



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**L'IMPATTO E IL RUOLO DELL'ADDITIVE MANUFACTURING
NELLA FONDERIA**

**THE ROLE AND IMPACT OF ADDITIVE MANUFACTURING IN
FOUNDRIES**

Relatore:

Prof. Mohamad El Mehtedi

Tesi di Laurea di:

Domenico Tartaglia

Correlatore:

Ing. Tommaso Mancina

Anno accademico [2018/2019]

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. PROCESSO DI FONDERIA.....	4
2.1. Processi Produttivi.....	5
2.2. Allestimento Modelli.....	6
2.3. Allestimento Anime.....	7
2.4. Formatura.....	8
2.5. Sistema di Colata.....	10
2.6. Vantaggi e Svantaggi Fonderia.....	12
3. ADDITIVE MANUFACTURING.....	13
3.1. Prototipazione Rapida.....	14
3.2. La Tecnologia AM.....	15
3.3. Tecniche di Produzione dell'AM.....	16
3.4. Materiali e relative applicazioni.....	20
3.5. Esempi applicativi.....	22
4. STATO DELL'ARTE	24
5. CONCLUSIONI.....	38
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	41

1. INTRODUZIONE

Tale lavoro di tesi ha lo scopo di analizzare l'applicazione dell'avveniristico processo dell'Additive Manufacturing nell'ambito della Fonderia, cercando di definire uno stato dell'arte di tale innovazione. Le tecnologie additive rappresentano un'interessante opportunità per l'industria manifatturiera, grazie alle loro caratteristiche di versatilità, efficienza e libertà di design. Tuttavia, c'è ancora molto lavoro e ricerca da svolgere prima che la tecnica di produzione additiva diventi standard nell'industria manifatturiera: non tutti i materiali di comune uso risultano idonei per tale processo e la precisione della tecnica va migliorata per eliminare la necessità di operazioni aggiuntive di finitura.

Ad ogni modo, i risultati positivi ottenuti sino ad oggi, generano ottimismo, garantendo, in un futuro prossimo, un posto di rilievo all'Additive Manufacturing.

Tale processo, nel contesto del settore della fonderia, è in rapidissima evoluzione, ragion per cui risulta estremamente difficile dare una definizione consolidata dello stato dell'arte, contrariamente a quanto, invece, può essere fatto per altri campi del manifatturiero.

Sono stati visionati articoli e trattazioni scientifiche per ottenere informazioni riguardanti l'argomento cardine della tesi. Purtroppo, la novità che contraddistingue il tema trattato non permette di disporre di moltissimi dati sperimentali in quanto essi sono ancora in fase di elaborazione e studio.

Il mio obiettivo sarà, comunque, quello di portare il lettore ad ampliare le sue conoscenze circa il processo di Additive Manufacturing nell'ambito della fonderia, illustrandone l'impatto, le potenzialità e i limiti e facendo emergere i benefici che tale tecnologia può apportare nel suddetto campo.

2. PROCESSO DI FONDERIA



Fig.1 Produzione del coke (illustrazione del 1879)

Il processo di colata è uno dei processi di formatura più antichi e risale al 4000 a. C. Oggigiorno, il processo di colata è una tecnica in continuo miglioramento; ciò porta ad ottenere pezzi sempre più omogenei, precisi e privi di difetti e forme molto complicate per fusione che, in alcuni casi, non richiedono lavorazioni successive.

I processi di produzione per fonderia sono spesso indicati con i termini tecnici di *fusione* o *processi fusori* con i quali si intende non solo il semplice passaggio dei metalli dallo stato solido alla fase liquida, ma anche tutta la serie di processi di produzione svolti in fonderia, per creare le forme cave necessarie, fondere i materiali metallici, trattare il fuso ed effettuare tutte le altre operazioni che portano alla realizzazione del prodotto.

Scegliendo opportunamente una delle tecniche di fonderia, si producono, in modo molto più economico rispetto ad altre lavorazioni, pezzi di geometria molto complessa; il controllo dei parametri di processo permette, poi, di realizzare getti con proprietà meccaniche uniformi.

L'industria delle Fonderie è un comparto diversificato e variegato, costituito da una tipologia di imprese ampia, di dimensioni da piccole fino a molto grandi, ognuna delle quali presenta una combinazione di tecnologie, impianti e processi definite in funzione del tipo di lega elaborata, della dimensione delle serie e del tipo di getti che la specifica Fonderia realizza.

Le industrie del settore vengono tradizionalmente classificate sulla base del tipo di lega ferrosa o non ferrosa prodotta, della numerosità o serie dei pezzi realizzati, delle dimensioni, della metodologia di formatura e di colata.

2.1 IL PROCESSO PRODUTTIVO

Il processo di fonderia può essere schematizzato in quattro aree principali:

- fusione e trattamento del metallo: area Fusione
- preparazione dei modelli, delle forme e delle anime: area Formatura
- riempimento delle forme con il metallo fuso, raffreddamento e solidificazione ed estrazione del getto dalla forma: area Colata
- lavorazioni successive del getto grezzo: area Finitura

Per ciascuna delle suddette aree, in particolare per l'area Fusione e per l'area Formatura, sono disponibili varie tipologie di processo e di impianti riconducibili alle seguenti categorie:

- Rispetto al tipo di lega metallica elaborata: ferrosa e non ferrosa;
- Rispetto al sistema di formatura impiegato: forma a perdere o forma permanente.

Nel sistema di **formatura di tipo "a perdere"**, in sabbia, (utilizzato nella maggior parte delle fonderie di metalli ferrosi, oltre che in alcune tipologie di fonderie di metalli non ferrosi), ciascuna forma viene utilizzata una sola volta e distrutta al momento della estrazione del getto; la forma è realizzata con sabbie (più comunemente di tipo siliceo, ma anche di cromite, di olivina) opportunamente miscelate con leganti e additivi che conferiscono loro le proprietà necessarie per consentire le operazioni di formatura.

Durante la fase di formatura, viene predisposta l'impronta che riproduce, in negativo, la geometria esterna del pezzo da realizzare; tale impronta si ottiene costipando la terra di formatura, contenuta all'interno di un apposito telaio, contro un modello che ha la forma del pezzo da ottenere.

Per poter consentire l'estrazione del modello dall'impronta, la forma predisposta è divisa in due parti (metà forma inferiore e metà superiore).

Qualora il pezzo da ottenere presenti delle cavità interne, si ricorre all'impiego delle anime, preparate in apposite fasi produttive impiegando materiali analoghi a quelli utilizzati per le forme (sabbie e leganti); le anime riproducono in negativo la geometria interna del getto. Vengono posizionate all'interno dell'impronta in una delle due mezze forme, sulla quale viene poi accoppiata l'altra.

Nelle fonderie che utilizzano **forme permanenti**, la colata viene realizzata all'interno di forme metalliche (conchiglie, stampi) che riproducono la geometria esterna del pezzo da realizzare; nel caso in cui il getto presenti cavità interne, esse vengono realizzate utilizzando anime in sabbia o appositi inserti metallici che si posizionano automaticamente nelle fasi di chiusura dello stampo.

Ogni combinazione di processi e impianti è possibile, ma, prevalentemente, le fonderie di **metalli ferrosi** impiegano sistemi di formatura a perdere (ad esempio: formatura in sabbia) mentre le fonderie di **metalli non ferrosi** utilizzano prevalentemente forme permanenti (ad esempio stampi per colata a pressione).

Tali processi consentono la fabbricazione di:

- SEMILAVORATI, hanno forma semplice;
- PANI, vengono rifusi nel processo di fonderia;
- LINGOTTI, usati per lavorazioni plastiche;
- GETTI, forma complessa e prossima a quella finale.

2.2 ALLESTIMENTO MODELLI

Per realizzare le forme vengono utilizzati dei modelli che rappresentano il negativo del getto da utilizzare.

Il modello consente la realizzazione della forma transitoria attraverso il processo di formatura, ossia processo di compattazione del materiale della forma attorno al modello.

Viene realizzato partendo dal disegno del getto e maggiorandone le dimensioni per tener conto del ritiro del metallo nella fase di solidificazione.

Il ritiro del metallo dipende dalla temperatura a cui il metallo viene fuso.

Oltre al sovraspessore, apposto per tener conto del ritiro volumetrico del metallo, viene aggiunto un sovrametallo, pari al sovraspessore, nelle zone superficiali, che dovranno subire lavorazioni alle macchine utensili per ottenere forma e rifinitura migliore come spigoli e angoli.

I modelli si distinguono in:

- **PERMANENTI**, realizzati in legno, alluminio, acciaio, ghisa e plastica attraverso le macchine utensili;
- **TRANSITORI o A PERDERE**, realizzati in cere, la forma è ottenuta attraverso la liquefazione del modello provocata dal calore generato da un forno; oppure in schiume polimeriche, la forma è ottenuta per degradazione termica progressiva del modello causata dal calore ceduto dal fuso.



Fig. 2 Esempio modello in legno

Il modello, inoltre, può distinguersi in:

- **MONOLITICO**, cioè composto da un'unica parte;
- **SCOMPONIBILE**, cioè formato da più parti;

Se il modello è simmetrico allora sarà costituito da due SEMIMODELLI simmetrici, altrimenti avremo due o più semi-modelli non simmetrici.

È fondamentale, di conseguenza, individuare il PIANO DI DIVISIONE più adatto onde evitare il danneggiamento della forma al momento dell'estrazione del modello (sformatura) e il problema dei sottosquadri.

Nella fase di estrazione del modello, la forma potrebbe danneggiarsi se non si è tenuto conto di:

- **ANGOLO DI SFORMO**: per facilitare l'operazione di estrazione del modello si inclinano tutte le superfici perpendicolari al piano di divisione di un angolo maggiore o uguale a 1° , il quale varia a seconda della complessità del modello. Tale angolo consente di eliminare il rischio di trascinarsi di materiale della forma e quindi il suo danneggiamento, ma comporta una modifica della geometria del getto che si realizzerà, il quale dovrà essere rifinito alle macchine utensili.

- SOTTOSQUADRI, sono quelle parti del pezzo che, se riportate nel modello, comporterebbero la rottura della forma al momento dell'estrazione del modello.

Possibili soluzioni:

- Modifiche del disegno progettuale;
- Inserimento di anime con le corrispondenti portate;
- Scomposizione del modello in più parti estraibili;
- Diversa divisione delle staffe della forma;
- Asportazione del materiale eccessivo per eliminare il sottosquadro mediante lavorazioni aggiunte di asportazione di truciolo.

2.3 ALLESTIMENTO ANIME

Le anime sono quegli elementi utilizzati per ottenere cavità non ottenibili con il modello e si dividono in:

- TRANSITORIE o a perdere, ottenute costipando terra da fonderia in forme cave (CASSE D'ANIMA);
- PERMANENTI, ottenute mediante lavorazioni per asportazione di truciolo; vengono riutilizzate.

Per quanto riguarda le prime esse saranno dello stesso materiale delle forme transitorie, e sono le uniche utilizzate in tali forme, invece le permanenti, realizzate in materiale metallico, sono utilizzate nelle forme permanenti e sono in grado di resistere a colate sottopressione. Nelle forme permanenti sono utilizzate anche quelle transitorie ma non per colate sottopressione.

2.4 FORMATURA

Il primo elemento per l'allestimento di una forma da fonderia sono le STAFFE.

Le staffe sono utilizzate per contenere il materiale compattato attorno al modello e sono realizzati in materiali metallici come ghisa o acciaio. Sono caratterizzate da avere superfici superiore e inferiore aperte per consentire la costipazione della terra, inoltre sono dotate di riferimenti per il montaggio che consentono di rimontare le staffe nella posizione in cui erano prima dell'estrazione del modello. Il processo di formatura consiste nel compattare terra da fonderia attorno al modello.

Tale materiale deve avere determinate caratteristiche tecnologiche quali:

- REFRAATTARIETA': capacità di resistere a elevate temperature;
- COESIONE: capacità di resistere alle sollecitazioni interne (pressione metallostatica);
- PERMEABILITA': capacità di lasciarsi attraversare dai gas;
- SCORREVOLEZZA: capacità di plasmarsi attorno al modello
- SGRETOLABILITA': facilità con la quale la terra viene rimossa al termine del processo.

