Rendiconti
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
136° (2018), Vol. XLII, Parte II, Tomo I, pp. 19-33

FERDINANDO AURICCHIO* – GIANLUCA ALAIMO
ALBERTO CATTENONE – STEFANIA MARCONI
SIMONE MORGANTI

La stampa 3D: una tecnologia abilitante ed affascinante. Dalla scienza dei materiali alla modellistica, dalla chirurgia all'ingegneria civile**

Abstract – In the following paper we give a brief overview of 3D printing, known also as additive manufacturing technology. We start introducing the concept of additive production process as deposition of layer sequences and we focus on the description of the many different technologies which are often indicated as 3D printing, with a discussion of the different materials involved by the different technologies.

We then give a very short – and henceforth extremely limited – list of applications exploiting the use of additive manufacturing, highlighting the needs of a careful material mechanical investigation as well as the role of computational methods in the design and optimization of 3D printed manufacts. The paper closes with a short description of some activities ongoing at the University of Pavia.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, manufacturing, prototyping, material, mechanical behavior, computational mechanics

Riassunto – Il lavoro vuole essere una breve panoramica sulla stampa 3D, nota anche con il termine di tecnologia di manifattura additiva. Si parte dal concetto di produzione additiva intesa come deposizione sequenziale di strati di materiale, per poi focalizzarsi sulle tante diverse tecnologie che vanno sotto il nome di stampa 3D, discutendo anche le diverse classi di materiali utilizzabili nelle diverse tecnologie.

Si presenta quindi una breve – e pertanto molto limitata – lista di possibili applicazioni che traggono vantaggio dall'uso della manifattura additiva, mettendo in luce il bisogno di

* Socio dell'Accademia dei XL. Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia. E.mail: auricchio@unipv.it

** Prolusione tenutasi durante la Seconda Assemblea Annuale dei Soci, Roma 26 novembre 2018, Biblioteca dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Scuderie Vecchie di Villa Torlonia.

attente caratterizzazioni meccaniche dei materiali così come la necessità ed il ruolo dell'uso di metodi computazionali a supporto della progettazione ed ottimizzazione di manufatti stampati in 3D. Il lavoro si conclude con un breve cenno ad alcune delle attività in corso presso l'Università di Pavia.

Parole chiave: manifattura additiva, stampa 3d, manifattura, prototipazione, materiali, comportamento meccanico, meccanica computazionale

Una breve introduzione

Negli ultimi anni la *stampa 3D* è entrata sempre più a far parte del nostro quotidiano. Sebbene sia nata a metà degli anni '80, solo recentemente ha iniziato a farsi conoscere massivamente nel mondo industriale ed amatoriale. Infatti, la stampa 3D ha assunto, negli ultimi anni, un ruolo sempre più rilevante tra le tecnologie industriali emergenti, tanto da guadagnarsi, di diritto, un posto di rilievo tra le cosiddette *tecnologie abilitanti della quarta rivoluzione industriale*. Tale definizione appare particolarmente calzante se si pensa alle possibilità offerte nei più svariati campi, da quello aeronautico a quello automobilistico, da quello medicale a quello dell'ingegneria civile, solo per citarne alcuni.

Basandosi su un processo di *manifattura additiva*, la stampa 3D apre nuove prospettive realizzative, permettendo il design e la produzione di manufatti altrimenti impossibili da realizzare con tecnologie produttive standard, ovvero basate, per esempio, sull'asportazione di materiale o per iniezione. Esempi sono stampi metallici con canali di raffreddamento dalla geometria ottimizzata, scambiatori termici o miscelatori dalla forma complessa ma ad elevatissima efficienza, cerniere alleggerite, ma con un'ottima risposta meccanica, non realizzabili con le normali tecnologie di lavorazione sottrattiva; tutti prodotti caratterizzati da una notevole riduzione di tempi o dei costi di produzione, oppure da una migliore qualità del prodotto finale (Fig. 1).

