere non fusa, il raffreddamento richiede molto più tempo e materiale indesiderato potrebbe aderire alla superficie inferiore del componente.

Quando il laser fonde la polvere in un'area nella quale lo strato sottostante è metallo solido, il calore fluisce dalla pozza di fusione alla struttura sottostante, ri-fondendola parzialmente e creando una forte saldatura. Anche la pozza di fusione si solidifica rapidamente una volta rimossa la sorgente laser, mentre il calore viene efficacemente condotto via.

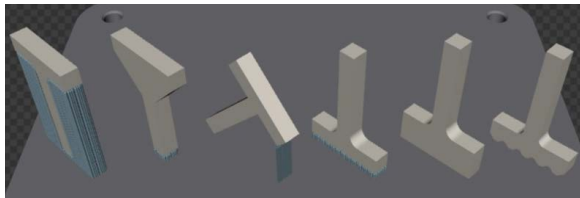
Quando ci sono strutture del componente sporgenti rispetto a quelle sottostanti, almeno parte della zona sotto la pozza di fusione sarà costituita da polvere non fusa. La polvere ha una conduttività termica molto inferiore rispetto al metallo solido, quindi il calore della pozza di fusione viene trattenuto più a lungo, generando una maggiore sinterizzazione della polvere circostante. Questo può avere come risultato l'incollamento di materiale alla superficie inferiore della regione sporgente; le sporgenze possono quindi presentare superfici deformi con finiture ruvide.

Opzioni di orientamento

Genericamente, i sottosquadra di oltre 45 gradi dalla verticale richiedono supporto. Le superfici sporgenti rivolte verso il basso sono dette in inglese "down-skin". Generalmente, presentano finiture più ruvide rispetto alle pareti verticali e alle superfici in "up-skin", cioè rivolte verso l'alto. L'effetto è dovuto alla sinterizzazione parziale della polvere sotto la sporgenza, causata a sua volta dal raffreddamento più lento della pozza di fusione. I componenti possono spesso essere costruiti con più orientamenti. Idealmente, l'orientamento deve essere scelto in modo da favorire le caratteristiche autoportanti, per minimizzare i costi di costruzione e le lavorazioni post-processo.



"Tenere conto dell'orientamento di costruzione in fase di progettazione è uno dei principi fondamentali del DfAM"



È spesso possibile costruire un pezzo in diversi orientamenti. Questa scelta ha un impatto molto forte sia sulla quantità di materiale di supporto sprecato, sia sulle lavorazioni post-processo richieste.

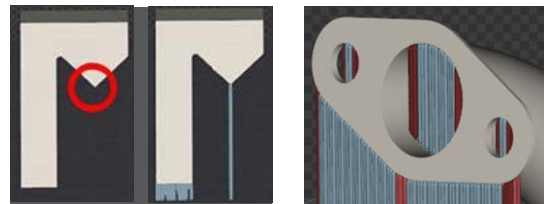
Da sinistra:

- Sporgenze più grandi che richiedono molto materiale di supporto (mostrato in blu)
- Progettazione modificata con materiale aggiuntivo rastremato sulle sporgenze per ridurre i supporti, che aumenta la massa del componente e potrebbe richiedere una lavorazione post-processo / elettroerosione
- Inclinazione a 45 gradi - in gran parte autoportante tranne per un minimo locale (vedere di seguito per ulteriori dettagli). Le superfici 'down-skin' e 'up-skin' presenteranno rugosità diverse
- Rovesciato, con supporti corti sotto la faccia inferiore - tempo di costruzione ridotto, ma sarà necessario procedere alla finitura della faccia supportata dopo la costruzione
- Costruzione solidale con la piastra e con sovrametallo per la successiva rimozione tramite elettroerosione a filo - le tensioni residue possono essere un problema
- Un approccio analogo, ma con regioni solidali più piccole per ridurre l'accumulo di tensioni - è probabile che questo sia la progettazione più efficiente dal punto di vista della produzione
- Un'ulteriore alternativa (non mostrata) prevede di posare la parte di piatto sulla piastra. Questo orientamento riduce l'altezza di costruzione, ma anche il numero di componenti che possono essere nidificati sulla piastra di costruzione, e favorisce maggiori tensioni residue.