Il processo di realizzazione della forma in terra viene eseguito in tre diverse modalità:

- In TERRA VERDE (a umido): è il più economico e consiste nel legare sabbia silicea con argilla al 5-20% utilizzando acqua. L'azione legante dell'argilla permette di amalgamare il tutto;
- A SEMIVERDE (semi-umido): viene eseguita una essiccazione parziale della cavità della forma per ridurre la formazione di difetti in superficie causati dalla generazione di vapore durante il processo;
- A SECCO: viene eseguita una essiccazione totale della forma in forno elevando i costi di formatura.

L'essiccazione della forma, nelle ultime due modalità, ha lo scopo di aumentare la possibilità di riuscita del processo in quanto favorisce un aumento della consistenza e della porosità della forma. Le forme generate sono costituite da sabbie più fini, che permettono la realizzazione di getti con superfici più lisce e facilmente lavorabili, e inoltre garantiscono minore sviluppo di gas nella colata diminuendo il rischio di soffiature.

La compattazione del materiale attorno al modello, per creare la forma, avviene grazie a delle macchine che utilizzano una placca-modello come supporto del modello nelle varie fasi di formatura, inoltre possono usare diversi principi di funzionamento:

- A COMPRESSIONE: tali macchine funzionano seguendo un preciso ordine di operazioni. Prima di tutto, viene inserita sulla placca modello la staffa, sulla staffa viene agganciato un dosatore che permette di inserire una quantità di terra maggiore rispetto a quella contenuta

dalla staffa prima della compattazione. Dopo aver inserito la terra fino al livello massimo, tramite un piatto mobile, azionato da un cilindro idraulico, avviene l'azione di compressione e compattazione della terra sino a quando il piatto arriva all'altezza della staffa. A questo punto, il piatto mobile si solleva, si rimuove il dosatore e si sfilà la staffa dalla placca modello. Abbiamo ottenuto così la prima metà della forma. La stessa cosa viene fatta per l'altra metà.

- A SCOSSA O VIBRAZIONE:

tali macchine sono utilizzate per realizzare pezzi con altezze non uniformi, e permette una compattazione più uniforme ottenuta con scosse o vibrazioni sfruttando le forze d'inerzia che si sviluppano. Anche in questo caso la placca modello è mobile

- A SCOSSA-COMPRESSIONE o VIBRO-COMPRESSIONE:

tale macchina è l'unione delle due precedenti e si utilizza una pressa a doppio effetto, contemporaneamente avviene la vibrazione grazie all'azione dell'aria compressa e la compressione per effetto dell'olio in pressione;

- A LANCIO CENTRIFUGO:

tale macchina è utilizzata tipicamente nella formatura di forme molto grandi e alti, non formabili con altri sistemi. Tale formatura è caratterizzata dalla presenza di una girante monopala che invia la terra nella staffa lanciandola e sottoponendo la superficie della placca a notevoli urti. Per addolcire tali urti, nella fase iniziale, il processo è eseguito a velocità ridotte. Dopo la creazione di un velo di terra sul modello, capace di proteggerlo, il processo aumenta di velocità generando una compattazione più uniforme di quella a compressione ma di minore entità e un'usura del modello nel tempo.

- A LANCIO PNEUMATICO:

tale macchina è caratterizzata da un sistema di formatura molto rapido grazie all'immissione di una miscela aria-terra, attraverso un condotto, nella staffa. La terra è mantenuta in sospensione nell'aria grazie al moto circolare vorticoso dovuto all'aria in pressione. Si ottiene una migliore compattazione rispetto alla macchina precedente, ma una maggiore usura del modello.

2.5 SISTEMA DI COLATA

La forma così completata è pronta per ricevere la ghisa fusa nella fase di colata; attraverso le canalizzazioni appositamente realizzate nella forma, esso andrà a riempire gli interspazi esistenti tra l'impronta e le anime. Il fuso raggiunge la forma attraverso un sistema di colata che assicura il rapido riempimento della forma ed evita forti abbassamenti di temperatura del fuso, erosione di forme e anime e trascinamento di aria e ossidi all'interno della forma.

Tale sistema è composto da:

- **BACINO DI COLATA:**
accoglie il fuso versato, è sagomato in maniera tale da assicurare un flusso tranquillo, è dotato di sistemi che trattengono scorie e inclusioni più pesanti che si raccolgono sul fondo;
- **CANALE DI COLATA:**
unico elemento ad avere sviluppo verticale, trasforma l'energia potenziale del fuso in energia cinetica ed è caratterizzato da una forma tronco-conica convergente alla base.
- **CANALE DI ALIMENTAZIONE:**
disposto alla base del canale di colata, ha il compito di distribuire il fuso entro la cavità della forma attraverso gli attacchi di colata. È caratterizzato da una sezione maggiore del canale di colata, da una forma che rallenta e addolcisce il flusso del fuso, e da un'estremità, oltre l'ultimo attacco, che funge da trappola per le inclusioni.
- **ATTACCHI DI COLATA:**
hanno il compito di collegare il canale di alimentazione alla cavità della forma. Sono caratterizzati da una sezione molto piccola alla giunzione con la cavità per consentire una facile separazione del getto solidificato e strozzare il flusso del fuso entro la cavità.



Fig.2 Sistema di colata

Tale operazione, però, è molto complessa in quanto accompagnata da una riduzione di temperatura del fuso dovuta alla cessione di calore alle pareti, con conseguente variazione delle caratteristiche fluidodinamiche del fuso nel tempo, quali:

- **VISCOSITA':**
è la resistenza che un liquido oppone allo scorrimento. Essa aumenta al diminuire della temperatura, di conseguenza, nel caso di pareti sottili, in cui si ha una forte dissipazione di calore verso l'esterno, il raffreddamento può essere più rapido aumentando la viscosità del fuso che ostruendo il canale non consente il perfetto riempimento della forma;

- TENSIONE SUPERFICIALE:

è il lavoro per creare una superficie di area unitaria a temperatura e volume costanti. Inoltre, opera all'interfaccia liquido-solido, aumenta al diminuire della temperatura, cresce a causa della formazione di ossidi (densi e tenaci) dovuti al contatto con l'atmosfera;

- FLUIDITA':

attitudine che il fuso ha a riempire la forma. Maggiore è la fluidità del fuso, più facilmente riesco a riempire la forma. La fluidità dipende da:

- Temperatura iniziale del fuso (temperatura di surriscaldamento);
- Metallo versato (composizione);
- Geometria, materiale e temperatura della forma.

Una bassa fluidità implica la formazione di difetti nel getto tipo:

- Riprese a caldo, due fronti di solidificazione vengono a contatto tra loro dando origine a discontinuità;
- Perdita di particolari, dovuta a non completo riempimento

È possibile quantificare la fluidità del fuso, ossia l'**indice di fluidità**, misurando la lunghezza del canale che il fuso percorre in sistemi standardizzati prima di arrestarsi per il progredire della solidificazione.

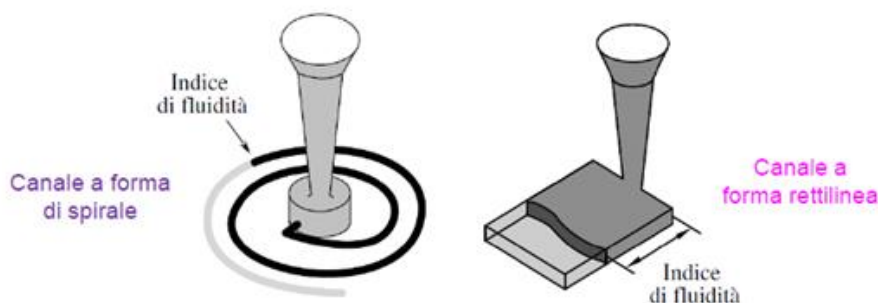


Fig.3 sistemi standardizzati per calcolare l'indice di fluidità

Trascorso il tempo necessario per la solidificazione ed il raffreddamento del getto ottenuto, la forma viene distrutta nell'operazione di distaffatura, ed il pezzo separato dalla terra (fase di sterratura). Una volta riempita la forma, con il passare del tempo il fuso si porterà alla temperatura di inizio solidificazione in cui avverrà la formazione dei primi nuclei di cristallizzazione. La forma in terra è caratterizzata da una bassa conducibilità termica; di conseguenza viene dissipata una scarsa quantità di calore verso l'esterno istante per istante, la temperatura del fuso diminuisce più lentamente e la velocità di raffreddamento è piuttosto bassa. La distribuzione delle lamelle è anche legata alla temperatura di colata e alle dimensioni del pezzo.

Nelle fasi di finitura, il getto viene separato dalle parti metalliche costituenti il sistema di colata (canali e attacchi di colata) e di alimentazione (materozze), nelle operazioni di smaterozzatura, e successivamente viene sottoposto alle operazioni di granigliatura, effettuate per eliminare i residui di sabbia rimasti attaccati al getto, e di sbavatura per l'asportazione di eventuali bave metalliche.

I controlli di qualità concludono il ciclo produttivo di un getto.

2.6 VANTAGGI E SVANTAGGI FONDERIA

VANTAGGI

Il campo di applicazione delle tecniche di fusione è estremamente ampio, per questo tali tecnologie sono certamente preferite agli altri processi produttivi nel momento in cui:

- si devono produrre forme complesse con cavità interne (ad esempio il monoblocco e la testata di un motore);
- l'uso dei processi fusori determina condizioni economiche certamente favorevoli nel caso di elevati volumi di produzione;
- il semilavorato non è producibile con altre tecniche: è il caso di numerosi particolari in ghisa, che possono essere realizzati solo ricorrendo alla fonderia.

SVANTAGGI

A fronte dei vantaggi finora citati, le principali limitazioni inerenti il processo di fonderia, sono:

- minore duttilità e tenacità dei prodotti, con scadenti proprietà meccaniche;
- maggior grado di porosità dei prodotti;
- minor livello di precisione e accuratezza;
- problemi ambientali di una certa rilevanza legati ai processi fuso.

3. ADDITIVE MANUFACTURING

Recentemente, a fronte di una certa confusione creatasi circa la definizione di Additive Manufacturing, è stata pubblicata una normativa di validità mondiale (ISO/ASTM52921-1 “Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies”), elaborata congiuntamente dagli enti normatori di vari Paesi.

Secondo tale direttiva, le tecnologie additive vanno intese come *“quei processi che aggregano materiali, al fine di creare oggetti, partendo dai loro modelli matematici tridimensionali, solitamente per sovrapposizione di layer, e procedendo in maniera opposta a quanto avviene nei processi sottrattivi (o ad asportazione di truciolo)”*.

Come sinonimo di AM, è spesso utilizzato quello di *stampa 3D*, molto popolare sui media, nel mondo dei maker e della personal manufacture, condotta con macchine low-cost.

Si identifica, quindi, come “stampa 3D”, quell’insieme di processi additivi che realizzano prodotti tramite la deposizione di materiale mediante una testa di stampa, ugelli o altre tecnologie di stampa. In passato, queste applicazioni erano contraddistinte dalla definizione di **“prototipazione rapida”**, ormai obsoleta, in quanto mediante le tecnologie additive vengono, sempre più spesso, realizzate parti funzionali e non solo pezzi prototipali o dimostrativi.

Di fatto, l’AM è utilizzato per produrre modelli fisici, prototipi, componenti, attrezzature e prodotti di vario genere, realizzati in polimeri, metalli, ceramiche e materiali compositi.

L’applicazione dell’AM all’industria manifatturiera è, quindi, in rapidissima espansione in tutti i settori, arrivando ad avere una sempre più larga applicazione anche nell’ambito biologico e nel settore alimentare.

3.1 PROTOTIPAZIONE RAPIDA

Le tecnologie di prototipazione rapida, che consentono di realizzare in scala reale un oggetto, si suddividono in produzione additiva (Additive Manufacturing), sottrattiva (Subtractive Manufacturing), e fusione.