Il cambio di paradigma produttivo introdotto dalla stampa 3D porta a molteplici vantaggi che emergono confrontando l'innovativo processo tecnologico additivo con quelli più tradizionali: capacità di creare uno spettro illimitato di componenti personalizzati; possibilità di produrre su larga scala manufatti complessi con investimenti di capitale a costo fisso; riduzione delle tempistiche di progettazione, processo e produzione; produzione più vicina all'utente finale, con riduzione o addirittura eliminazione del magazzino; produzione di parti di forma anche complessa con limitatissime quantità di materiale di scarto.

L'impatto della manifattura additiva sull'economia di larga scala risulta tanto più evidente se si considerano le stime di crescita che prevedono il decuplicarsi, nell'arco di un decennio, del volume di investimenti nel settore.

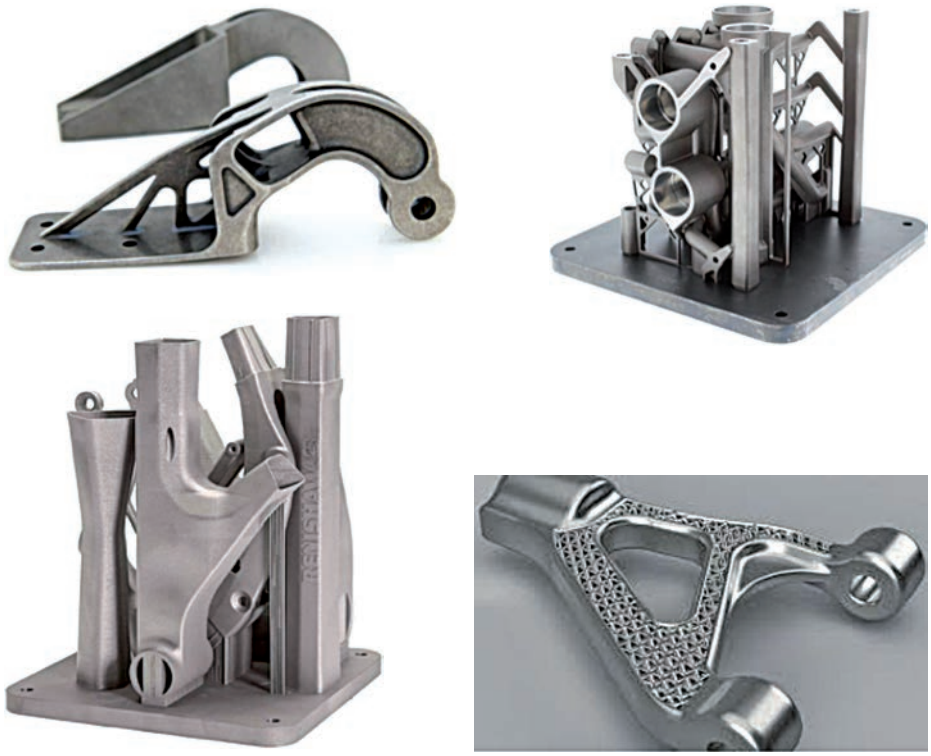


Fig. 1. Esempi di geometrie complesse che possono essere realizzate in metallo con manifattura additiva.

Il concetto di stampa strato per strato

Indipendentemente dalla specifica tecnologia additiva utilizzata, il processo di stampa 3D parte da un modello 3D virtuale che può essere ottenuto con software di modellazione geometrica, scansioni 3D, o dall'elaborazione e ricostruzione 3D di immagini mediche (quali ad esempio tomografia computerizzata – TC – o risonanza magnetica – RM) (Fig. 2.1). Il modello virtuale deve essere convertito in un formato adatto alla stampa, dove lo standard più comune è rappresentato dal formato *Standard Triangulation Language* (STL). Il passaggio successivo consiste nell'operazione di *slicing,* durante la quale l'oggetto in formato STL viene virtualmente sezionato in «fette» di spessore compatibile con le capacità realizzative della stampante utilizzata (Fig. 2.2). Infine, ogni «fetta» viene inviata alla stampante che deposita il corrispondente strato di materiale (Fig. 2.3) ed il processo continua fino alla realizzazione dell'intero prodotto (Fig. 2.4).