È preferibile valutare vari orientamenti di costruzione utilizzando il software di preparazione fin dall'inizio della fase di progetto del componente, per determinare quale sia il più promettente. Una volta presa questa decisione, la progettazione può procedere in dettaglio su queste basi.

Minimi locali

Si tratta di quelle aree del componente che non sono collegate a uno strato sottostante. Tali aree richiedono supporto per essere ancorate durante la costruzione. Se iniziamo a costruire senza una struttura di supporto sottostante, il primo strato costruito verrà probabilmente spostato dalla racla durante il dosaggio dello strato successivo, facendo sì che la costruzione non riesca.

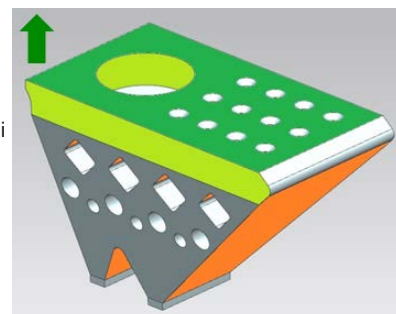


I minimi locali possono essere evidenti, come nell'esempio mostrato di seguito. Possono apparire anche sulla parte superiore dei fori laterali o inclinati, nel punto in cui intersecano il bordo del componente (mostrato sopra). Il nostro obiettivo deve essere quello di ridurre o eliminare i minimi locali in modo da minimizzare i supporti.

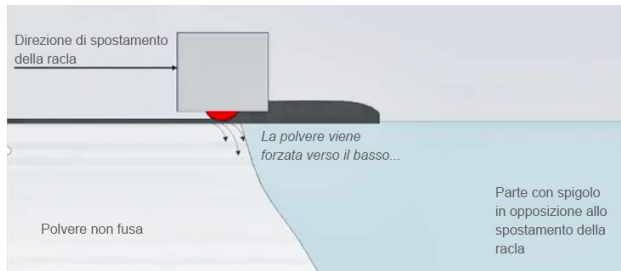
Orientamento delle caratteristiche

Come abbiamo già detto, le superfici 'down-skin' tendono a presentare una finitura superficiale di qualità inferiore. Se l'obiettivo è quello di produrre caratteristiche dettagliate con la massima precisione, è preferibile orientarle sulla superficie superiore del componente, la 'up-skin'. È probabile che le caratteristiche dettagliate inserite in superfici 'down-skin' perdano definizione.

Un altro parametro di cui tenere conto è l'orientamento del componente rispetto alla racla di dosaggio. Durante l'applicazione di un nuovo strato di polvere, mentre la racla lo spinge lungo il letto, la



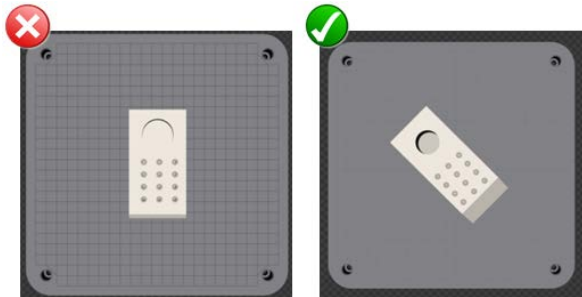
polvere viene progressivamente schiacciata sotto la racla per creare il nuovo strato a grande densità. Si crea così un'onda di pressione nel letto di polvere, mentre il materiale viene compresso verso il basso. Essa può interagire con le superfici del componente che sono inclinate verso la racla, forzando la polvere verso il basso e spingendo il bordo anteriore del componente stesso verso l'alto. La racla potrebbe così interferire con il componente, facendone fallire la costruzione. Si noti che l'uso di una racla flessibile riduce questo effetto.



Interazione tra racla di dosaggio e bordo inclinato di un componente.

