

TECNICHE DI PRODUZIONE ADDITIVE

Introduzione

Con l'espressione Tecnologie Additive (Additive Manufacturing, AM) ci si riferisce all'insieme dei processi di trasformazione volti all'ottenimento del volume e della geometria del componente tramite l'aggiunta progressiva di materiale in assenza di stampi

Questa definizione sottolinea le distinzioni di tali lavorazioni dagli altri processi di lavorazione meccanica. In particolare, il fatto che tramite tali processi venga ottenuto il volume finale del componente li differenzia chiaramente dai processi per deformazione plastica (forgiatura, laminazione, piegatura ecc.)

Tale volume finale è inoltre ottenuto tramite l'aggiunta di materiale, al contrario di quanto accade nel caso delle lavorazioni per asportazione di truciolo

Il fatto che l'aggiunta di materiale avvenga in maniera progressiva differenzia tali tecnologie dai processi di consolidamento delle polveri

Infine, viene rimarcato come tale aggiunta progressiva avvenga in assenza di attrezzature fisse che riproducono il negativo della geometria desiderata, evidenziando così la distinzione dai processi fusori (colata in sabbia, pressocolata microfusione, ecc.)

Nel linguaggio comune si fa spesso ricorso al termine stampa 3D o 3D Printing (3DP) come sinonimo di tecnologia additiva

Questa dicitura ha riscosso un grande successo grazie all'analogia con la stampa bidimensionale e all'idea di semplicità di utilizzo da essa richiamata

Volendo essere rigorosi, la dicitura 3DP corrisponde ad uno specifico processo additivo e pertanto non sarebbe corretto ricorrervi per riferirsi all'intero settore tecnologico

Le tecnologie additive sono state il fenomeno più popolare dell'ingegneria di processo da molti anni a questa parte. L'enorme interesse verso questi processi deriva in primo luogo dalla possibilità di superare molti dei vincoli geometrici delle altre tecnologie

Bisogna sottolineare come questo non significa che queste tecnologie siano prive di vincoli, bensì ne introducono di nuovi, che devono pertanto essere opportunamente compresi e gestiti durante la progettazione

Un altro motivo alla base del successo dell'AM risiede nella sua natura profondamente digitale, la quale lo rende uno dei campi abilitanti nel panorama dell'industria 4.0. In pratica, con tutte è possibile realizzare il prodotto immediatamente dopo averne realizzato il modello solido CAD

Per questo motivo sono state sfruttate per dare la possibilità a progettisti e designers di vedere realizzate in tempi brevi le proprie idee

Fasi comuni

E' possibile riscontrare tra le varie tecniche alcuni aspetti comuni che caratterizzano il flusso di informazioni che porta dal progetto al prodotto

Tutti i processi additivi partono da una rappresentazione virtuale del modello realizzata al CAD

La presenza di un modello digitale del prodotto è un requisito vincolante per la realizzazione del prodotto finale: questo aspetto distingue le tecnologie additive dalla maggior parte degli altri processi

Attualmente, i processi di AM utilizzano una particolare rappresentazione del solido detta STL (ambiguamente STereo Lithography interface format o Standard Triangulation Language): all'interno di tale codifica, le superfici esterne sono rappresentate tramite una discretizzazione (mesh) di elementi triangolari

Ciascun elemento triangolare (o facet) è caratterizzato dalle nove coordinate cartesiane (X, Y e Z) dei suoi tre vertici (v_1 , v_2 e v_3) e dalle tre componenti (i, j e k) del versore uscente dalla superficie

La definizione della normale uscente dal solido è un aspetto fondamentale per definire la porzione di spazio occupata dal volume della parte, cioè per definire l'interno e l'esterno dell'oggetto

Il passaggio da una rappresentazione B-Rep ad una discretizzazione tramite triangoli comporta una approssimazione delle superfici matematiche del componente

Nelle figure è mostrata la medesima sfera in rappresentazione B-Rep ed STL tramite rispettivamente 320, 192 e 60 triangoli

Al diminuire dei triangoli, la rappresentazione STL porta ad un allontanamento dalla geometria nominale della parte

Essendo il file STL il punto di partenza per il successivo processo additivo, la scelta del numero dei triangoli utilizzati per la rappresentazione è dunque fondamentale nel determinare la geometria componente finale

Il numero di triangoli scelto è di norma un compromesso tra l'accuratezza geometrica desiderata e le dimensioni del file STL

La maggior parte degli ambienti CAD consente di fissare un parametro detto corda massima, ovvero la massima distanza tra la discretizzazione triangolare e le superfici matematiche, demandando al software la creazione dell'STL tramite l'utilizzo del minor numero di triangoli necessario a soddisfare tale vincolo

Accanto ai file STL, negli ultimi anni sono stati proposti nuovi formati, come ad esempio l'Additive Manufacturing File format (AMF) o il 3D Manufacturing Format (3MF), con lo scopo di includere ulteriori informazioni riguardo il modello (colori, materiali ed altro) e ridurre la quantità di memoria allocata tramite compressione

Questi formati rappresentano sempre la geometria per mezzo di una discretizzazione di triangoli

Al fine di rendere possibile il successivo processo di manifattura additiva, è necessario assicurarsi che l'insieme dei triangoli rappresenti le superfici di un solido reale

E' necessario correggere eventuali zone di criticità nella discretizzazione

Esistono attualmente numerosi software dedicati alla verifica e riparazione di file STL, che rappresenta una fase di fondamentale importanza nel ciclo produttivo di qualsiasi componente realizzato tramite AM

Dopo aver ottenuto una rappresentazione digitale dell'oggetto (o degli oggetti) da realizzare, si passa alla creazione di una rappresentazione virtuale del lavoro di stampa utilizzato per la loro costruzione

Tale rappresentazione del processo comprende tutti gli aspetti geometrici, come ad esempio quanti e quali oggetti debbano essere realizzati, la loro posizione e il loro orientamento all'interno dell'area di lavoro della macchina

Si modellano inoltre le geometrie ausiliarie, ovvero quelle parti di materiale non utili alla messa in esercizio del pezzo, ma necessarie alla sua costruzione

In questa fase è necessario definire i parametri di processo, ovvero le restanti informazioni necessarie a definire in maniera univoca il comportamento della macchina durante la produzione

Il modello digitale del processo viene infine utilizzato per generare le istruzioni macchina, ovvero l'insieme dei comandi che il controllo numerico del dispositivo dovrà attuare e controllare durante il processo additivo

Il primo passo per la modellazione del processo additivo è la definizione dell'area di lavoro, vale a dire della regione del dispositivo nella quale avviene il processo

di trasformazione

La forma e le dimensioni dell'area di lavoro variano seconda della tecnologia additiva e della specifica macchina

Una rappresentazione in ambiente virtuale dell'area di lavoro definisce quindi lo spazio utile ai fini del processo

Tale rappresentazione include, oltre alla geometria dell'area di lavoro, il sistema di riferimento cartesiano della macchina. La figura 1.6 a) fornisce un esempio di rappresentazione digitale dell'area di lavoro per una macchina additiva

La figura a sinistra fornisce un esempio di rappresentazione digitale dell'area di lavoro per una macchina additiva

Il prodotto è rappresentato tramite un modello digitale definito rispetto ad un sistema di riferimento interno

Per consentire la lavorazione, il prodotto dovrà essere situato all'interno dell'area di lavoro della macchina. A livello di rappresentazione digitale, ciò si traduce in una serie di rotazioni e traslazioni del sistema di riferimento locale del modello rispetto al sistema di riferimento della macchina, per definirne la posizione e l'orientamento all'interno dell'area di lavoro

La figura a destra mostra un esempio di modello del prodotto collocato all'interno della regione di costruzione in seguito a tali trasformazioni

A seconda del tipo di tecnologia additiva utilizzata, l'orientamento e la posizione del componente rispetto al sistema di riferimento macchina hanno un'importanza fondamentale nel determinare le proprietà fisiche e geometriche del prodotto, nonché i tempi e la quantità di materiale necessari alla sua realizzazione

La definizione dell'orientamento e della posizione ottimale del modello all'interno dell'area di costruzione è dunque un problema multi-obiettivo che non possiede, di norma, una soluzione univoca

Il problema si complica ulteriormente se si considera che è possibile posizionare all'interno della medesima area di lavoro più componenti (siano essi ripetizioni dello stesso modello o di modelli differenti), che saranno quindi realizzati simultaneamente durante il processo additivo

La scelta della posizione e dell'orientamento di ciascun modello avrà quindi un'incidenza fondamentale nel determinare il numero di componenti realizzabili tramite il medesimo processo produttivo. L'operazione di orientamento e collocamento dei modelli all'interno dell'area di lavoro prende il nome di nesting (letteralmente annidamento)

Si parla di nesting anche relativamente nella tranciatura delle lamiere, al fine di ridurre la quantità di scarto, ma in questo caso è un nesting tridimensionale, più complesso

Durante il nesting l'ingegnere di processo è chiamato a compiere delle scelte di fondamentale importanza per garantire la produttività e l'economicità del processo produttivo nel mantenimento dei requisiti qualitativi imposti per il prodotto

Al fine di raggiungere tale scopo, è necessaria una conoscenza profonda delle caratteristiche dello specifico processo additivo utilizzato

Poiché le tecnologie additive trovano grande impiego nella realizzazione di particolari unici o di piccole serie, l'attività di nesting abbia un peso fondamentale sulla pianificazione della produzione

Per procedere con la descrizione dei parametri necessari a completare il modello virtuale del processo, è indispensabile introdurre il concetto di stratificazione

Infatti, nella quasi totalità delle tecnologie additive ad oggi disponibili, la geometria tridimensionale del prodotto è ottenuta tramite la sovrapposizione di strati piani di materiale detti layers generati in sequenza

Convenzionalmente, il sistema di riferimento delle macchine additive è scelto indicando con Z la direzione lungo la quale avviene la stratificazione. La produzione additiva si tradurrà dunque nella generazione di figure piane (nel piano XY) sovrapposte lungo Z

All'atto della realizzazione, le figure piane corrispondenti a ciascuno strato saranno dotate di uno spessore (altezza del layer). L'area di lavoro sarà dunque suddivisa tramite una serie di piani normali a Z e distanziati di una quantità pari all'altezza del layer; l'intersezione di tali piani con i modelli digitali dei prodotti presenti all'interno dell'area di lavoro determinerà la figura piana corrispondente a ciascun layer

Questa operazione prende il nome di slicing (letteralmente, affettare)

Lo slicing porta a una discretizzazione del modello digitale, introducendo dunque un ulteriore fattore di approssimazione (oltre a quello dato dalla rappresentazione STL)

Nella figura superiore il medesimo modello è rappresentato in formato STL e come sovrapposizione di layer piani

Tale approssimazione va riducendosi al diminuire dello spessore degli strati (h_L) utilizzati per la discretizzazione

L'approssimazione introdotta dallo slicing introduce sulle superfici esterne del componente realizzato il cosiddetto effetto a gradini (o stairstepping)

Questo effetto può essere descritto tramite l'altezza della cuspide (cusp height), ovvero la massima distanza tra il modello STL e la geometria stratificata a ciascun layer, come mostrato nella figura inferiore

L'altezza h_c della generica cuspide dipende non solo dalla altezza h_L del layer, ma anche dall'orientamento della mesh STL, ovvero dal vettore normale n . In particolare, essendo la componente in direzione Z n_z del vettore normale uguale al coseno dell'angolo α mostrato in figura, l'altezza della cuspide può essere stimata con la formula nella slide

Si noti come il valore di h_c tenda a 0 per α che tende a $\pi/2$, ovvero nel caso di pareti verticali in cui n è ortogonale alla direzione di accrescimento Z. Infatti, in tal caso ciascun layer sarà allineato al precedente, non dando quindi luogo all'effetto a gradini

Osservando l'equazione è possibile notare come l'altezza della cuspide cresca al diminuire dell'angolo α . Questo fa sì che l'effetto a scalini divenga sempre più visibile man mano che l'orientamento delle superfici si avvicina al piano XY

Tuttavia, una superficie perfettamente orizzontale, cioè coincidente col piano XY, sarà costruita all'interno dello stesso layer e non darà pertanto luogo all'effetto a gradini. Questo è il motivo per il quale la formula esclude i valori $\alpha = 0$ e $\alpha = \pi$, in corrispondenza dei quali si avrà $h_c = 0$

Per i motivi sopra esposti, le features piane che richiedono un grado di dettaglio elevato, ad esempio i fori, sono, laddove possibile, realizzate nel piano XY

Inoltre, quando si vanno a realizzare due componenti destinati all'accoppiamento è sempre opportuno che le superfici a contatto vengano costruite con il medesimo orientamento rispetto al piano di stampa, così che gli effetti dello stairsepping si riflettano in maniera uguale sulle due parti accoppiate

Oltre all'accuratezza del modello, l'altezza del layer (e dunque il numero di strati in cui il modello sarà discretizzato) influenza direttamente il tempo di costruzione del modello, con ovvie ripercussioni sui consumi energetici ed i costi dell'intero processo

Risulta dunque evidente come l'altezza dei layer da utilizzare durante il processo additivo sia un parametro fondamentale della rappresentazione digitale del processo

I valori adottabili dipendono fortemente dalla specifica tecnologia utilizzata ed influenzano, oltre all'accuratezza dimensionale, le proprietà fisiche dei componenti ed i tempi di processo

Ulteriori parametri necessari a descrivere univocamente il processo additivo comprendono, ad esempio, le caratteristiche fisiche del materiale utilizzato, la velocità degli organi della macchina in movimento, le temperature che devono essere mantenute nelle diverse zone della macchina e le dimensioni degli eventuali utensili

Una volta completato il modello digitale del processo, esso viene convertito da un opportuno software nelle istruzioni macchina necessarie alla sua attuazione

Affinché ciò sia possibile, il software dovrà contenere le regole necessarie a rielaborare le informazioni in ingresso e a trasformarle in istruzioni interpretabili dalla specifica macchina utilizzata: pertanto, il software viene generalmente fornito dal produttore del dispositivo

Le istruzioni generate vengono poi inviate alle logiche di controllo della macchina; in molte tecnologie attualmente sul mercato, tale trasferimento di dati può avvenire utilizzando la rete internet

Tutte le operazioni preparatorie finora descritte sono svolte in ambiente virtuale e non necessitano la prossimità tra operatore e macchina. Ne consegue che il medesimo operatore può pianificare, preparare e comandare da remoto numerosi processi additivi su dispositivi anche distanti tra loro

Inoltre, la generazione di un modello di processo digitale consente a chiunque sia in possesso di tale file di replicare la medesima produzione su una macchina. Di conseguenza, la condivisione dei progetti di processo e la sicurezza dei dati sono aspetti centrali

Una volta ricevute le istruzioni necessarie alla realizzazione dei componenti, la macchina può procedere alla loro attuazione per la realizzazione dei componenti specificati

Le modalità con cui il materiale viene trasformato per andare a costituire il componente finale dipendono fortemente dalla tecnologia utilizzata; tuttavia, è possibile osservare alcuni aspetti comuni tra le diverse tecnologie nel modo in cui vengono costruiti i diversi layer

Durante la costruzione del pezzo, l'operatore può controllare l'area di lavoro in maniera diretta o indiretta (tramite appositi sistemi di acquisizione dell'immagine, anche da remoto) al fine di monitorare eventuali criticità o scostamenti dal comportamento atteso

Una volta terminata la fase di costruzione, il prodotto deve essere rimosso dall'area di lavoro della macchina

Nei processi additivi questa operazione risulta spesso critica e può richiedere particolari accorgimenti per preservare la qualità del prodotto, dell'ambiente di lavoro e della sicurezza degli operatori. Questa fase richiede solitamente l'impiego di specifiche attrezzature manuali o robotizzate

A seconda della tecnologia impiegata, può essere necessario un tempo di attesa tra la fine della costruzione del pezzo e la rimozione del componente

Nei processi che agiscono per via termica tale tempo di attesa consente un rilassamento delle tensioni di raffreddamento necessario ad evitare deformazioni incontrollate del prodotto

Se la costruzione avviene in presenza di gas pericolosi per l'essere umano o per l'ambiente, essi devono essere aspirati (tramite opportuni sistemi di filtraggio) prima che la zona di costruzione sia messa in contatto con l'ambiente esterno

In molti processi il distacco del pezzo dalla macchina richiede l'ausilio di opportune attrezzature (manuali o robotizzate) che consentano di evitare il danneggiamento del prodotto e dei componenti della macchina stessa

Un aspetto particolarmente importante legato alla rimozione del componente dalla zona di lavoro è il recupero del materiale non trasformato eventualmente presente in essa

Infatti, molti processi additivi necessitano di introdurre nella zona di lavoro una quantità di materiale di partenza superiore a quella trasformata per formare il pezzo finale; il materiale in eccesso deve dunque essere opportunamente raccolto per poter essere riutilizzato (totalmente o in percentuali controllate) nelle produzioni successive

I pezzi ottenuti da tecnologia additiva, una volta rimossi dalla zona di costruzione, sono spesso inadatti alla messa in opera diretta nella maggior parte delle applicazioni di interesse industriale

Si possono dunque rendere necessarie varie operazioni sulle parti ottenute al fine di raggiungere le caratteristiche geometriche e fisiche imposte dal progetto

Tali operazioni si configurano quindi come fasi successive all'interno del ciclo produttivo del componente e possono raggiungere gradi di complessità molto differenti a seconda della tecnologia impiegata e delle richieste progettuali

Tra le operazioni più comunemente adottate a valle dei processi additivi vi sono:

Rimozione delle strutture ausiliarie, ovvero di tutte le eventuali porzioni di materiale trasformato necessarie alla costruzione del pezzo, ma non alla sua messa in opera

Pulizia del pezzo, con rimozione dell'eventuale materiale non trasformato che residua dopo l'estrazione del pezzo dall'area di costruzione

Trattamenti termici, fisici o chimici, necessari a conferire alla parte specifiche proprietà meccaniche o fisiche

Finitura superficiale, in particolare al fine ridurre l'effetto "a gradini" indotto dalla stratificazione sulle superfici esterne

Ulteriori operazioni post-processo possono includere verniciatura, rivestimento, infiltrazione ed altri

Le prime applicazioni dei processi additivi si sono avute nel campo dello sviluppo prodotto per l'ottenimento di prototipi

La flessibilità delle tecnologie additive, infatti, consente di ottenere geometrie tridimensionali di forma complessa in tempi ristretti rispetto alle tradizionali tecniche di prototipazione

In seguito, le accuratezze dimensionali ottenibili e la ripetibilità del processo hanno consentito a molte tecnologie di produrre componenti che vadano ad inserirsi all'interno di assiemi complessi (accoppiandosi agli altri elementi funzionali)

Le proprietà fisiche e meccaniche che possono essere raggiunte tramite alcune tecnologie additive sono ad oggi comparabili con quelle dei prodotti da "processi tradizionali"

L'applicabilità di una tecnologia additiva in luogo di altri metodi per la produzione di un dato componente dipende dalle specifiche della tecnologia medesima e del progetto

Tali tecnologie risultano spesso convenienti economicamente rispetto ai metodi "tradizionali" nel caso di geometrie complesse e piccoli lotti di produzione

Infatti, la costruzione per strati consente il superamento di molti vincoli legati ad altri processi, consentendo di sostituire un ciclo produttivo in più fasi

Inoltre, l'assenza di attrezzature fisse legate alla geometria del componente consente di svincolare il costo unitario del prodotto dalle dimensioni del lotto produttivo

I vantaggi derivanti dall'impiego di tecnologie additive possono essere colti appieno solo tramite un'opportuna progettazione che tenga conto di potenzialità e vincoli degli specifici processi

A tal fine, è fondamentale che i progettisti siano informati riguardo i nuovi strumenti tecnologici, introdotti sul mercato ad un ritmo sempre più serrato

Classificazione

Il panorama delle tecnologie additive risulta estremamente variegato ed in continua evoluzione

Fornire una classificazione soddisfacente di tali processi in grado di porre ordine in questo scenario risulta complicato

Vedremo una classificazione basata su:

- o Materiale di partenza
- o Strategia di stratificazione
- o Strategia di costruzione del layer

Nel seguito ciascuna di queste tre voci sarà brevemente definita, con la presentazione delle categorie che la compongono e delle relative peculiarità

I materiali di partenza per le tecnologie additive possono essere:

- o Liquidi
- o Viscosi
- o Pulviscolari
- o Solidi

Materiali liquidi

I principali materiali allo stato liquido utilizzati nel campo delle tecnologie additive sono le resine fotopolimeriche, ovvero resine termoindurenti in grado di polimerizzare tramite fotopolimerizzazione

La fotopolimerizzazione è il meccanismo chimico-fisico tramite il quale alcuni materiali polimerici modificano le proprie caratteristiche quando colpiti da una radiazione luminosa

Il risultato della fotopolimerizzazione è un polimero termoindurente solido

A seconda del tipo di resina utilizzata, la polimerizzazione può avvenire seguendo due diversi meccanismi:

Fotopolimerizzazione radicalica, nella quale la catena polimerica si forma tramite la successiva addizione di radicali liberi. E' un meccanismo tipico delle resine acriliche

Fotopolimerizzazione cationica, nella quale i monomeri assorbono una carica che li rende reattivi, consentendone l'aggregamento ad altri monomeri per la formazione del polimero. É un meccanismo tipico delle resine epossidiche

In entrambi i casi, è necessaria la presenza all'interno della resina liquida di un particolare elemento chimico -detto fotoiniziatore- che una volta sottoposto a radiazione luminosa rilascia le sostanze necessarie ad innescare la polimerizzazione del materiale

La fotopolimerizzazione radicalica risulta più veloce di quella cationica, e questo la rende particolarmente favorevole per contenere i tempi necessari al processo additivo tramite fotopolimerizzazione selettiva

Di contro, le resine epossidiche mostrano una minor contrazione volumetrica durante la polimerizzazione, con conseguente riduzione delle distorsioni nel pezzo finale

Perciò, queste famiglie di monomeri sono attualmente spesso incluse nella composizione delle resine commerciali

La necessità di innescare la fotopolimerizzazione pone un importante limite ai materiali trasformabili tramite questo meccanismo

Le resine liquide adottate nel processo di stereolitografia possono contenere altri elementi in grado di conferire al componente finale particolari caratteristiche fisiche

Materiali viscosi

Ricordo che la deformazione dei materiali viscosi è funzione non solo del carico applicato, ma anche della sua durata

I materiali reali hanno una, seppur piccola componente di deformazione elastica, la quale deve essere tenuta in considerazione durante il processo di trasformazione

I materiali di interesse per i processi di trasformazione additiva includono polimeri termoplastici, impasti ceramici, cemento, paste alimentari ed altri

Tali materiali vengono mantenuti allo stato viscoso durante il processo di costruzione della geometria tridimensionale

Una volta modellati, vengono quindi sottoposti a trattamenti finalizzati a conferire al manufatto le proprietà meccaniche desiderate, in particolare in termini di rigidità

Tali trattamenti possono consistere in raffreddamenti, cicli di cottura, essiccazione, o altro

Polveri

I materiali in forma pulviscolare sono costituiti da particelle solide di granulometria solitamente inferiore ai 100 micron

Tali materiali trovano grande impiego nel campo delle tecnologie additive, grazie alla loro estrema versatilità ed alla possibilità di mescolare polveri di diversa natura, ottenendo così particolari proprietà fisico-chimiche del prodotto finito

Le classi di materiali processate nel campo delle tecnologie additive includono polimeri termoplastici, metalli e minerali come le ceramiche ed il silice

Il consolidamento delle polveri per ottenere un solido continuo tramite tecnologie additive avviene attraverso sinterizzazione e/o fusione

Si possono distinguere quattro principali meccanismi di unione

Sinterizzazione allo stato solido

Legame chimico

Sinterizzazione per fusione localizzata

Rifusione completa

I processi additivi possono utilizzare uno o più di questi meccanismi per ottenere un solido a partire dal materiale pulviscolare

La sinterizzazione allo stato solido avviene ponendo dei grani di polvere adiacenti in un ambiente che ne aumenti l'energia superficiale specifica rispetto alle condizioni ambientali (questo può essere fatto, ad esempio, aumentando la temperatura o la pressione)

All'aumentare dell'energia superficiale specifica, per minimizzare l'energia superficiale totale del sistema, le particelle di polvere tenderanno ad unirsi come in B) , riducendo così la superficie totale. Tale fenomeno avviene a temperature anche inferiori a quella di fusione del materiale, senza quindi nessun passaggio attraverso lo stato liquido