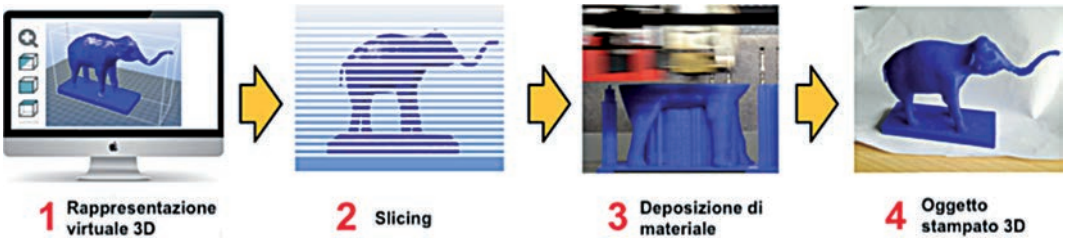


Fig. 2. Processo di stampa 3D: dal modello virtuale al modello stampato.

Le tecnologie disponibili

La Commissione ASTM F42 sulla manifattura additiva ha proposto nel 2009 la seguente classificazione distinguendo 7 tecnologie additive:

- *Vat Photo-polymerization*, basata sull'uso di un fotopolimero liquido contenuto in genere in un vasca ed in grado di reticolare (solidificare) strato dopo strato attraverso opportune sorgenti di luce (visibile, ultravioletto, fascio di elettroni, raggi gamma, o raggi X);
- *Material jetting*, basata sempre sull'uso di uno o più fotopolimeri, in questo caso depositati da una testina di stampa e reticolati per mezzo di una lampada UV. L'importante vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di depositare più resine contemporaneamente, regolando così proprietà cromatiche e meccaniche.
- *Binder jetting*, basata sull'uso di due materiali: una polvere (per esempio, gesso, plastica o metallo) ed un collante (detto *binder*). Il binder viene depositato sulla polvere solo dove richiesto, eventualmente insieme a inchiostri colorati; al termine della stampa la polvere non incollata può essere recuperata.
- *Material extrusion*, basata sull'estrusione del materiale di stampa attraverso ugelli, utilizzando azionamenti pneumatici, meccanici, a pistone, o a vite senza fine. La più comune tecnologia M*aterial Extrusion* è la cosiddetta FDM (*Fused Deposition Modeling*) che prevede l'estrusione di un filo di materiale termoplastico di diametro iniziale tipicamente pari a 1.75 o 2.85 mm, riscaldato a livello della testina di stampa. Il filamento viene agganciato da una puleggia dentata e spinto dentro la camera di riscaldamento, dove la pressione esercitata dal filo ancora solido a monte permette l'estrusione del materiale riscaldato attraverso un ugello di diametro comunemente compreso tra 0.3 e 0.8 mm.
- *Powder Bed Fusion*, basata su fusione selettiva di polveri di un materiale (generalmente metallico o plastico e talvolta ceramico) attraverso laser di alta potenza e opportuna lunghezza d'onda o attraverso un fascio di elettroni (*electron beam*).
- *Sheet lamination*, basata su laminazione e deposizione sequenziale di lastre di materiale, legate insieme attraverso varie strategie (ad esempio incollaggio, fusione);

- *Direct Energy Deposition*, basata sulla deposizione diretta di un materiale che viene fuso mentre viene depositato. L'apparato di stampa 3D è solitamente collegato a un braccio robotico multi-asse e consiste in un ugello che deposita materiale (spesso polvere metallica) e in una fonte di energia (laser, *electron beam* o arco di plasma) che lo fonde, formando, strato dopo strato, un oggetto solido.

I materiali

Le possibilità offerte dalla stampa 3D non si limitano alla sola tecnologia produttiva, ma anche alla gamma di materiali disponibili. Grazie alla stampa 3D, struttura e materiale, tradizionalmente concetti disgiunti, possono essere pensati e sviluppati come un tutt'uno. La deposizione additiva del materiale, permette, infatti, di cambiare le proprietà strutturali e funzionali dell'oggetto da realizzare variando la modalità con cui il materiale stesso è depositato strato per strato e, con alcune tecnologie, punto per punto in ogni strato.