È preferibile quindi orientare i supporti e i bordi inclinati in una direzione diversa da quella della racla, quando possibile. Ruotando la parte, l'onda di pressione la colpisce obliquamente, riducendo le probabilità di distorsione.

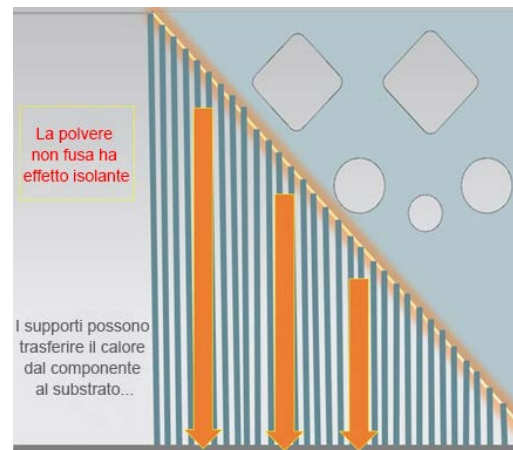
Se non è possibile modificare l'allineamento rotazionale, o se il componente è rotazionalmente simmetrico, potrebbero essere necessari supporti, con possibile lavorazione post-processo della superficie interessata.



Suggerimenti di progettazione nell'ottica dell'orientamento

- L'orientamento di costruzione di un componente **progettato** per l'AM deve essere **ovvio**
- L'obiettivo dei progettisti deve essere quello di creare progetti **autoportanti**
- La **riuscita della costruzione** è la considerazione primaria
- Anche le **tensioni residue** e la **finitura superficiale** sono fattori importanti che risentono dell'orientamento
- L'orientamento influenza i **tempi di costruzione** e i **relativi costi**
- **Potrebbe risultare più difficile orientare le geometrie complesse** - spesso è richiesto un compromesso tra qualità superficiale, dettagli, tempi/costi di costruzione e strutture di supporto
- I progettisti devono valutare fattori concorrenti per definire l'orientamento

Fattore nr. 3 - supporti



Come abbiamo già visto, affidarsi a supporti per superare i problemi di orientamento è una pratica assai diffusa ma sconsigliabile. I tempi aggiuntivi di costruzione e lavorazione post-processo sono accettabili per un prototipo, ma di certo un tale spreco non è tollerabile per produzioni AM di serie. Un eccessivo affidamento sui supporti indica una geometria 'marginale' del componente, che può avere effetti sul rendimento di produzione.

Finalità dei supporti

Idealmente, un progetto non dovrebbe includere supporti, ma poiché tale condizione è raramente possibile, bisogna cercare di ridurli al minimo. I supporti hanno tre funzioni principali:

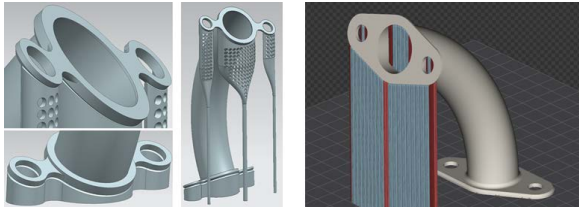
Materiale isolato - i supporti vengono utilizzati per ancorare il materiale che non sia collegato a strati precedenti (ovvero la sporgenza è più di 45° dalla verticale, oppure la caratteristica è un minimo locale). È preferibile integrare le strutture di supporto nella progettazione del componente.

Tensioni residue - la progettazione deve essere effettuata in modo da mitigare le tensioni residue nella costruzione, evitando bordi affilati e grandi aree di materiale da realizzare direttamente sulla piastra di costruzione. Dove questo non sia possibile, i supporti possono essere applicati in modo da opporsi alle tensioni residue nella parte, e impedire che il materiale possa piegarsi verso l'alto staccandosi dalla piastra di costruzione. Questo è sconsigliabile per le costruzioni in produzione.

Dissipatore di calore - la polvere non fusa isola termicamente. I supporti trasferiscono una parte del calore dalle aree 'down-skin' per evitare bruciature, fusioni eccessive, distorsioni e decolorazioni, in particolare su quelle rivolte verso la racla. Per minimizzare questi effetti, ruotare il componente rispetto alla racla.