Il consolidamento per via chimica si basa su reazioni chimiche attivate termicamente (tra polveri differenti o tra la polvere e altri elementi presenti nell'ambiente di lavoro) che portano alla generazione di sottoprodotti che fungono da leganti

Si ha quindi un incollaggio delle polveri solide tramite un secondo prodotto. Il risultato di questo meccanismo di consolidamento è dunque un materiale composito costituito dal materiale di base e dal legante

La resistenza del componente finale dipende dunque dalle forze adesive tra polvere e legante, e non dalle caratteristiche proprie del materiale di base

Inoltre, questo meccanismo di consolidamento porta a parti con porosità generalmente elevate, poiché il legante non riesce a riempire efficacemente i meati tra i grani di polvere

Nella fusione localizzata si verifica il passaggio allo stato liquido di alcune zone della polvere

Tali zone possono essere dovute ad una composizione eterogenea che favorisce la fusione del componente bassofondente o ad un apporto di calore sufficiente a rifondere solo la parte esterna del granello; questa seconda tecnica è più facilmente applicabile nei materiali che presentano bassa conduttività termica (come ad esempio i polimeri)

La figura mostra un esempio di rifusione localizzata in cui la superficie dei grani solidi (A) passa allo stato liquido (B) per poi risolidificarsi in un solido continuo (C)

Nell'ultimo metodo di consolidamento, la rifusione completa, si assiste al passaggio di tutti i granelli di materiale allo stato liquido con successiva solidificazione in un solido unico

La quasi totalità dei processi additivi a letto di polvere utilizza ad oggi la fusione localizzata o la rifusione completa per la sinterizzazione delle polveri

Esistono inoltre processi additivi in cui le polveri vengono bagnate da un legante chimico che funge da collante tra i granelli di solido. Valgono in tal caso le stesse considerazioni esposte nel caso della sinterizzazione per legame chimico

Tipicamente questi processi sono seguiti da un trattamento termico durante il quale il legante viene dissolto e si instaura uno degli altri meccanismi di sinterizzazione per via termica descritti in precedenza

Solidi

I processi additivi che utilizzano materiali di partenza allo stato solido (con forma diversa da quella pulviscolare) sono attualmente pochi e con limitati campi di applicazione

Ciò è da imputarsi principalmente alle difficoltà che si incontrano nel modellare il materiale solido per ottenere la forma dell'oggetto finale

Per questo motivo, all'interno dei processi additivi, si utilizzano per lo più solidi con geometrie che ne favoriscano la deformabilità, come filamenti e fogli di piccolo spessore

Si possono poi adoperare sottoprocessi di taglio per conferire al materiale la forma desiderata

I materiali solidi usati sono principalmente polimeri termoplastici e metalli

Il meccanismo di consolidamento può essere l'incollaggio, tramite adesivo o solvente, oppure la saldatura del materiale

Strategie di solidificazione

Il componente realizzato con tecnologia additiva è ottenuto per strati successivi di materiale

Questi strati possono essere ottenuti per:

o Trasformazione selettiva (Processi a letto di materiale)

o Deposizione

Si distingue tra queste due categorie a seconda che il materiale di partenza, nel momento in cui avviene la sua trasformazione, riempia (interamente o parzialmente) o meno la camera di costruzione

Nella trasformazione selettiva di materiale la camera di costruzione (o almeno la porzione in cui avviene la trasformazione del materiale) è inizialmente piena del materiale di partenza

Per questo motivo i processi che utilizzano tale strategia sono anche detti a letto di materiale. Il processo procede quindi trasformando solo la porzione del materiale che corrisponde alla geometria del pezzo

Una volta completata questa trasformazione, l'intera area di lavoro viene ricoperta di materia prima ed il ciclo si ripete

Al termine del processo, il pezzo si troverà quindi immerso nel materiale di partenza, dal quale dovrà essere estratto

Ciò comporta in primo luogo la necessità di una operazione di pulizia del pezzo in seguito alla rimozione dalla camera di costruzione. Non sarà quindi possibile costruire parti cave prive di aperture in quanto il materiale non trasformato rimarrebbe intrappolato all'interno

La dimensione minima delle aperture necessarie a pulire il pezzo dipenderà dalla sua geometria, dalle caratteristiche del materiale e dal metodo usato per la pulizia

Nella deposizione, il materiale viene depositato solo in zone scelte della camera di costruzione, la quale è inizialmente occupata da aria o altri gas.

Il primo layer di materiale sarà depositato sulla piattaforma di costruzione (ovvero il pavimento della camera di costruzione), mentre ciascuno dei layers successivi sarà depositato sul precedente

Questa strategia di stratificazione offre la possibilità di depositare materiali diversi in maniera controllata. Si ha quindi l'opportunità di progettare e realizzare componenti costituiti da più materiali, cosa che non è in genere possibile fare nei processi a letto di materiale

Strutture di supporto

A questo punto è opportuno introdurre un tema fondamentale della progettazione per tecnologie additive, ovvero le strutture di supporto

Nei processi di deposizione, al fine di avere ad ogni layer una continuità del materiale con la piattaforma di costruzione, il modello non deve presentare zone a sbalzo nella direzione Z

In altri termini, ad ogni strato $i > 0$ ciascuna zona trasformata deve trovare sotto di sé del materiale: infatti, se così non fosse, il materiale non potrebbe aderire al resto del componente, ma cadrebbe sulla piattaforma per effetto della gravità

Questa considerazione è valida anche per i processi a letto di materiale in cui la materia prima è costituita da un liquido o comunque presenta una densità minore a quella del materiale trasformato

La figura 2.4 mostra un esempio di modello che presenta minimi locali rispetto all'asse Z, mettendo in evidenza come tali zone siano sconnesse dal resto del modello al layer i-esimo

La presenza di minimi locali può essere in alcuni casi evitata agendo sull'orientamento rispetto all'asse Z del componente in fase di progettazione del processo

Molto spesso è necessario trasformare zone ausiliarie di materiale, dette supporti, che hanno la funzione di sostenere il materiale trasformato nelle zone a sbalzo del modello. La figura mostra in colore blu i supporti aggiunti per sostenere le zone critiche evidenziate nella slide precedente

Al termine del processo, il pezzo presenterà dunque delle zone trasformate (le strutture di supporto) che non fanno parte del modello iniziale, ma sono necessarie alla sua realizzazione. Tali strutture dovranno dunque essere rimosse nella fase di post-processo, prima della messa in opera del componente

I supporti devono essere aggiunti al modello in ambiente virtuale durante la progettazione del processo: esistono a tale scopo numerosi software dedicati

A seconda delle caratteristiche specifiche della tecnologia e del processo, è possibile utilizzare strutture di supporto di geometrie e dimensioni diverse

Gli obiettivi che ci si pone durante la progettazione di tali strutture sono:

Sostenere efficacemente il materiale in costruzione

Ridurre il volume delle strutture di supporto

Facilitare la rimozione dei supporti in post-processo

Al fine di facilitarne la rimozione, i supporti vengono solitamente progettati con sezioni assottigliate in prossimità della parte che fungono da zone di rottura preferenziale (si veda l'esempio di figura 2.5, in cui i supporti hanno forma conica con sezione minima nel punto di contatto con il pezzo)

Per consentire la rimozione, è inoltre necessario che i supporti siano posizionati in zone raggiungibili dall'operatore e dagli eventuali utensili utilizzati per la loro rimozione

Oltre che ad evitare la presenza di minimi locali, le strutture di supporto possono essere necessarie anche ad evitare che il materiale appena trasformato si deformi per effetto del proprio peso

La tendenza del layer a deformarsi sotto l'effetto del peso proprio dipende dalle caratteristiche del materiale, dall'inclinazione rispetto a Z delle superfici e da numerosi parametri di processo come, ad esempio, l'altezza del layer

Per una certa combinazione di materiale e parametri, è dunque possibile definire un angolo α_{lim} detto angolo limite rispetto all'asse Z, oltre il quale il materiale non è in grado di sostenere il proprio peso

La figura mostra una rappresentazione dell'angolo theta da confrontarsi con l'angolo limite α_{lim} : si noti come ciascun layer in figura presenti una sezione a sbalzo rispetto allo strato precedente, la cui lunghezza aumenta al crescere di theta

Una volta noto l'angolo limite, è possibile individuare le superfici che necessitano di supporti, andando a verificare il loro orientamento rispetto alla direzione di costruzione

La deformazione del materiale sotto l'effetto del peso proprio interessa anche le strutture cosiddette "a ponte", ovvero tutte quelle geometrie sostenute solo agli estremi dal materiale sottostante

La figura mostra un esempio di struttura "a ponte" deformata sotto l'effetto del peso proprio

La deformazione di una struttura a ponte dipende dalla lunghezza della zona sospesa, nonché dalle dimensioni della sezione trasversale

Si definisce un rapporto massimo tra queste grandezze, oltre il quale sarà necessario ricorrere a strutture di supporto

Ragionamenti analoghi possono essere condotti nel caso di geometrie a sbalzo. Anche in questo caso si avrà quindi un rapporto massimo tra la sezione della struttura a sbalzo e la sua lunghezza, oltre il quale è necessario fare ricorso a strutture di supporto

Si sottolinea come la lunghezza limite degli sbalzi sia in genere inferiore, a parità di sezione, a quella delle strutture a ponte

In alcune tecnologie la progettazione di alcuni di questi elementi, se non supportati, non è ammissibile indipendentemente dalle loro dimensioni

Strategie di costruzione dei layer

A prescindere dalla strategia di trasformazione e dalla tecnica utilizzata per il consolidamento del materiale, è possibile distinguere tre approcci differenti attraverso i quali le tecnologie additive trasformano il materiale di ciascun layer, ovvero:

Singolo canale di trasformazione

Vettore monodimensionale di canali di trasformazione

Matrice bidimensionale di canali di trasformazione

Nella strategia a singolo canale, detta anche puntuale, ad ogni istante della lavorazione avviene la trasformazione di una piccola regione del layer

L'utensile usato per tale trasformazione (sia esso materiale o energetico) viene dunque idealmente considerato come un singolo punto in movimento durante la definizione dei percorsi

L'utensile può essere attivo o inattivo a seconda che operi o meno la trasformazione del materiale di base

L'area della porzione di materiale trasformata ad ogni istante dal canale di trasformazione determinerà lo spessore della traccia di materiale trasformata e dunque la definizione ottenibile sul piano del layer

Ad ogni layer, il canale di trasformazione dovrà ricoprire tutte le aree delle figure piane definite durante la fase di slicing

Per fare ciò, normalmente si distinguono due fasi distinte per ciascun layer:

dapprima il canale compie un percorso esterno volto a trasformare il perimetro delle figure piane (contouring), mentre nella seconda fase procede a trasformare il materiale all'interno di tali figure (hatching)

I percorsi compiuti dal canale di trasformazione durante il contouring e l'hatching sono detti, rispettivamente, di contorno e di riempimento

Il tempo di costruzione di ciascun layer dipenderà dunque dall'area delle figure piane in esso contenute

In particolare, la necessità di effettuare i percorsi di riempimento aumenta il tempo necessario alla costruzione di ciascuno strato in maniera inversamente proporzionale alla velocità del canale di trasformazione e alla porzione di materiale da esso trasformato

Laddove tali tempi risultino particolarmente onerosi ed i requisiti imposti al componente lo consentano, si preferisce talvolta effettuare un riempimento non completo delle figure piane (e dunque del componente) al fine di ridurre i tempi complessivi del processo

Per ridurre il tempo di costruzione di ciascuno strato, alcune tecnologie offrono anche la possibilità di adottare più canali di trasformazione (solitamente 2 o 4) che lavorano in parallelo su zone diverse del layer

Nelle tecnologie che adottano una strategia di costruzione tramite vettore monodimensionale di canali, detta anche lineare, si ha un numero finito di canali allineati lungo una direzione fissa (normalmente Y)

Questo vettore di canali si muove con velocità ortogonale alla direzione di allineamento durante la costruzione del layer

In base alla posizione del vettore, ogni canale si troverà nella condizione

attiva o inattiva (cioè trasformerà o meno il materiale di base) a seconda della forma calcolata durante lo slicing

Questa strategia prevede dunque un coordinamento tra l'avanzamento del vettore e l'attuazione acceso/spento di ciascun canale per ottenere la figura comandata; per meglio comprendere, si può pensare all'analogia con la stampa bidimensionale a getto di inchiostro

La definizione ottenibile nella direzione Y dipenderà dalla porzione di materiale trasformata da ciascun canale e dalla distanza tra canali adiacenti

La definizione ottenibile nella direzione X, invece, dipenderà dalla velocità di avanzamento del vettore di canali

Si noti come, in questa strategia, il tempo necessario alla costruzione del singolo strato non dipenda dalla geometria delle figure piane contenute nel layer, ma solo dalla velocità di avanzamento imposta

Di conseguenza, le tecnologie che utilizzano questa strategia consentono di realizzare solidi pieni senza aggravii sui tempi

Inoltre, il tempo totale del processo dipenderà solo dal numero di layer da costruire (ovvero dall'altezza in z dell'area di lavoro utilizzata) e risulta facilmente calcolabile dal modello di processo

Nella strategia di trasformazione tramite matrice bidimensionale di canali, detta anche planare, l'intera superficie del piano xy dell'area di lavoro è suddivisa in piccole regioni, a ciascuna delle quali compete un canale di trasformazione.

L'intera geometria del layer viene dunque trasformata simultaneamente attivando i soli canali corrispondenti alle regioni piene della figura

Questa strategia prevede dunque una duplice discretizzazione delle geometrie nelle direzioni X ed Y, legata alle dimensioni dei canali di trasformazione

La risoluzione della figura piana è del tutto analoga a quella delle immagini digitali (in questo caso il canale di trasformazione si sostituisce al pixel), tanto che spesso viene espressa in punti per pollice (Dots Per Inch, DPI)

Anche in questo caso, il tempo necessario alla costruzione del singolo strato non è influenzato dalla sua geometria

Inoltre, qui non si ha nemmeno una dipendenza dalle dimensioni dell'area di lavoro

Questa strategia, trasformando simultaneamente l'intero layer, consente pertanto solitamente un risparmio considerevole di tempo sull'intero tempo di processo

Processi puntuali a letto di materiale liquido

L'unico processo in questa categoria è la stereolitografia

la stereolitografia (SLA) è la prima tecnologia additiva ad essere stata sviluppata nel 1983

Nel processo di stereolitografia, per innescare il meccanismo di fotopolimerizzazione viene utilizzata una emissione laser nel campo dell'ultravioletto (UV)

A tal fine, si sfruttano sorgenti a diodo con bassa potenza. Il laser andrà a colpire il materiale non trasformato del layer e si muoverà per riprodurre le geometrie calcolate nella fase di slicing

Il fascio laser deve provocare la polimerizzazione di un certo spessore della resina

La profondità di penetrazione del fascio dipende dalla trasparenza della resina rispetto alla lunghezza d'onda del laser e viene misurato sperimentalmente

La profondità di penetrazione è dunque un parametro caratteristico della resina liquida estremamente importante per il processo di stereolitografia

La larghezza della striscia di materiale colpito dal fascio è invece un valore caratteristico della sola radiazione

Per reticolare, la resina liquida necessita di essere esposta alla radiazione luminosa (descritta dall'intensità) per un tempo sufficiente

Definiamo dunque l'esposizione critica come il valore minimo E_c dell'esposizione al quale ha luogo la fotopolimerizzazione della resina

Il valore di E_c dipende dall'interazione tra la radiazione incidente e il materiale liquido e deve essere misurato sperimentalmente per ogni combinazione di resina e laser

Si può dimostrare che nel caso di percorso rettilineo del laser, la porzione

di materiale polimerizzato che si trova sotto il laser ad ogni posizione del percorso ha la forma di un cilindro parabolico, come mostrato in figura

C_d rappresenta la massima profondità dalla superficie colpita dal laser alla quale il materiale passa allo stato solido

E_c influisce in maniera logaritmica sulla profondità ottenibile (che decresce al crescere di E_c)

La profondità massima del tracciato polimerizzato cresce all'aumentare della potenza fornita dal laser (P_L) e diminuisce all'aumentare della velocità con cui si muove il laser (W_s), sempre con andamento logaritmico

Infine, all'aumentare del raggio W_o , si ha una riduzione della massima profondità ottenibile: questo andamento può essere compreso considerando che, a parità di potenza (e dunque

di area sottesa alla curva gaussiana in figura), un aumento di W_0 corrisponde ad una riduzione della massima intensità del laser I_{max}

La larghezza del tracciato di materiale polimerizzato è proporzionale alla radice quadrata della sua profondità

Nel processo di stereolitografia, il laser fotopolimerizza uno dopo l'altro gli strati necessari al componente finale

Questa particolare applicazione richiede dunque di:

Polimerizzare i contorni delle figure di ogni layer (contouring)

Polimerizzare l'area interna alle figure (hatching)

Garantire l'adesione di ogni layer sul precedente

Durante la reticolazione si assiste ad una riduzione di volume della resina; questa variazione volumetrica si traduce in tensioni esercitate dal materiale in trasformazione sul polimero solido (già trasformato) adiacente

Al termine del processo, il componente sarà caratterizzato da tensioni

residue interne, le quali possono indurre deformazioni considerevoli della geometria trasformata

Tale comportamento si riflette in difetti sul prodotto finito che andranno ad aumentare nel caso di sezioni snelle

Di conseguenza, le tensioni interne al materiale pongono un vincolo sulla sezione minima ottenibile tramite il processo di stereolitografia

La distribuzione e l'entità delle tensioni interne al materiale dipende fortemente dalla geometria di ciascun layer e dai percorsi (di contorno e di riempimento) usati per la sua costruzione

Al fine di garantire una stabilità del processo indipendentemente dalla geometria del componente (e dunque del contorno di ciascuno strato), sono state messe a punto speciali strategie di riempimento volte a bilanciare e a ridurre gli effetti delle tensioni interne

La prima strategia di riempimento ad essere stata sviluppata prende il nome Di WEAVE (letteralmente, tessuto)

In questo approccio, la compenetrazione tra i layer avviene solo in specifiche zone: questo consente di svincolare il riempimento della parte (e dunque la densità del componente) dalle tensioni interne da ritiro

La strategia WEAVE utilizza tre fasi distinte per la generazione del layer

FASE 1 : Il laser percorre il contorno della figura polimerizzando il materiale

FASE 2 : Il laser riempie la figura con passate parallele all'asse X distanziate di una grandezza h detta spaziatura di riempimento (hatching spacing)

FASE 3 : Il laser riempie la figura con passate parallele all'asse Y distanziate di h

Il livello di esposizione a cui è sottoposta la resina è scelto combinando i parametri in maniera tale che la profondità di cura C_d sia minore o uguale allo spessore dello strato

Nelle zone in cui le passate di riempimento in direzione X e quelle in direzione Y si incrociano, la resina sarà attraversata per due volte dalla radiazione luminosa, con un'esposizione totale risultante pari a $2E_{max}$

Una volta noto C_d , la profondità di cura aggiuntiva nelle zone di intersezione delle passate dipende solo dalle caratteristiche della resina nella sua interazione col laser

Sarà necessario agire sui parametri che definiscono C_d per far sì che C_d^* (massima profondità di cura nelle zone di intersezione) risulti maggiore dell'altezza dello strato h : pertanto, nelle zone di intersezione dei percorsi di riempimento la cura del materiale terminerà all'interno dello strato precedente, garantendo così l'adesione tra i layer

Al fine di ridurre le tensioni residue anche all'interno del layer, la spaziatura di riempimento h viene normalmente posta maggiore della larghezza del tracciato polimerizzato L_w , così da evitare la sovrapposizione tra passate parallele con conseguente sviluppo di tensioni nel piano XY

La strategia WEAVE porta ad un notevole miglioramento delle tensioni da ritiro se confrontata con un riempimento in cui ogni passata del laser compenetra completamente lo strato sottostante

Tuttavia il materiale polimerizzato durante le passate di hatching in X e Y ritirando tende a richiamare verso il centro il materiale polimerizzato tramite il percorso di contorno a cui si congiunge

Questo dà luogo ad uno stato tensionale nel piano XY che tende a deformare i contorni esterni del layer (cioè le superfici esterne del prodotto)

Inoltre le zone di compenetrazione sono allineate lungo la direzione Z, di conseguenza, al crescere del numero di layers, si avrà un aumento delle tensioni residue lungo gli assi, che tenderà a distorcere il componente proporzionalmente alla sua altezza in Z (e, dunque, al numero di strati)

Per ovviare a questi inconvenienti, spesso si adotta una versione modificata della strategia WEAVE, detta STAR-WEAVE

La strategia STAR-WEAVE prevede le stesse tre fasi fondamentali della WEAVE, ma modificate come in figura

Ciascuna passata di riempimento, sia direzione X che in direzione Y è collegata al percorso di contorno ad una sola estremità, lasciando all'estremità opposta una distanza h_d di materiale non trasformato

Questo consente una più libera contrazione del materiale, con conseguente riduzione delle tensioni residue che agiscono sul contorno della figura

Inoltre, a ciascuna passata, l'estremità libera e quella vincolata vengono invertite, al fine di garantire un miglior bilanciamento delle tensioni sul componente finito

Per limitare gli effetti nella direzione Z, le zone di giunzione del materiale non sono allineate lungo Z, ma sfalsate di una quantità pari ad $h_s/2$ in X e Y

Tale configurazione consente una miglior redistribuzione delle tensioni da ritiro sul layer precedente

Negli anni, al fine di ridurre ulteriormente le tensioni residue, sono state messe a punto altre strategie di riempimento

In base a quanto visto nelle strategie di costruzione descritte, l'adesione tra due strati consecutivi è circoscritta alle zone in cui la profondità di cura C_d^* risulta maggiore dell'altezza del layer h_L

Come conseguenza, gli oggetti prodotti utilizzando tali strategie presentano un comportamento anisotropo, con minori proprietà meccaniche (in termini di resistenza a trazione e modulo di rigidezza) lungo la direzione Z

Tale tendenza può essere bilanciata agendo sui parametri di processo ed in particolare sulla distanza tra passate parallele

Utilizzando valori sufficientemente piccoli di h_s , ed h_L , è possibile giungere ad un comportamento quasi-isotropo del componente finale

In tutti i processi che utilizzano un laser come canale di trasformazione si ha la necessità di trasportare la radiazione laser dalla sorgente fino al layer in costruzione

Il sistema si compone pertanto di una sorgente laser, una o più ottiche di focalizzazione ed un sistema di guida in grado di movimentare il raggio laser sul layer in costruzione

Nell'architettura top-down, il pezzo viene costruito su una piattaforma mobile immersa in una vasca di materiale

La figura mostra una rappresentazione schematica di tale architettura, nella quale sono messi in evidenza i seguenti elementi caratteristici:

Sorgente del laser usato per la fotopolimerizzazione

Sistema galvanometrico, per indirizzare il laser tramite specchi

Sistema ottico, per la focalizzazione della radiazione luminosa

Raggio laser

Vasca contenente la resina liquida ed il materiale polimerizzato(i.e. il pezzo in costruzione)

Piattaforma di costruzione, che sostiene il materiale polimerizzato. La piattaforma di costruzione è libera di muoversi in direzione Z all'interno della vasca

Il generico layer i -esimo verrà costruito muovendo il laser sulla superficie libera della resina liquida

Una volta completato il layer, il laser si spegne e la piattaforma si abbassa all'interno della vasca di una quantità pari allo spessore del layer h_L

Così facendo, la superficie superiore del pezzo in costruzione viene ricoperta da uno strato di liquido pari all'altezza del layer

Il laser viene dunque riacceso e indirizzato sulla nuova superficie libera del liquido per curare lo strato successivo

La resina polimerica è caratterizzata da un'alta viscosità

Questo fa sì che, una volta abbassato il pezzo all'interno della vasca, il liquido non riesca a ricoprire il layer appena solidificato per solo effetto della gravità

Per garantire il corretto ricoprimento è quindi presente un organo mobile detto wiper che ha lo scopo di distribuire in maniera uniforme la resina dello strato superficiale

Il sistema dovrà inoltre prevedere rabbocco del liquido per compensare gli effetti del ritiro del materiale sulla posizione del pelo libero

Lo sviluppo dei materiali viene fatto tenendo in considerazione le specifiche condizioni di lavoro quali altezza del layer, temperatura della resina e tensione superficiale tra solido e liquido

La piattaforma di costruzione presenta dei fori sulla superficie di appoggio del pezzo per ridurre al minimo le turbolenze nel liquido durante l'abbassamento

È inoltre fondamentale garantire l'adesione del pezzo solidificato alla piattaforma di costruzione durante tutta la lavorazione