La prima e più diffusa categoria di materiali è quella legata alla tecnologia FDM, ovvero i *polimeri termoplastici*. I due materiali più diffusi, soprattutto a livello amatoriale, sono PLA (Poli-Acido Lattico o Polilattato) e ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene).

Tuttavia, una categoria di materiali che negli ultimi anni ha attirato l'attenzione dei progettisti è quella dei tecnopolimeri, cioè materie plastiche che mostrano elevate caratteristiche di rigidezza, resistenza meccanica e all'usura, unitamente ad un basso peso. Questo elevato rapporto resistenza-peso, congiuntamente ad una loro buona lavorabilità con i metodi tradizionali, li rende particolarmente indicati nelle applicazioni speciali di piccola e media serie, come ad esempio il settore aeronautico, la produzione di stampi o ruote dentate, le competizioni automobilistiche o ancora per sostituire, in alcuni casi, leghe leggere per uso strutturale. In questa classe di materiali vanno ricordati l'ULTEM™ e il PEEK. Più recentemente, sono stati commercializzati sistemi FDM che consentono la deposizione sia della matrice in polimero termoplastico che di rinforzi caratterizzati da fibre ad alte prestazioni come carbonio, kevlar o fibre di vetro.

Tra i materiali adoperati con la tecnica FDM, meritano un cenno anche gli elastomeri, cioè materiali caratterizzati da elevata elasticità, ovvero dalla capacità di sopportare elevate deformazioni senza rottura e di recuperare le dimensioni iniziali una volta cessata la sollecitazione. Nella stampa 3D FDM sono ormai ampiamente diffusi filamenti elastomerici, rappresentati principalmente dalla famiglia dei TPU (PoliUretani Termoplastici) e dei TPE (Elastomeri TermoPlastici).

Inoltre, processi additivi basati sull'estrusione a freddo di materiale non termoplastico prevedono l'utilizzo di *malte cementizie* per applicazioni in ambito civile. Aspetti critici e determinanti per il successo della stampa 3D in questo campo sono la velocità e la pressione di estrusione così come le proprietà reologiche della malta utilizzata.

Con questa tecnologia di stampa, possono essere realizzati elementi strutturali in cemento post-armato mediante deposizione di strati di cemento, ottimizzando forma e peso, assicurando comunque adeguate prestazioni meccaniche. Gli elementi strutturali possono essere suddivisi in segmenti da stampare separatamente e poi da assemblare con un sistema di rinforzo esterno dell'armatura (Fig. 3). Questo approccio facilita la produzione di elementi curvi con sezione trasversale variabile, consentendo una nuova libertà di progettazione. Per le travi lunghe, può essere esplorato anche l'uso di cavi post-tesi per collegare segmenti di cemento ed aumentare la resistenza alla flessione.

(a) (b)

Fig. 3. Stampa 3D del calcestruzzo: (a) Processo di deposizione della malta cementizia; (b) Struttura stampata in 3D costituita da elementi di forma complessa assemblati con rinforzo esterno.

Una terza categoria di materiali è costituita dai *fotopolimeri*, impiegati nelle categorie Vat-photo-polymerization – a cui appartengono le stampanti SLA (Stereolithography) e DLP (Digital Light Processing) – e Material Jetting. I fotopolimeri sono polimeri in grado di reagire alla radiazione luminosa, generalmente appartenente alla regione UV (ultravioletta) o visibile dello spettro elettromagnetico. I processi di stampa 3D impiegano fotopolimeri allo stato liquido che subiscono una trasformazione in solido quando esposti alla luce. La metodica di reticolazione e/o deposizione varia a seconda della specifica tecnologia, ma concettualmente si basa sull'esposizione selettiva della regione di materiale di base che appartiene al singolo strato dell'oggetto che si sta generando. In linea generale, questi materiali offrono un'elevata rapidità di stampa e grande versatilità di progetto per la possibilità, grazie alla tecnologia Material Jetting, di combinare materiali diversi direttamente durante la deposizione sul piatto di stampa: in questo caso, è molto evidente la compenetrazione tra design della struttura e scelta del materiale. I fotopolimeri sono in grado di offrire un'ampia gamma di caratteristiche meccaniche, ottiche e funzionali, ma al momento il loro prezzo è significativamente più alto rispetto ai materiali comunemente utilizzati nelle stampanti a filo.