Supporti primari e secondari

I supporti primari sono quelli che vengono sviluppati in ambiente CAD insieme al componente e devono essere pensati come strutture sacrificali, da rimuovere al termine della costruzione. I supporti secondari sono invece quelli generati nei software di preparazione delle costruzioni.

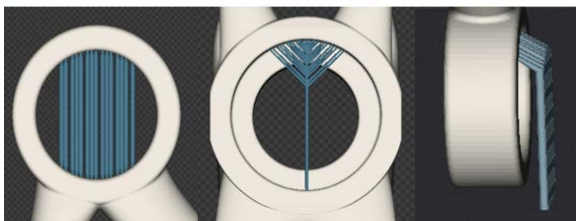


Supporti primari, sviluppati in CAD (sinistra) e supporti secondari, sviluppati tramite software di preparazione della costruzione (destra).

I supporti primari solidi consentono un maggiore controllo. Possono essere importati nel software di preparazione della costruzione (come STL) o progettati unitamente al corpo principale del componente. Possono essere derivati in modo parametrico con il controllo completo della revisione. È possibile eseguire l'analisi agli elementi finiti delle sollecitazioni, nonché progettare e simulare supporti primari che disperdano il calore in modo controllato.

Anche i supporti secondari creati con il software di preparazione della costruzione sono gestibili tramite parametri, ma mancano di tracciabilità e ripetibilità. Potrebbero dover essere ricreati, se la progettazione del componente viene modificata.

Supporti semplici **Supporti ad albero** **Supporti angolari**



Tipi di supporti secondari, generati nel software di preparazione della costruzione. I supporti devono essere selezionati mirando a minimizzare il tempo di costruzione e i costi delle lavorazioni successive.

La progettazione ibrida dei supporti si avvale sia del software CAD che di quello di preparazione della costruzione per ottenere la soluzione ottimale.

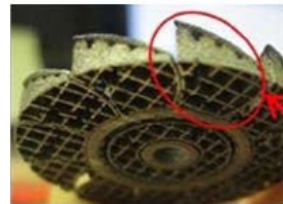
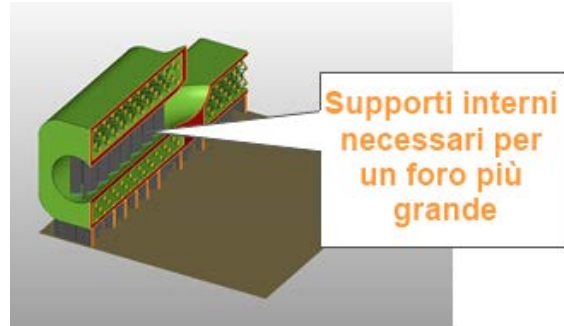
Smussi e raccordi

Nonostante una sporgenza orizzontale di 0,3 - 1 mm possa essere autoportante, resta comunque consigliabile. Al contrario, per le sporgenze superiori a 1 mm sarà sicuramente necessario rivedere il progetto o aggiungere supporti. Per eliminare le sporgenze, è possibile aggiungere ai pezzi smussi e raccordi (mostrati a destra).



Sfide nella rimozione dei supporti

I supporti all'interno di fori e tubi possono essere difficili da rimuovere e richiedere interventi di lavorazione successivi. Analogamente, anche i supporti troppo piccoli possono causare problemi. Se la geometria del componente è più debole del supporto, la sua rimozione implica notevoli rischi di danneggiamento del componente stesso.



Il pezzo è troppo piccolo e fragile per rimuovere i supporti senza danneggiarlo

I supporti possono essere difficili da rimuovere senza danneggiare il componente.

Esempio di orientamento per minimizzare i supporti

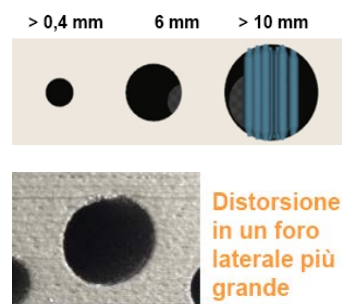
✓ L'orientamento verticale consente di costruire direttamente sulla piastra di costruzione con materiale aggiuntivo. È più probabile che il foro sia circolare. Supporti ridotti al minimo e alto tasso di riuscita.