La piattaforma di costruzione viene dunque realizzata in materiali (di norma metallici) su cui il materiale polimerico possa aderire: la rugosità della piattaforma è ragionevolmente alta per favorire tale adesione

il movimento in Z viene attuato a laser spento, ovvero quando i due specchi sono fermi

L'architettura descritta presenta dunque 2,5 assi controllati, con due moti di rotazione (degli specchi) ed un moto di traslazione (della piattaforma)

Nell'architettura bottom-up, il laser si trova al di sotto della vasca di resina liquida

La vasca è dotata di uno schermo trasparente nella parte inferiore per consentire il passaggio della radiazione luminosa

In questo caso quindi, al contrario di quanto accade nell'architettura top-down, la fotopolimerizzazione avviene sul fondo del liquido

La piattaforma di costruzione, alla quale il pezzo è solidale, si muove verso l'alto con un passo pari all'altezza del layer

Il generico layer i -esimo viene dunque polimerizzato a contatto con lo schermo trasparente della vasca

Lo schermo è realizzato tramite un materiale che limiti l'adesione del materiale polimerizzato: tra le soluzioni più comuni si citano i materiali acrilici ed il politetrafluoroetilene (PTFE)

È inoltre possibile attuare dei movimenti aggiuntivi per favorire il distacco del pezzo in costruzione dal fondo della vasca

Una soluzione consiste nel far compiere alla vasca un movimento laterale di andata e ritorno prima del sollevamento della piattaforma

Una volta distaccato il layer i -esimo, la piattaforma si solleva di una quantità pari allo spessore del layer, così che un nuovo strato di materiale liquido di altezza h_L si ritrovi al di sotto del pezzo in costruzione

Tale materiale viene colpito nuovamente dal laser per realizzare lo strato $(i+1)$ -esimo

Questa strategia consente di eliminare le criticità di ricoprimento del layer sottolineate nell'approccio top-down. In particolare, l'altezza del layer di materiale liquido utile alla costruzione è assicurata dal movimento della piattaforma: pertanto, il monitoraggio del livello della resina liquida necessita di un controllo assai meno preciso del caso precedente (con minori costi annessi)

Di contro, la necessità di distaccare il materiale polimerizzato tramite un movimento laterale comporta una forza di taglio sul layer appena generato che rischia di deformare la geometria ottenuta

Tale forza di separazione aumenta in maniera proporzionale all'area del layer

Per contenere le deformazioni indotte ed il rischio di distacco del pezzo dalla piattaforma, è dunque necessario ridurre la sezione di ogni layer

Questo è un vincolo fondamentale dei processi di stereolitografia che usano un approccio botton-up, del quale è necessario tenere conto durante la scelta dell'orientamento del componente rispetto alla direzione di stratificazione Z

Una volta completato il processo di costruzione, i pezzi prodotti tramite stereolitografia risultano ricoperti da un sottile strato di resina liquida

L'adesione del liquido al componente è accentuata dalla presenza di zone non completamente polimerizzate, ovvero sottoposte durante il processo ad una esposizione di poco minore E_c

Il post-processo dei componenti realizzati tramite stereolitografia comincia dunque con un lavaggio volto a ripulire le superfici esterne del pezzo

Tale lavaggio avviene per mezzo di un solvente in grado di rompere i legami all'interfaccia tra liquido e solido

L'alcool isopropilico, essendo un solvente sia delle resine epossidiche che di quelle metacrilate, trova largo impiego per il lavaggio dei componenti da SLA, anche grazie alla sua facile reperibilità

Il pezzo viene mantenuto immerso nel solvente per un tempo sufficiente a separare completamente il liquido

Di contro, un tempo di permanenza troppo lungo all'interno del solvente può portare alla rottura dei legami interni al polimero, con conseguente rammollimento del componente

Il tempo di mantenimento all'interno del solvente deve dunque essere scelto accuratamente in funzione della specifica resina, per consentire una pulizia efficace senza compromettere le proprietà del prodotto

Esistono ad oggi diversi sistemi automatizzati o semi-automatizzati per la pulizia dei pezzi che possono comprendere più fasi di lavaggio e risciacquo

L'esposizione critica E_c è il valore minimo necessario ad ottenere la solidificazione del materiale: ciò corrisponde ad una reticolazione non completa del polimero

Questa condizione del materiale al termine del processo viene definita "stato verde"

Per migliorare le caratteristiche del componente, è dunque necessario completare il processo di polimerizzazione del materiale tramite una fase detta di post-cura

La post-cura avviene ponendo il materiale all'interno di un forno ai raggi ultravioletti, all'interno del quale viene sottoposto ad una radiazione luminosa avente lunghezza d'onda uguale a quella del laser in ambiente riscaldato

Al crescere della temperatura, infatti, aumenta la mobilità dei gruppi liberi della resina e di conseguenza la loro probabilità di formare nuovi legami

Durante la fase di post-cura, tuttavia, si ha un ulteriore ritiro del materiale solido, con conseguente aumento delle tensioni interne al componente; ciò può portare all'insorgere di deformazioni e cricche sul componente finito

La combinazione di tempo e temperatura di post-cura deve dunque essere scelta accuratamente in funzione dello specifico componente, per ottenere il miglior compromesso tra proprietà meccaniche e accuratezza dimensionale

Il pezzo in costruzione deve essere solidale alla piattaforma durante il processo. Questo si traduce, durante la modellazione digitale del processo, nella necessità di ancorare tutti i componenti al piano XY del sistema di riferimento macchina, come in figura di sinistra

Saranno pertanto necessarie strutture di supporto in grado di sorreggere il pezzo durante la costruzione

Spesso si ricorre a strutture di supporto trabecolari come quelle mostrate nella figura a destra

Tali supporti sono rastremati nella zona di contatto con il pezzo per favorirne la rottura durante la post-lavorazione

Si fa inoltre spesso ricorso ad una base come quella mostrata in figura, che ha il duplice scopo di migliorare l'adesione del pezzo alla piattaforma durante la costruzione e facilitarne il distacco al termine del processo

Si noti a tal proposito come la base sia solitamente munita di angoli di invito per favorire l'ingresso dell'utensile utilizzato per la rimozione

La necessità di supporti comporta vincoli in termini di angolo limite, bridge e overhang

L'esigenza di ripulire efficacemente il pezzo, porta inoltre all'impossibilità di realizzare geometrie cave prive di aperture

Infatti, la resina liquida rimarrebbe intrappolata all'interno delle cavità durante la costruzione, non potrebbe essere raggiunta durante il lavaggio dei pezzi

Le dimensioni minime delle aperture necessarie a far defluire la resina (dette anche fori di drenaggio) dipendono dalla viscosità del materiale e dal solvente utilizzato per la pulizia delle parti

La viscosità della resina pone anche un limite inferiore alla minima dimensione dei fori e, più in generale, delle cavità realizzabili all'interno di un modello

Infatti, nel caso di capillari troppo piccoli, il fluido rimarrebbe all'interno della cavità per effetto della tensione superficiale

Le tensioni interne al materiale durante il processo pongono un limite inferiore allo spessore minimo delle pareti verticali, ovvero quegli elementi il cui spessore minimo è misurato in un piano normale a Z

Infatti, le tensioni interne ai layer (per quanto contenute dai percorsi di hatching) nel caso di spessori troppo sottili si tradurrebbero in deformazioni inaccettabili del pezzo

Si è soliti distinguere tra pareti verticali supportate e non supportate, mostrate rispettivamente a sinistra e a destra

Nel secondo caso gli elementi laterali vincolano gli spostamenti della parete sottile, consentendo pertanto di utilizzare spessori inferiori rispetto al primo

Le tensioni interne al materiale comportano anche un limite sul minimo rapporto tra altezza (h) e diametro (d) dei perni verticali, ovvero il cui asse è orientato secondo l'asse Z

Le regole appena esposte riguardino dei casi geometricamente molto semplici (pareti sottili e perni verticali) che vengono solitamente utilizzati dai costruttori o dagli utilizzatori per fornire delle linee guida sull'utilizzo

Più in generale, le problematiche di distorsione interesseranno tutte le geometrie snelle che si sviluppano lungo la direzione di stratificazione

Infine, l'altezza del layer e l'accuratezza del sistema laser adottato per la sua trasformazione pongono un limite alle dimensioni minime delle geometrie in dettaglio ed in rilievo

Tali limiti saranno ancora una volta strettamente correlati all'orientamento della geometria rispetto alla direzione di accrescimento Z

Le considerazioni esposte sino a qui si applicano indifferentemente alle architetture bottom-up e top-down

Nel caso della architettura bottom-up è tuttavia necessario tenere in considerazione un ulteriore vincolo legato al cosiddetto effetto ventosa o cup

Una cup consiste in una geometria cavità che viene a formarsi con il fondo della piattaforma durante la costruzione del pezzo, come mostrato schematicamente nella figura inferiore

Durante il distacco dal fondo della piattaforma viene a crearsi una depressione nella zona in cui l'aria è intrappolata

Questa agisce sulle pareti della cup tendendo ad infletterle verso l'interno

In base agli spessori e alle proprietà meccaniche del materiale si potrà assistere a deformazioni o fratture delle pareti della cup

Processi planari a letto di liquido - Digital Light Processing

Il processo di Digital Light Processing (DLP) utilizza una matrice bidimensionale di canali di trasformazione per processare una resina fotopolimerica

Questo processo nasce con lo scopo di superare alcune delle criticità legate all'utilizzo di un laser nella stereolitografia, legate ad esempio ai percorsi di riempimento, al tempo di costruzione di ciascun layer ed ai costi di acquisto del sistema laser stesso

L'idea alla base della tecnologia DLP è quella di proiettare simultaneamente l'intera figura del layer sul materiale liquido utilizzando una luce UV, così da ottenerne la polimerizzazione. Questo processo, con alcune varianti, è noto anche con altri nomi.

In figura si propone uno schema semplificato del processo. La figura rappresenta una architettura top-down, nondimeno anche in questo caso è possibile l'utilizzo di architetture bottom-up, per le quali valgono le medesime considerazioni espresse nella trattazione della stereolitografia.

Il processo utilizza una luce UV diffusa generata per mezzo di una lampada. Questa luce attraversa un collimatore, ovvero una lente che raddrizza i fotoni in arrivo dalla lampada, fornendo in uscita un fascio di raggi paralleli.

Il fascio luminoso raddrizzato va poi a colpire un dispositivo chiamato Digital Micromirror Device (DMD), il quale ha lo scopo di selezionare le porzioni della radiazione luminosa che verranno riflesse sul materiale liquido per generare lo strato.

Una volta terminata la trasformazione del layer, la piattaforma si abbasserà per consentire la costruzione del successivo (valgono a tal proposito tutte le considerazioni espresse per la stereolitografia).

Il DMD può essere considerato il cuore di questo processo.

Esso è costituito da una matrice bidimensionale di piccoli specchi, come mostrato schematicamente in figura.

Ciascun microspecchio può essere attuato indipendentemente spostandosi tra due posizioni, che indicheremo come on ed off.

Per semplicità, la posizione off corrisponde a quella piana in figura. Solo quando il microspecchio si trova nella posizione on la luce incidente su di esso verrà riflessa verso la vasca di Costruzione.

A ciascun spostamento della piattaforma, il DMD verrà dunque comandato per riprodurre la figura piana corrispondente al layer.

Possiamo dunque pensare ai microspecchi che costituiscono il DMD come ai pixel di una immagine bidimensionale, che verranno di volta in volta accesi o spenti per ottenere la figura desiderata.

Questa analogia mostra immediatamente come questo approccio introduca un'ulteriore discretizzazione nel processo: infatti non sarà possibile riprodurre nel piano dettagli di dimensioni inferiori a quelle della luce riflessa da un singolo microspecchio.

Nonostante i benefici offerti dal DMD, questo dispositivo presenta alcune criticità legate al costo iniziale, all'attuazione e alla manutenzione.

Processi planari a letto di liquido – Liquid Crystal Display

Al fine di superare le criticità del DMD, negli ultimi anni è stato introdotto un processo a trasformazione di materiale liquido tramite matrice di canali basato sull'utilizzo di schermi a cristalli liquidi (Liquid Crystal Display, LCD), da cui prende il nome

La figura presenta uno schema di processo LCD. In questo caso, l'architettura bottom-up mostrata in figura è l'unica effettivamente utilizzata in questa famiglia di processi

La luce UV generata dalla lampada viene proiettata su uno schermo LCD. I cristalli liquidi presenti all'interno dello schermo polarizzano la luce incidente e la filtrano per ottenere l'immagine corrispondente al layer

Il fondo trasparente della vasca di costruzione consente il passaggio della luce, che andrà a colpire il materiale liquido

Il fondo della vasca è costituito da uno strato sottile di materiale (tipicamente 0.1 - 0.2 mm) ad alta trasparenza che consente di trasmettere efficacemente l'immagine mostrata dall'LCD al materiale

Risulta evidente come l'architettura bottom-up consenta un'evidente semplificazione evitando un contatto diretto tra lo schermo LCD ed il pelo libero del materiale

Permangono tuttavia le criticità legate al distacco del materiale al termine di ogni layer

Queste problematiche sono acuite dalla necessità di utilizzare uno strato trasparente di piccolo spessore

Per favorire il distacco del pezzo vengono utilizzati materiali plastici a bassissimo coefficiente di attrito come il politetrafluoroetilene (PTFE)

Il costo contenuto degli schermi LCD e delle annesse logiche di controllo ad oggi sul mercato rende questa tecnologia estremamente accessibile

Processi planari a letto di liquido – Digital Light Synthesis

Il processo di Digital Light Synthesis (DLS), o Carbon Digital Light Synthesis (CDLS), nasce con lo scopo di eliminare le criticità legate al distacco del pezzo trasformato dal fondo della vasca durante la trasformazione bottom up di resine polimeriche tramite matrice di canali di trasformazione

La figura mostra uno schema di questo processo

La luce UV direzionata viene emessa da un dispositivo con funzionamento analogo a quanto visto nel DLP. Il processo si sviluppa con un approccio bottomup

La particolarità di questa tecnologia risiede nel materiale usato per il fondo della vasca di costruzione, costituito da una speciale membrana permeabile all'ossigeno

Durante il processo, l'aria entra da tale membrana, dando vita ad una ricircolazione della resina dalle zone laterali verso l'area di costruzione

Viene quindi a crearsi sul fondo della vasca una regione in cui si ha una miscela di resina liquida e gas, la quale prende il nome di zona morta

Il pezzo sarà costruito appena al di sopra di tale zona per effetto della fotopolimerizzazione della resina

Questo metodo di costruzione prende il nome di Continuous Liquid Interface Production (CLP)

La particolarità di questa tecnologia risiede nel materiale usato per il fondo della vasca di costruzione, costituito da una speciale membrana permeabile all'ossigeno

Si noti come, in questa configurazione, il pezzo in costruzione non è a contatto con il fondo della vasca, ma con la zona morta, ovvero con una miscela di ossigeno e resina fotopolimerica in ricircolo continuo

L'assenza di forze di adesione agenti sullo strato in costruzione consente di avere un moto continuo, anziché intermittente, della piattaforma durante la lavorazione

Questo porta ad una differenza fondamentale rispetto a tutti gli altri processi additivi descritti in precedenza, l'assenza di layer

Infatti, visto il moto continuo della piattaforma, non sarà più possibile riconoscere gli strati che compongono il pezzo, come si può vedere anche nella figura, con un conseguente miglioramento della finitura superficiale e dell'accuratezza in Z

A fronte di questa sua peculiarità, la tecnologia DLS viene definita layerless

Per seguire il moto continuo della piattaforma, la proiezione delle sezioni trasversali del pezzo tramite luce UV avviene con un alto numero di frame per secondo (fps), risultando del tutto simile ad una animazione video

Il moto continuo della piattaforma consente anche di ottenere velocità di costruzione del pezzo significativamente maggiori di quanto accade nel DLP e nell'LCD

Le regole e i vincoli progettuali dei processi planari sono in gran parte analoghi a quelli già descritti per i processi di stereolitografia

Valgono pertanto tutte le considerazioni viste in merito a fori di drenaggio, spessori minimi, ponti, overhang ecc.

Tuttavia, nel caso dei processi a letto di liquido si ha una importante differenza legata alle modalità di costruzione del layer

Infatti, come si è visto, la figura piana del layer viene trasformata tramite una matrice bidimensionale di canali che possono essere assimilati ai pixel di una immagine

Pertanto, si avrà un'ulteriore discretizzazione delle geometrie nei piani paralleli ad XY

L'effetto di tale discretizzazione andrà via via riducendosi al diminuire della dimensione dei canali di trasformazione, ovvero all'aumentare del loro numero

Per questo motivo, per avere la massima accuratezza di un tratto rettilineo, questo deve essere orientato secondo l'asse X o Y del piano di stampa

Processi puntuali a deposizione di liquido

Anche questa categoria di processi utilizza resine fotopolimeriche che vengono curate per mezzo di una radiazione luminosa tramite ultravioletti

Prima di entrare nel merito delle tecnologie Continuous Mode e Drop-On-Demand, si ritiene opportuno introdurre brevemente le tecniche utilizzate per la deposizione di materiali liquidi in forma di gocce

Queste tecniche infatti rivestono un ruolo centrale in numerosi processi additivi

Le tecniche per la deposizione di gocce liquide utilizzate nella tecnologia additiva derivano dalle tecnologie di stampa a getto d'inchiostro

La tecnica a getto di inchiostro a getto continuo è molto utilizzata per i processi di stampa bidimensionale su scala industriale in quanto ben si adatta ad alti volumi produttivi e ad elevate velocità

La figura mostra uno schema del principio di funzionamento di questa tecnica decisamente semplificato rispetto alle architetture adottate industrialmente, ma comunque in grado di metterne in luce gli aspetti fondamentali

Il liquido viene pescato da un serbatoio tramite una pompa ad alta pressione e convogliato verso un ugello di piccole dimensioni

Attraversando tale ugello il fluido, per effetto della tensione superficiale, si separa formando delle piccole gocce

Le gocce attraversano quindi un campo magnetico, indotto tramite elettrodi, caricandosi elettrostaticamente

Il materiale così caricato passa attraverso degli elettrodi in grado di generare un campo magnetico ad alta tensione

Se questi elettrodi sono spenti, il materiale prosegue la propria caduta verso un canale di raccolta, il quale convoglia il materiale verso il serbatoio principale

Viceversa, se gli elettrodi sono accesi il campo magnetico generato devia la traiettoria della goccia in caduta, consentendole così di raggiungere la piattaforma di deposizione

La deposizione con getto a richiesta è a oggi la tecnica più diffusa per le stampanti a inchiostro di piccole e medie dimensioni

La differenza principale con il metodo descritto precedentemente è che in questo caso la pressione necessaria a far fuoriuscire la goccia di liquido non è continua, ma è attuata appunto su richiesta

Lo schema di figura mostra il principio di funzionamento. Osservando la figura, è immediatamente intuibile la minor complessità di impianto rispetto alla soluzione precedente

Il serbatoio è mantenuto alla pressione ambiente e messo in comunicazione con una piccola camera (ingrandita a scopo dimostrativo in figura) dotata di un piccolo orifizio sul fondo

In condizioni di pressione ambientale, la tensione superficiale del liquido prevale sulla forza di gravità e pertanto il liquido non può uscire dall'orifizio

Si utilizzerà dunque un attuatore per aumentare la pressione all'interno della camera, consentendo così al liquido di vincere la tensione superficiale e cadere sulla piattaforma

L'attuatore è quindi quel dispositivo chiamato ad azionare il comando con cui si richiede la fuoriuscita della goccia e rappresenta l'elemento centrale nella tecnica con getto a richiesta

Distinguiamo due tipi di attuatori, quelli termici (o bubble jet) e quelli piezoelettrici

In entrambi i casi l'attuatore viene comandato tramite un segnale elettrico

Nel caso degli attuatori termici, questa corrente va a riscaldare una resistenza elettrica

La resistenza porta a evaporare una parte del liquido a contatto con essa, il quale si espande formando una bolla (da cui la dicitura "bubble jet")

Questo aumento di volume accresce la pressione nella camera, costringendo una goccia di materiale a fluire attraverso l'orifizio

Gli attuatori piezoelettrici sfruttano invece la proprietà di alcuni materiali (detta appunto piezoelettricità) di deformarsi elasticamente quando sottoposti ad un campo elettrico

L'attuatore in questo caso è costituito da una membrana di materiale piezoelettrico che, una volta deformatasi per effetto della corrente, riduce il volume disponibile all'interno della camera costringendo il liquido ad uscire dall'orifizio

La deposizione DOD è la tecnica ampiamente più utilizzata nel campo delle tecnologie additive, in quanto consente di ottenere una minor dimensione delle gocce ed un loro più accurato posizionamento

Viene inoltre solitamente preferita l'attuazione piezoelettrica a quella termica, poiché la variazione di temperatura richiesta da quest'ultima potrebbe danneggiare le proprietà dei materiali depositati

Nel processo additivo Drop-On-Demand (DOD) l'ugello viene movimentato nel piano XY per depositare il materiale in accordo ai percorsi calcolati durante la fase di slicing

La resina liquida viene poi curata per mezzo di una lampada (tipicamente a UV), la quale fornisce la radiazione necessaria ad attivare la fotopolimerizzazione

La figura mostra uno schema di tale processo

Una volta completata la costruzione dello strato, la piattaforma si abbasserà di un'altezza pari all'altezza del layer

Al termine, il pezzo dovrà essere distaccato dalla piattaforma, (tipicamente tramite l'uso di una spatola)

Questa tecnologia è caratterizzata da un'alta precisione dei dettagli e da spessori del layer molto piccoli (nell'ordine dei 15-20 micron)

Di contro, i tempi necessari alla costruzione di una parte risultano generalmente lunghi se confrontati alla maggior parte delle altre tecnologie additive

Questo dipende dall'alta risoluzione del layer (che porta ad un numero di strati maggiore) e alla movimentazione meccanica del vettore di deposizione nel piano XY (decisamente più lenta rispetto al laser)

È importante sottolineare che, poiché la resina allo stato liquido non offre resistenza al proprio peso, l'angolo limite di falda è uguale a 0° . Questo significa che sarà sempre necessario del materiale di supporto

Inoltre, viste le piccole dimensioni delle gocce depositate, il supporto dovrà essere pieno

La figura mostra il materiale di supporto necessario a realizzare la geometria a sbalzo

Per facilitare la post-lavorazione del pezzo, si utilizzano solitamente due canali di deposizione differenti, uno per il materiale del pezzo ed uno per quello di supporto

Quest'ultimo è un materiale con una resistenza meccanica minore rispetto a quella del componente curato, il che ne facilita la rimozione evitando di danneggiare il manufatto

La consistenza dei materiali di supporto utilizzati è spesso simile a quella della cera

La pulizia dei componenti si avvale spesso di un getto d'acqua (water jet) per rimuovere il materiale di supporto dalle superfici del pezzo

Si osserva come la condizione di supporti pieni renda necessario, durante la progettazione, prevedere che tutto il materiale sia efficacemente raggiungibile tramite attrezzi meccanici o getto d'acqua

Al fine di facilitare l'operazione di pulizia, negli ultimi anni sono stati proposti materiali di supporto idrosolubili

In questo caso la loro rimozione avviene immergendo il pezzo in acqua e attendendo che i supporti si dissolvano. Ciò porta ad un'evidente semplificazione del ciclo di post lavorazione del componente

La contrazione della resina durante la solidificazione porta ad avere criticità analoghe a quelle viste con la stereolitografia

Per contrastare le distorsioni del materiale e le eventuali imprecisioni date dall'adesione della goccia sul substrato, è possibile posizionare un materiale di supporto anche lateralmente alle geometrie di dettaglio, come mostrato nella figura di sinistra

I supporti laterali possono essere utilizzati anche per migliorare l'accuratezza dei fori di piccole dimensioni, come mostrato nella figura a destra

Più in generale, questa strategia sarà applicabile a tutte le geometrie di dettaglio, al fine di preservarne l'accuratezza

Osservando la figura a destra si noti la criticità che emerge nella pulizia di tale materiale di supporto al termine del processo

Infatti, laddove non si disponga di un materiale di supporto idrosolubile, sarà necessario ricorrere ad un getto d'acqua in pressione o ad un utensile manuale per la pulizia del pezzo

In generale, la progettazione dei supporti per questa tecnologia deve dunque tenere in considerazione la necessità di raggiungere il materiale da rimuovere durante le post lavorazioni senza danneggiare il pezzo

Processi lineari di deposizione di liquido

Il processo di Material Jetting (MJ) trasforma resine fotopolimeriche tramite un vettore di canali di deposizione