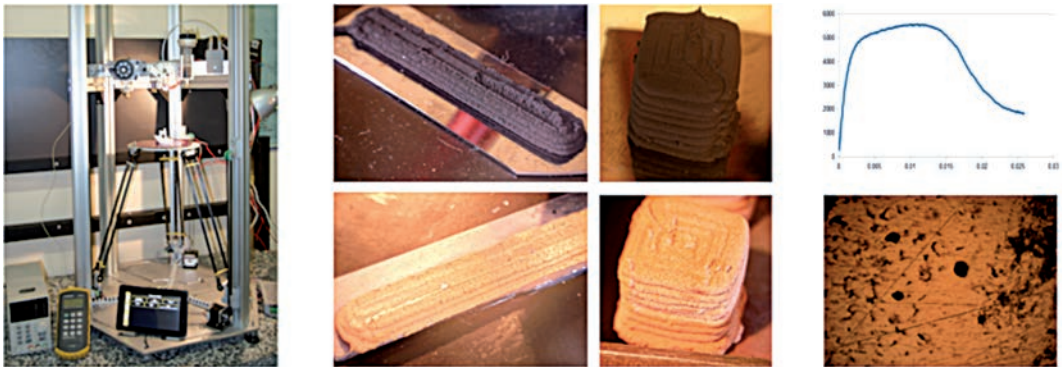
Tra i materiali presenti in commercio troviamo anche le *polveri di gesso*, che vengono impiegate in tecnologie additive Binder Jetting che utilizzano come legante collanti a base di acqua, spesso in combinazione con colorante o inchiostro.

Passando al mondo della prototipazione e produzione quasi esclusivamente industriale, troviamo le *polveri*, destinate alla lavorazione tramite SLS (Selective Laser Sintering), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) o EBM (Electron Beam Melting). Queste tecnologie operano tramite la fusione selettiva della polvere, generalmente attraverso un raggio laser,: tipicamente, la granulometria del materiale richiesta è legata alla specifica tecnologia di stampa. All'interno di questa categoria di materiali figurano sia materiali polimerici sia metallici oltre a ceramici e compositi metallici o ceramici.

Le *polveri metalliche* sono quelle più interessanti sul mercato industriale, per l'enorme ventaglio applicativo che permettono di aprire. Le polveri più comunemente utilizzate sono acciaio, acciaio inossidabile, leghe cromo-cobalto, alluminio e leghe di titanio, a cui si affiancano anche materiali preziosi come oro, platino, argento. I materiali ceramici, invece, rappresentano al momento un prodotto non ancora ampiamente presente sul mercato, ma di grande interesse dal punto di vista della ricerca e sviluppo. Materiali come zirconia, grafite, porcellana hanno fatto recentemente la loro comparsa nel panorama dei materiali disponibili, seppur prevalentemente a livello sperimentale.

Tra i materiali per la stampa 3D meritano particolare attenzione i *materiali avanzati ad alte prestazioni* (come i ceramici avanzati e i carburi cementati). La combinazione di forme complesse che possono essere realizzate con processi di manifattura additiva e materiali innovativi caratterizzati da elevatissime proprietà meccaniche, può infatti portare a ricadute di grandissimo impatto a livello applicativo e industriale. Per poter realizzare componenti con queste preziose caratteristiche risulta cruciale formulare appropriati materiali di partenza e progettare in modo molto accurato processi di sintesi specifici. A titolo esemplificativo, riportiamo in sintesi un'idea coperta da brevetto per la produzione di materiali ceramici avanzati: (i) la prima fase risiede nella formulazione di un colloide (o di un filamento, a seconda del processo tecnologico di stampa utilizzato) che abbia opportune proporzioni di materiale organico, polveri inorganiche e solventi; (ii) il materiale precursore realizzato viene quindi stampato 3D in forme anche complesse attraverso sistemi di deposizione progettati ad-hoc; (iii) a questo segue una fase di sinterizzazione del componente durante la quale il carbonio liberato dalle componenti organiche si lega alle polveri inorganiche a formare il carburo desiderato. Il processo è relativamente complesso e necessita di strumenti di simulazione che predicano i ritiri che verranno originati e «suggeriscano» quindi la forma corretta da stampare.