! L'orientamento inclinato può ridurre il volume dei supporti richiesti ed evitare l'intrappolamento di materiale. Il foro prodotto può essere ellittico.

✗ L'orientamento orizzontale occupa più spazio ed è quello che richiede più supporti. I supporti all'interno del foro saranno difficili da rimuovere. È più probabile che il foro non sia circolare.

Dettaglio orizzontale - supporto o ri-progettazione

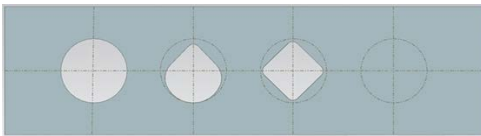
Anche i fori che emergono dalle superfici laterali potrebbero richiedere l'uso di supporti. Le dimensioni minime di un foro la cui costruzione sia sensata su gran parte della macchine laser a letto di polvere è 0,4 mm.



Fori e tubi con un diametro superiore ai 10 mm richiedono supporti al centro, ed è quindi consigliabile ipotizzarne la ri-progettazione. I fori di dimensioni intermedie possono essere creati senza supporti, ma potrebbero presentare distorsioni nelle superfici 'down-skin', a causa del lento processo di raffreddamento della pozza di fusione al di sopra della sporgenza.

È difficile che i fori orizzontali siano perfettamente rotondi e spesso conviene modificare la loro forma per avere la certezza che siano autoportanti. In alcuni casi, si può valutare la realizzazione di fori romboidali o a goccia. Entrambi i profili possono essere utilizzati per la creazione di canali per il passaggio di liquidi e forniscono prestazioni idrauliche simili, ma i fori a rombo offrono una resistenza notevolmente superiore alle sollecitazioni da pressione.

Nei casi in cui sia indispensabile ottenere fori rotondi, sarà necessario procedere a una lavorazione successiva. Da questo punto di vista, i rombi offrono un foro pilota simmetrico per la fresatura e sono preferibili rispetto alle forme a goccia. In molti casi, può essere preferibile riempire il foro e ricavarlo



Opzioni per i fori laterali: costruire a misura e tollerare un po' di distorsione, produrre fori autoportanti a goccia o a rombo con un po' di materiale in più per successiva lavorazione, o lavorazione della caratteristica dal solido.

Suggerimenti di progettazione nell'ottica dei supporti

- Rimodellare i fori con diametro maggiore di 10 mm in forme romboidali autoportanti
- Usare smussi per evitare supporti alti
- Eliminare le aree sporgenti più di 45° rispetto alla verticale
- Ruotare le superfici 'down-skin' in direzione opposta a quella della racla
- Lavorare a macchina le caratteristiche più piccole dopo la costruzione
- Costruire direttamente sulla piastra di costruzione con materiale aggiuntivo per successiva lavorazione
- Eliminare le aree 'down-skin' orizzontali

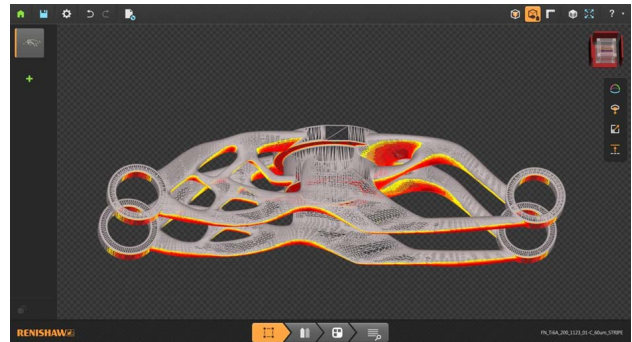
Fattore nr. 4 - ottimizzazione

L'ottimizzazione topologica e la progettazione generativa sono sempre più utilizzate per progettare componenti efficienti. Anche le strutture reticolari possono garantire vantaggi in termini di riduzione del peso. La capacità dell'AM di produrre forme complesse la rende la metodologia ottimale per creare strutture di questo tipo.