Quella dell'additive manufacturing o di stampa 3D è un tipo di prototipazione rapida, che, attraverso l'aggiunta di materiale strato su strato, porta alla realizzazione di un modello.

Esistono varie tecnologie di produzione additiva: FDM, SLS, SLA, MJP, CJP, e SCP.

L'ultima tecnologia introdotta nel mercato è la Multi Jet Fusion di HP, una tecnica che consente sia la prototipazione che la produzione di parti finite.

La produzione sottrattiva, al contrario, parte da un blocco di materiale e sottrae il superfluo, fino ad ottenere la parte finita. Anche la produzione sottrattiva ha diverse tecnologie come la fresatura, la tornitura, la foratura, ecc.

La fusione, invece, consiste nel creare diversi prototipi a partire da un modello. Tale processo richiede numerosi passaggi e la realizzazione di uno stampo, per cui il suo utilizzo è particolarmente indicato nel caso di elevati volumi di produzione.



Fig.4 Prototipazione rapida

3.2 LA TECNOLOGIA AM

L' Additive Manufacturing viene, da decenni, adoperata quale tecnica per la produzione di prototipi dalle aziende più innovative. Dal punto di vista tecnologico, non si tratta, quindi, di un'innovazione recente (la stampa 3D si utilizza da metà anni 80 nella prototipazione rapida), ma negli ultimi anni le opportunità di utilizzo di questa tecnologia si sono ampliate notevolmente grazie alla possibilità di "stampare" oggetti di maggiori dimensioni, in una gamma assai più ampia di materiali (in plastica, metallo, ceramica, cera, gesso, materiali compositi, elastomeri, fotopolimeri, ecc.), con tempi di produzione assai ridotti rispetto al passato. Anche il costo delle macchine si è ridotto e l'insieme di questi fattori ha permesso uno sviluppo molto importante di questa tecnologia nella produzione di componenti per uso finale.

Per la realizzazione di un prodotto tramite AM, si parte da un modello CAD 3D che viene, successivamente, convertito in file di stereolitografia (STL).

Il disegno contiene le informazioni di ogni strato che verrà stampato.

Lo schema di strati risultanti guida la stampante nella deposizione, o sinterizzazione, del materiale. In contemporanea, vengono aggiunti al modello 3D eventuali supporti, da creare al momento mediante la tecnologia stessa, oppure costruiti in precedenza; essi permettono al particolare di non collassare su sé stesso durante la produzione.

Infine, terminato lo stampaggio, i particolari ricavati possono essere, se necessario, sottoposti a trattamenti di post-produzione, tra cui trattamenti chimici e termici ma anche lavorazioni di finitura alle macchine utensili.

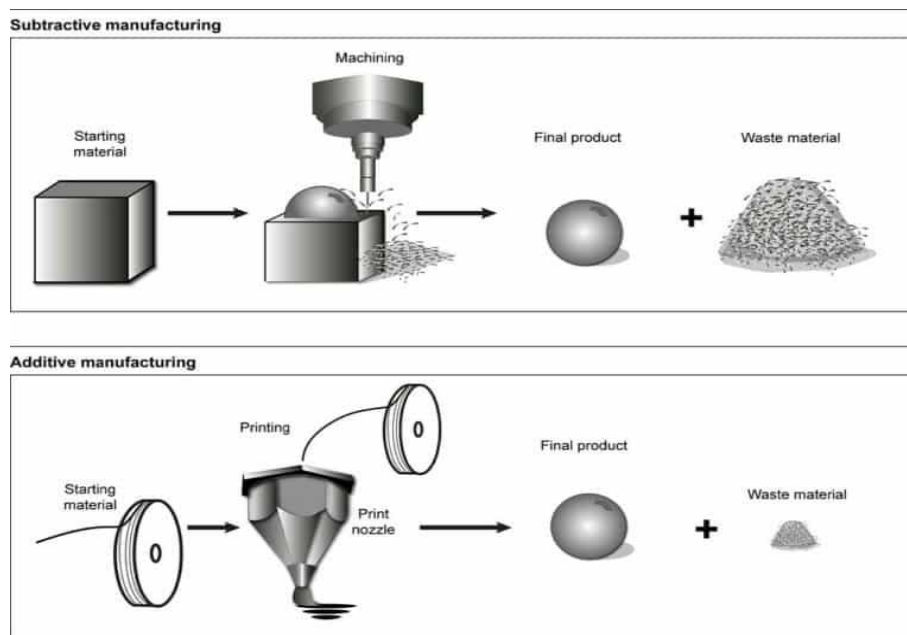


Fig. 5 Esempio esplicativo

Due caratteristiche in particolare della produzione additiva permettono di comprenderne le potenzialità di sviluppo:

- La possibilità di produrre oggetti dalle geometrie complesse, non altrimenti realizzabili in un pezzo unico con le tecniche tradizionali, con un minore impiego di materie prime, maggiori prestazioni e l'utilizzo di materiali diversi da quelli oggi in uso;

- fare sì che i costi di realizzazione di varianti, rispetto ad un modello base, siano sostanzialmente nulli.

Ciò implica che la manifattura additiva sia poco indicata su produzioni di grandissima serie (non esistono di fatto economie di scala). Tuttavia, l'AM ha posto, e continua a porre, le basi per aprire nuove possibilità alla “**mass customization**”: strategia di produzione di beni e servizi orientata a soddisfare i bisogni individuali dei clienti e, contemporaneamente, perseverare l'efficienza della produzione di massa, in termini di bassi costi di produzione e quindi prezzi di vendita contenuti.

3.3 TECNICHE DI PRODUZIONE DELL'AM

La tecnica di AM utilizzata viene scelta in base alle caratteristiche che l'oggetto dovrà avere una volta ultimato.

La gamma di tecnologie di produzione additiva oggi disponibili è in grado di applicarsi a materiali polimerici (plastiche, resine, biopolimeri,..) come pure a metalli (acciaio, titanio, bronzo, metalli preziosi,..), mediante l'impiego di diversi processi di deposizione e saldatura delle materie prime.

DMLS e SLM

DMLS e SLM sono lavorazioni che permettono la costruzione di particolari metallici direttamente da polvere sottile metallica; esse sono adatte alla produzione di particolari che necessitano di un processo di finitura per poter essere utilizzati come prodotti finiti.

- La **DMLS** (Direct Metal Laser Sintering) utilizza un sistema laser che disegna sulla superficie di una polvere metallica atomizzata, fondendo, così, la parte che, successivamente, si solidifica. Quindi, è aggiunto un nuovo strato di polvere e si ripete il processo fino alla formazione delle parti metalliche finali. La DMLS permette di realizzare pezzi con proprietà meccaniche uguali o superiori a quelli costruiti con tecniche tradizionali, con un elevato grado di precisione ed un buon livello di dettaglio. Con leghe di alluminio, titanio, cromo-cobalto, acciaio e nickel si possono costruire prototipi, componenti definitivi e produzioni di serie fino a un centinaio di pezzi, ma anche inserti per stampi a iniezione.
- La **SLM** (Selective Laser Melting) fonde le polveri metalliche in una massa omogenea anziché sinterizzarle. I materiali impiegabili sono gli stessi della DMLS e gli strati ottenibili hanno spessori da 20 a 10 μm ; i prodotti ottenuti, per finitura e prestazioni, sono simili a quelli delle altre tecnologie con fascio laser.

Le due tecnologie permettono di realizzare prototipi direttamente in metallo, pronti per essere collaudati o già utilizzati come elementi definitivi. La tecnologia DMLS e SLM offre una notevole precisione ed i materiali sono adatti per post-lavorazioni come fresatura, tornitura CNC, trattamenti termici, trattamenti superficiali sia estetici che protettivi.

EBM

La tecnologia EBM (Electron Beam Melting) consente di ottenere particolari in metallo da un fascio di elettroni anziché da un fascio laser.

Molto simile alla [SLM](#) e all'alternativa [DMLS](#), questa tecnologia permette di ottenere una fusione totale della polvere metallica, superiore a quella derivante dalla sinterizzazione laser di metalli.

Il processo di fusione avviene a temperature tipicamente comprese tra 700 e 1.000 °C e permette di ottenere parti sostanzialmente prive di tensioni residue, che, pertanto, non necessitano di post trattamenti termici dopo la produzione.

I pezzi, tuttavia, sono leggermente meno accurati a livello di finitura e precisione. I prototipi ed i prodotti definitivi così costruiti, presentano eccezionali proprietà meccaniche e un'elevatissima resistenza al calore, tanto da poter essere utilizzati nel settore dell'automotive, all'interno di turbine d'aerei e motori in genere. Altro settore d'applicazione è quello del medicale: utilizzando il titanio e il cromo-cobalto, si possono creare attrezzature speciali e protesi interne e ad personam per i pazienti.

FDM

La Modellazione Deposizione Fusa FDM (Fused Deposition Modelling) è una delle tecnologie di produzione additiva più comune e "pulita"; questo la rende idonea all'utilizzo in ambienti ove non ci sia uno specifico trattamento dell'aria.

I principali materiali usati sono ABS, PLA, nylon, e policarbonato.

I prototipi vengono costruiti strato dopo strato, tramite deposizione di un termoplastico che proviene dalla fusione di un filamento.

Le parti prodotte con questa tecnologia sono resistenti al calore, agli agenti chimici, allo stress meccanico e alle variabili di ambiente come l'umidità e l'aria secca. I pezzi ottenuti, generalmente, non necessitano di finitura però, in molti casi, vengono perfezionati esteticamente con verniciatura o sabbiatura.

POLYJET

La stampa 3D PolyJet funziona in modo simile alla stampa a getto d'inchiostro; tuttavia, anziché depositare gocce d'inchiostro sulla carta, le stampanti 3D PolyJet depositano strati di fotopolimeri liquidi solidificabili su un vassoio.

Il software di preparazione alla creazione calcola, automaticamente, il posizionamento dei fotopolimeri e del materiale di supporto tramite un file CAD 3D. La stampante 3D, quindi, deposita e immediatamente polimerizza a raggi UV minuscole gocce di fotopolimeri liquidi.

Strati sottili si accumulano uno sull'altro, sopra il vassoio, creando uno o più modelli o parti tridimensionali precise. Quando vi siano sporgenze o forme complesse che richiedono un sostegno, la stampante 3D deposita un materiale di supporto rimovibile. Alla conclusione del processo, si rimuove con facilità il materiale di supporto, a mano, con acqua o in un bagno con una soluzione.

I modelli e gli oggetti sono pronti alla manipolazione o all'uso appena usciti dalla stampante 3D PolyJet, senza bisogno di altri trattamenti.

Questa tecnologia offre la possibilità di ottenere un dettaglio accurato, superfici lisce ed elevata precisione e permette di costruire modelli in diverse materie plastiche e in gomme di durezza differente, layer da 16-32 μm che permettono una precisione quasi assoluta ($\pm 0,1\text{mm}$) e con un'ottima qualità superficiale, offrendo diverse possibilità d'impiego come il co-stampaggio, l'uso di materiali completamente trasparenti, l'uso di materiali sterilizzabili e bio-compatibili. La tecnologia PolyJet è particolarmente adatta alla produzione di modelli dai dettagli estremamente spinti, utili a test d'accoppiamento, controlli dimensionali e prove ergonomiche.

SLS

La Sinterizzazione SLS (Selective Laser Sintering) vede l'utilizzo di un laser per sinterizzare, fondendo polveri di diversi materiali che spaziano dagli elastomeri al nylon.

La macchina stende, strato dopo strato, le polveri su una tavola che si abbassa progressivamente; la funzione del laser è saldare fra loro le piccole particelle solide. Il principale vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di impiego di vari tipi di materie prime, in grado di restituire elevate rese meccaniche e termiche. I prototipi ottenuti con questa tecnologia sono più resistenti rispetto a quelli ricavati con la tecnica della Stereolitografia SLA; tuttavia, la superficie porosa conferisce ad essi un aspetto finale grezzo e meno gradevole. Per migliorare l'aspetto estetico e tattile sono, quindi, necessarie finiture personalizzate dopo il processo produttivo.