Con processi analoghi si sta mettendo a punto la realizzazione di componenti metallici ottenuti con processi di manifattura additiva a basso costo (Fig. 4) e che ad oggi risulta estremamente complicato produrre con altre tecnologie additive (come per esempio prodotti in rame).

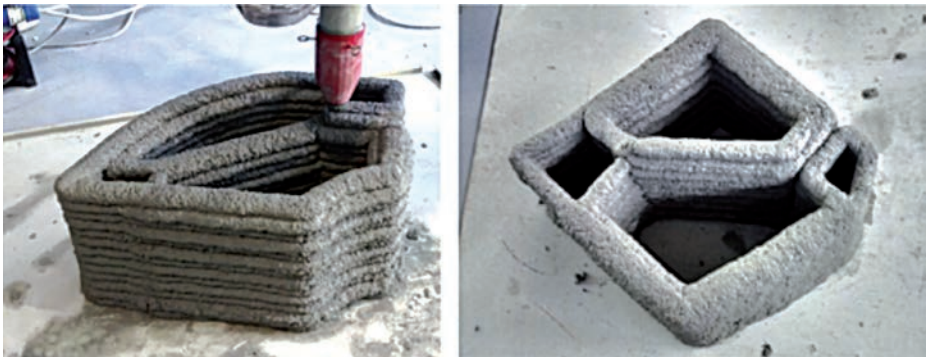


(a) (b) (c)

Fig. 4. La stampante 3D realizzata presso l'Università di Pavia per l'estrusione di colloidi viscosi opportunamente formulati (a); Campioni preliminari stampati in 3D di ossido di rame che risultano costituiti da rame puro dopo la riduzione dell'ossido (b); Caratterizzazione meccanica e microstrutturale dei campioni metallici stampati in 3D (c).

Esempi applicativi

Interessanti applicazioni della tecnologia additiva si stanno sviluppando in moltissimi settori tecnologici. Un esempio è l'industria delle costruzioni, in special modo nelle *applicazioni in calcestruzzo* (Fig. 5), con l'obiettivo di sfruttare la tecnologia per garantire nuove libertà, in termini stilistici nonché progettuali, permettendo quindi allo stesso tempo nuove proprietà estetiche e funzionali (concetto di *Freeform* strutturale). Infatti, nelle applicazioni costruttive tradizionali, i singoli elementi possiedono nella maggior parte dei casi dimensioni ben definite e difficilmente variabili: i processi produttivi, che risiedono in paradigmi di produzione standardizzati, richiedono stampi appropriati o tecnologie di sottrazione per essere creati. I processi di



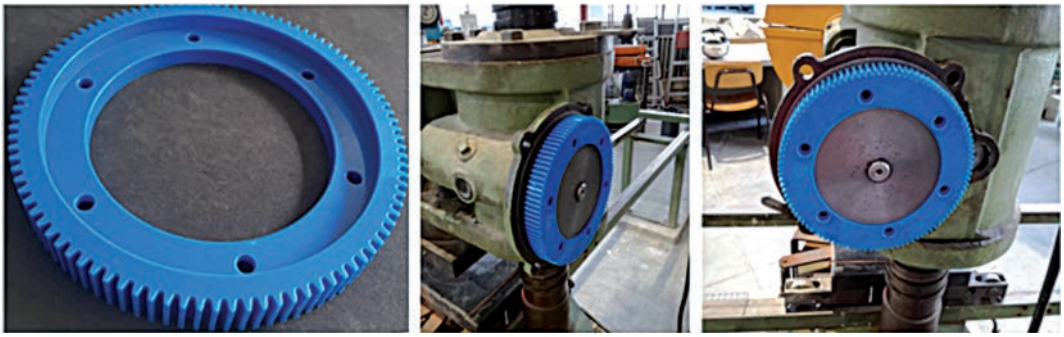
(a) (b)

Fig. 5. (a) Processo di stampa in atto e (b) un sottoprodotto cementizio.

manifattura additiva rappresentano invece la via per rivoluzionare questo paradigma, permettendo ai progettisti di sperimentare e creare elementi unici senza costi proibitivi. Altri vantaggi generati dall'automazione di questo processo sono: riduzione dei costi, maggiore sicurezza per i lavoratori, qualità e affidabilità, risparmio di materiale con un diretto impatto sulla sostenibilità.