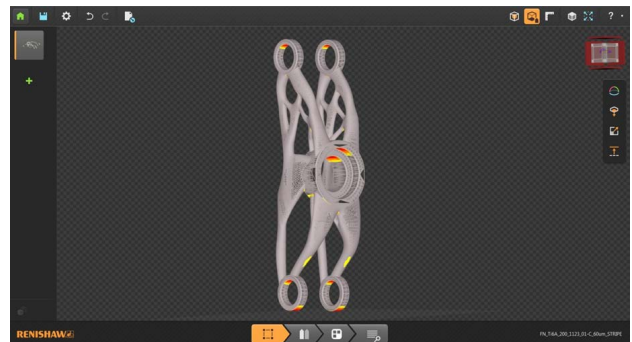


L'obiettivo principale di queste tecniche di ottimizzazione è preservare la resistenza e rigidità strutturale eliminando il materiale non necessario. Spesso i componenti ottimizzati assumono un aspetto più complesso, quasi organico. È importante notare che una parte ottimizzata dal punto di vista funzionale potrebbe non essere molto adatta alla produzione in AM, specialmente in termini di orientamento della costruzione.

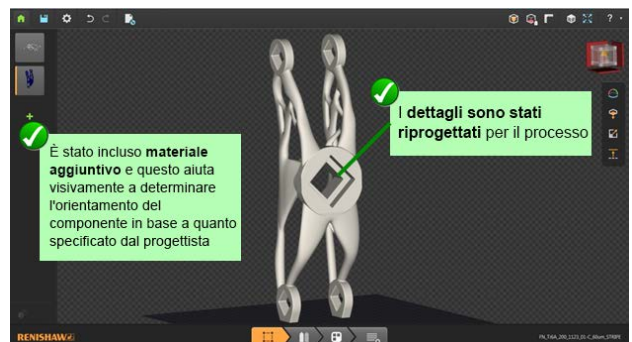
Ad esempio, è ovvio che creare questo componente con orientamento orizzontale richiederebbe una grande quantità di supporti nelle regioni sporgenti evidenziate in rosso.



Ri-orientarlo in senso verticale riduce il numero di parti che hanno bisogno di supporto. Dettagli come i fori circolari avranno bisogno di supporti o dovranno essere ri-progettati. Sarà necessario prestare attenzione anche negli angoli dei segmenti ottimizzati e nei raggi dei raccordi nei quali s'incontrano.



La ri-valutazione del componente in fase di progettazione ha tenuto conto dell'orientamento di costruzione, evidenziando che può essere solo uno. I dettagli come i fori laterali sono stati ora ri-progettati per essere ottenuti tramite lavorazione successiva:



Suggerimenti di progettazione nell'ottica dell'ottimizzazione

- Fare riferimento alle linee guida relative allo spessore minimo delle pareti
- Identificare le aree critiche per la lavorazione meccanica
- Si consideri il posizionamento dei supporti e la rimozione o ri-progettazione per eliminarne la necessità
- Progettare in funzione di un orientamento e modificare i dettagli di conseguenza
- Determinare se sia possibile ottenere la finitura superficiale richiesta

I progettisti possono trovarsi a dover combinare tecniche diverse - ottimizzazione topologica, parti cave, strutture reticolari (ove applicabili) - per ottenere un progetto efficiente. L'orientamento dovrebbe essere lo stimolo principale, dopo l'idoneità, la forma e la funzione.

Riepilogo

L'AM offre una grande libertà progettuale nella produzione di componenti efficienti ad alte prestazioni. Ma tener conto delle caratteristiche dei processi AM è fondamentale anche per costruire i pezzi minimizzando costi e sprechi.

Integrare l'approccio DfAM nella fase di progettazione massimizza la riuscita della costruzione e migliora l'economia del processo AM. I progettisti dovranno conoscere meglio il processo di produzione additiva, se vogliono essere competitivi.

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