Mediante questa tecnologia di precisione (gli strati sono di appena 0,1 mm) è possibile creare prototipi strutturali, per verifiche di montaggio, test di ingombro e di forma.

SLA

La stereolitografia SLA (StereoLithography Apparatus) è la prima tecnica di prototipazione rapida ad essere stata introdotta sul mercato.

Si basa sulla polimerizzazione di una resina liquida (materiale formato da polimeri epossidici) per effetto di un laser che, focalizzato sul piano di lavoro mediante sistemi ottici, provvede a costruire il prototipo strato su strato. La tecnica consente di produrre pezzi dalle geometrie complesse e con finiture di superficie migliori rispetto agli altri processi additivi.

Gli oggetti prodotti sono contraddistinti, soprattutto, da un elevato livello di finitura e una definizione accurata dei dettagli.

VACUUM CASTING

Il Vacuum Casting si utilizza per realizzare particolari plastici con caratteristiche meccaniche ed estetiche molto simili a quelle dei prodotti finiti, colando sottovuoto resine poliuretaniche a bassa densità all'interno dello stampo. Le resine da colata più utilizzate sono dei poliuretani bicomponenti, molto simili nelle caratteristiche meccaniche ai più diffusi materiali di produzione.

In genere, con un unico stampo, si possono realizzare dai 30 ai 50 pezzi, in colori diversi e personalizzati; il tutto in pochissime ore di lavoro.

Le fasi di produzione per la realizzazione di parti, prodotti finiti e piccole serie, tramite l'utilizzo di stampi in silicone, sono sostanzialmente tre:

- realizzazione del modello con tecnologia di stampa 3D (SLA e SLS);
- realizzazione dello stampo in silicone, utilizzando come "anima" il pezzo realizzato con stampa 3D;
- colata sottovuoto dell'oggetto finito o della serie di parti tramite l'utilizzo dello stampo siliconico.

Con gli stampi siliconici è possibile realizzare preserie e produzioni in piccoli lotti, prototipi per test funzionali, prove di verifica, test di assemblaggio, presentazioni, elementi per fiere ed eventi. La tecnica degli stampi in silicone si presta anche alla riproduzione di oggetti perfettamente trasparenti.

3.4 MATERIALI E RELATIVE APPLICAZIONI

Le tecnologie di produzione additiva permettono l'utilizzo di materiali di varia natura. Recentemente la scelta dei produttori è andata orientandosi sulla scelta di materiali sempre più performanti, anche se questo si traduceva in costi maggiorati. Tuttavia, anche i materiali più economici hanno visto, negli anni, incrementare rapidamente le loro prestazioni.

I materiali per l'Additive Manufacturing si possono suddividere in due principali famiglie: quella dei polimeri e quella dei metalli.

I polimeri garantiscono costi inferiori sia per quanto riguarda l'acquisto del materiale stesso sia in termini di tecnologie di stampa.

I metalli, d'altro canto, offrono prestazioni di livello più elevato.

Polimeri

PLA

Il PLA deriva dall'amido (per questo viene considerato eco-friendly).

Presenta una buona stabilità, coniugata ad un ritiro ridotto e a buone caratteristiche meccaniche.

Si stampa a temperature inferiori rispetto a quelle degli altri polimeri. Risulta, quindi, essere un materiale molto flessibile adatto a innumerevoli applicazioni.

ABS

L'ABS è caratterizzato da un'alta resistenza meccanica e al graffio e una buona resistenza al calore; è, inoltre, molto rigido e può essere lucidato e verniciato facilmente.

Durante la progettazione è necessario, però, tenere conto del suo elevato ritiro.

Le sue proprietà meccaniche lo rendono adatto a quelle applicazioni dove il particolare è sottoposto a sforzi rilevanti.

NYLON

Il Nylon presenta delle proprietà meccaniche molto interessanti: si salda bene su sé stesso, rendendo meno visibili gli "strati" della produzione additiva sulla superficie, e si può stampare senza necessità di un piano riscaldato.

Necessita altresì di alte temperature di stampaggio, superiori a 250°, ed è inoltre molto sensibile all'umidità, quindi va trattato con maggior attenzione rispetto agli altri polimeri.

Metalli

ALLUMINIO

L'alluminio è molto leggero e per questo adatto ad applicazioni che richiedono un buon compromesso fra capacità termiche e peso contenuto.

Tipicamente, infatti, lo si utilizza nel settore automotive e nell'aeronautica.

CROMO-COBALTO

Le superleghe Cromo-Cobalto offrono proprietà meccaniche e termiche elevatissime, che, addirittura, migliorano col salire della temperatura fino a 500°-600°C.

Offrono un'ottima resistenza alla corrosione, per questo motivo vengono utilizzate in applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura, come in motori degli aerei e in ambito biomedico.

NICHEL

Le leghe di Nichel resistono a temperature elevatissime e presentano un'ottima resistenza meccanica e all'ossidazione, vengono spesso utilizzate a temperature fino a 1200°. Aereospaziale e energia sono i due settori dove vede più utilizzato, ad esempio nelle turbine.

ACCIAIO

Esistono numerose tipologie di acciai (temprabili, inossidabili, ecc.) per additive manufacturing che ripropongono tutte le caratteristiche che possiedono i normali acciai forgiati.

Per il suo rapporto costo-prestazioni, è la lega più utilizzata, in quanto presenta una notevole flessibilità applicativa.

TITANIO

Il titanio è famoso per essere una lega dalla bassa densità, con notevoli proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione, caratteristiche che lo rendono adatto a molte applicazioni in ambito motorsport e aereospaziale.

La purezza ottenibile in alcune polveri, sommata alle sue proprietà, lo rendono ideale anche per applicazioni biomediche. Il titanio, infatti, presenta una buonissima biocompatibilità.

3.5 ESEMPI APPLICATIVI

I tre settori nei quali le tecnologie additive hanno soppiantato le tecnologie tradizionali, arrivando a essere la pratica tecnologica di elezione, sono il settore dell'aerospaziale, per la produzione di componenti dei motori aeronautici, il settore del biomedicale, con particolare riferimento alla produzione di supporti protesici in campo ortopedico e di apparecchi nell'ortodonzia e nelle audioprotesi, e, infine, il settore motorsport.

Il settore aerospaziale

Un caso degno di nota nel settore manifatturiero aerospaziale italiano è quello di Avio Aero, azienda che fa capo al colosso General Electric.

Nello stabilimento Avio Aero di Cameri, nel piemontese, è impiegata esclusivamente la manifattura additiva per la produzione di pale turbine di bassa pressione ed altri componenti per motori aeronautici.

Questa caratteristica rende lo stabilimento di Cameri un caso unico a livello mondiale.

Lo stabilimento può ospitare fino a 60 stampanti 3D per uso industriale ed è attrezzato con due atomizzatori per la produzione interna di polveri di speciali leghe metalliche come l'alluminuro di titanio – TiAl – e due impianti per il trattamento termico dei componenti realizzati.

Anche gli altri grandi player del settore, in ogni caso, hanno incentrato sempre più le loro produzioni sulla tecnica della manifattura additiva, utilizzando come materiale d'impiego in particolar modo l'alluminio e ottenendo, così, pezzi più leggeri e più robusti rispetto alle soluzioni precedenti che prevedevano la saldatura di più pezzi stampati con procedimento a iniezione.

Il settore biomedicale

Nel settore biomedicale, la manifattura additiva consente sia la produzione in pezzo unico di protesi personalizzate, trovando così applicazione principale nel ambito dell'ortodonzia e dell'implantologia maxillofacciale e cranica, sia la produzione di pezzi in piccola e media serie, risultando efficiente per la produzione di coppe acetabolari impiegate per la realizzazione di protesi d'anca.

Nel caso di pezzi unici, il fattore decisivo per l'impiego delle tecnologie della produzione additiva è la possibilità di raggiungere una completa personalizzazione del manufatto a partire da una scansione TAC o risonanza magnetica. Come si è detto, infatti, la manifattura additiva rende minimo il costo delle varianti e ogni stampante 3D può realizzare contemporaneamente una molteplicità di prodotti diversi, con il solo limite della capienza complessiva della cubatura di lavoro.

Il settore automotive

Nel comparto motor-racing la produzione additiva è ormai ben radicata.

In questo ambito, infatti, è tipica la necessità di realizzare geometrie complesse.

Le potenzialità, connesse alla riduzione dei vincoli costruttivi, che caratterizzano la manifattura additiva, consentono, di fatto, di fabbricare manufatti capaci di adattarsi alle scelte progettuali in continuo cambiamento dei reparti corse, ottenendo un netto miglioramento delle prestazioni del veicolo nelle competizioni.

Le applicazioni sono molteplici, sia con riferimento all'impiego di materie plastiche, sia nella realizzazione di componenti in metallo per il motore e per altre parti dei veicoli.

Un altro ambito di applicazione della manifattura additiva nel settore automotive riguarda le produzioni di auto e moto top di gamma. In questo caso, si sta sviluppando la produzione di pezzi di piccola serie le cui caratteristiche non sono realizzabili con le tecniche tradizionali (per esempio, pezzi con circuiti integrati di raffreddamento con caratteristiche termo-fluidodinamiche ottimali) oppure di pezzi personalizzati, sulla base delle specifiche esigenze o del gusto estetico dei clienti.



Fig.6 Blocco motore realizzato in PLA

4. STATO DELL'ARTE

Tale lavoro di tesi vuole essere portavoce dei benefici e dei cambiamenti apportati dall'Additive Manufacturing nell'ambito del settore manifatturiero della fonderia. Si cercherà, in questo capitolo, di valutare lo stato dell'arte di tale processo attraverso l'analisi di esempi pratici trattati e tutt'ora oggetto di studio da parte di ricercatori di tutto il mondo che ne hanno fatto argomento centrale di numerosi articoli scientifici.

Lo studio: **“Fused Deposition Modeling Printed Patterns for Sand Casting in a Nigerian Foundry: A Review”**, eseguito da **Anakhu, P. I., Bolu, C. A., Abioye, A. A., Azeta J.** effettuato in un contesto industriale quale quello della fonderia per fusione in sabbia in Nigeria, vuole essere portavoce di un confronto tra due tipologie di realizzazione di modelli per la fusione in sabbia, la prima di tipo tradizionale, con la creazione di un modello in legno, la seconda più avveniristica, basata sulla realizzazione di un modello tramite Additive Manufacturing.

La fabbricazione del modello è il punto cardine del processo di fusione in sabbia.

Di fatto, un errore nel processo di creazione del modello porta, poi, ad una pluralità di errori in ogni attività lungo la linea di produzione.

Nell'articolo vengono esposti vantaggi e svantaggi per ambedue i modelli, e sono poste le basi per possibili soluzioni future che vedono la tecnica FDM protagonista della modellistica del domani.

I due modelli a confronto

I modelli tradizionali vengono realizzati tramite lavoro manuale, non prevedendo l'uso di centri di lavoro CNC.

Il materiale più comune per la realizzazione di tali modelli è il legno.

L'uso del legno per la preparazione dello stampo comporta, però, delle problematiche legate all'attrito superficiale tra sabbia della forma e superfici esterne del modello.

Di fatto, durante la rimozione del modello dallo stampo, c'è la possibilità di provocare danni alla cavità dello stampo stesso.

Un metodo per superare tale problema include il rivestimento del modello con materiale protettivo. Tuttavia, l'inalazione della polvere di legno, derivante dall'operazione di modellatura, e l'utilizzo di sostanze chimiche, durante il processo di lavorazione e di rivestimento superficiale, risultano essere un pericolo comune e grave per la salute degli addetti al processo.

Un'altra problematica, inerente al modello realizzato manualmente, sta nella difficoltà di raggiungere la stessa precisione e ripetitività di dimensioni nella formazione degli stessi modelli, dovuta a errori relativi agli strumenti di lavoro e al possibile errore umano.