Il principio attraverso il quale avviene la deposizione è del tutto analogo a quanto visto nella Deposizione a getto continuo e nella Deposizione con getto a richiesta

Questo processo è noto anche con altri nomi

La figura mostra uno schema di funzionamento del processo

La principale differenza col Getto a Richiesta risiede nel fatto che in questa tecnologia si hanno numerosi canali di deposizione allineati lungo un asse (Y nello schema di figura)

Ciascuno di questi canali consiste in un piccolo orifizio da cui può essere depositata una goccia di materiale

Il dispositivo che comprende questi canali viene normalmente chiamato testina di stampa

Durante il processo, la testina di stampa avanza lungo la direzione ortogonale a quella di allineamento degli orifizi (X in figura)

Durante l'avanzamento, la deposizione delle gocce da ciascun orifizio sarà attuata o meno per riprodurre la geometria piana del layer, in accordo a quanto avviene nella tradizionale stampa a getto di inchiostro bidimensionale

Una lampada a raggi UV solidale alle testine di stampa illumina il materiale appena depositato inducendone la fotopolimerizzazione

Quando la dimensione della testina lungo la direzione di allineamento degli ugelli è minore (Y in figura) della corrispondente dimensione della piattaforma, la testina dovrà traslare lungo tale direzione e fare più passate parallele all'interno dello stesso layer

In ogni caso, la deposizione e la cura del materiale avviene sempre e solo durante il movimento nella direzione normale a quella di allineamento (X in figura)

Solo una volta completata la deposizione del layer, la piattaforma si abbasserà per consentire la costruzione del successivo

Analogamente a quanto visto per il Getto a Richiesta, è sempre necessario un materiale di supporto, il quale può essere una simil-cera o un materiale idrosolubile

È inoltre possibile utilizzare più testine di stampa (come rappresentato in figura) al fine di depositare materiali diversi all'interno dello stesso pezzo

Miscelando materiali di diverse tonalità è ad esempio possibile ottenere pezzi colorati: la realizzazione di riproduzioni con le stesse textures dei componenti reali è infatti una delle principali applicazioni di questa tecnologia

Poter progettare i materiali che costituiscono localmente la parte comporta inoltre la possibilità di conferire a quest'ultima diverse proprietà fisiche nelle diverse zone della geometria

Ad esempio, è possibile progettare componenti che offrano continuità tra zone rigide (ad esempio con funzioni strutturali) e materiali a bassa durezza, ad esempio simil-gomme per impugnature o altro

Questo apre un immenso spettro di opportunità alla progettazione di assemblaggio e alla realizzazione di componenti con prestazioni fisiche e meccaniche non ottenibili altrimenti

Si noti come i materiali che costituiscono le diverse zone del pezzo possono essere anche compositi ottenuti depositando una combinazione di due o più dei materiali presenti nelle testine a getto in concentrazioni e configurazioni predefinite

Queste combinazioni delle resine di partenza vengono dette anche materiali digitali (digital materials)

Ciò consente, ad esempio, di ottenere una ampia gamma di colori a partire da alcune tonalità di base, come avviene nella stampa in quadricromia

Più in generale, la combinazione di resine porta ad avere materiali digitati con predefinite proprietà fisiche e meccaniche

I digital materials sono solitamente definiti dal produttore ed implementati nel software di controllo della macchina e vengono dunque selezionati dall'utente alla pari dei materiali di base

Come nel caso della tecnologia del Getto a Richiesta, le piccole dimensioni della goccia e lo spessore ridotto del layer consentono l'ottenimento di pezzi caratterizzati da un ottimo livello di dettaglio e finitura superficiale

La possibilità di depositare un alto numero di gocce simultaneamente durante l'avanzamento consente inoltre di ridurre enormemente i tempi di costruzione rispetto alla tecnologia del Getto a Richiesta

Di conseguenza, questo processo viene utilizzato anche per la realizzazione di parti di dimensioni non trascurabili

Le considerazioni progettuali sono in gran parte analoghe a quanto esposto per le tecniche già viste

Infatti, la presenza di un liquido fotopolimerizzante induce stati di tensione interna che tendono a distorcere il componente

Queste tensioni sono tuttavia notevolmente mitigate dalle piccole dimensioni del layer e dalla trasformazione omogenea del materiale ottenibile per mezzo della lampada UV (rispetto al caso del laser)

Il materiale di supporto può essere utilizzato non solo per sostenere il peso proprio del componente, ma anche le superfici laterali per migliorarne l'accuratezza

Le superfici a contatto con il materiale di supporto presentano in genere una finitura opaca (matte), a differenza delle superfici a contatto con l'aria, le quali mostrano un aspetto lucido (glossy)

Visto l'importante utilizzo di questa tecnologia per la realizzazione di prototipi estetici (e, più in generale, componenti il cui aspetto riveste un ruolo fondamentale), questa caratteristica può essere deliberatamente sfruttata per agire sulla texture del componente

Si avranno quindi casi in cui il componente viene ricoperto di materiale di supporto anche nella parte superiore per ottenere una finitura matte

Si noti che, laddove si abbia necessità di strutture di supporto per ragioni strutturali (esposte in precedenza) si ha sempre una finitura matte. In questo caso, quindi, non ricoprendo il pezzo si avrà un aspetto non omogeneo del componente tra superfici supportate e non supportate, eventualmente correggibile tramite post-lavorazioni

Come descritto in precedenza, questa tecnica è caratterizzata dalla possibilità di realizzare parti con proprietà eterogenee utilizzando materiali diversi per la costruzione delle diverse regioni del pezzo

A livello di modellazione, questo richiede di rappresentare ciascun materiale come un oggetto separato; il componente finale sarà quindi ottenuto assemblando le geometrie corrispondenti ai diversi materiali che lo compongono

Oltre ad una complicazione dell'attività di modellazione, questo può comportare alcune criticità durante l'assemblaggio dei componenti anche a causa delle approssimazioni introdotte dalla discretizzazione STL

Si fa spesso ricorso ad appositi software per correggere eventuali errori nell'accoppiamento tra le diverse regioni del pezzo tramite operazioni booleane tra le mesh

Il Nano Particle Jetting (NPJ) è un processo a getto di materiale liquido di recente introduzione che consente di processare materiali metallici e ceramici

La particolarità di questo processo risiede nel materiale di partenza, ovvero un liquido legante all'interno del quale sono dispersi in sospensione frammenti nanometrici del materiale alto-resistente (che può essere metallo o ceramica), come schematizzato in figura)

Il liquido contenente la nanodispersione viene depositato su una piattaforma riscaldata

La temperatura presente nella camera di costruzione fa sì che il liquido evapori rapidamente, lasciando solo la frazione solida ricoperta da una piccola frazione di legante residuo

Le nanoparticelle di materiale si impacchettano stocasticamente, formando un corpo solido in cui i vari elementi sono tenuti assieme dall'azione del legante

Il componente in questo stato viene definito "verde" e non possiede ancora le proprietà fisiche finali

Al termine del processo, l'oggetto ottenuto viene sottoposto ad un trattamento termico in forno durante il quale la frazione di legante residua si degrada e le particelle di solido danno luogo ad una sinterizzazione allo stato solido

Al termine di questo processo si avrà quindi un componente solido caratterizzato da un'alta densità

Il processo di deposizione del materiale avviene in maniera sostanzialmente analoga a quanto visto nel Material Jetting, tranne per il fatto che, non avendosi un materiale fotopolimerico, non vi è una lampada a raggi UV e la piattaforma è riscaldata

Allo stato attuale, il processo di NPJ utilizza un solo materiale per costruire il pezzo

Infatti, benché sarebbe possibile depositare materiali diversi come nel Material Jetting, questi dovrebbero successivamente essere sinterizzati durante il trattamento termico

Permane inoltre la necessità di strutture di supporto analoghe a quelle viste nel Material Jetting

Al fine di evitare di danneggiare il pezzo allo stato verde tramite un'azione meccanica, si preferisce in questo caso l'utilizzo di strutture idrosolubili, le quali vengono disciolte prima del trattamento termico di sinterizzazione

I principali vincoli progettuali in questa tecnica derivano dalla fase di trattamento termico seguente al processo

Infatti, durante questa fase si assiste ad una variazione della densità del pezzo, la quale comporta tensioni interne che possono portare a distorsioni

I vincoli esposti in precedenza in merito a pareti sottili e perni devono pertanto essere considerati indipendentemente dall'orientamento in macchina del componente

Processi puntuali a letto di polvere

I processi additivi per il consolidamento di materiale a partire da una vasca di polveri sono solitamente classificati sotto la dicitura di "fusione in letto di polvere" (Powder Bed Fusion, PBF)

In questa famiglia, un ruolo predominante è rivestito da quei processi che utilizzano una sorgente laser come fonte di energia per la fusione del materiale

All'interno di tale categoria si opera un'importante distinzione tra i processi che trasformano polveri polimeriche o metalliche

Infatti, come sarà chiarito nel seguito, le profonde differenze di proprietà fisiche e chimiche tra queste due classi di materiali portano ad accorgimenti molto diversi nella progettazione e realizzazione di questi processi

Nel linguaggio comune, si è soliti distinguere tra SLS (Selective Laser Sintering) e SLM (Selective Laser Melting) a seconda che il materiale processato sia, rispettivamente, polimerico o metallico

Tale nomenclatura risulta fuorviante, in quanto indurrebbe a pensare che la distinzione riguardi i meccanismi con cui avviene il consolidamento del materiale e non, come nella realtà, i materiali trasformati

Questo è invero non corretto, poiché, come si vedrà nel seguito, i processi con laser per la trasformazione di polimeri e metalli utilizzano spesso gli stessi meccanismi fisici di consolidamento

Recentemente è stata proposta una terminologia più corretta la quale racchiude tutti i processi di questa categoria che utilizzano un laser sotto la dicitura Laser Sintering (LS) o Laser Powder Bed Fusion (LPBF), distinguendo poi tra polymer LS (pLS) e metal LS (mLS) a seconda del materiale trattato

Questa terminologia tuttavia non è ancora stata pienamente recepita nella pratica dagli utilizzatori di tecnologie additive

Per tale motivo si parlerà ancora di SLS ed SLM

Accanto ai processi che utilizzano una sorgente laser si presenterà la tecnologia di Electron Beam Melting (EBM), in cui l'energia necessaria a fondere il materiale viene fornita da un fascio di elettroni

Il processo di sinterizzazione selettiva tramite laser (Selective Laser Sintering, SLS) prevede la sinterizzazione localizzata di materiale allo stato pulviscolare all'interno di una vasca

La granulometria di questi materiali è solitamente compresa tra i 20 e gli 80 micron

La sinterizzazione è ottenuta fornendo calore al materiale pulviscolare tramite una radiazione laser e può avvenire tramite fusione localizzata o rifusione completa, a seconda del materiale e dei parametri di processo utilizzati

A seconda del costruttore e dell'applicazione, è possibile osservare architetture differenti nelle macchine usate per l'SLS: nel seguito verrà presentato lo schema in figura per via del suo ampio utilizzo e in quanto utile per descrivere alcuni elementi fondamentali del processo

Il sistema laser è nel funzionamento analogo a quanto descritto per la stereolitografia, benché solitamente differisca per tipologia di sorgente utilizzata e potenze in gioco

Infatti, i laser utilizzati nell'SLS sono nella maggior parte dei casi basati su sorgenti a CO₂

Si avrà dunque una sorgente laser seguita da un sistema galvanometrico di deflessione e da una lente di focalizzazione f-theta

L'architettura mostrata in figura prevede una piattaforma centrale, all'interno della quale avviene la costruzione del pezzo, mobile nella direzione Z (quella verticale nella vista in figura)

Vi è poi una tramoggia che ha la funzione di dispenser del nuovo materiale, a cui è reso solidale un rullo cilindrico

Durante la costruzione del pezzo, il laser andrà a colpire la superficie esposta

della vasca di costruzione (in accordo con i percorsi di slicing) sinterizzando il materiale per uno spessore pari all'altezza del layer (figura a))

Al termine di questa operazione, la vasca di costruzione si abbassa di una quantità pari allo spessore del layer (figura b))

Una volta abbassata, la tramoggia si apre dispensando una quantità di materiale sufficiente a ricoprire nuovamente la vasca di costruzione

Contemporaneamente, il rullo viene posto in controrotazione, così da appiattire ed omogeneizzare il materiale appena depositato

Una volta che il nuovo materiale è stato steso sulla superficie della vasca di costruzione, si procede con la sinterizzazione tramite laser del layer successivo, ripetendo cioè lo step in figura a)

La figura a) mostra un esempio di curva temperatura-calore assorbito di un materiale polimerico semi-cristallino. E' possibile notare come la curva superiore, la quale corrisponde al riscaldamento del materiale, mostri un picco di assorbimento del calore in corrispondenza della fusione. Questo calore corrisponde all'energia necessaria a sciogliere i cristalli

Durante il raffreddamento (curva inferiore in figura a) si ha invece un picco esotermico in corrispondenza della cristallizzazione

Compattandosi in strutture a maggior densità, infatti, il polimero rilascia una quantità di energia sotto forma termica

La figura b) sottolinea anche come, in corrispondenza di tale trasformazione, si assista ad una brusca riduzione del volume specifico del materiale

L'intervallo tra i due picchi (quello di fusione e quello di cristallizzazione) prende il nome di finestra di sottoraffreddamento

All'interno di tale intervallo il materiale si trova in uno stato parzialmente fuso

Nel processo di SLS la polvere all'interno della camera viene preriscaldata e mantenuta ad una temperatura T_b compresa all'interno della finestra di sottoraffreddamento

Si noti che, essendo la tensione superficiale dei materiali polimerici generalmente bassa, rispetto ad esempio a quella dei metalli, il materiale può permanere a queste temperature anche per lungo tempo senza che avvenga la sinterizzazione allo stato solido

Al suo passaggio, il laser fornirà una quantità di energia sufficiente a sciogliere i legami cristallini, portando a fusione il materiale

Essendo il materiale preriscaldato, tale energia è significativamente minore di quella che sarebbe richiesta per fondere il materiale a partire dalla temperatura ambiente

Il materiale fuso, per effetto dello scambio termico con il materiale circostante, si porterà rapidamente alla temperatura T_b , alla quale si trova in uno stato parzialmente fuso e viene mantenuto in tale condizione fino al termine del processo

In questa maniera è possibile evitare le contrazioni volumetriche del materiale dovute alla cristallizzazione

Tali contrazioni sarebbero infatti particolarmente dannose, in quanto porterebbero tensioni interne e deformazioni del componente in costruzione, con conseguente perdita di accuratezza dimensionale

La presenza di una fase parzialmente liquida consente inoltre ai vari layer di compattarsi tra loro, riducendo le porosità nel prodotto finito

Al termine del processo, viene interrotto il riscaldamento della piattaforma e il materiale si raffredda fino alla temperatura ambiente

La solidificazione termina solo in questa fase

I materiali termoplastici amorfi non mostrano la finestra di sottoraffreddamento, non consentendo pertanto la strategia di lavorazione appena descritta

Per questo motivo, nel processo di SLS (ed in generale nei processi a letto di polvere basati sulla rifusione di polimeri termoplastici) si preferisce fare ricorso a materiali semi-cristallini

Si sottolinea inoltre che non tutti i semi-cristallini presentano il profilo termico mostrato

Molto spesso le campane corrispondenti al picco di fusione e a quello di cristallizzazione si intersecano lungo l'asse delle ascisse: non si ha pertanto in questi casi una finestra di sottoraffreddamento e tali polimeri non sono adatti alla trasformazione tramite SLS

Tra i polimeri che ben si prestano a questo processo spiccano le Poliammidi (nylon), le quali coprono la netta maggioranza delle applicazioni

I materiali adatti all'SLS comprendono anche polimeri con elevata resistenza meccanica e chimica

Una strategia utilizzata per mantenere alte prestazioni senza perdere accuratezza è quella di scansionare più volte il medesimo percorso con una potenza minore, ovviamente con un aggravio dei tempi di produzione

I percorsi utilizzati per il riempimento hanno a loro volta un enorme impatto sulle proprietà fisiche, meccaniche e dimensionali del componente finito

La distanza imposta tra due passate parallele (SP) è in genere minore della larghezza della singolo passata

La direzione delle passate del laser nel piano XY porta inoltre ad una anisotropia delle proprietà del componente

Al fine di bilanciare gli effetti di tensioni residue e anisotropia del componente, si fa spesso ricorso a strategie di riempimento "ad isole", come mostrato in figura

Seguendo tale strategia, l'area da riempire viene suddivisa in sottoregioni (le isole, appunto) di ugual dimensione; il laser riempirà le isole adiacenti con orientamenti diversi, così da ottenere un bilanciamento delle tensioni residue e delle anisotropie sul componente finito

Per bilanciare anche le anisotropie che nascono dall'accumulo di energia dovuto alla sovrapposizione di passate lungo lo spessore del layer, l'orientamento di ciascuna isola viene ruotato attorno a Z di una quantità $\Delta \theta$ rispetto al layer precedente, come mostrato in figura

Una scelta comune consiste nell'adottare per l'angolo $\Delta \theta$ numeri primi, così da massimizzare il numero di layer dopo i quali l'orientazione delle passate si ripete: in particolare, il valore $\Delta \theta = 67^\circ$ trova largo impiego poiché consente di avere un angolo sufficientemente grande tra due layer successivi

Al termine del processo, la vasca di costruzione viene portata a temperatura ambiente prima di procedere all'estrazione dei pezzi; ciò consente di ridurre le deformazioni indotte durante il raffreddamento grazie ad una redistribuzione progressiva del calore

Il raffreddamento dei componenti all'interno della vasca può avvenire in modo naturale (interrompendo il riscaldamento e lasciando la vasca a temperatura ambiente) o forzato (estraendo calore dall'area di lavoro)

All'aumentare della velocità di raffreddamento, si assiste ad un miglioramento delle proprietà meccaniche del componente a spese dell'accuratezza dimensionale

La scelta della velocità di raffreddamento deve quindi tenere conto delle caratteristiche richieste dal progetto e della produttività del processo (il tempo di raffreddamento può infatti raggiungere circa il 50% del tempo di costruzione)

Al termine del raffreddamento, i pezzi vengono estratti rimuovendo la polvere non sinterizzata tramite un sistema di aspirazione

Tale sistema filtra la polvere selezionando i granelli di dimensione idonea ad essere riutilizzati come materiale di partenza per un successivo ciclo produttivo

Si noti tuttavia come il materiale non trasformato sia stato mantenuto ad una temperatura T_b prossima al suo picco di fusione per un lungo periodo

Questo nel lungo termine porta a degradare le proprietà del polimero, modificandone la curva termica e compromettendo la qualità del processo

Per questo motivo la polvere riciclata deve essere miscelata a materiale vergine in percentuali che dipendono dal polimero utilizzato (solitamente attorno al 50%)

Al diminuire della granulometria delle polveri si ha un aumento della loro volatilità e dei rischi legati all'inalazione

Pertanto, gli operatori durante le operazioni di pulizia e caricamento della macchina devono essere muniti di adeguati dispositivi di protezione individuale e le polveri disperse nell'area in cui opera la macchina devono essere aspirate, filtrate e adeguatamente smaltite per evitare la contaminazione dell'ambiente esterno

Il materiale fuso tramite laser, nel perimetro del layer, si troverà a solidificare a contatto con la polvere non fusa

Questo si traduce in una scarsa finitura superficiale del componente, che richiede pertanto spesso una successiva operazione al fine di raggiungere la rugosità richiesta per l'applicazione

Tale operazione può consistere in una lavorazione per asportazione (manuale o tramite macchine a controllo numerico) o rivestimenti delle superfici (come, ad esempio, verniciature)

Il pezzo finito presenta di frequente un alto grado di porosità (valori caratteristici si aggirano attorno al 5%)

Per aumentare la densità delle parti, si può ricorrere ad infiltrazioni del componente tramite materiali con temperature di fusione minori rispetto a quello del pezzo

Nella SLS il materiale non trasformato è in grado di sostenere efficacemente i layer in costruzione, perciò non è necessaria la generazione di strutture di supporto per le geometrie a sbalzo

Inoltre, si è visto come, lavorando nella finestra di sottoraffreddamento, le tensioni interne durante il processo siano contenute e riescano a redistribuirsi senza dar luogo a deformazioni significative

Di conseguenza i componenti non richiedono di essere ancorati alla piattaforma di costruzione

L'intero volume di lavoro può essere utilizzato durante il nesting

Il posizionamento delle parti all'interno del volume di lavoro deve però tenere conto della capacità di smaltire calore del materiale

Infatti, durante il raffreddamento all'interno della vasca, il calore defluisce dalle parti verso l'ambiente esterno tramite il materiale non trasformato

La capacità di smaltire calore dipende dunque dalla quantità di polvere presente all'interno del volume di lavoro rispetto alla massa dei pezzi da raffreddare

Si definisce pertanto il parametro caratteristico "densità di confezionamento" (nesting density) etad il rapporto tra la somma dei volumi dei componenti V_{parts} (i.e. il volume totale di materiale trasformato) ed il volume totale di polveri immesse nel volume di lavoro V_{powd}

La densità di nesting deve essere tenuto sotto stretto controllo durante la modellazione digitale del processo

Alti valori di etad porterebbero ad aumentare il tempo richiesto per il raffreddamento della vasca e lo stress termico sul materiale non trasformato (con conseguente perdita di proprietà)

Al contrario, valori della densità di nesting troppo bassi corrispondono ad un sottoutilizzo della macchina, nonché ad un maggiore spreco di materiale in polvere (considerando costante la percentuale di miscelazione tra materiale vergine e riciclato)

Nel caso di accumuli localizzati di calore, possono svilupparsi temperature in grado di fondere localmente il materiale non colpito dal laser

Questa situazione può essere riscontrata quando la distanza tra i componenti non consente un efficace smaltimento del calore, come schematizzato in figura, e si traduce nella sinterizzazione non controllata della polvere adiacente

Questo fenomeno è anche noto con il nome di thermal bleeding

Per evitare la comparsa di questa criticità, i componenti devono essere distanziati all'interno del volume di lavoro proporzionalmente alla quantità di calore da smaltire durante il loro raffreddamento, ovvero al loro volume

La conduttività termica della polvere gioca a sua volta un ruolo fondamentale nella determinazione di tale distanza

Durante il raffreddamento si assiste alla contrazione volumetrica del materiale, con conseguente comparsa di tensioni interne che possono dar luogo a distorsioni del componente

Tali tensioni saranno ovviamente tanto più marcate quanto più eterogenea è la velocità di raffreddamento all'interno del volume di lavoro e, conseguentemente, del componente

Per questo motivo un altro parametro di fondamentale importanza è la distribuzione delle aree dei layer

Possiamo definire il coefficiente di variazione dell'area CVA_L come il rapporto tra la deviazione standard $\sigma_{A,L}$ e il valor medio AL delle aree degli NL layer

Nella situazione ottimale, il valore di CVA_L sarebbe uguale a zero, cioè tutti i layer avrebbero la medesima superficie di materiale fuso dal laser

Nella pratica questa condizione non è quasi mai ottenibile, pertanto si cerca di ottimizzare l'orientamento ed il nesting dei componenti al fine di minimizzare CVA_L

La necessità di avere un raffreddamento quanto più omogeneo dei componenti, porta anche ad evitare il loro posizionamento nelle zone immediatamente adiacenti alle pareti della

vasca, in quanto caratterizzate da un raffreddamento più rapido rispetto al resto dell'area di costruzione

Ciò si traduce in una riduzione dello spazio effettivamente utilizzabile per il posizionamento delle parti in fase di modellazione del processo

Come in tutti i processi a letto di materiale, non è possibile la realizzazione di solidi cavi privi di aperture: tuttavia, talvolta si assiste allo svuotamento di componenti pieni (che rimarranno pieni riempiti polvere non sinterizzata) al fine di ridurre il tempo di costruzione, il peso specifico e le problematiche legate al ritiro

In base a quanto illustrato, risulta evidente come il processo di SLS sia particolarmente critico nel caso di componenti massivi con forti cambi di sezione, che tendono a concentrare le deformazioni durante il raffreddamento

Abbiamo visto che il mantenimento della camera di costruzione all'interno della finestra di sottoraffreddamento consente di limitare le tensioni da ritiro durante il processo

Tuttavia, al termine della costruzione, si assisterà ad un aumento di densità del materiale dovuto al raffreddamento

Questo viene tenuto in considerazione innanzitutto scalando leggermente i modelli rispetto alle dimensioni nominali

Inoltre, poiché il calore deve essere smaltito interamente attraverso la polvere, si avrà una distribuzione di temperature non uniforme all'interno del pezzo durante il raffreddamento, con conseguente comparsa di tensioni interne