Quando, poi, il disegno del modello è molto complicato, è ulteriormente difficile raggiungere manualmente la precisione desiderata.

Per quanto concerne le attrezzature e gli strumenti utilizzati per la realizzazione dei modelli in legno, essi richiedono solitamente una ricalibrazione periodica volta a ristabilire il loro grado di precisione e, inoltre, i costi di tali utensili vanno da diverse migliaia a decine di migliaia di dollari a seconda delle dimensioni e della complessità del modello.

I tempi di consegna variano da alcune settimane o mesi.

Tutte queste caratteristiche fanno del metodo tradizionale una tecnica obsoleta e dispendiosa in termini di tempo e costi.

Un metodo alternativo per la riduzione di questi due parametri vede, quindi, l'utilizzo dell'Additive Manufacturing.

Il metodo di Additive Manufacturing più comunemente usato per lo stampaggio dei modelli è FDM, che offre costi più contenuti rispetto agli altri metodi e che permette una riduzione nei tempi di consegna e un migliore accuratezza nel particolare rispetto alla creazione di modelli realizzati con tecnica tradizionale.

Tuttavia, anche in questo caso, sorgono problematiche, dovute a:

- scarsa finitura superficiale;
- differenti resistenze alla compressione del modello realizzato in PLA;
- diversi valori di parametri di processo;
- attrito superficiale elevato tra sabbia e pareti del modello che causa frequenti danni allo stampo durante la rimozione del modello da esso.

Inoltre, ogni modello viene utilizzato per creare una cavità all'interno dello stampo.

Ciò si realizza compattando la sabbia attorno al modello. Per la compattazione si applica una pressione di compattazione tale da prevenire il cedimento della cavità dello stampo durante la rimozione del modello o durante la pressione del metallo fuso.

Qualsiasi modello di tipo PLA o in legno deve essere in grado di resistere a tali pressioni.

Il modello in legno ha un'elevata resistenza grazie alla sua struttura, mentre, nel modello PLA, la resistenza alla compressione è tendenzialmente inferiore; per questo motivo alcuni modelli in PLA cedono durante la compattazione.

Ad oggi, si sta cercando di ottimizzare il modello in PLA per renderlo più conforme alla sua funzione.



Fig. 7

- Fase di post-trattamento per migliorare la finitura superficiale;*
- Dopo l'operazione di stampaggio del modello PLA con la cavità dello stampo danneggiata e dalla scarsa finitura superficiale;*

Di fatto, alcuni modelli PLA, stampati con FDM, sono risultati non idonei per la realizzazione della cavità della forma, in quanto le superfici del modello risultavano dentellate. Il problema viene risolto tramite trattamenti post-produzione, come il riempimento delle pareti del modello con resina, la cui parte in eccesso viene successivamente levigata.

Ulteriore svantaggio di tali modelli si ha a causa della loro cedevolezza nelle fasi iniziali di stampaggio.

Per far sì che il modello acquisti la giusta geometria, è inevitabile l'uso di strutture di supporto; queste ultime, però, rappresentano un maggior utilizzo di materiale che poi dovrà essere rimosso, oltre che formare rugosità superficiale nei punti di contatto con il modello. Questo comporta la necessità di tecniche post-produzione per raffinare le superfici, come trattamento chimico, levigatura meccanica, rimozione supporti e pulizia del modello.

Ovviamente, ai trattamenti post-produzione si associano costi aggiuntivi e tempi maggiori di produzione.

Tutto ciò rende, di conseguenza, la produzione di modelli FDM meno conveniente rispetto alla realizzazione di modelli tradizionali.

Va sottolineato, quindi, che la stampa di modelli in PLA con la tecnica FDM non sempre consente di ottenere una riduzione dei costi e dei tempi di produzione in quanto dipende dalla geometria e dalle dimensioni del modello.

La scelta della tecnica più idonea alla realizzazione di un dato modello dipende, dunque, dal tipo di modello che si vuole andare a ottenere.

Per modelli senza cavità e dalle geometrie più semplici, risulta più conveniente utilizzare le tecniche tradizionali anziché la tecnica FDM.

Inoltre, la durata del processo FDM è due volte maggiore rispetto a quel del metodo tradizionale.

Il vantaggio della tecnica FDM resta, in ogni caso, l'autonomia di lavoro, di circa due giorni rispetto al metodo tradizionale che richiede, invece 8 ore di lavoro al giorno per due giorni con coinvolgimento di operatore.

Da tale studio, risulta, quindi, evidente la necessità di migliorare la tecnica FDM per la creazione di modelli, in modo da sfruttare interamente i vantaggi dell'operazione di colata in sabbia.

A dare ulteriore conferma all'effettiva efficienza ed efficacia della stampa in 3D, per le applicazioni di fonderia, arriva, anche il risultato di una ricerca pubblicata nel "International Journal of Engineering and Innovative Technology" da parte dei Prof. Patil, Mohan Kumar e Abhilash, dal titolo: **"Development of Complex Patterns: Scope and Benefits of Rapid Prototyping in Foundries"**.

Questo documento fornisce uno studio dettagliato della fabbricazione di un complesso modello, utilizzando una tecnica di Additive Manufacturing, oltre a presentarne la portata e i benefici rispetto alle pratiche attuali.

L'obiettivo principale è quello di evidenziare i vantaggi dell'utilizzo della tecnica FDM per eliminare lo spreco di materiale nella produzione di modelli e ridurre i costi e i tempi di consegna nella realizzazione di complessi getti di una qualità superficiale accettabile.

La ricerca, alla cui base c'è, ancora una volta, il confronto tra modelli realizzati attraverso tecnica FDM e tecnologie "tradizionali", dimostra come il costo del singolo componente sia più elevato, in termini di materiale, nella stampa 3D, ma che quest'ultima consente in ogni caso:

- Una riduzione del 65/70% dei tempi di sviluppo della parte;
- Una riduzione del 50% delle ore di lavoro necessarie allo sviluppo;
- Un aumento considerevole delle possibilità di utilizzo del prodotto sviluppato dalla stampa FDM;
- Un maggior dettaglio superficiale.

Sono messi in evidenza, quindi, i vantaggi che si possono ottenere per progetti riguardanti fusioni in stampi in sabbia, utilizzando modelli realizzati con tecnica FDM.

Questi modelli, realizzati in legno, presentano delle limitazioni (come la difficoltà nella fabbricazione per ottenere le forme esatte), possono richiedere l'assemblaggio di parti, sono suscettibili di assorbimento di umidità, attacco di funghi, restringimento e possono richiedere rivestimenti speciali per aumentare la durata di conservazione.

Per superare queste difficoltà, vengono utilizzati anche modelli fatti di leghe.

Tuttavia, il costo, le dimensioni limitate e la non facilità nel processo di stampaggio sono alcune delle limitazioni dei modelli realizzati in metallo o lega.

Tutte queste limitazioni sono superate, in realtà, dall'introduzione di nuovi materiali quali: polimeri (termoplastiche e fotopolimeri), come ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), PC (policarbonato), ULTEM, PPS (Polyphenylsulfone) ecc. che possono essere facilmente fabbricati da stampanti 3D.

L'utilizzo di modelli polimerici e plastici presenta, quindi, diversi vantaggi: maggiore durata del ciclo del prodotto, grande precisione dimensionale, riduzione delle ispezioni e delle rilavorazioni e anche della riusabilità.

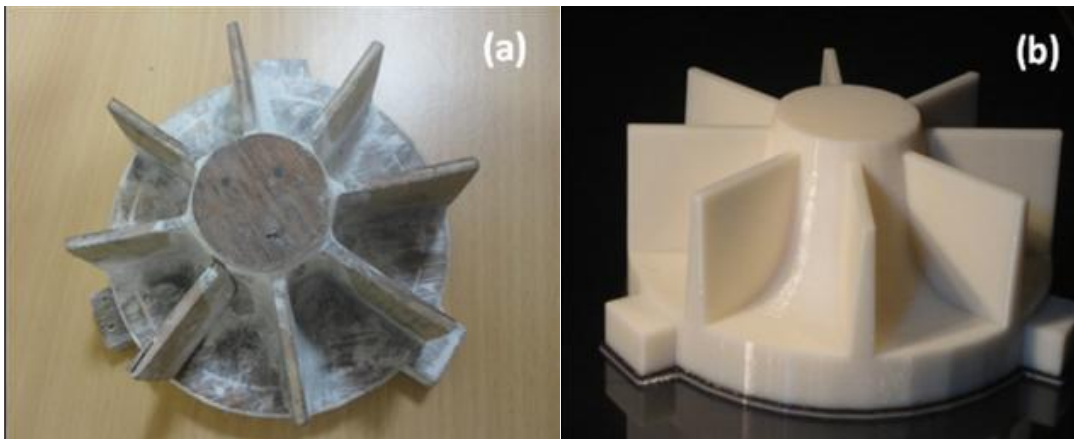


Fig. 8 a) modello convenzionalmente fabbricato (legno) e b) il modello (ABS) fabbricato attraverso FDM

Utilizzando il metodo FDM, in aggiunta alla riduzione della manodopera nella produzione di modelli, è possibile ottenere una riduzione dei tempi di produzione del 65 -70 %.

Anche se il costo totale coinvolto nel metodo FDM è il doppio di quello del metodo convenzionale, considerando il numero di colate che possono essere ottenute utilizzando modelli stampati, si ottiene una riduzione del costo di produzione per modello quattro volte superiore.

Dunque, ci sono diversi vantaggi dell'utilizzo della tecnologia Additive Manufacturing nelle fonderie. Rispetto al metodo convenzionale e al processo di lavorazione CNC, essa è veloce e accurata e produce il modello senza alcuno spreco di materiale, non richiede strumenti, maschere e infissi speciali e operazioni secondarie per costruire i modelli principali.

Inoltre, è altamente automatizzata, con conseguente fattore di rischio o errore relativamente nullo e ha la capacità di creare qualsiasi forma e caratteristica geometriche.

Sono state osservate le dimensioni del modello in legno fabbricato e del modello in ABS rispetto alle loro colate in alluminio.

Sulla base di queste osservazioni, si comprende che c'era una deviazione normale sulle dimensioni in entrambe le colate a causa del restringimento della lega di alluminio.

Tuttavia, si osserva che i contorni della colata realizzati con motivi in legno non erano abbastanza precisi rispetto a quelli della colata realizzata con modello ABS.

Un'osservazione microscopica è stata fatta anche per comprendere la qualità della superficie delle colate ottenute utilizzando modelli in legno e ABS.

Le micrografie fotografiche ottenute con ingrandimento 4X (Figura 3), mostrano la finitura superficiale liscia del modello in ABS rispetto al modello in legno.

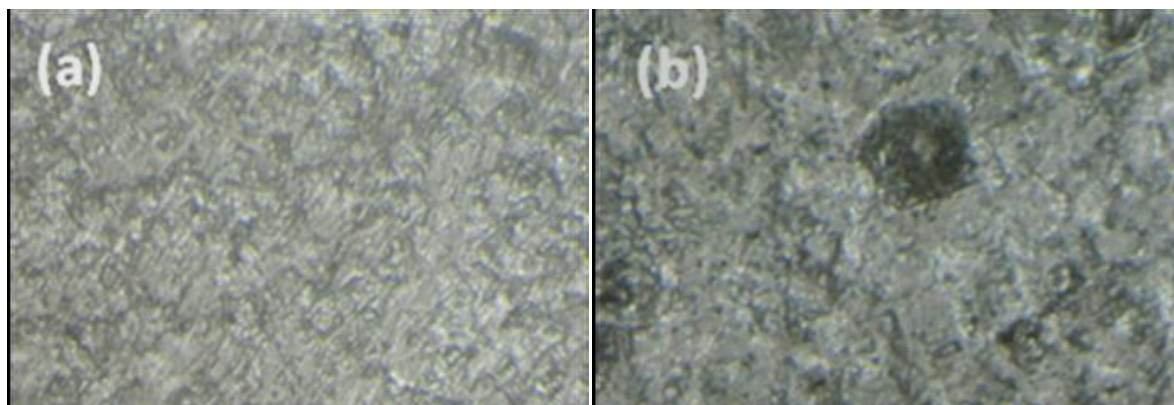


Fig.9 Microfotografie fotografiche ottenute con ingrandimento 4X (a) modello in ABS (b) modello in legno.

I risultati di questo studio indicano vantaggi significativi nell'impiego di una tecnologia di Additive Manufacturing nella produzione di modelli. Di fatto, pur includendo notevoli costi, AM permette risparmi di tempo di produzione, con uno spreco di materiale minimo.

In aggiunta a questo, le dimensioni accurate e la migliore qualità della superficie delle colate ottenute, utilizzando i modelli ABS, hanno eliminato i passaggi secondari di post-produzione.

La maggiore densità e rigidità dei modelli ABS possono anche aumentare la durata del modello che a sua volta contribuisce a un maggior numero di colate per modello e, quindi, alla riduzione del costo totale di produzione.

Questi vantaggi indicano chiaramente un possibile ampio utilizzo di tecnologia di Additive Manufacturing nelle fonderie.

Purtroppo, nonostante i tanti vantaggi, l'utilizzo della tecnologia di Additive nelle fonderie di piccole e medie dimensioni è ancora in fase iniziale a causa dell'elevato costo iniziale e del costo del materiale più elevato.

In ogni caso, la tecnologia di AM può risultare più economica facendo modelli vuoti e optando per la “mass customization” attraverso la produzione rapida.

La ricerca: “**The role and impact of 3D printing technologies in casting**” degli studiosi Jin-wu Kang and Qiang-xian Ma, mette in luce il ruolo e l’impatto della stampa 3D nei settori legati alla produzione.

In particolar modo, ne viene analizzato il potenziale nel settore della fonderia.

Ovviamente, ai vantaggi si affiancano anche alcuni elementi limitativi rispetto al processo di fusione, volto alla realizzazione di un modello, anima o stampo manualmente o mediante lavorazione meccanica.

Ne è prova il fatto che, se limitato al processo di formatura delle forme, la fusione è migliore e più veloce rispetto alla stampa 3D.

Questo perché lo stampaggio viene eseguito punto per punto, profilo per profilo e strato per strato e quindi richiede molto più tempo, mentre, in meno di un’ora, nella cavità di uno stampo, possono essere versate tonnellate e tonnellate di metallo liquido.

Dallo studio emergono, poi, altre limitazioni legate allo stampaggio 3D: la difficoltà di realizzare prodotti di grandi dimensioni o pesanti con la stampa 3D a causa dei limiti di costi e attrezzature.

La difficoltà nella creazione di superfici rotonde in quanto dallo stampaggio 3D si ottiene sempre un contorno a gradini che riduce la rotondità dell’oggetto e che, per quanto si vada a diminuire lo spessore dello strato, non può essere completamente eliminato.

La limitazione più grave, tuttavia, è la stessa dei metodi di produzione tradizionali e riguarda l’estrazione di materiali indesiderati, come materiali di supporto, dalle cavità, specialmente quelle lunghe, strette o chiuse e la pulizia dalla polvere sfusa.

Però, d’altro canto, l’Additive Manufacturing colma le lacune nella fusione di leghe difficili da fondere, come il titanio, e, di conseguenza, permette di ampliare la limitata selezione di leghe cui, invece, è soggetta la fusione.

Inoltre, supera anche il problema di riempimento degli stampi che si ha nel processo tradizionale con le leghe leggere a causa della loro bassa densità.

Se da un lato, quindi, può essere utilizzata per creare strutture complicate e pezzi unici, fondere leghe difficili, risulta anche vantaggiosa in quanto bypassa il problema di posizionamento e rimozione del modello nella forma nel tradizionale processo di fusione.



Fig. 10 Assemblaggio di anima e stampo fabbricati da 3DP

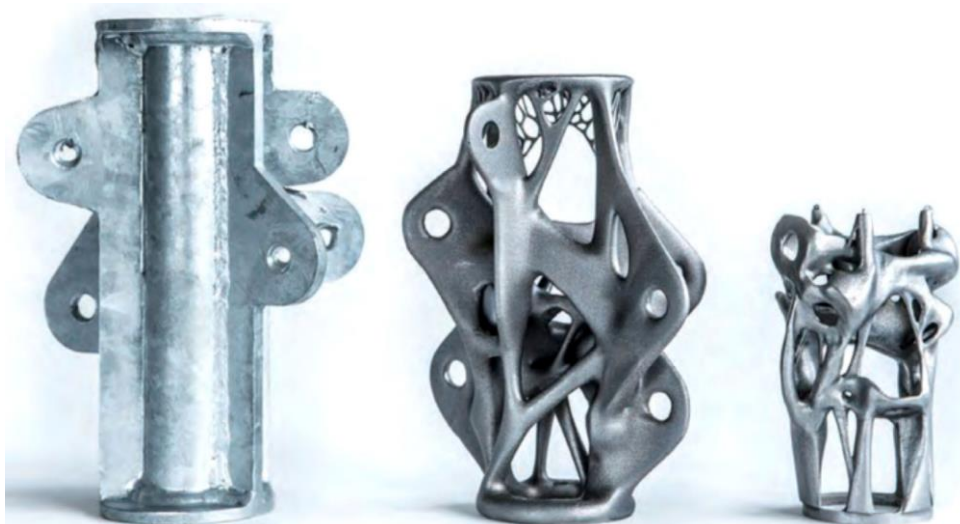


Fig. 11 Ottimizzazione di una parte stampata in 3D

La stampa 3D Offre, dunque, molta più libertà ai progettisti, porta vantaggio in termini di risparmio di materiale, permette di ottenere un'elevata precisione dimensionale dei getti e una produzione intelligente, posizionando i sensori per il monitoraggio e il controllo positivo dello stampo di una struttura a traliccio. Inoltre, in futuro, l'Additive Manufacturing permetterà lo stampaggio in 3D della forma, di conseguenza, sarà possibile creare forme vuote sostenute da strutture a traliccio che permettono l'esistenza di canali entro cui poter posizionare coppie termiche, estensimetri e sensori per monitorare lo stato dello stampo; in più, tramite AM sarà possibile realizzare anche dei raffreddamenti mirati in una determinata zona della forma.

I vantaggi che derivano da tutto ciò sono: peso inferiore, materiale utilizzato inferiore, tempo di costruzione dello stampo inferiore, e di conseguenza costi inferiori.

Sul versante delle limitazioni, la stampa 3D, attualmente, consuma molta energia per il processo di fusione del materiale e ha dei costi elevati.

Le tecnologie di stampa 3D, dunque, si sono evolute da prototipazione rapida, a utensili rapidi, produzione rapida e fusione rapida. Tuttavia, per i limiti di cui sopra, è ancora difficile per la stampa 3D sostituire i metodi tradizionali di produzione della fusione, ma, per certo, l'AM sta rivoluzionando e rivoluzionerà completamente il settore della fusione.

Il lavoro di ricerca, dal titolo “**DESIGN AND DEVELOPMENT OF FDM PATTERN FOR SAND CASTING PROCESS**”, ad opera dei ricercatori **S. Sekar, R. Veli, V. Ramesh** ha il fine di analizzare la realizzazione di getti, tramite fusione in sabbia, di una girante di una pompa centrifuga, utilizzando un modello realizzato tramite Additive Manufacturing.

Lo studio va anche ad osservare l'accuratezza dimensionale, la qualità della superficie e il costo di questi getti.

La tecnologia FDM rappresenta la tecnica utilizzata per la realizzazione del modello.

In tale tecnica sono impiegati materiali termoplastici per realizzare parti resistenti, durevoli e dimensionalmente stabili con la massima precisione e ripetibilità.

Tra tutti i materiali termoplastici che la tecnologia FDM può utilizzare, l'ABS è il migliore, soprattutto per resistenza meccanica, e quasi il 90 % di tutti i prototipi FDM sono prodotti in questo materiale.

In questo lavoro, viene utilizzato un file CAD per generare il modello di una girante di una pompa centrifuga.

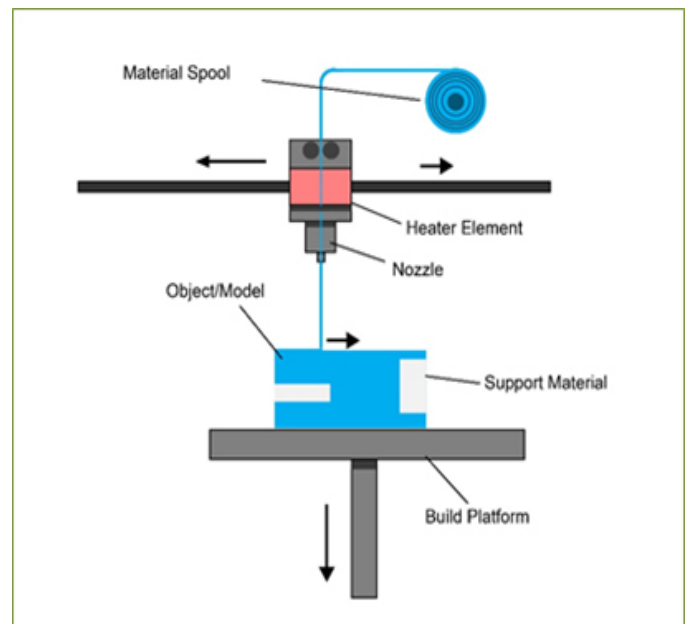


Fig.12 Schema del processo FDM

La metodologia prevede vari passaggi per ottenere il risultato richiesto. Il polimero Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) viene utilizzato come materiale per la costruzione del modello. Il materiale ABS è un termoplastico che conferisce una buona finitura superficiale al modello.

I dati relativi ai tempi di produzione del modello e costi di produzione sono stati analizzati da tale studio ed è stato riscontrato che la realizzazione del modello in legno richiede tempi di costruzione maggiori.

Il costo del modello in legno è inferiore rispetto a quello in modello FDM .

Il massimo numero di getti realizzabili con il modello FDM è di circa 130-150, mentre utilizzando il modello in legno è possibile realizzare 40-60 getti.

Le conclusioni ricavate da tale studio sono le seguenti:

- Il getto ottenuto dalla fusione, utilizzando il modello realizzato con il metodo FDM, ha una maggiore precisione dimensionale ed elevata qualità superficiale;
- Il modello realizzato in materiale ABS può essere utilizzato per produrre un numero maggiore di pezzi fusi;
- Il metodo FDM comporta una riduzione dei tempi di produzione e dei costi per la realizzazione di modelli;
- È possibile creare facilmente modelli con forme complesse.



Fig. 13 Modello reale girante e modelli in ABS.

Tale studio dal titolo:” **Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand**” redatto da Kevin J.Hodder e Richarda J. Chalaturnyk, va ad analizzare la possibilità di utilizzare la tradizionale sabbia da fonderia all'interno delle stampanti 3D e quanto questa sabbia sia effettivamente adatta, al fine di fornire una più agevole adozione della tecnologia AM.

Di conseguenza, tali studiosi hanno selezionato e poi utilizzato quattro diverse tipologie di sabbie per la fabbricazione degli stampi di sabbia per stampante in 3D: la sabbia SIL 1 e SIL 3 e la sabbia di controllo e, infine, la sabbia rigenerata che è data da un rapporto uguale di SIL 1 e SIL 3, perciò già utilizzata in precedenza negli stampi e, per questo, impregnata di legante.

Per effettuare l'esperimento è stato, inizialmente, creato un blocco geometrico contenente cubi e cilindri di varie dimensioni, utilizzato come modello per andare a realizzare, con tecnica tradizionale, una forma, al cui interno, viene, in seguito, colato dell'alluminio fuso.