Gli spessori minimi del pezzo dovranno quindi essere scelti in modo da resistere a tali tensioni senza dar luogo a deformazioni sensibili della geometria del componente

Durante il raffreddamento, il calore tenderà ad essere smaltito verso l'alto, vale a dire nella direzione positiva di Z

Ne consegue che lungo tale direzione il ritiro sarà maggiore che nelle altre direzioni

Questo fa sì che il minimo spessore delle pareti misurato lungo Z (s_1 in figura a) debba essere maggiore del minimo spessore ammissibile nelle direzioni ortogonali (s_2 in figura b))

Le condizioni di raffreddamento non omogenee portano ad avere nei prodotti da SLS anche un altro difetto ben noto nelle tradizionali tecnologie di deformazione polimerica, ovvero il cedimento localizzato delle pareti (o sink mark), rappresentato schematicamente in figura

Questo difetto nasce in corrispondenza delle zone in cui si ha una concentrazione di spessore rispetto al resto del pezzo

Il materiale al centro di tale spessore si raffredderà per ultimo, generando una depressione sulle superfici esterne (già contratte) che ne causa il cedimento, come mostrato in figura

Per evitare questo tipo di criticità, così come la nascita di porosità interne, risulta pertanto conveniente limitare il massimo spessore dei pezzi prodotti tramite SLS, così da consentirne un più omogeneo raffreddamento

In analogia con i processi di formatura polimerica "tradizionale" si preferisce inoltre evitare brusche variazioni di spessore, privilegiando l'utilizzo di smussi e raccordi, così da limitare la concentrazione di tensioni durante il ritiro (oltre che in esercizio)

Il rischio di fusione localizzata (thermal bleeding) della polvere adiacente pone dei limiti stringenti alle minime dimensioni ammissibili per i fori e, più in generale, ai giochi tra le superfici del pezzo

Il thermal bleeding interessa anche le geometrie con cavità rivolte verso il basso, come mostrato in figura

Infatti tali geometrie finiranno per divenire regioni di accumulo del calore con conseguente fusione non controllata della polvere adiacente

L'accumulo di calore nelle superfici rivolte verso il basso ha anche un altro effetto, questa volta benefico, sullo stairstepping

Tale calore tende a smussare gli angoli dei gradini introdotti dal layering, come mostrato in figura

Ne consegue che a parità di altezza nominale della cuspidi h_c l'effetto a gradini risulterà meno marcato nelle superfici rivolte verso il basso

Trattandosi di un processo a letto di materiale, sarà necessario prevedere dei fori di drenaggio per consentire l'evacuazione della polvere non trasformata

La dimensione minima di tali aperture dipenderà dalla granulometria della polvere, nonché dalle sue proprietà fisiche

Come anticipato, vengono generalmente indicate con il termine Selective Laser Melting (SLM) le tecnologie di PBF che trasformano materiali metallici per mezzo di una radiazione laser

La granulometria delle polveri utilizzate è solitamente compresa tra i 10 ed i 50 micron

Questi processi sono anche conosciuti come metal Laser Sintering (mLS)

Presso i diversi costruttori è inoltre possibile riscontrare numerose altre nomenclature

A livello di architettura di macchina e strategie di costruzione del componente, la SLM adotta soluzioni analoghe a quelle descritte per la SLS, che non saranno dunque ripetute

Le proprietà profondamente diverse dei materiali metallici rispetto a quelli polimerici, tuttavia, portano a profonde differenze nelle trasformazioni che hanno luogo durante il processo e, di conseguenza, nella progettazione dello stesso

Tali differenze ed i loro riflessi sulla tecnologia sono brevemente messe in luce nel seguito

La prima differenza fondamentale che si ha passando dai polimeri ai metalli è che per questi ultimi non è possibile definire una finestra di sottoraffreddamento

La figura richiama infatti schematicamente le curve di tempo e temperatura per un metallo puro (a)) e per una lega metallica (b))

Nel caso di metalli puri, una volta che il liquido (L) raggiunge la temperatura di solidificazione (T_s), la trasformazione da liquido a solido (S) procede a temperatura costante. In questo intervallo si assiste infatti alla nucleazione e all'accrescimento dei grani cristallini

Nel caso di leghe metalliche la solidificazione non può avvenire a temperatura costante, dato il diverso punto di fusione degli elementi che costituiscono la lega. La regione di solidificazione (L+S) avrà dunque l'inclinazione mostrata in b)

La figura c) mostra le variazioni di volume specifico a cui si assiste al variare della temperatura durante la solidificazione della lega

Risulta evidente come nel caso di materiali metallici il raffreddamento sotto T_s comporti variazioni di volume e, di conseguenza tensioni interne, molto più significative di quanto visto nel caso dei polimeri cristallini

Queste tensioni sono ancora più severe dal momento che la camera di costruzione, e di conseguenza la polvere non trasformata, viene mantenuta ad una temperatura ben al di sotto di T_s per diverse ragioni

In primo luogo, un raffreddamento lento del materiale durante la solidificazione comporta un accrescimento dei grani che non è solitamente desiderabile per le proprietà del componente finale

Si preferisce quindi operare un sottoraffreddamento nel metallo liquido, così da favorire la nucleazione e la formazione di strutture cristalline a grano fine

Inoltre, al contrario dei materiali polimerici, i metalli presentano una elevata tensione superficiale

Questo fa sì che, mantenendo le polveri ad alta temperatura per un lungo periodo, si assisterebbe alla sinterizzazione del materiale allo stato solido

Ciò determinerebbe una notevole difficoltà, se non l'impossibilità, nel rimuovere i pezzi finiti dal letto di polvere al termine del processo

Infine si noti che la temperatura di solidificazione di alcuni materiali, come ad esempio le leghe di Ti o Cr-Co, può facilmente superare i 1600°C

Risulta evidente come il mantenimento della camera di costruzione a temperature prossime a tali valori comporterebbe difficoltà costruttive tutt'altro che trascurabili

Per le ragioni sopra esposte, durante il processo di SLM si hanno delle differenze tra la temperatura di solidificazione T_s e la temperatura T_b del letto di polvere estremamente più marcate del processo di SLS

Questa differenza di temperatura si traduce in tensioni interne molto elevate nel layer in costruzione

Infatti, una volta fuso, il materiale del layer i -esimo comincia a raffreddarsi contraendosi

Quando il layer $i+1$ -esimo verrà fuso al di sopra, inizierà a sua volta a contrarsi dalla temperatura di fusione fino a quella di mantenimento T_b , mentre il layer i -esimo avrà già in parte svolto tale contrazione

Dal momento che i due layer sono saldati, questo si tradurrà in una differenza di tensioni sul piano XY a diverse quote Z, come mostrato in figura

La propagazione di questo effetto sui vari layer fa nascere un momento che tende ad "imbarcare" il layer piano; tale deformazione viene spesso indicata con il nome di warping ed è mostrata in figura

Un warping incontrollato porterebbe ad un sollevamento del materiale al di sopra del layer in costruzione

Nel caso di distorsioni severe, questo materiale può divenire un impedimento al movimento del recoater, determinando quindi il fallimento dell'intero processo

Per contrastare tali tensioni è necessario ricorrere alla costruzione di strutture di supporto che ancorino le zone a sbalzo alla piattaforma

La figura mostra un esempio di geometria a sbalzo (A), che tende, durante il raffreddamento, ad assumere la forma in (B)

Il supporto in (C) bilancia le tensioni da raffreddamento, mantenendo la forma del componente

Anche in questo caso, è possibile definire un angolo critico ed una lunghezza delle strutture a sbalzo oltre il quale è necessaria la generazione di supporti

Si noti come, a differenza di quanto visto nei processi precedenti, lo scopo delle strutture di supporto in questo caso non è quello di contrastare l'azione della gravità, bensì quella delle tensioni interne

Per gli stessi motivi, il primo layer dovrà essere ancorato alla piattaforma di costruzione

Tale ancoraggio consiste di fatto nella saldatura delle polveri metalliche alla piattaforma

Il materiale di cui quest'ultima è costruita dovrà quindi essere scelto in funzione del materiale processato per garantire la saldabilità

Risulta evidente il fatto che questo vincolo porta ad avere un nesting bidimensionale e non più tridimensionale come nel caso dell'SLS

Oltre che bilanciando le tensioni dovute al ritiro, le strutture di supporto agiscono conducendo il calore, riducendo così i gradienti termici all'interno nel pezzo e, di conseguenza, le tensioni interne

Viste le proprietà meccaniche dei materiali di cui si compongono le strutture di supporto, la loro rimozione avviene frequentemente tramite macchine utensili per asportazione di truciolo o altri processi di taglio

Le strutture di supporto devono dunque essere progettate per:

- o Resistere alle tensioni dovute al ritiro
- o Smaltire efficacemente il calore verso la piattaforma
- o Essere facilmente rimovibili in fase di post-processo

L'elevato salto di temperatura tra TB e TS porta alla necessità di fornire al materiale una quantità di energia specifica molto superiore a quanto descritto per la SLS

Per questo motivo, nella SLM vengono preferite sorgenti laser allo stato solido (Nd:YAG, Yb:YAG o fibra), che meglio si prestano a erogare tali potenze e le cui lunghezze d'onda hanno un miglior assorbimento da parte dei materiali metallici (al contrario di ciò che avviene per i materiali polimerici)

Tuttavia, non è possibile fornire tutta l'energia richiesta per portare il materiale a fusione tramite un aumento della potenza laser

A parità di densità di energia applicata, aumentando la densità di potenza aumenta la quantità di energia fornita allo strato superficiale

Valori troppo elevati di densità di potenza porterebbero il materiale in superficie oltre la temperatura di vaporizzazione, o addirittura di plasma, con conseguente ablazione del materiale dal layer in costruzione

Questo pone un limite superiore alla potenza, e dunque alla velocità di scansione della radiazione laser

Viceversa, aumentando la durata dell'illuminazione in un punto aumenta la conduzione verso il materiale sottostante

Quando l'energia fornita non è sufficiente a garantire la corretta bagnabilità del metallo fuso sul layer precedente il liquido, per effetto della tensione superficiale, tende ad assumere la forma che minimizza il rapporto area su volume, ovvero la sfera

Si ha quindi l'insorgere del fenomeno noto come balling, ovvero la separazione della traccia fusa in piccole sfere di metallo liquido, che porta a difetti interni e superficiali del componente lavorato

Al fine di proteggere il bagno di materiale fuso, è necessario immettere nella camera di lavorazione un gas di assistenza a protezione del materiale fuso

Per evitare che i fumi generati durante la fusione del materiale interferiscano con la radiazione luminosa, è necessario che il laser si muova con verso opposto al flusso del gas di assistenza

Inoltre, supponendo che il gas di assistenza si muova in direzione X, bisognerà evitare che i percorsi di riempimento abbiano angoli troppo prossimi alla normale Y, come mostrato in figura

Infatti, in tali regioni, il gas di assistenza non riuscirebbe ad allontanare efficacemente il laser dalla radiazione luminosa, inficiandone dunque l'efficacia

Anche in questa tecnologia, si fa sovente ricorso a strategie di hatching ad isole e alla rotazione dei layers successivi, come descritto in riferimento alla SLS

Al termine della costruzione, i pezzi metallici (comprensivi delle strutture di supporto) si trovano ad essere saldati alla piattaforma di costruzione (anch'essa in metallo)

Rimuovendo il pezzo dalla piattaforma, le tensioni residue presenti potrebbero liberarsi traducendosi in importanti deformazioni del componente

Per questo motivo, la piattaforma ed i pezzi ad essa saldati vengono spesso sottoposti prima ad una ricottura di distensione, durante la quale si ha un rilassamento delle tensioni interne al materiale grazie al riassetto delle dislocazioni tra i grani

Al termine della ricottura di distensione, i pezzi (e le strutture di supporto) vengono staccati dalla piattaforma tramite taglio

A seconda del materiale, delle geometrie e della forma dei supporti, il distacco dei pezzi può avvenire tramite diverse tecnologie di taglio

La più semplice consiste nell'utilizzo di una sega verticale, la quale però porta ad una bassa precisione ed esercita forze che possono deformare il pezzo

Una soluzione più frequentemente impiegata sfrutta l'elettroerosione a filo

Questa tecnologia offre il vantaggio di poter lavorare materiali ad elevata resistenza e durezza senza sollecitare meccanicamente la parte

Prima di essere riutilizzata, la piattaforma necessita di una lavorazione di rettifica volta ad ottenere nuovamente una superficie di riferimento piana e con rugosità controllata

Poiché anche i supporti sono costituiti dallo stesso materiale metallico del pezzo, la loro modalità di rimozione deve essere accuratamente valutata al fine di non danneggiare il prodotto

Le strutture di supporto vengono generalmente rimosse tramite fresatura, manuale o con controllo numerico, o altre tecniche di asportazione di truciolo

Si sottolinea come la progettazione del pezzo e il suo orientamento debbano dunque prevedere la possibilità di raggiungere le zone supportate con l'utensile usato per l'asportazione, nonché gli afferraggi necessari a ciascun posizionamento

Anche in questo caso, risulta necessaria un'attenta pulizia delle cavità interne del pezzo, al fine di rimuovere la polvere non sinterizzata

Questo aspetto risulta particolarmente critico qualora si lavorino materiali costosi o pericolosi per la salute umana

Le parti ottenute tramite SLM possono poi essere sottoposte a trattamenti termici, chimici o meccanici volti a migliorarne le proprietà fisiche e meccaniche

Un trattamento sovente impiegato è l'Hot Isostatic Pressing (HIP), nel quale il componente viene posto in un ambiente riscaldato e pressurizzato tramite un gas

Questo trattamento consente di ridurre notevolmente le porosità interne del materiale

Le differenze tra SLS e SLM introdotte dall'utilizzo di una polvere metallica si riflettono anche sulla progettazione delle parti

La prima differenza fondamentale consiste nel fatto che le tensioni da ritiro (con conseguente rischio di deformazioni) abbiano luogo durante il processo e non al termine

Al fine di limitare le criticità dovute a questo aspetto, è sempre opportuno limitare l'area fusa in ciascun layer, così da contenere contestualmente le tensioni generate durante la solidificazione

Questo può essere fatto agendo sull'orientamento dei pezzi o sulla loro geometria

Come già descritto, la necessità di contrastare le tensioni da ritiro porta a realizzare strutture di supporto che dovranno poi essere rimosse al termine del processo

La progettazione delle parti dovrà tenere quindi in considerazione non solo la necessità di ripulire il pezzo dalla polvere non trasformata, ma anche la rimozione di tali strutture ausiliarie

Trattandosi di materiali metallici con elevata resistenza, questa rimozione dovrà avvenire tramite tecnologie di taglio tradizionali o speciali

Questo richiede che la geometria del pezzo sia tale da consentire il posizionamento in macchina del componente durante le post-lavorazioni di asportazione

Anche in questo caso si avranno dei vincoli sui minimi spessori della parete e sui rapporti di aspetto ammissibili per limitare le distorsioni che emergono durante il ritiro

Le diverse proprietà fisiche del metallo fanno anche sì che la differenza di qualità superficiale tra superfici rivolte verso l'alto e verso il basso sia diametralmente opposta a quanto visto in precedenza per la SLS

Infatti, la minore viscosità del materiale facilita l'infiltrazione del liquido nella polvere sottostante

Inoltre, l'elevata tensione superficiale del materiale ne favorisce la sinterizzazione non controllata nelle zone di accumulo del calore (ovvero nelle facce rivolte verso il basso)

Ne consegue una scarsa finitura superficiale, come schematicamente mostrato in figura, la cui entità è in genere notevolmente superiore a quella dell'effetto a scalini

Per ridurre queste problematiche è possibile intervenire sulle strategie di scansione del laser realizzando più passate (con minor irradianza) in corrispondenza delle zone critiche, così da ridurre la profondità della zona termicamente alterata

Questo difetto risulta più marcato per le superfici la cui inclinazione tende all'orizzontale, ovvero alla configurazione di figura

Si noti però che, in base a quanto descritto in precedenza, queste superfici richiedono la presenza di supporti durante la costruzione e dovranno pertanto essere, almeno parzialmente, riprese per asportazione al termine del processo

Un caso particolare abbastanza frequente di questo difetto è quello di fori con asse normale alla direzione di accrescimento, come mostrato in figura a)

Tale criticità diviene sempre più importante al crescere del diametro del foro

Una possibile soluzione consiste nell'utilizzo di supporti nella zona centrale come in figura b)

La soluzione richiede tuttavia la rilavorazione del foro per la rimozione dei supporti

In particolare, nel caso di canalizzazioni interne al componente questa rilavorazione non è praticabile per l'impossibilità di raggiungere i supporti con l'utensile per asportazione

Pertanto, è possibile ricorrere ad una modifica della sezione come mostrato in figura c) tale da non richiedere l'ausilio di strutture di supporto durante la costruzione

Si noti come tale soluzione, nel caso di canalizzazioni con asse non rettilineo, determini una sezione non costante

Durante il ricoprimento è inoltre possibile che si abbiano dei contatti tra il recoater ed il layer costruito, dovuti a piccoli spostamenti di quest'ultimo fuori dal piano

Tali urti possono divenire particolarmente critici quando si ha una linea di contatto estesa nel primo contatto tra il recoater ed il materiale trasformato

Pertanto è preferibile evitare pareti piane parallele al recoater, come nel caso di Figura a)

In tal senso è necessario operare una rotazione della parete attorno all'asse Z in maniera tale che l'eventuale contatto tra il recoater ed il pezzo abbia idealmente inizio in un solo punto come in figura b)

L'Electron Beam Melting (EBM), o Selective Electron Beam Melting (SEBM), è una tecnologia per la trasformazione di polveri tramite singolo canale nella quale l'energia necessaria a fondere il materiale viene fornita per mezzo di un fascio di elettroni

Uno schema del processo è mostrato in figura

La generazione del fascio di elettroni avviene riscaldando un filamento di materiale altofondente (ad esempio tungsteno) tramite una corrente ad alta tensione

Gli elettroni caricati negativamente viaggiano verso un anodo forato caricato positivamente

Al fine di regolare il numero di elettroni nel fascio, ovvero la sua corrente, viene interposta una gabbia tra il catodo e l'anodo, la quale funge a sua volta da catodo e raccoglie parte degli elettroni in transito

Il foro presente nell'anodo fa sì che gli elettroni proseguano la propria corsa

Il fascio elettronico attraversa quindi una lente di focalizzazione magnetica

Questa è costituita da un circuito ferromagnetico, all'interno del quale viene generato un campo magnetico per mezzo di una bobina

La forza di Lorentz esercitata dal campo elettromagnetico viene quindi utilizzata per modificare il diametro del fascio di elettroni in transito

Al fine di regolare il numero di elettroni nel fascio, ovvero la sua corrente, viene interposta una gabbia tra il catodo e l'anodo, la quale funge a sua volta da catodo e raccoglie parte degli elettroni in transito

Il fascio attraversa poi una bobina di deflessione magnetica, la quale, sempre per mezzo delle forze di Lorentz, devia la direzione dell'asse del fascio di elettroni, indirizzandolo così nella posizione desiderata all'interno del piano XY del layer in lavorazione

Si noti come la lente di focalizzazione magnetica e la bobina di deflessione magnetica svolgano un ruolo analogo, rispettivamente, a quello della lente di focalizzazione ottica e del sistema galvanometrico nell'SLM

Una volta colpito il layer, gli elettroni incidenti trasferiranno la loro energia cinetica al materiale pulviscolare, portandolo così a fusione

Al termine della costruzione del layer, la piattaforma si abbasserà per consentire il ricoprimento della vasca con nuovo materiale

Nello schema di figura il materiale d'apporto viene erogato da una tramoggia e steso al di sopra della vasca di costruzione tramite un recoater costituito da una spatola

Questo schema costruttivo è concettualmente analogo a quello descritto in precedenza per i processi che utilizzano sorgenti laser

In condizioni ambientali, il fascio di elettroni si troverebbe a interagire con le molecole presenti nell'aria, ionizzando queste ultime e perdendo di conseguenza la propria carica

Per evitare che questo avvenga, l'intero processo ha luogo in condizioni di vuoto

Affinché si abbia l'assorbimento del fascio elettronico incidente, il materiale presente all'interno della camera di costruzione deve essere conduttivo

Tale conduttività deve inoltre essere sufficientemente elevata a compensare la tendenza a caricarsi negativamente del materiale via via che riceve elettroni dal fascio

Pertanto, l'applicabilità di questa tecnologia è limitata ai soli materiali metallici

La carica negativa assunta dal materiale per effetto del fascio elettronico, oltre a ridurre l'assorbimento del fascio stesso, rischia di dare luogo a forze repulsive tra i granelli di polvere

Quando tale forza arriva a vincere l'azione della gravità e delle forze di attrito tra le particelle, il materiale si allontana dal layer

Per evitare che questo avvenga, si favorisce una sinterizzazione allo stato solido tra i grani di materiale

Infatti, una giunzione anche piccola tra le particelle consente di dissipare gli elettroni del fascio di elettroni, evitando un accumulo di carica negativa

L'entità di tale sinterizzazione dovrà essere quanto più contenuta, al fine di semplificare le operazioni di pulizia e non compromettere l'accuratezza e la finitura superficiale delle parti

All'atto pratico, la sinterizzazione viene ottenuta per via termica riscaldando la camera di costruzione

Questo consente anche di ridurre la quantità di energia che deve essere fornita dal fascio di elettroni per portare a fusione il materiale, consentendo pertanto l'utilizzo di velocità di avanzamento maggiori

La scelta della temperatura a cui viene mantenuta la camera pone quindi di fronte ad un compromesso: aumentando la temperatura si aumenterà infatti la velocità di produzione, ma si favorirà anche la sinterizzazione del materiale non investito dal fascio di elettroni, con conseguente scadimento dell'accuratezza e aggravio delle operazioni di post processo

Aumentando la granulometria delle polveri, aumentano le forze di inerzia che la carica negativa deve vincere per allontanare il materiale dalla vasca di costruzione, riducendo pertanto il rischio di criticità

Per questo motivo, per il processo si preferiscono polveri con granulometria relativamente elevata (tipicamente nel range 50 – 150 micron) rispetto ai processi che utilizzano una sorgente laser

I processi a letto di polvere offrono la possibilità di lavorare una vasta gamma di materiali ottenendo un'alta qualità dei prodotti

I processi a singolo canale di trasformazione (sia esso laser o fascio di elettroni) sono però caratterizzati da lunghi tempi di costruzione, oltre che di raffreddamento, che ne limitano l'applicabilità in molti campi dell'industria

Inoltre, come si è visto, la necessità di riempire le figure piane con una strategia puntuale può portare ad alcune criticità sulla qualità del prodotto quali anisotropie, porosità, gradienti termici ecc.