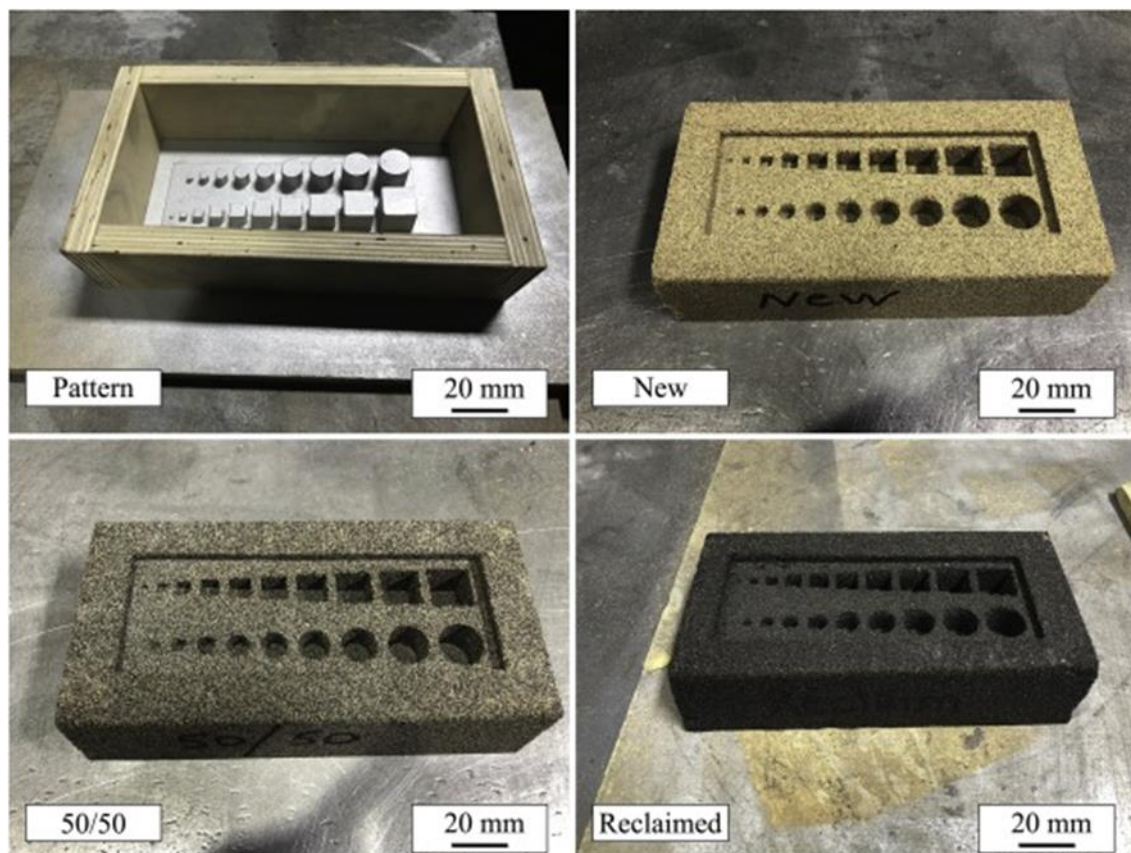


Fig. 14 Stampi realizzati nelle diverse tipologie di sabbia a partire dal modello nella prima foto in alto a sinistra

Effettuando la colata è stato riscontrato che tutti gli stampi si sono deteriorati fino al punto di essere facilmente rimossi, molto probabilmente a causa della vaporizzazione del legante.

Prima di iniziare lo stampaggio con stampa 3D sono effettuate alcune analisi:

Si va a analizzare dal punto di vista della distribuzione dimensionale i granelli di tutti i tipi di sabbia e il loro orientamento, riscontrando, così, che la sabbia meno adatta allo stampaggio tramite la stampa 3D è la sabbia rigenerata.

Quindi, si è andati a considerare le quantità di legante da usare per valutare se potesse influire nel processo di sformatura, in quanto è stato ipotizzato che, se la saturazione del legante fosse troppo

elevata, gli stampi sarebbero troppo difficili da rompere e se la saturazione del legante fosse troppo bassa, gli stampi sarebbero troppo fragili da gestire.

A questo punto, si è passati a realizzare stampi con stampante 3D

Durante i cicli di stampa iniziali, è diventato evidente che proprio la sabbia rigenerata, rispetto alle altre, stava subendo gravi intasamenti e altri problemi di stampa.

L'intasamento era, molto probabilmente, dovuto alla modifica della superficie delle particelle di sabbia a causa dell'incollaggio del legante residuo dai getti precedenti. Il problema dell'intasamento viene superato attraverso la forza vibrazionale generata da un Recoater (spargitore di sabbia vibrante), il quale consente, a una elevata velocità, la giusta deposizione di sabbia.

Quindi, alla fine dello stampaggio si comprende che, rispetto ai metodi di fusione tradizionali, la fusione realizzata con uno stampo di sabbia stampato in 3D, utilizzando la sabbia di controllo ottimizzata per la stampante 3D, ha funzionato bene. Infatti, sebbene la fusione del campione abbia bordi leggermente arrotondati, ha catturato la più piccola geometria circolare, mentre lo stampo tradizionale no. Poiché, però, la sabbia di controllo è ottimizzata per la stampante 3D, il risultato non è sorprendente.

Tuttavia, se ci si sposta su sabbie non standard, esiste un contrasto immediato nella qualità della colata a seconda della ricetta della sabbia utilizzata, con il miglior risultato ottenuto da uno stampo realizzato con sabbia di controllo al 100%. Il risultato, anche in questo caso, non è inaspettato dato che la miscela di sabbia silicea è ottimizzata per la stampante 3D.

Un confronto di due stampi in Fig. 15 mostra la differenza di qualità a seconda della ricetta specifica della sabbia utilizzata, in cui il campione migliore (campione 1, sabbia di controllo al 100%) è confrontato con il peggiore (campione 4, sabbia rigenerata al 100%). Il risultato non è sorprendente considerando che il campione 4 è fabbricato con sabbia rigenerata al 100%, che è soggetta a uno strato irregolare di sabbia che si deposita durante i cicli di stampa 3D.

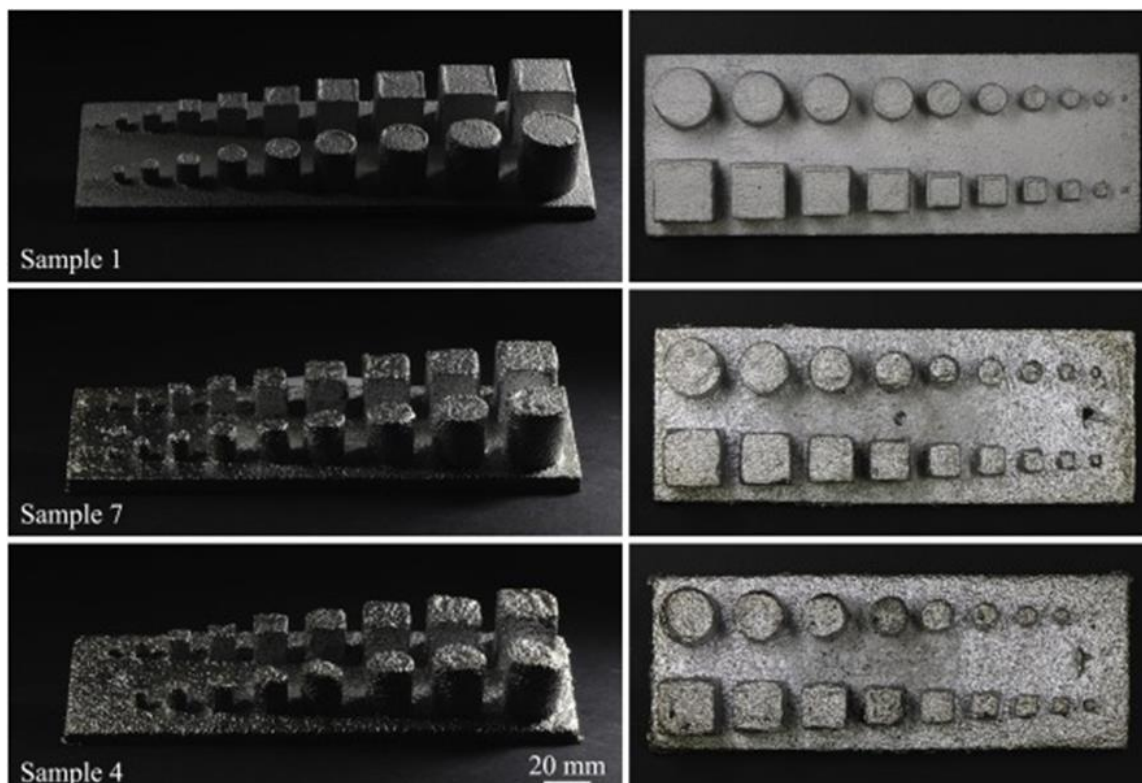


Fig.15 Collage che mostra il confronto qualitativo in base alla tipologia di sabbia

Visivamente, si deduce che la difficoltà di stampa deriva dal legante aderente degli stampi precedenti. Oltre all'osservazione visiva, sono state misurate la rugosità superficiale e i parametri geometrici al fine di determinare eventuali correlazioni tra ricette di sabbia e qualità del getto: i getti fusi da stampi stampati in 3D hanno una superficie circa due volte più ruvida dei metodi tradizionali, indipendentemente dal tipo di sabbia utilizzata.

Si è capito, quindi, che la compattazione della sabbia prima della colata, passaggio assente per gli stampi stampati in 3D e presente, invece, nel metodo tradizionale, riduce significativamente la rugosità superficiale.

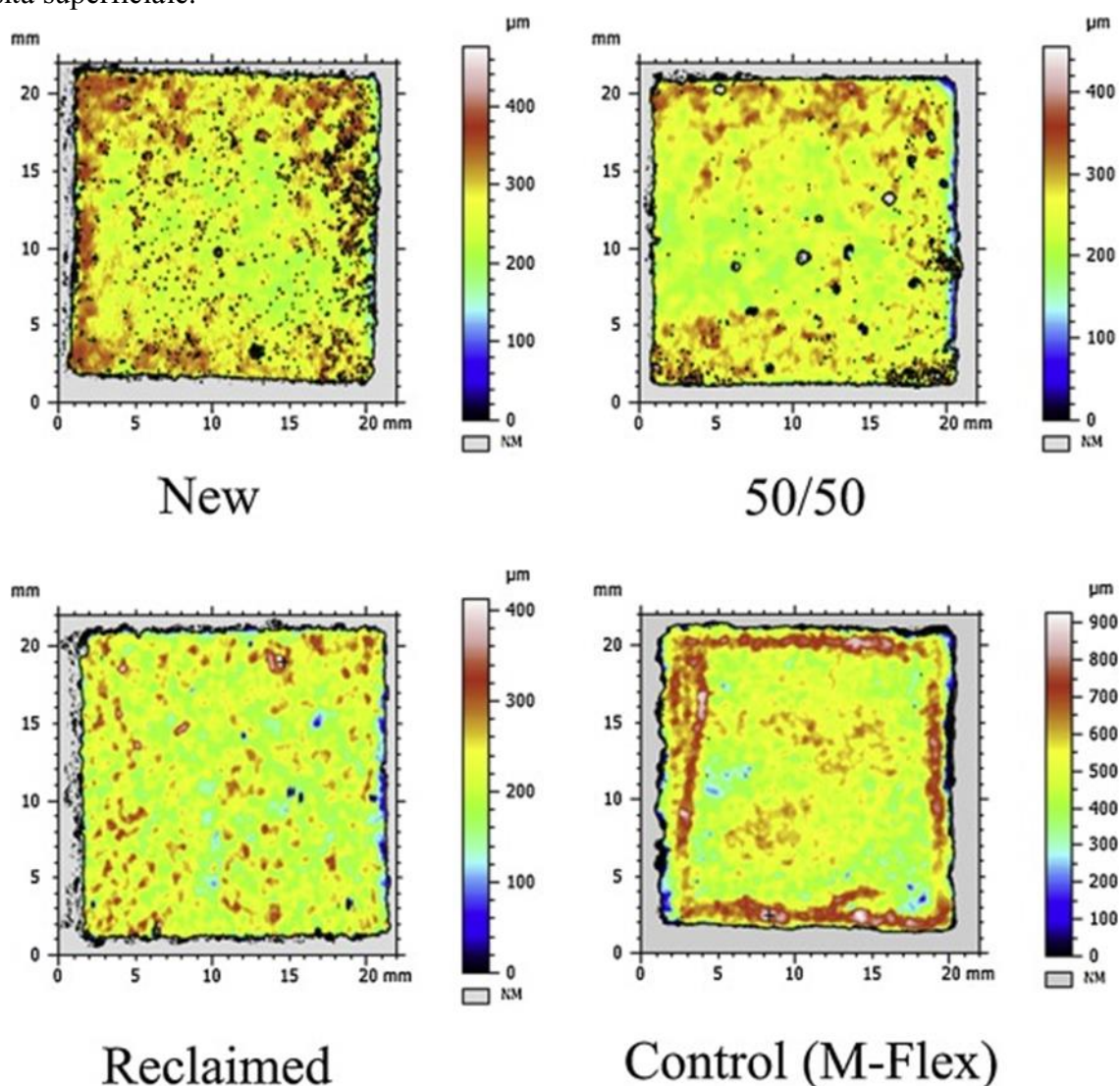


Fig. 16 Scansioni superficiali dei getti realizzati con gli stampi tradizionali contenenti sabbia nuova (pulita), bonificata al 50%, bonificata al 100% rispetto allo stampo di controllo stampato in 3D

Pertanto, sebbene sia stata riportata maggiore rugosità superficiale, l'accuratezza dimensionale è la stessa tra i getti realizzati con tecnica tradizionale e quelli stampati con 3D. Dunque, se si può tollerare un aumento della rugosità superficiale, gli stampi stampati in 3D realizzati con sabbia di controllo sono un'opzione valida.