Al fine di superare queste problematiche, sono state proposte tecnologie che utilizzano un vettore di canali per la trasformazione del materiale

Nella maggior parte di questi processi si fa ricorso ad una testina di deposizione tramite la quale vengono depositati specifici liquidi sul layer di polvere in costruzione

Anche in questo caso è necessario operare una distinzione in base al materiale della polvere utilizzata

Nei processi che utilizzano materiali polimerici la trasformazione del materiale consiste in un ciclo di fusione e successiva risolidificazione che viene completato all'interno dell'area di lavoro della macchina

Esiste poi una seconda categoria di processi che vengono raggruppati sotto la dicitura di Binder Jetting (BJ), in quanto depositano sul letto di polvere un legante, il cui scopo è quello di far aderire tra loro le particelle

Non si ha quindi in questo caso alcuna trasformazione termica della polvere durante il processo

Questi processi consentono di trasformare, oltre ai polimeri, una ampia gamma di materiali

Processi lineari a letto di polvere con fusione del materiale

I processi a letto di polvere polimerica seguono principi in gran parte analoghi a quanto descritto nel Selective Laser Sintering

Le modalità con cui la piattaforma viene abbassata e ricoperta di polvere ad ogni layer sono quelle già viste

Anche i materiali utilizzati sono i medesimi, così come uguali sono le strategie di riscaldamento del letto di polvere, mantenimento della temperatura durante il processo, raffreddamento e pulizia al termine della lavorazione

Pertanto, continueranno a valere tutte le considerazioni già esposte in merito a queste fasi

Una differenza sostanziale si ha invece nelle modalità con cui il materiale viene fuso selettivamente ad ogni layer

In base a questo aspetto vengono suddivise quattro principali categorie di processi, descritte brevemente nel seguito

Il materiale polimerico (costituito da un polimero semicristallino con le caratteristiche già viste) viene steso sulla vasca con metodi analoghi a quelli descritti nel Selective Laser Sintering

Per fondere il materiale, si fa ricorso ad una testina termica (thermal printhead)

Come mostrato in figura, la testina presenta un vettore di elementi termici allineati, i quali producono calore una volta attivati elettricamente

Questo sistema, mutuato dalle vecchie tecnologie di stampa bidimensionale quali i fax, consente di riscaldare in maniera selettiva il materiale sottostante

Durante la costruzione del layer, la testina avanza parallelamente ad un asse (X nella figura della slide precedente) portando a fusione il materiale del layer

Durante il processo, il materiale è mantenuto a temperature molto prossime alla temperatura di fusione, così da richiedere un apporto energetico limitato da parte dell'elemento termico e consentire quindi maggiori velocità di avanzamento

Una testina a getto di inchiostro che si muove linearmente lungo l'asse X deposita un agente chimico a base di carbon-black sullo strato di polvere in costruzione

La deposizione avviene attuando selettivamente gli ugelli della testina

Una volta depositato l'inchiostro sulle regioni che costituiranno il componente, la polvere viene illuminata tramite una lampada agli infrarossi che si muove seguendo la testina a getto di inchiostro (spesso i due elementi sono resi solidali)

La lampada trasferirà quindi una certa quantità di energia al materiale sotto forma di irraggiamento

La polvere bianca (non inchiostrata) riflette la maggior parte di questa energia verso la lampada

Al contrario, la polvere bagnata dal carbon-black presenta un comportamento prossimo a quello di un corpo nero, assorbendo la maggior parte dell'energia incidente

L'energia assorbita si trasforma quindi in calore, portando a fusione il materiale nelle zone sulle quali è stato depositato l'inchiostro

La quantità di inchiostro depositata e l'irradianza fornita dalla lampada risultano fondamentali per determinare la quantità di calore sviluppata e dunque la fusione

Una quantità insufficiente di carbon-black potrebbe determinare una fusione non completa del materiale, con conseguenti porosità interne al materiale

Di contro, una quantità eccessiva di calore può portare alla fusione indesiderata del materiale nelle zone limitrofe al pezzo, con conseguente scadimento della accuratezza

Questo problema viene accentuato qualora quantità eccessive di inchiostro vadano a bagnare la polvere adiacente alle zone di deposizione

Pertanto, è fondamentale calibrare attentamente la quantità di carbon-black depositata per unità di superficie

Si noti inoltre che la ripetuta esposizione del materiale non fuso alla radiazione infrarossa accelera il decadimento delle proprietà del polimero rispetto a quanto avviene nella SLS

Pertanto, si cercherà di limitare l'irradianza delle lampade al valor minimo che consente di ottenere la fusione del materiale

Inoltre, le percentuali di materiale riciclato sono generalmente più basse rispetto al caso della SLS

Questo processo adotta una logica opposta a quella del HSS visto in precedenza

Infatti in questo caso l'inchiostro utilizzato è un inibitore della fusione che viene depositato su tutta la polvere, tranne che nelle zone in cui dovrà essere costruito il pezzo

Si fornirà quindi tramite le lampade una quantità di irradianza sufficiente a fondere il materiale di base, lasciando solido il materiale contenente l'inibitore

Poiché l'assorbitività luminosa della polvere bianca è solitamente bassa, la potenza specifica fornita tramite le lampade dovrà essere maggiore al caso dell'HSS

Conseguentemente, questo processo presenta una minor efficienza energetica

Si noti come, al contrario di quanto descritto per l'HSS, in questo processo il materiale che costituisce il pezzo non è imbevuto tramite agenti chimici che possano modificarne le proprietà

Le caratteristiche fisiche saranno pertanto quelle del materiale di base

La presenza di un agente chimico porta ad una difficoltà nel recupero della polvere non trasformata

Le percentuali di materiale riciclato risulteranno pertanto marcatamente più basse rispetto ai processi visti in precedenza

Il processo di Multi Jet Fusion (MJF) combina aspetti dell'High Speed Sintering e del Selective Inhibition Sintering. La figura mostra uno schema di tale processo

Come nel caso dell'HSS, viene depositato un agente chimico carico di carbonblack sulle regioni che costituiscono il pezzo. Attorno a tali regioni viene depositato un secondo agente, chiamato dettagliante, che inibisce la fusione del materiale

Una volta che il layer viene investito dalla radiazione luminosa, le regioni investite dal carbon-black raggiungono la temperatura di fusione. Durante questa fase, l'agente di dettaglio previene la fusione non controllata del materiale adiacente

Oltre all'azione inibitrice, questo agente chimico svolge anche un ruolo tensioattivo evitando che il carbon-black prima ed il materiale fuso poi vadano a bagnare la polvere circostante la geometria del layer

Questa tecnica consente di lavorare a temperature più alte rispetto a quanto visto nell'HSS, ottenendo quindi una maggiore densità dei componenti senza però determinare uno scadimento dell'accuratezza dimensionale

Inoltre, la deposizione dell'agente inibitore solo nelle aree limitrofe al pezzo consente il riciclo di una quantità molto maggiore di polvere nei processi successivi (fino all'80%)

Nei processi visti fino a questo momento il materiale viene mantenuto all'interno della finestra di sottoraffreddamento, con tensioni interne (e dunque deformazioni) trascurabili

Si ha cioè la medesima condizione già descritta per il processo di SLS e valgono pertanto tutte le considerazioni già esposte

Inoltre, nei processi che utilizzano una radiazione luminosa per fondere il materiale è necessario tenere il rapporto tra area fusa e non ad ogni posizione della lampada. Si veda a titolo esemplificativo la differenza in termini di superficie fusa tra le posizioni 1 e 2 che si ha nell'avanzamento della lampada in figura

A parità di irradianza fornita dalla lampada, nella posizione 1 la quantità di energia che deve essere assorbita per fondere il materiale è notevolmente superiore a quella richiesta in posizione 2

Qualora tale energia non risultasse sufficiente, si avrebbe una non completa fusione del layer con conseguente porosità e, nel caso dell'ultimo layer, difetti superficiali

Viceversa, laddove l'energia risulti eccessiva si può avere un eccessivo riscaldamento del materiale, con conseguente aggravio del thermal bleeding e degli altri fenomeni legati alla temperatura descritti in precedenza

Inoltre, l'eccessiva energia fornita alla polvere non fusa ne accelera i fenomeni di degrado, riducendone di conseguenza la riciclabilità

Questo problema risulta particolarmente marcato nei processi che utilizzano un agente assorbente della radiazione luminosa

Sarà dunque necessario agire sul disegno e sull'orientamento dei pezzi al fine di limitare quanto più possibile l'estensione di ciascun layer, in particolare nella direzione normale a quella di avanzamento della lampada

Questo aspetto deve essere tenuto in considerazione anche durante il nesting dei pezzi all'interno della camera di costruzione

In questi processi è inoltre possibile riscontrare un difetto che prende il nome di capillarità, mostrato in figura

La capillarità nasce dalla diversa tensione superficiale tra il materiale liquido e la polvere non trasformata che lo circonda

Questo porta ad una deformazione localizzata del menisco liquido nelle zone di bordo, come mostrato in figura, la quale permane sui bordi del pezzo al termine della solidificazione

Il difetto sarà pertanto riscontrabile lungo gli spigoli di tutte le facce piane (ovvero normali a Z) superiori del pezzo

La modellazione e l'orientamento del pezzo devono quindi essere svolte con l'obiettivo di minimizzare tali superfici

Gli elementi che costituiscono il sistema sono fondamentalmente gli stessi già descritti con altre tecniche, con l'importante differenza che in questo caso non si ha una lampada a fondere il materiale

Inoltre, l'agente depositato risulta assai diverso

Il BJ è uno dei processi additivi di più lunga tradizione. Infatti, il primo esempio di questa tecnologia fu brevettato nel 1993 dall'MIT con il nome di 3D Printing (3DP)

Questo nome ha poi riscosso un enorme successo di pubblico, tanto da essere oggi comunemente usato come sinonimo di "tecnologia additiva"

Il 3DP brevettato dal MIT partiva da un letto di polvere inerte (gesso) sul quale veniva depositato un legante costituito per la maggior parte da acqua

Nelle zone del letto di polvere bagnate dal legante si otteneva così una coesione chimica del materiale in polvere

La possibilità di aggiungere coloranti al legante depositato consentiva inoltre di conferire diverse cromaticità ai pezzi

Grazie a questa peculiarità, il processo ha trovato largo utilizzo nella fabbricazione di prototipi con le medesime colorazioni del prodotto finale

Bisogna però sottolineare come il pezzo così fabbricato goda di scarsissime proprietà meccaniche, limitando di fatto l'utilizzo di questa tecnologia alla produzione di prototipi estetici e non funzionali

Si noti come il processo possa essere applicato a qualsiasi combinazione di materiale pulviscolare e legante, purché quest'ultimo sia in grado di generare un'adesione tra i grani di polvere

Inoltre, non avendosi una fusione, il processo consente di lavorare elementi con un alto punto di fusione ottenendo un buon grado di accuratezza

Ne consegue un'enorme versatilità di questa tecnologia, che ne ha esteso l'applicazione a svariati tipi di materiali

Una applicazione attualmente molto diffusa consiste nella produzione di anime e stampi per i processi di colata. In questo caso il materiale in polvere è costituito da una terra da fonderia

Si possono avere diversi leganti quali resine furaniche, fenoliche o inorganiche

Questa applicazione consente la fabbricazione di anime e forme di notevole complessità, eliminando la necessità di attrezzature fisse (ad esempio le casse d'anima) e operazioni di assemblaggio, e consentendo sottosquadri non ottenibili tramite processi convenzionali (a meno di assemblaggi)

I componenti estratti dal processo di Binder Jetting vengono definiti "al verde" e, come già menzionato, da una bassa resistenza meccanica legata alla forza adesiva esercitata dal legante tra i grani

Questo aspetto ne favorisce la frantumazione al termine della colata nelle applicazioni di fonderia

Inoltre, i componenti al verde sono caratterizzati da una densità che si aggira tra il 60% e l'80%

Queste porosità rappresentano un vantaggio per la fonderia, in quanto favoriscono l'estrazione di gas dalla forma durante il processo

Qualora si desideri ottenere componenti con elevate prestazioni meccaniche, è necessario introdurre un successivo trattamento termico del componente, riassunto in figura

Il trattamento consta di due fasi principali, ovvero debinding e sinterizzazione

Durante la fase di debinding si ha la vaporizzazione del legante. Per favorire questo processo, viene solitamente aggiunto ossigeno o altri comburenti all'interno del forno

Successivamente, il componente viene ulteriormente riscaldato per dar luogo ad una sinterizzazione

In una prima fase, si ha la formazione di un collo solido tra i grani. Mantenendo il pezzo ad alta temperatura, queste regioni di contatto crescono sovrapponendosi e chiudendo le porosità tra i grani di materiale

Si noti come questo trattamento presenti importanti analogie con quello dei pezzi da nano Particle Jetting

Una differenza fondamentale, tuttavia, deriva dalla diversa dimensione del particolato solido

Infatti, nel Binder Jetting la dimensione delle polveri deve essere mantenuta relativamente elevata, al fine di consentire l'infiltrazione del legante durante la fase di stampa. Questo comporta una notevole contrazione volumetrica del materiale

Gli effetti della contrazione dipendono enormemente dalla geometria del componente e possono portare a distorsioni localizzate, tensioni residue e perdite di accuratezza geometrica e dimensionale

Al fine di limitare questi effetti, si utilizza spesso una granulometria ad ampia distribuzione, ovvero una miscela di polveri grosse che consentano la penetrazione del legante e di polveri più fini che aumentino la densità del componente e, di conseguenza, limitino il ritiro durante la solidificazione

Gli effettivi valori di questi intervalli dipendono dal tipo di polvere e leganti utilizzati

Tra i materiali utilizzati in questo processo spiccano i metalli ed i materiali ceramici, per i quali si parla, rispettivamente, di Metal Binder Jetting (MBJ) e Ceramic Binder Jetting (CBJ)

L'alto punto di fusione e l'elevata tensione superficiale di questi materiali ne favoriscono la sinterizzazione, consentendo di ottenere parti con alte densità e proprietà meccaniche

Si sottolinea come, nel confronto con le tecnologie a singolo canale di trasformazione, non vi è la necessità di supporti ed i tempi (di stampa) risultino notevolmente ridotti

Di contro, si hanno importanti fenomeni di ritiro che possono compromettere notevolmente l'accuratezza del processo

Inoltre, le massime densità ottenibili risultano, in genere, inferiori nel caso del BJ

L'assenza di trasformazioni termiche durante il processo fa sì che non si pongano le criticità legate alla variazione dimensionale descritte per gli altri processi a letto di polvere affrontati fino a questo momento

Il Binder Jetting pone importanti vincoli sui minimi spessori ottenibili, legati alla necessità di estrarre il pezzo "al verde" senza danneggiarlo

Per lo stesso motivo, sono da evitare spigoli vivi (specie in presenza di angoli acuti) in favore di raggi di raccordo il più possibile ampi

Nel caso di componenti sottoposti a successiva sinterizzazione, si ha un'importante contrazione del materiale durante questo trattamento

Valgono pertanto in tal caso tutte le considerazioni esposte in precedenza sulla progettazione di sezioni sottili, i cambi di sezione repentini e le altre geometrie che possono portare a distorsioni

Infine, trattandosi di un processo a letto di materiale, sarà ancora una volta fondamentale prevedere opportune aperture per il drenaggio del materiale non trasformato, la cui dimensione minima dipende dalla granulometria e dalle proprietà fisiche della polvere

Il processo di Large Area Projection Sintering (LAPS) trasforma simultaneamente un intero layer di materiale pulviscolare

Le tecniche di ricoprimento del layer e di movimentazione della piattaforma sono analoghe a quanto descritto in precedenza

Anche i materiali utilizzati per il processo sono gli stessi, ovvero polimeri semicristallini con un intervallo di sottoraffreddamento sufficientemente ampio

Una lampada posta al di sopra del layer emette una radiazione luminosa proiettando la geometria del layer sulla superficie superiore del letto di polvere

Il polimero viene quindi sottoposto ad una radiazione di minore intensità e per un tempo più lungo rispetto a quanto avviene, ad esempio, nella SLS

Questo consente di avere una fusione più omogenea del materiale, che si traduce in una maggiore densità e in migliori proprietà meccaniche e finitura superficiale

Il tempo di costruzione del pezzo nel LAPS non dipende dall'area di materiale trasformato a ciascun layer, ma solo dall'altezza totale della tavolata

Al contrario di quello che avviene nei processi lineari, però, il tempo di costruzione non dipende dalle dimensioni dell'area di lavoro. Questo consente di scalare le dimensioni dell'attrezzatura senza un aggravio nel tempo totale del processo

Da qui la convenienza nell'utilizzo di questi processi nelle applicazioni di grandi dimensioni, come sottolineato anche dal nome del processo

Queste sono le tecnologie additive attualmente più diffuse

Questo è dovuto alla semplicità costruttiva ed al fatto che i brevetti relativi ad alcune di queste tecnologie sono stati tra i primi a decadere

Negli ultimi anni si è assistito alla comparsa di processi fortemente innovativi appartenenti a questa categoria, i quali ne hanno ampliato enormemente i campi di applicazione

Tutti i processi basati sulla deposizione di materiali pastosi tramite singolo canale verranno raggruppati nella più ampia categoria di Material Extrusion (MEx)

Si noti come tale definizione prescinda dal tipo di materiale trattato e/o dalla temperatura a cui il processo ha luogo

Tra questi processi, un'importante sottocategoria è costituita dai materiali viscoelastici che vengono portati allo stato viscoso tramite fusione

Questi processi verranno classificati con il termine Fused Deposition Modelling (FDM) e rappresentano la grande maggioranza dei processi MEx sul mercato

La quasi totalità di tali tecnologie ricorre all'utilizzo di materiali termoplastici che vengono portati alla temperatura di fusione per la deposizione e successivamente risolidificati

La soluzione più comune per l'approvvigionamento di materiale nell'FDM consiste nell'utilizzare un filamento di materiale termoplastico che viene progressivamente richiamato verso la zona di deposizione

Si ha in questo caso un particolare processo FDM noto come Fused Filament Fabrication (FFF)

L'FFF è talmente popolare che il più generico acronimo FDM viene spesso utilizzato per fare riferimento a queste tecnologie

La stessa dicitura "stampa 3D" è spesso utilizzata come sinonimo di FFF proprio in virtù dell'enorme diffusione di queste tecnologie

Dato l'ampia diffusione di questa tecnologia e la sua importanza nel panorama delle tecnologie additive, la trattazione che segue comincia col presentare il processo di FFF

In seguito, verrà fornita una visione più ampia dei processi di FDM, introducendo alcune soluzioni innovative di enorme interesse per l'attuale panorama tecnologico

In ultimo, si amplierà il quadro del MEx presentando processi che non fanno ricorso alla rifusione del materiale

La fabbricazione a filamento fuso (Fused Filament Fabrication, FFF) è una tecnologia additiva basata sull'estrusione di materiale allo stato viscoso da parte di un utensile in movimento

Il materiale di partenza è un polimero in forma di filamento, che viene rammollito per mezzo del calore e depositato per strati

Questa tecnologia trova attualmente una grande diffusione grazie alla semplicità di utilizzo e all'economicità delle attrezzature

Per questo motivo, il termine FDM è generalmente utilizzato come sinonimo di FFF

Nel seguito viene illustrata la modalità con cui le parti vengono costruite nell'FFF utilizzando come riferimento un'architettura tra le più semplici, al fine di mettere in luce gli elementi caratteristici del processo

Vengono poi illustrati alcuni degli aspetti che caratterizzano la progettazione del processo di FFF in relazione alle sue specifiche tecnologiche

Infine, si affrontano brevemente gli aspetti legati alla rimozione e al post-processo delle parti per la messa in opera

L'elemento centrale del processo FFF è il sistema di estrusione, rappresentato schematicamente in figura

Il filamento di partenza è di solito raccolto in bobine. L'estremità del filo entra dall'alto nella carcassa dell'estrusore, dove passa tra due rotelle dentellate

Durante l'estrusione, una delle due rotelle viene posta in rotazione tramite un motore elettrico, trascinando il filo verso la zona di deposizione. La seconda rotella (folle) ha la funzione di garantire la posizione del filo ed entra in rotazione trascinata dallo stesso

Durante la rotazione, le dentellature esterne alle due ruote andranno ad agire sulla superficie esterna del filo, favorendone il trascinamento

Il filo viene quindi spinto verso una resistenza elettrica che riscalda il termo-polimero al di sopra della sua temperatura di fusione (T_m)

Il materiale liquefatto, per effetto della gravità e della pressione esercitata dal filamento, passa attraverso un ugello (nozzle) con un diametro minore di quello del filamento iniziale

Il materiale fuso in uscita dall'ugello va dunque a sovrapporsi a quello precedentemente depositato

Si noti come il filo debba preservare una rigidità sufficiente ad esercitare la pressione necessaria per espellere il materiale fuso

Al fine di evitare che il calore usato per rifondere il materiale si propaghi verso l'alto andando a rammollire il filo, uno stato di materiale isolante ed un dissipatore di calore vengono posti al di sopra della resistenza per raffreddare il filo in tale zona

La necessità di spingere il fuso per mezzo del filo rappresenta anche un limite ai materiali processabili

Infatti, non sarà possibile trasformare materiali eccessivamente elastici (ad esempio gomme), in quanto questi tenderebbero a deformarsi elasticamente sotto l'azione delle due rotelle, senza esercitare sul materiale sottostante il carico assiale necessario all'estrusione e senza richiamare nuovo materiale dalla bobina

D'altro canto, il materiale deve essere sufficientemente duttile affinché il filo si deformi senza spezzarsi seguendo i percorsi dell'estrusore

Questi requisiti individuano un campo ben preciso di materiali lavorabili tramite FFF nonché di diametri del filo di partenza

Al fine di preservare l'accuratezza dimensionale, il materiale appena depositato viene spesso raffreddato tramite una ventola posta a valle dell'estrusore. In questo modo, il polimero inizia a contrarsi prima che altro materiale sia depositato al di sopra

Inoltre, raffreddandosi il materiale aumenta la propria rigidità, riducendo pertanto il rischio di deformarsi sotto l'effetto del peso proprio e dell'inerzia legata alla velocità di estrusione

Il polimero viene depositato per strati al di sopra di una piattaforma fino all'ottenimento del pezzo finito. Il materiale deve quindi essere estruso in base allo slicing del componente: a tal fine è necessario un moto relativo tra l'estrusore e la piattaforma di costruzione

Tale moto relativo può essere ottenuto movimentando l'estrusore, la piattaforma, o entrambi

La soluzione vista in figura, nella quale le rotelle di richiamo sono inserite all'interno dell'estrusore, viene generalmente definita estrusione diretta

Accanto a questa, esiste un'altra architettura denominata Bowden, nella quale le rotelle di approvvigionamento del filo sono solidali al telaio della macchina

In questo secondo caso, il filo è poi guidato tramite un tubo fino all'estrusore

Questa soluzione porta in genere ad avere limiti ancora più stringenti alla minima rigidità del materiale processabile

Indipendentemente dal tipo di estrusione, esistono diverse soluzioni costruttive per attuare i moti relativi tra estrusore e piattaforma di costruzione

Nel seguito verranno presentate alcune tra le architetture di più ampio utilizzo

Nella figura l'estrusore è montato su un supporto libero di scorrere lungo due barre orientate secondo l'asse X

Questo sistema è ancorato alle due estremità a strutture di supporto, libere a loro volta di scorrere lungo due barre orientate secondo l'asse Y

I movimenti del blocco estrusore (lungo X) e della traversa su cui esso è montato (lungo Y) possono essere azionati, ad esempio, per mezzo di motori stepper e cinghie di trasmissione. La combinazione di questi due movimenti definisce la posizione del canale di trasformazione (ovvero l'estrusore) nel piano di ciascun layer.

La piattaforma su cui il pezzo viene costruito è movimentata lungo l'asse Z per mezzo di una vite di manovra azionata da un motore stepper.

Al termine di ciascuno strato, la piattaforma si abbasserà di una quantità pari ad hL per consentire la costruzione del layer successivo.

Questa architettura trova largo utilizzo nelle stampanti di piccole e medie dimensioni grazie alla sua semplicità costruttiva.

Come nel caso precedente, l'estrusore è reso solidale ad un supporto libero di traslare lungo guide dirette secondo l'asse X.

Le barre sono in questo caso mosse lungo l'asse Z tramite guide lineari.

L'ultimo movimento cartesiano, ovvero quello in Y, è invece conferito al piatto, il quale viene fatto traslare su guide lineari.

Anche questa architettura gode di grande popolarità grazie alla sua semplicità costruttiva. Si noti come, al contrario della versione con piatto mobile in Z, la piattaforma non trasla in Z, ma soltanto nel piano.

Per questo motivo, questa architettura viene preferita nel caso di componenti di grandi dimensioni, al fine di evitare perdite di accuratezza in Z dovute al peso del componente.

Nel caso di componenti di grandissime dimensioni, si preferisce spesso far traslare l'intero portale, anziché la piattaforma, lungo l'asse Y.

Questo consente di mantenere fermo il componente durante la lavorazione, ovviando di fatto a tutte le problematiche connesse alla massa.

Questa architettura utilizza tre guide movimentate in direzione Z, posizionate su tre colonne poste a 120° tra loro nel piano XY, come mostrato nella figura.

Lo spazio di costruzione sarà dunque cilindrico.

Si noti come anche in questo caso non sia attribuito nessun moto alla piattaforma. Pertanto, l'architettura consente di processare pezzi pesanti.

In particolare, tale soluzione è spesso utilizzata nel MEx di materiali non polimerici.

L'architettura delta sta riscontrando un grande successo negli ultimi anni, in quanto consente il raggiungimento di grandi accuratezze dimensionali. Di contro, questa soluzione richiede una programmazione più complessa del cartesiano per tradurre, tramite cinematica

inversa, i percorsi calcolati nella fase di slicing negli avanzamenti che devono essere comandati ai tre carrelli

Sempre più spesso si assiste ad applicazioni della tecnologia FFF in cui un estrusore viene montato su un braccio robotico a 6 assi

Il braccio si muove nello spazio, depositando il materiale in corrispondenza delle zone del pezzo desiderate

Si noti come in questo caso si possa dare vita ad un layer curvo o inclinato, ovvero diverso dal piano XY

Ovviamente, questo tipo di deposizione dovrà fronteggiare le problematiche dettate dalla forza di gravità, che agisce sul materiale fuso in uscita dall'ugello

Inoltre, il calcolo dei percorsi differirà in maniera sostanziale da quanto descritto in precedenza

L'adesione tra pezzo e piattaforma può venire meno durante la solidificazione e il successivo raffreddamento del materiale, a causa del ritiro di quest'ultimo e dell'effetto di warping, dando luogo ad un distacco del componente

Per ridurre questo tipo di problematiche, alcune macchine prevedono l'utilizzo di una piattaforma riscaldata, che riduce pertanto le contrazioni termiche dei primi layer durante la stampa

Al fine di prevenire il distacco del pezzo, la piattaforma di costruzione deve essere realizzata tramite materiali che favoriscano l'adesione del materiale depositato e con porosità che favoriscono il grip tra polimero fuso e piattaforma

È anche possibile rivestire la piattaforma con uno strato di adesivo lavabile, al fine di aumentare ulteriormente l'adesione del pezzo

Le problematiche legate alla contrazione termica, ovviamente, non interessano solo il primo layer, ma anche i successivi. Questo può portare a importanti tensioni interne e distorsioni del componente con conseguente perdita di accuratezza, soprattutto nel caso di materiali semi-cristallini

Per questo motivo, le macchine FFF utilizzate per trasformare materiali ad alte prestazioni prevedono l'utilizzo di una camera riscaldata

In questo caso, il pezzo completerà solo una parte del raffreddamento (e quindi della contrazione volumetrica) durante il processo, terminandolo al di fuori della zona di costruzione al termine del processo

In questo modo è possibile ridurre notevolmente le disomogeneità legate al raffreddamento non uniforme

Quando l'estrusore è in funzionamento, il materiale fuso fuoriesce con un diametro d_N , pari (o comunque di poco inferiore) a quello dell'ugello utilizzato

Mantenendo un'altezza del layer h_L uguale a tale diametro, il materiale estruso manterrebbe una sezione circolare, come mostrato in figura A)

In tali condizioni ciascuna sezione tocca quella della traccia sottostante in un unico punto; ciò si tradurrebbe in una mancanza di adesione tra gli strati del pezzo finito

Al fine di aumentare la superficie di adesione, si ricorre pertanto ad altezze del layer $h_L < d_N$, come mostrato in figura B)

In tal modo, il materiale in uscita dall'ugello viene premuto contro lo strato precedente con una pressione che favorisce l'adesione

Come conseguenza, la larghezza della traccia di materiale (w_m) risulta maggiore del diametro dell'ugello

Sarà dunque necessario regolare il rapporto tra la velocità del filo in ingresso e la velocità di avanzamento per mantenere costante w_m

La scelta dell'altezza del layer dovrà dunque tenere in considerazione questi fattori per combinare le caratteristiche di resistenza e accuratezza dimensionale con il tempo necessario alla produzione del pezzo

Per evitare che il materiale fuoriesca dall'ugello quando l'estrusore non è in lavorazione, il filo viene ritratto facendo ruotare la rotella dentellata nella direzione opposta a quella vista in precedenza

La lunghezza di filo represso e la velocità di rotazione delle ruote determinano l'efficacia della retrazione nonché il tempo necessario a riportare il filo nella zona di estrusione

Questi parametri devono quindi essere definiti in fase di progettazione di processo, così da interrompere e riprendere la deposizione nel minor intervallo di tempo possibile

A causa delle limitazioni alle velocità del filo e delle rotelle e della necessità di movimentare un utensile dotato di massa (l'estrusore), l'FFF risulta in generale molto più lento (a parità di percorso) dei processi additivi che utilizzano un laser

Per questo motivo, si fa spesso ricorso a riempimenti del layer con bassa densità, volti a preservare l'economia del processo a scapito delle prestazioni meccaniche del componente

Le strategie di riempimento utilizzate prevedono spesso la ripetizione di una figura piana (detta cella) all'interno dei contorni di ogni layer

La figura mostra tre esempi percorsi di riempimento spesso utilizzati nei processi FFF

Per migliorare l'accuratezza delle superfici esterne si fa spesso ricorso a più perimetri di contorno affiancati, come nell'esempio di figura

Nella zona di confine tra linee di contorno e di riempimento è possibile adottare diverse soluzioni, come schematicamente mostrato nella figura

Nel caso in cui l'obiettivo primario sia quello di preservare l'accuratezza dimensionale delle superfici esterne, i percorsi vengono scelti in maniera che le tracce del riempimento siano tangenti al perimetro al contorno più interno, come nel caso della figura a)

Dalla figura è tuttavia possibile notare che questa strategia porta ad avere dei vuoti nelle zone di bordo, con conseguente scadimento delle proprietà meccaniche del componente

Qualora si voglia privilegiare la resistenza, si procede dunque come mostrato in b), sovrapponendo i percorsi di riempimento alle linee di contorno

Questo, di contro, comporta una perdita di accuratezza delle superfici esterne, che diviene più marcata al diminuire del numero di linee di contorno

Il rapporto tra la superficie di materiale depositato e l'area interna del layer prende il nome di percentuale di riempimento o infill

Basse percentuali di infill consentono di limitare le distorsioni durante la fase di raffreddamento del componente

Infatti, poiché il ritiro termico è volumetrico, ad una minore quantità di materiale depositato corrisponderanno minori tensioni da ritiro

E' tuttavia fondamentale garantire che la rigidità delle strutture di riempimento sia tale da prevenire la distorsione delle pareti esterne del componente

Durante il processo, il pezzo è sostenuto unicamente dalla piattaforma di costruzione; per questo motivo, risultano necessarie strutture di supporto nel caso di minimi locali, strutture a sbalzo, ponti ed altre strutture non autosupportanti

Come già introdotto, uno dei problemi più caratteristici di questa tecnologia (e delle altre tecnologie FDM) riguarda l'adesione dei primi strati alla piattaforma

Infatti, l'effetto di warping porterebbe i primi strati a distaccarsi dal piatto, con conseguente fallimento del processo

In aggiunta agli accorgimenti costruttivi esposti in precedenza (uno su tutti l'utilizzo di piattaforme riscaldate), per prevenire il distacco dei pezzi dalla piattaforma durante la costruzione, è possibile realizzare geometrie ausiliarie con lo scopo di migliorare l'adesione superficiale tra il pezzo e la piattaforma

In particolare, si distinguono due strategie, denominate rispettivamente raft e brim, mostrate in figura a) e b)

Il raft (letteralmente "zattera") consiste in una serie di layer posti al di sotto del pezzo, al fine di aumentare la superficie di contatto e dunque l'adesione con la piattaforma

Ovviamente, al termine della lavorazione il raft deve essere rimosso dal resto del pezzo, in quanto non necessario durante la fase di utilizzo

Al fine di favorire il distacco, il layer sommitale a contatto con il pezzo (detto di transizione) può essere realizzato con una bassa densità e senza contorni esterni

Il brim (letteralmente "orlo") consiste in un certo numero di perimetri esterni al profilo del primo layer, che ne favoriscono ancora una volta l'adesione alla piattaforma

La rimozione del brim al termine del processo può portare ad una sbavatura dei contorni del primo layer

Per questo motivo, soprattutto nel caso di materiali con elevata resistenza meccanica, si fa ricorso ad appositi utensili per rifilare tali profili

Il brim non deve essere confuso con un altro metodo che disegna un profilo esterno al primo layer, rappresentato in figura c), il quale prende il nome di skirt (letteralmente "gonna")

Come è possibile vedere in c), lo skirt non presenta punti di contatto con il pezzo e non influisce quindi sull'adesione di quest'ultimo alla piattaforma

L'obiettivo in questo caso è infatti di tutt'altra natura, ovvero depositare al di fuori del pezzo il primo materiale rifuso, così da regolarizzare il flusso di polimero in uscita ed evitare difetti nel primo layer

Piccoli cambiamenti nel diametro del filo influenzano in maniera significativa la portata di materiale e, a parità di altri parametri, la larghezza della traccia depositata

Per questi motivi, la calibrazione del diametro del filamento risulta un aspetto fondamentale per l'accuratezza dei processi di FFF

È importante sottolineare che la velocità di avanzamento dell'ugello non può essere aumentata a piacimento, ma presenta un limite superiore legato alla necessità di fondere efficacemente il materiale. Questo pone un limite superiore alla produttività di questo processo

La temperatura a cui il materiale viene estruso ha a sua volta un'enorme importanza nel determinare la capacità di ciascun layer di aderire allo strato precedente (o alla piattaforma nel caso del primo layer)

Inoltre, la temperatura di fusione influenza in maniera diretta la viscosità e la rigidità del materiale polimerico, determinando quindi la sua capacità di mantenere la forma assegnata durante la deposizione

La progettazione di processo richiede dunque una scelta accurata della temperatura della resistenza e delle eventuali temperature del piatto e della camera di costruzione, nonché della velocità delle ventole poste a raffreddare il materiale appena depositato

Al termine del processo, il componente viene staccato dalla piattaforma di costruzione manualmente o tramite l'ausilio di appositi utensili (tipicamente raschietti o spatole)

Avvenuta la rimozione, il pezzo deve essere ripulito dalle strutture di supporto (compresi eventuali raft o brim) generate per la sua costruzione

Nel caso in cui vi sia la possibilità di adottare 2 materiali diversi (in una configurazione a 2 estrusori), uno dei 2 materiali può essere utilizzato per la costruzione delle sole strutture di supporto

In particolare, è possibile adottare dei materiali idrosolubili (o comunque solubili per via chimica e/o termica), al fine di rimuovere le strutture di supporto senza danneggiare il pezzo

In questo caso, il pezzo viene lasciato a bagno nel solvente o riscaldato per consentire la rimozione del materiale di supporto

Oltre a limitare i danneggiamenti sul componente, l'utilizzo di un materiale solubile consente la pulizia di zone non raggiungibili tramite utensili meccanici, ampliando così le possibilità di progettazione dei supporti

I pezzi realizzati tramite FFF godono generalmente di scarse finiture superficiali, rendendo spesso necessarie ulteriori operazioni di finitura

La finitura può essere realizzata per via meccanica tramite l'asportazione di materiale, oppure chimicamente, ad esempio nebulizzando un solvente del materiale sulle superfici esterne e lasciandolo agire per un tempo sufficiente a sciogliere i gradini generati dalla stratificazione, spianando così la rugosità superficiale

Dal punto di vista progettuale, la criticità maggiore nasce dalla necessità di supportare efficacemente il materiale durante la costruzione

La strategia di deposizione a filo rende infatti impossibile la costruzione di geometrie a sbalzo come quella in figura a), anche nel caso di lunghezze L ridotte

È possibile risolvere tale criticità tramite una riprogettazione del componente come quella mostrata in b) o tramite l'utilizzo di strutture di supporto come in c)

Molto diverso è in caso delle strutture a ponte

Infatti, scegliendo opportunamente i percorsi dell'ugello, il filamento si trova in questo caso supportato da entrambi i lati dal materiale sottostante

Sarà quindi possibile costruire strutture a ponte, sebbene ancora con limiti legati al rapporto tra lunghezza e sezione della geometria

Per favorire la costruzione di queste geometrie, si ricorre spesso a un raffreddamento accelerato del materiale in uscita dall'estrusore (aumentando la velocità delle ventole), così da aumentare rapidamente la rigidità del materiale e, di conseguenza, la sua capacità di non deformarsi sotto l'effetto del peso proprio

Seguendo lo stesso criterio è possibile ridurre la temperatura di estrusione, sempre mantenendo le condizioni necessarie alla corretta fuoriuscita del materiale

Si ha una criticità nell'interruzione repentina dell'estrusione e la successiva ripresa dopo uno spostamento

Pertanto, la progettazione deve preferire strutture costituite da linee continue nel piano XY

Poiché gli spigoli vivi fungono da punti di concentrazione delle tensioni termiche da ritiro che agiscono sui primi layer causando il fenomeno di warping, si preferisce disegnare basi d'appoggio del pezzo con raggi di raccordo più possibile ampi, soprattutto qualora non si faccia ricorso all'utilizzo di raft o brim

In generale, i raccordi nel piano XY sono preferibili anche al fine di evitare bruschi cambi di direzione dell'ugello e gli errori di forma che possono conseguirne

Si noti inoltre che la forma dell'estruso porterà comunque ad avere un raggio di raccordo minimo reale pari al raggio del filamento

La presenza di tensioni da ritiro legate al materiale in solidificazione porta inoltre a limiti sui minimi spessori delle pareti e a considerazioni sui cambi di sezione

Infine, questo processo risente particolarmente dell'effetto a gradini. Per questo motivo, le features per le quali si richiede la massima accuratezza (come ad esempio scritte e fori) dovrebbero essere preferibilmente orientate parallelamente al piano XY

Nel caso di più materiali all'interno dello stesso pezzo, questi devono essere modellati come STL distinti e assemblati

La tecnologia FFF presenta alcune importanti limitazioni ai materiali processabili, in particolare legate alla rigidità di questi ultimi

Si è visto inoltre come sia necessario mantenere una stretta tolleranza sul diametro del filamento in ingresso, al fine di garantire una corretta deposizione del materiale

Infine, risulta ovvio come la produzione del filamento costituisca una lavorazione intermedia che grava sui costi e sulla complessità dell'intero ciclo produttivo

Al fine di superare queste criticità, sono stati proposti processi per la deposizione di materiale termoplastico fuso che non richiedono l'utilizzo di un materiale in forma di filamento

Questi processi partono in genere da un materiale granulato (pellet) di grado industriale, ovvero la forma in cui i polimeri termoplastici sono normalmente commercializzati

Verranno prima presentati i processi che si basano sul principio dell'estrusione polimerica, ovvero i processi Fused Granulate Fabrication (FGF). Dopo verrà invece illustrato un processo diverso per strategie di trasformazione e deposizione del materiale, vale a dire il Plastic Freeforming (PF)

Il processo di Fused Granulate Fabrication (FGF) parte da un pellet industriale per depositare materiale allo stato viscoso. Questo processo è anche noto con altri nomi

Il materiale in forma di pellet è contenuto all'interno di una tramoggia in comunicazione con l'estrusore

All'interno dell'estrusore è contenuta una vite di polimerizzazione azionata da un motore. Inoltre, la zona che contiene la vite è riscaldata tramite resistenze elettriche

Per effetto della vite e delle resistenze elettriche, il polimero raggiunge la temperatura di fusione

Il movimento rotatorio della vite spinge poi il materiale verso l'ugello posto sul fondo dell'estrusore

Il materiale sarà dunque estruso sotto forma di filamento continuo, come nel caso dell'FFF. Si potranno pertanto ripetere tutte le considerazioni già viste circa le modalità di deposizione del materiale

La portata in uscita dall'estrusore risulta direttamente proporzionale alla velocità di rotazione ed al diametro della vite

Inoltre, il volume estruso è strettamente legato alla viscosità del materiale, la quale a sua volta dipende dalla temperatura del fuso e dalla velocità con cui esso viene deformato (trattandosi di un fluido non newtoniano)

Il numero di resistenze e la temperatura comandata da ciascuna di esse avranno quindi a loro volta un ruolo fondamentale nel determinare la portata estrusa

La corretta calibrazione della velocità di rotazione della vite rispetto alla velocità di avanzamento dell'estrusore richiede in genere una messa a punto sperimentale

Le modalità con cui vengono messi in moto relativo l'ugello e la piattaforma possono essere le stesse viste per l'FFF

Per garantire un continuo approvvigionamento del pellet, spesso risulta conveniente rendere la tramoggia solidale all'estrusore

Uno dei principali problemi di questa tecnologia risiede nell'ingombro della testa di estrusione, soprattutto nella direzione assiale a causa della lunghezza della vite. Pertanto,

questa tecnologia è stata inizialmente utilizzata per la realizzazione di componenti di grandissime dimensioni

Tale applicazione, tutt'oggi molto utilizzata, prende il nome di Big Area Additive Manufacturing (BAAM) e viene applicata, ad esempio, per la prototipazione di elementi automobilistici o navali

Le grandi dimensioni dell'ugello di uscita (tra i 5 ed i 10 mm) comportano ovviamente superfici ondulate che necessitano di essere riprese tramite successive lavorazioni per asportazione

Negli ultimi anni, tuttavia, si è assistito ad una riduzione degli ingombri degli estrusori e contestualmente allo sviluppo di macchine in grado di lavorare parti con dimensioni e accuratèzze analoghe all'FFF

Questo risultato è ottenuto aumentando l'energia termica fornita dalle resistenze e riducendo quella richiesta alla vite per fondere il materiale

Il ruolo primario della vite diverrà quindi quello di spingere il materiale verso la zona di estrusione

Si noti che, benché il processo risulti sensibilmente diverso per architettura, come nel caso del FFF si ha in uscita dall'ugello un estruso continuo di materiale polimerico fuso. Pertanto molte considerazioni sono comuni

Il processo di Plastic Freeforming (PF) utilizza principi dell'iniezione polimerica (piuttosto che dell'estrusione, come nel caso precedente) per depositare materiale fuso in forma discreta

La figura mostra uno schema di funzionamento di questa tecnologia

Il materiale in forma di granuli viene convogliato tramite la tramoggia verso il cilindro che contiene la vite reciprocante durante la carica del materiale la vite arretra e ruota, fondendo il materiale

Anche in questo caso, il cilindro della vite è dotato di resistenze elettriche che forniscono la maggior parte del calore necessario a fondere il materiale

Una volta completata la fase di caricamento, la vite avanza in direzione assiale esercitando una pressione sul polimero fuso, il quale viene convogliato verso l'estrusore

Una valvola di non ritorno posta in testa alla vite impedisce che il polimero compresso fluisca verso la parte posteriore di quest'ultima

Il fuso polimerico compresso fluisce attraverso un canale verso l'estrusore

Qui un otturatore viene movimentato assialmente tramite un attuatore piezoelettrico per aprire e chiudere l'ugello

Il moto alternato dell'otturatore separerà il materiale in uscita, il quale verrà quindi depositato sulla piattaforma in forma di gocce

Tutti i moti relativi tra estrusore e piattaforma sono conferiti a quest'ultima, vista la necessità di mantenere l'ugello solidale al sistema in pressione

Il volume della singola goccia dipenderà pertanto dalla pressione esercitata dalla vite, dalla temperatura della vite (nelle sue diverse posizioni), dalla temperatura dell'estrusore, dalla frequenza dell'attuatore piezoelettrico e dalle caratteristiche fisico-chimiche del materiale

In particolare, la viscosità del materiale alla temperatura di estrusione gioca un ruolo fondamentale

È possibile definire il Drop Aspect Ratio (DAR) come il rapporto tra la larghezza, w_d e l'altezza h_L della goccia depositata

Il DAR è un parametro caratteristico di questo processo ed è fondamentale per garantire una corretta deposizione

Si noti infatti come l'altezza della goccia sia determinata dalla posizione in Z dell'estrusore

Pertanto, il DAR è direttamente proporzionale alla larghezza nominale della singola goccia e, di conseguenza, alla distanza tra due posizioni di deposizione successive

Un valore del DAR troppo basso si tradurrebbe pertanto in una eccessiva sovrapposizione delle gocce, con conseguente overfilling del componente e perdita di accuratezza

Al contrario, valori troppo bassi del DAR portano ad avere una bassa densità del componente, con conseguente perdita di proprietà meccaniche

Si noti infine che la strategia di deposizione a goccia determina un'ulteriore discretizzazione lungo le direzioni di deposizione. Infatti, la lunghezza di ogni percorso lineare o curvilineo estruso nel piano XY dovrà necessariamente essere un multiplo intero di w_d o, più correttamente, del prodotto tra h_L e il DAR

Questa tecnologia consente di utilizzare ugelli di diametro inferiore al FGF, con conseguente aumento dell'accuratezza e della densità dei componenti

Inoltre, la presenza dell'otturatore riduce i problemi legati alla fuoriuscita non controllata di materiale al termine dell'estrusione

Sarà quindi possibile realizzare geometrie di dettaglio non continue, rimuovendo uno dei vincoli progettuali del Fused Filament Fabrication

Questo consente di lavorare materiali che presentano basse viscosità, ampliando ulteriormente lo spettro dei materiali processabili

La deposizione a goccia pone inoltre un limite nella realizzazione di strutture a ponte e supporti rastremati. Si preferisce pertanto in genere utilizzare strutture piene per il supporto delle geometrie a sbalzo

Nei processi MEx fino a qui descritti, il materiale si trova inizialmente allo stato solido e viene rammollito tramite calore

Esistono tuttavia numerosi materiali che si trovano naturalmente allo stato pastoso, o possono esservi portati tramite l'aggiunta di un liquido (spesso acqua)

Tra questi materiali vi sono paste alimentari, ceramiche, cementi, o altre miscele di liquido e solido

Questi materiali possono altresì essere facilmente stampati tramite deposizione con tecniche molto simili alla Fused Granulate Deposition

In particolare, la figura mostra uno schema molto utilizzato per estrarre materiali argillosi

Si fa riferimento a questa architettura in quanto facilmente estendibile agli altri tipi di paste fredde comunemente utilizzate

La differenza principale dell'impianto rispetto alla Fused Granulate Deposition risiede nel fatto che il materiale si trova già allo stato pastoso all'inizio del processo

Si utilizza quindi un serbatoio da cui la pasta viene spinta tramite un pistone verso l'estrusore attraverso un tubo

Nella configurazione mostrata in figura, la spinta sul pistone viene esercitata tramite aria compressa fornita da una pompa. Questa soluzione è molto utilizzata per la possibilità di ottenere pressioni rilevanti con una relativa semplicità costruttiva

Nel caso di materiali a bassa viscosità, per i quali siano richieste spinte minori, è anche possibile azionare il pistone tramite una vite accoppiata ad un motore elettrico

L'estrusore è analogo a quanto descritto nella FGF, tranne per il fatto che non si hanno in questo caso resistenze elettriche per il riscaldamento. La funzione della vite è quindi quella di rimescolare il materiale e convogliarlo verso l'ugello di uscita

La viscosità del materiale è un parametro estremamente importante. Essa deve essere sufficientemente bassa da consentire il trasporto del materiale dal serbatoio all'estrusore sotto l'effetto del pistone

Infatti, visto l'alto peso specifico di molti materiali utilizzati, nel caso in cui l'estrusore sia mobile si preferisce collegarlo tramite un elemento flessibile al serbatoio solidale, mantenendo fermo quest'ultimo

D'altro canto, la viscosità deve essere sufficientemente alta da evitare l'uscita del materiale dall'ugello quando la vite non è in movimento

Nel caso di materiali non newtoniani plastici come l'argilla, l'azione della vite consente anche di abbassare la viscosità del materiale, favorendone così l'estrusione

Nella maggior parte delle paste, la viscosità dipende dalla composizione e, in particolare, dalla concentrazione del liquido (acqua, nel caso dell'argilla)

Una volta terminato il processo di deposizione, il componente viene asciugato per rimuovere la frazione liquida. In questa fase si assiste ad importanti variazioni volumetriche del materiale, con conseguente perdita di accuratezza dimensionale e comparsa di tensioni interne che possono portare anche alla frattura del componente

Questi fenomeni sono tanto più marcati quanto più elevata è la percentuale di liquido nella miscela di partenza

Inoltre, possono essere presenti successivi trattamenti termici, ad esempio di cottura, volti a conferire le proprietà finali al pezzo

Infine, la concentrazione di liquido ha una notevole importanza nel determinare la corretta adesione tra layer successivi

Risulta evidente come la preparazione dei materiali sia un elemento fondamentale di questi processi

Nel caso dell'argilla, si fa spesso ricorso a strutture che consentano di mantenere ferma la piattaforma di costruzione, così da non dover movimentare la massa (considerevole) del pezzo in costruzione

Come detto, questa tecnologia può anche essere applicata per l'estrusione di materiali quali il cemento o il calcestruzzo

Tale applicazione risulta estremamente interessante nel campo edile per la costruzione di fabbricati

In questo caso è possibile utilizzare architetture a portale nelle quali il movimento in Y è conferito al portale stesso che scorre lungo dei carrelli

Un'altra soluzione consiste nel depositare il materiale tramite un braccio robotico mobile. Quest'ultima strategia consente la costruzione di strutture di grandissime dimensioni senza la necessità di altrettanto imponenti portali

Tuttavia, si richiede in questo caso un attento controllo del riposizionamento del braccio, al fine di riprendere correttamente la deposizione

Uno dei campi di ricerca di maggior interesse e fascino per l'applicazione del MEx in campo edile riguarda la possibilità di costruire basi spaziali utilizzando i terreni extraterrestri, evitando così il trasporto spaziale di pesanti materiali da costruzione

Il processo di Bound Metal Deposition (BMD), come suggerisce il nome, consente di ottenere componenti metallici tramite deposizione puntuale di materiale pastoso