I problemi evidenziati da tale ricerca possono essere così spiegati:

- Gli stampi stampati in 3D sono stati fabbricati utilizzando sabbia di controllo, che potrebbe non essere l'ideale per l'infrastruttura di fonderia; quindi, c'è ancora bisogno di esaminare gli effetti delle sabbie di fonderia sul processo di stampa 3D.

- Per la stampa 3D, inoltre, non esiste alcun modello che guidi la formazione della forma; la sabbia è l'unico elemento presente nella fase di stampaggio, ciò comporta uno dei principali svantaggi della stampa 3D con la sabbia: lo scivolamento del legante.

Tuttavia, questa distorsione può essere alleviata introducendo una maggiore superficie durante la stampa, che si ottiene attraverso granelli di sabbia più fini. Di fatto, lo scivolamento è ridotto al minimo attraverso la sabbia di controllo, ma peggiora sempre più quando i granelli di sabbia si ingrossano.

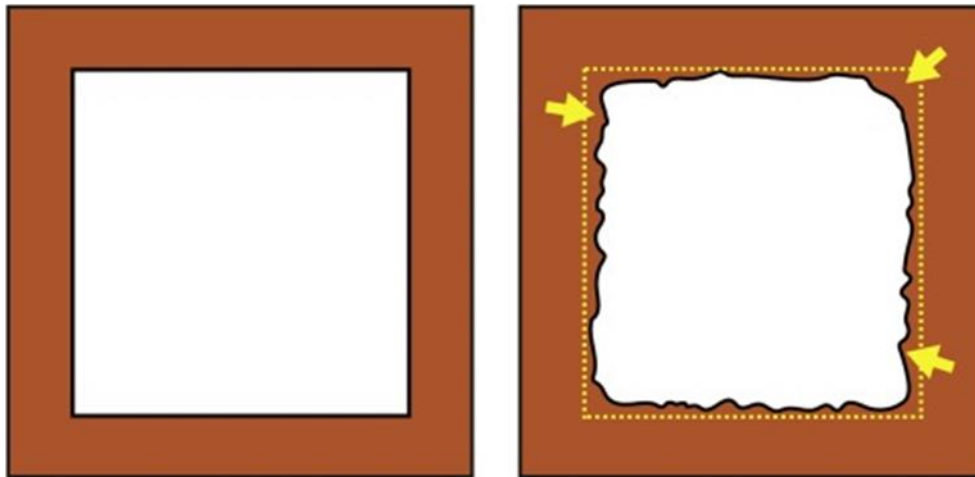


Fig.17 Un'illustrazione che mostra l'effetto dello scivolamento del legante

Pertanto, sebbene sia stato dimostrato che la tradizionale sabbia da fonderia può essere utilizzata all'interno di una stampante 3D per fabbricare direttamente stampi, la sabbia potrebbe non fluire così facilmente, portando a getti che non sono ottimali.

Inoltre, a causa del legante liquido, i bordi di ogni strato stampato potrebbero deformarsi per opera della sabbia libera presente durante la stampa.

Infine, l'assenza di compattazione attorno a un modello, nella stampa 3D, genera dimensioni non ottimali nel getto ottenuto. Tuttavia, per i pezzi decorativi in cui non sono richieste rugosità superficiale o dimensioni esatte, è immediatamente possibile l'adozione di fusione rapida utilizzando sabbia da fonderia.

Quindi, si può concludere che un ulteriore lavoro deve essere svolto per ridurre tutte le problematiche connesse allo scivolamento del legante e si è resa nota, anche, la necessità di introduzione di una fase di compattazione in situ nel processo di stampa 3D.

Entrambe le soluzioni sono attualmente in fase di studio.

5. CONCLUSIONI

Dall'analisi delle varie ricerche, emerge che la stampa 3D ha tutto il potenziale per integrare o sostituire, almeno per ora parzialmente, il metodo di fusione tradizionale, avendo un ruolo chiave non solo nell'ambito della produzione, ma anche nella linea della progettazione di prodotti, assieme e parti, quali getti, modelli, anime e stampi.

Di fatto, l'Additive Manufacturing, nel settore della fonderia, sta caratterizzandosi sempre più come tecnica all'avanguardia, riuscendo a superare problemi legati ai processi di fusione tradizionale, apportando migliorie anche da un punto di vista dei materiali usati, presentandosi come una soluzione eco-friendly ed essendo vantaggiosa in termini di tempo di produzione e gestione spazi in azienda.

L'Additive Manufacturing, dal punto di vista della costituzione del modello, permette di bypassare limiti caratterizzanti del modello realizzato, invece, con la tecnica tradizionale.

Una prima miglioria si può riscontrare nel tipo di materiale (polimerico) che la tecnica AM utilizza rispetto al materiale (in legno) del modello tradizionale. L'uso di polimeri consente di ottenere dei modelli dalle caratteristiche superficiali e dimensionali migliori, nonché più precise. Inoltre, tale materiale permette di produrre getti qualitativamente superiori per forma, superficie e in numero maggiorato. Questo si riscontra sia con modelli realizzati in ABS che PLA, tramite tecnica FDM, come si evince dagli articoli precedenti.

L'AM si caratterizza, inoltre, per essere una tecnica in grado di ridurre grandemente i tempi di produzione e consegna ma anche i costi di realizzazione del modello, in quanto permette una riduzione dello spreco di materiale, automatizzazione del lavoro di produzione del modello grazie alla non necessità di un operatore, migliore accuratezza nel particolare e di conseguenza una minor probabilità di trattamento post-produzione del modello.

Va, comunque, sottolineato che, per la realizzazione di modelli dalle geometrie semplici, e per il lavoro in una piccola e media fonderia risulta più veloce e conveniente sempre il processo tradizionale, proprio a fronte degli elevati costi legati alle macchine di stampaggio e ai materiali da utilizzare. Ciò per la piccola e media impresa si tradurrebbe in una perdita e non un guadagno anche se il tutto è a scapito dell'innovazione.

Per quanto riguarda la formazione di stampi attraverso l'AM, sono state condotte ricerche per valutare quali e quanti materiali è possibile usare in maniera efficiente per lo stampaggio.

È risultato idoneo l'utilizzo di sabbia da fonderia per la realizzazione degli stampi, pur riscontrando problemi legati alla non presenza di un processo di compattazione della forma e alla mancanza di un modello che guidi la formazione della cavità, generando così il problema dello scivolamento del legante che comporta superfici non precise.

Tali difficoltà non sono ancora state risolte appieno e sono tutt'ora in fase di studio.

D'altro canto, la realizzazione di stampi con stampa 3D consente di creare stampi cavi all'interno ma stabili grazie alla presenza di strutture reticolari, permettendo così una riduzione dei tempi di fabbricazione, un risparmio in termini di materiale utilizzato e, di conseguenza, un contenimento del peso dello stampo e dei costi di produzione.

Inoltre, si evidenzia come la creazione di una struttura reticolare nello stampo possa consentire l'introduzione di strumenti di controllo del getto fuso, all'interno della forma.

Nonostante questi importanti risultati ottenibili con tecnologia AM va tenuto presente che, ad oggi, come già evidenziato precedentemente, la tecnica richiede migliorie: la stampa 3D, attualmente, consuma molta energia per il processo di fusione del materiale e ha dei costi elevati.

Ci sono, poi, ancora tante difficoltà legate alla realizzazione con stampa 3D di prodotti di grandi dimensioni e pesanti a causa dei limiti imposti dal volume della camera della macchina di stampa e dei costi del macchinario stesso.

Tuttavia, in un futuro prossimo, con la scadenza dei brevetti dei macchinari e dei materiali, la concorrenza aumenterà sempre più, il prezzo delle macchine da stampa e dei prodotti diminuirà, aumenterà la produttività e, di conseguenza, il costo del processo calerà drasticamente, permettendo l'applicazione dello stampaggio 3D alla stragrande maggioranza dei settori del manifatturiero.

Dunque, si può affermare che l'impatto e il ruolo dell'AM nel settore della fonderia non può che aumentare: la tecnica dello stampaggio 3D sarà sempre più protagonista di tutti i processi di tale settore, snellendo tempi e costi di produzioni e lasciando libertà di espressione ai progettisti.

*Le vecchie abitudini, anche cattive, turbano meno
delle cose nuove e inconsuete.
Tuttavia, talvolta è necessario cambiare, passando
gradualmente alle cose inconsuete.*
IPPOCRATE (460 – 377 A.C.)

BIBLIOGRAFIA:

1. • Forcellese A., *Processi di fonderia*,
[https://learn.univpm.it/pluginfile.php/72739/mod_resource/content/1/FONDERIA%202018-19.pdf]
2. **Kevin J.Hodder , Richard J.Chalaturnyk** , *Bridging additive manufacturing and sand casting: Utilizing foundry sand* , in “Additive Manufacturing” Volume 8 , agosto 2019;
3. **S. Sekar,R. Veli, V. Ramesh** , Design and development of FDM pattern for sand casting process , in “International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)” Volume 8, Issue 8, August 2017;
4. **Patil, Mohan Kumar e Abhilash** , *Development of Complex Patterns: Scope and Benefits of Rapid Prototyping in Foundries* , in “International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)” Volume 1, Issue 4, April 2012;
5. **Jin-wu Kang and Qiang-xian Ma**, *The role and impact of 3D printing technologies in casting* , in “China Foundry 14 (2017) 157-168;
6. **Anakhu, P. I., Bolu, C. A., Abioye, A. A., Azeta J** , *Fused Deposition Modeling Printed Patterns for Sand Casting in a Nigerian Foundry: A Review* , in “International Journal of Applied Engineering Research” ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 7 (2018) pp. 5113-5119.

SITOGRAFIA:

<https://www.innovationpost.it/2018/09/17/tutto-quello-che-ce-da-sapere-sulladditive-manufacturing-guida/>
<http://tecnichenuove-1.hs-sites.com/scarica-fabbricazione-additiva? hstc=121487959.0faa6e2361274c5f6cce5410a6fecdf4.1569511591619.1569511591619.1569511591619.1& hssc=121487959.1.1569511591621& hsfp=1846976929>
<http://www.data.unibg.it/dati/corsi/39007/80288-L08%20Additive%20Manufacturing.pdf>
<https://www.ansys.com/products/structures/additive-manufacturing>
<http://www.confindustriasi.it/fabbrica4.0/Cap4.pdf>