Il materiale depositato è costituito da polveri metalliche disperse all'interno di un legante costituito da polimero termoplastico e cera

Questa miscela viene caricata in forma di barre cilindriche dentro l'estrusore e spinta verso l'ugello

Si noti come l'utilizzo di barre anziché filamenti consenta di non avere i requisiti di rigidità tipici della tecnica FFF

All'interno dell'estrusore il legante viene liquefatto tramite il calore prodotto dalle resistenze, portando così il materiale allo stato pastoso

La zona di transizione impedisce la sinterizzazione tra il pezzo e le strutture di supporto. Queste ultime potranno quindi essere facilmente rimosse sgretolando l'argilla nella zona di transizione

Si noti come la progettazione delle strutture di supporto e delle zone di transizione debba essere tale da consentire la rimozione, ovvero il disassemblaggio dei blocchi supportanti

Come nel caso della BJ, durante la sinterizzazione i componenti prodotti tramite BMD subiscono un'importante variazione volumetrica (tra il 17% ed il 22%)

Questo può portare a forti tensioni interne e conseguenti distorsioni del componente

Esiste una variante di questo processo in cui il materiale metallico è disperso all'interno di un filamento polimerico che viene depositato con tecniche analoghe all'FFF

Si parla in questo caso di Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Questo composto viene spinto verso l'estrusore e depositato in maniera analoga a quanto visto per l'FFF

Il processo prevede un secondo estrusore (freddo) caricato tramite argilla. Questa viene depositata all'interfaccia tra il pezzo e i supporti, creando le cosiddette zone di transizione

La presenza di queste zone servirà a facilitare il distacco dei supporti dal pezzo al termine del processo

Una volta terminata la deposizione, la piattaforma contenente il pezzo viene posta in un bagno di solvente che scioglie il legante tra le particelle metalliche

In seguito, il pezzo viene posto in forno e portato ad alta temperatura per far avvenire la sinterizzazione del metallo, in maniera analoga a quanto descritto per la BJ

La zona di transizione impedisce la sinterizzazione tra il pezzo e le strutture di supporto. Queste ultime potranno quindi essere facilmente rimosse sgretolando l'argilla nella zona di transizione

Si noti come la progettazione delle strutture di supporto e delle zone di transizione debba essere tale da consentire la rimozione, ovvero il disassemblaggio dei blocchi supportanti

Come nel caso del Binder Jetting, durante la sinterizzazione i componenti prodotti tramite BMD subiscono un'importante variazione volumetrica (tra il 17% ed il 22%). Questo può portare a forti tensioni interne e conseguenti distorsioni del componente

Saranno pertanto valide tutte le considerazioni esposte nella Binder Jetting sulla progettazione delle geometrie

Esiste una variante di questo processo in cui il materiale metallico è disperso all'interno di un filamento polimerico che viene depositato con tecniche analoghe a quanto visto nella Fused Filament Fabrication

Si parla in questo caso di Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM)

Processi puntuali di deposizione di polvere

Accanto alle tecnologie MEx, un diverso approccio alla deposizione tramite singolo canale prevede di utilizzare come materiale di partenza una polvere che viene depositata e fusa per mezzo di una sorgente termica

Questi processi rientrano nella categoria delle tecnologie Direct Energy Deposition

Nella soluzione più comune, la fusione avviene tramite un laser, si parla in questo caso di Laser Powder Deposition (LPD), che sarà l'unico processo descritto nella sezione seguente

Tuttavia, è possibile sostituire la radiazione laser con altre fonti energetiche concentrate, in grado di portare a fusione il materiale. Ad esempio, esiste una variante di questo processo nel quale si utilizza un arco di plasma, nota come Plasma Arc Deposition

Il processo LPD è anche noto con altri nomi

L'elemento centrale di questo processo è una testa di deposizione, della quale si mostra un possibile schema nella figura di sinistra

La testa di estrusione getta una polvere di materiale solido verso lo spot del Laser

Il laser è focalizzato in modo da fondere la polvere solo in prossimità del substrato e una piccola porzione di quest'ultimo, come mostrato nella figura a destra. Come mostrato in figura, esiste una zona attorno al piano focale in cui la concentrazione di energia è sufficiente a fondere il materiale

Al di fuori di questa zona, la polvere rimarrà quindi allo stato solido, seppur all'interno del raggio

In questa condizione, si avrà la fusione della polvere solo in prossimità della superficie

Inoltre, come si può vedere a destra, il piano focale viene posizionato in modo da rifondere anche parte del substrato per consentire la saldatura del nuovo materiale

Sulla zona di fusione viene soffiato, sempre tramite la testa di deposizione, il gas di assistenza che ha la doppia funzione di proteggere il bagno fuso e incanalare il materiale in polvere verso il fuoco della radiazione laser

Le alte velocità di avanzamento di questo processo e le piccole dimensioni del bagno fuso (tra 0.25 e 1.0 mm in larghezza e tra 0.1 e 0.75 mm in spessore) consentono di avere velocità di raffreddamento del materiale estremamente elevate (tra 103 e 105 °C/s). Pertanto, il materiale solidifica quasi istantaneamente nella posizione in cui è stato depositato

La testa di deposizione viene movimentata con modalità analoghe a quelle descritte parlando della Fused Filament Fabrication. In particolare, la polvere viene depositata con una energia cinetica che rende trascurabile l'effetto della gravità e solidifica appena depositata

Per questo motivo, la qualità della deposizione risulta praticamente insensibile alla direzione della forza di gravità, ovvero al piano su cui il materiale viene depositato

Inoltre, la testa di deposizione utilizza un laser allo stato solido in fibra, facilmente maneggiabile

Per questi motivi, la tecnologia LPD viene spesso installata su centri di lavoro a 5 assi o su manipolatori robotici a 6 assi. Si avrà quindi la possibilità di generare layer non piani, senza le problematiche dovute alla forza di gravità

Non tutta la polvere viene efficacemente catturata all'interno del bagno fuso. Per questo motivo, si utilizza una quantità di materiale superiore a quella strettamente necessaria alla formazione del layer

Ciò comporta, oltre ad un'inefficienza del processo, un inquinamento dell'ambiente di lavoro ed una difficoltà nel recupero di queste polveri per il riutilizzo

D'altro canto, l'utilizzo di polvere in esubero consente di avere un miglior controllo dello spessore del layer. Infatti, questo non sarà determinato dalla quantità di polvere utilizzata (il che richiederebbe una calibrazione estremamente accurata del flusso), bensì dalla focalizzazione del laser

La posizione del piano focale rispetto al substrato risulta di fondamentale importanza per determinare la porzione di quest'ultimo che viene fusa durante la deposizione

In particolare, è possibile posizionare il piano focale al livello o al di sotto del substrato, ottenendo così una rifusione più profonda

D'altro canto, l'utilizzo di polvere in esubero consente di avere un miglior controllo dello spessore del layer. Infatti, questo non sarà determinato dalla quantità di polvere utilizzata (il che richiederebbe una calibrazione estremamente accurata del flusso), bensì dalla focalizzazione del laser.

La posizione del piano focale rispetto al substrato risulta di fondamentale importanza per determinare la porzione di quest'ultimo che viene rifusa durante la deposizione.

In particolare, è possibile posizionare il piano focale al livello o al di sotto del substrato, ottenendo così una rifusione più profonda.

Ovviamente, questi spostamenti determinano anche un cambiamento nell'altezza del layer. È quindi possibile tramite tale processo ottenere deposizioni di altezza variabile, oltre che curvilinee.

Risulta evidente come la velocità di avanzamento, la potenza del laser e la distanza tra passate parallele risultino altrettanto fondamentali ed influenzino la fusione.

Anche in questo processo le direzioni delle passate di hatching vengono alternate passando da un layer al successivo, al fine di ridurre le anisotropie.

Ovviamente, questi spostamenti determinano anche un cambiamento nell'altezza del layer. È quindi possibile tramite tale processo ottenere deposizioni di altezza variabile, oltre che curvilinee.

Risulta evidente come la velocità di avanzamento, la potenza del laser e la distanza tra passate parallele risultino altrettanto fondamentali ed influenzino la fusione.

Anche in questo processo le direzioni delle passate di hatching vengono alternate passando da un layer al successivo, al fine di ridurre le anisotropie.

Il processo di LPD viene utilizzato per trasformare un'ampia gamma di metalli.

In particolare, si preferiscono quei materiali che presentano una buona saldabilità, come già descritto per il processo SLM.

Rispetto ai processi a letto di polvere, il LPD offre il vantaggio di poter depositare, utilizzando diverse teste di deposizione, più materiali, purché saldabili tra loro.

Il LPD può essere utilizzato, oltre che per realizzare interi componenti, per riportare materiale su parti già esistenti. Un'applicazione in questo senso si ha per il remanufacturing di componenti a fine vita.

La testa di deposizione che realizza il processo è estremamente facile da maneggiare e consente la deposizione in direzioni comunque orientate nello spazio.

Pertanto, questa tecnologia può essere facilmente integrata in centri di lavoro a controllo numerico attrezzati con utensili per l'asportazione di truciolo con un numero qualsiasi di assi

Questo tipo di applicazione consente lavorazioni cosiddette ibride (hybrid manufacturing), ovvero in grado di combinare le potenzialità di tecnologie additive e sottrattive

Il tema, benché di grande interesse tecnico ed applicativo, non sarà approfondito, in quanto esula dagli obiettivi del presente testo

Processi puntuali di deposizione di solido

Nei processi di deposizione puntuale che utilizzano un materiale solido, quest'ultimo si presenta sotto forma di filamento metallico

Tale filo viene depositato sulla zona di costruzione e saldato al materiale sottostante per costruire i layer dell'oggetto tridimensionale

Il calore necessario a fondere il filamento può essere fornito mediante laser, fascio di elettroni, arco di plasma o attrito

A queste quattro modalità si associano altrettanti processi additivi

I processi che usano laser, fascio di elettroni, arco di plasma presentano numerosi aspetti in comune e differiscono principalmente per la fonte di calore concentrata, utilizzata per fondere localmente il filo

Nel seguito si descriverà soltanto il processo di WAAM (Wire Arc Additive manufacturing)

Inoltre, questi processi godono di una diffusione crescente grazie alla loro economicità e relativa semplicità di utilizzo

Infatti, essi mutuano tecniche ben note nel campo della saldatura, alla cui letteratura si invita a fare riferimento per un approfondimento della fisica alla base del processo

Infine, si introdurrà brevemente il processo di FSAM (Friction Stir Additive Manufacturing) per mostrarne le peculiarità e potenzialità

Sfrutta l'arco elettrico che si crea tra due elettrodi sottoposti ad una differenza di potenziale

In queste condizioni, gli atomi presenti nell'aria si polarizzano e si separano sotto l'effetto della tensione elettrica, dando vita ad un insieme di cariche in movimento che prende il nome di plasma

All'interno dell'arco le cariche positive tenderanno a muoversi verso l'elettrodo con potenziale più basso (anodo), mentre le cariche negative verso l'elettrodo con potenziale più alto (catodo)

Gli attriti tra queste particelle in movimento generano calore all'interno dell'arco elettrico, il quale diviene quindi una sorgente concentrata

Nel processo di WAAM il catodo è costituito da un elettrodo di tungsteno, mentre l'anodo è rappresentato dal pezzo o dal suo substrato, come mostrato in Figura

Il catodo è posto all'interno dell'ugello di deposizione, attraverso il quale viene fatto anche fluire il gas

Da questo gas, che funge da protezione del bagno fuso, sarà generato l'arco elettrico

Un filamento, inizialmente avvolto in una bobina, viene convogliato verso l'arco elettrico tramite due rulli controrotanti, concettualmente simili alle rotelle per l'approvvigionamento del materiale utilizzato nell'FFF

Circa il 70% del calore totale sarà generato sull'anodo, favorendo così la fusione del filamento metallico e dello strato superficiale del pezzo sottostante, così da consentire la saldatura del materiale

La quota di calore generata sul catodo tenderebbe tuttavia a portarne a fusione l'estremità e, conseguentemente, a consumare il filamento di tungsteno

Per evitare che ciò avvenga, è necessario prevedere un opportuno sistema di raffreddamento

In alternativa, è possibile decidere di lasciare che la punta del filamento arrivi a fusione e che il materiale fuso venga trasportato verso il pezzo

In questa soluzione, nota anche come Gas Metal Arc Welding (GMAW), il materiale di apporto sarà costituito dallo stesso elettrodo

Il sistema di alimentazione del filo e la bobina saranno pertanto posti a monte dell'ugello di deposizione, analogamente a quanto visto nell'FFF

Risulta quindi che l'elettrodo sarà costituito dello stesso materiale del pezzo

Questa soluzione risulta tuttavia critica, a causa della necessità di operare un continuo controllo dell'alimentazione del filo per mantenere costante la lunghezza dell'arco

Infatti, piccoli cambiamenti del traferro tra i due elettrodi possono disturbare notevolmente il processo e devono essere corretti per via elettrica o meccanica

Esiste poi un'altra variante del processo, nota come Plasma Arc Additive Manufacturing (PAAM), in cui il gas utilizzato per la formazione del plasma è distinto dal gas di protezione

E' possibile ulteriormente distinguere tra processi ad arco trasferito e non trasferito, a seconda che l'anodo sia costituito dal pezzo o dalla stessa testa di deposizione, come mostrato in figura

Nel secondo caso il gas plasmogeno viene riscaldato e ionizzato trasformandosi in plasma prima di essere inviato verso la zona di fusione, fungendo quindi da mezzo intermedio per il trasporto di calore dall'arco al materiale

Il processo di WAAM è caratterizzato da finiture superficiali generalmente basse e inversamente proporzionali alla velocità di deposizione

I componenti realizzati sono caratterizzati da notevoli tensioni interne, dovute alla contrazione del metallo fuso in fase di solidificazione

Per mitigare questa problematica è fondamentale operare una scelta opportuna dei percorsi di deposizione, al fine di limitare le deformazioni e le anisotropie del componente

Inoltre, questo processo comporta un elevato rischio di generare porosità, a causa delle impurità presenti nel filamento e nel substrato

Queste porosità possono compromettere le proprietà meccaniche del manufatto

Infine, la forza di adesione tra i layer saldati risulta inferiore alla resistenza del materiale di partenza, determinando un'anisotropia del componente

Come anticipato, questa tecnologia risulta in generale più economica rispetto all'utilizzo di sorgenti laser o fasci di elettroni. Inoltre, la testa di deposizione può essere movimentata facilmente, consentendo l'utilizzo di diverse architetture analoghe a quanto descritto a proposito dell'FFF

In particolare, si fa spesso ricorso all'utilizzo di bracci robotici, con la possibilità di depositare il materiale lungo percorsi non piani

Infine, tra i vantaggi del WAAM, non bisogna sottovalutare la conoscenza esistente in merito a questi processi nel campo della saldatura, che ne facilita l'applicazione a diversi materiali

Al contrario di quanto visto fino a qui, nei processi di Friction Stir Additive Manufacturing (FSAM) il materiale viene saldato allo stato solido, ovvero senza che vi sia una rifusione

Uno schema del processo è mostrato in figura

Il filamento viene convogliato verso l'utensile con tecniche analoghe a quelle viste col plasma

Il materiale attraversa centralmente l'utensile e viene premuto con un carico assiale da quest'ultimo verso il layer in costruzione

Contestualmente, l'utensile viene posto in rotazione ad alta velocità

L'attrito che si crea all'interfaccia riscalda il materiale, pur mantenendolo al di sotto della temperatura di fusione, mentre il movimento dell'utensile lo deforma plasticamente unendolo al pezzo

Questo processo consente di rompere i grani del metallo, ottenendo così un componente con strutture cristalline più fini del materiale di partenza e dunque prestazioni meccaniche migliori

Inoltre, questa frammentazione consente di ottenere componenti con comportamento praticamente isotropo, al contrario di quello che accade, ad esempio, nel WAAM

L'utilizzo di basse temperature consente anche una notevole riduzione delle tensioni interne e delle deformazioni da ritiro rispetto ai processi basati sulla rifusione del materiale

Il processo di FSAM consente inoltre di ottenere componenti ad elevata densità con un consumo energetico relativamente basso

Il processo fin qui descritto utilizza un filamento continuo come materiale di apporto

Tuttavia, il processo può essere replicato utilizzando polveri o trucioli di metallo, a patto di garantire un corretto apporto di materiale verso il pezzo attraverso il canale di alimentazione

Poiché questo processo mutua principi e tecniche della saldatura per attrito (Friction Stir, Welding, FSW), si rimanda alla letteratura inerente questi ultimi per un approfondimento degli aspetti metallurgici e dell'influenza dei parametri di processo sulla qualità del cordone saldato

Processi puntuali a letto di materiale solido

Questa famiglia di processi si basa sulla compattazione di fogli di materiale solido, che vengono sagomati per ottenere la geometria del layer e dunque, al termine del processo, del componente tridimensionale

Tali processi vengono raccolti sotto la dicitura Sheet Lamination

A seconda delle modalità con cui i fogli vengono compattati e sagomati e della sequenza tra queste due fasi si distinguono diverse famiglie di processi

Il processo di Laminated Object Manufacturing (LOM) è uno dei primi processi additivi ad essere stato commercializzato all'inizio degli anni Novanta

Questo processo si basa sull'incollaggio di fogli di materiale tramite uno strato di adesivo polimerico

In particolare, le prime applicazioni nel campo della prototipazione utilizzavano come materiale di partenza una carta plastificata su una delle due facce, simile a quella utilizzata per conservare gli alimenti

Negli anni sono state messe a punto varianti in grado di processare materiali più prestazionali, come polimeri e metalli

Il materiale di partenza si presenta in forma di un lungo foglio di materiale leggermente più largo dell'area di costruzione, avvolto attorno ad una bobina

Il materiale svolto dalla bobina viene fatto passare al di sopra della piattaforma di costruzione con la faccia plastificata rivolta verso il basso (direzione Z negativa) e avvolto

attorno ad una seconda bobina, che ha la funzione di richiamare nuovo materiale e raccogliere quello in eccesso

Due rulli folli intermedi sono utilizzati per rendere i fogli paralleli al piano di costruzione nell'area di lavoro

Ad ogni layer, la piattaforma viene ricoperta da un nuovo strato di materiale

Un rullo riscaldato viene fatto passare sopra ai fogli depositati, compattandoli e sciogliendo l'adesivo polimerico. In questo modo, si ottiene l'adesione del materiale ai layer sottostanti

Il materiale appena incollato viene poi ritagliato per mezzo di un laser secondo la sagoma del layer

In alcune varianti del processo il laser può essere sostituito da un coltello metallico

Il materiale in eccesso viene ritagliato in piccoli cubetti, come mostrato nella figura e svolge la funzione di supporto durante la costruzione del pezzo

Una volta terminata la sagomatura del layer, la piattaforma viene abbassata e la bobina di richiamo viene fatta ruotare, raccogliendo così il materiale di scarto e ricoprendo l'area di lavoro con una nuova carta plastificata

Questa tecnologia presenta numerosi vantaggi, tra i quali l'economicità, soprattutto per la realizzazione di parti di grandi dimensioni

Inoltre le contrazioni durante la solidificazione dell'adesivo sono piuttosto contenute, consentendo di ottenere parti con basse tensioni interne e distorsioni

Il materiale di supporto, ritagliato come visto, dovrà essere rimosso al termine della costruzione tramite appositi utensili. Tale rimozione può risultare particolarmente complessa, soprattutto una volta che il blocco di materiale si è raffreddato

Per superare queste criticità, sono stati proposti processi in grado di distribuire selettivamente l'adesivo sulle sole zone che andranno a costituire il pezzo

L'adesivo viene depositato con tecniche di stampa bidimensionale a getto

Così facendo, non si avrà adesione tra i layer nelle zone che costituiscono il supporto, facilitandone pertanto la rimozione al termine del processo

Utilizzando la carta plastificata descritta sopra, il pezzo deve essere successivamente verniciato o laccato, al fine di evitarne la degradazione sotto l'azione degli agenti ambientali, come l'umidità

Più in generale, le scarse proprietà meccaniche e fisiche di questo materiale costituiscono un notevole limite all'applicazione dei componenti realizzati tramite LOM

(nessuna nota)

Nel processo Form-then-Bond (FtB) il materiale di partenza viene sagomato prima di essere unito ai layer sottostanti. La figura mostra un esempio di questo procedimento

Il foglio viene dapprima posizionato su un substrato flessibile e ritagliato tramite un coltello metallico o un laser

Una volta completata questa fase, il layer ed il substrato vengono posizionati al di sopra del pezzo in costruzione e compattati tramite pressione e calore al materiale sottostante, come visto in precedenza

Il substrato viene poi rimosso, trascinando con sé il materiale in eccesso

Anche in questo caso, sono state proposte soluzioni in grado di replicare il processo con materiali alto prestazionali, come fogli di metallo e ceramici

In tal caso, i componenti vengono sottoposti a successivi trattamenti termici e meccanici per completare la compattazione

Rispetto a quanto visto versione LOM precedente, questa tecnica consente di costruire zone cave e, più in generale, elimina le problematiche legate alla rimozione delle strutture di supporto al termine del processo

Di contro, non avendosi strutture di supporto durante la costruzione, si hanno limitazioni progettuali sostanzialmente analoghe a quelle dei processi di deposizione (angolo limite, strutture a sbalzo e ponti)

Il processo di Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) è in realtà una tecnologia ibrida additivo-sottrattiva

Tuttavia, si ritiene di presentarla comunque qui, vista la prevalente natura additiva di questo processo e la sua crescente applicazione in diversi campi

La figura mostra uno schema del processo nelle diverse fasi che lo compongono

Si ha una fase di stratificazione (figura a)), seguita dalla sagomatura (b)) del layer

Durante la fase di stratificazione, dei fogli di materiale metallico vengono affiancati e compattati tramite un sonotrodo rotante

Durante il suo passaggio, il sonotrodo comprime i layer e genera una vibrazione con frequenza ultrasonica (solitamente attorno ai 20 kHz)

Questa vibrazione genera un attrito all'interfaccia tra i layer il quale si trasforma in calore, consentendo così la saldatura dei due fogli sotto la pressione esercitata dal sonotrodo

Una fresa viene poi utilizzata per sagomare il materiale saldato secondo le geometrie del layer

Per contenere i costi ed i tempi del processo, la sagomatura non viene effettuata ad ogni layer, ma dopo un certo numero di strati che prende il nome di livello

Si noti che, nel caso in cui la fresa sia dotata di più di due assi controllati, la sagomatura non deve essere per forza piana, ma può comprendere percorsi curvilinei nello spazio

Nel caso in cui si abbiano più di tre assi controllati, è inoltre possibile avere lavorazioni in sottosquadro

Questo offre la possibilità, ad esempio, di lasciare materiale di supporto e rimuoverlo durante una successiva fase intermedia del processo

La finitura superficiale del componente finito non sarà quindi data dall'altezza dei layer, bensì dalla qualità della lavorazione per asportazione

Questo processo ibrido consente dunque di ottenere componenti con elevate finiture superficiali e geometrie complesse non realizzabili per asportazione

Per consentire la corretta lavorazione di tutte le zone del pezzo, sarà necessario operare un' oculata scelta del numero di layer che costituiscono i livelli, ovvero della frequenza delle operazioni sottrattive di sagomatura

É inoltre possibile interrompere il processo in qualsiasi fase, per inserire all'interno componenti integrati, come nel caso dei processi a deposizione

La saldatura avviene a temperature inferiori alla temperatura di fusione del materiale (indicativamente attorno al 50% di quest'ultima). Ciò riduce considerevolmente le tensioni e le distorsioni durante la fase di raffreddamento rispetto ai processi a rifusione

La saldatura ad ultrasuoni può essere applicata a materiali diversi, consentendo così la fabbricazione di componenti multimateriale

La corretta messa a punto dei parametri di saldatura (frequenza di oscillazione del sonotrodo, velocità di avanzamento e pressione) e l'altezza dei layer risultano fondamentali per la qualità del giunto e, di conseguenza, per la resistenza del componente lungo la direzione di accrescimento

Questo processo si presta bene alla realizzazione di componenti di grandi dimensioni, anche nell'ordine di metri

Le principali criticità del processo risiedono nella presenza di porosità interne e nell'inclusione di ossidi superficiali, che possono compromettere le proprietà del prodotto

La resistenza del giunto tra due layer risulta generalmente minore di quella del materiale di partenza, determinando un'anisotropia del componente

Si noti infine come la fase di sagomatura preveda l'asportazione di una notevole quantità di materiale, il che comporta una quantità di materiale di scarto superiore a quella imputabile alla maggior parte delle altre tecnologie additive