Recentemente, la combinazione di fabbricazione digitale e di materiali cementizi innovativi ha garantito lo sviluppo di nuovi processi produttivi (ad esempio il Layered Extrusion, a sua volta suddiviso in Contour Crafting, Concrete Printing e Freeform Constructions, nonché il Binder Jetting e lo Slip-Forming).

Applicazioni della stampa 3D sono sempre più frequenti anche per la produzione di *elementi strutturali da impiegare nel settore della componentistica meccanica*. Per questo tipo di utilizzo è fondamentale la scelta del materiale più idoneo, per garantire adeguati livelli di resistenza e durata, come richiesto dalle specifiche di progetto. I componenti in leghe metalliche, come acciaio, inconel, alluminio o titanio, sono attualmente i più richiesti garantendo prestazioni uguali se non superiori a quelle dei medesimi componenti ottenuti tramite i più tradizionali processi produttivi. L'ampia scelta di materiali disponibili ed utilizzabili nell'ambito della stampa 3D consente, inoltre, la produzione di componenti meccanici anche in materie plastiche ad alte prestazioni. Questi materiali, oggetto di costante ricerca da parte dell'industria e di istituzioni universitarie, possiedono elevati valori di resistenza ad usura e possono essere impiegati anche a temperature fino a 300°C di esercizio; possono, inoltre, essere rinforzati tramite l'impiego di fibre di carbonio, Kevlar o vetro, depositate tramite appositi estrusori insieme alla matrice plastica. Questo tipo di applicazioni è sempre più richiesto, soprattutto in quei casi in cui sia difficile reperire pezzi di ricambio o quando i costi per la produzione di un singolo componente non siano convenienti o sostenibili: un esempio applicativo è mostrato in Fig. 6.



(a) (b) (c)

Fig. 6. Realizzazione di ruota dentata in sostituzione al componente originale. L'intero processo, dal disegno alla produzione del componente, ha richiesto pochi giorni. (a) Ruota dentata dopo il post-processing necessario per la rimozione del supporto. Non sono state necessarie successive lavorazioni alle macchine utensili. (b-c) Ruota dentata durante le fasi di montaggio e collaudo.

Una delle caratteristiche principali delle tecniche di manifattura additiva è l'estrema trasversalità di applicazione. Ne è un esempio l'utilizzo di questa tecnologia nell'ambito delle microonde. La stampa 3D è stata utilizzata per realizzare *guide dielettriche* con geometrie non standard, da impiegare nella realizzazione di circuiti integrati a basso costo e con perdite ridotte, in grado di lavorare con onde di lunghezza micrometrica e millimetrica. Utilizzando polvere di gesso è possibile conferire al prodotto finale una grande stabilità termica, aprendo la possibilità ad applicazioni estreme, ad esempio in ambiente criogenico, mentre con plastiche per FDM (Ninjaflex®) si possono ottenere guide dielettriche. Agendo sul parametro che regola la densità di riempimento (*infill*), è possibile controllare le proprietà dielettriche del materiale stesso. Una volta ottenuta una correlazione tra la percentuale di riempimento e le proprietà dielettriche, è possibile progettare guide per applicazioni nel campo delle microonde, in grado di aumentare la banda di frequenza utilizzabile grazie ad una combinazione di zone a densità differente. Sempre con l'utilizzo di stampanti FDM è possibile realizzare componenti in ABS, uno dei più comuni filamenti termoplastici, che possono essere successivamente metallizzati con inchiostro a base di argento.

Le potenzialità della stampa 3D possono essere sfruttate anche per applicazioni in *ambito medicale* utilizzando le immagini mediche – quali risonanza magnetica (RM) o tomografia computerizzata (TAC) – a supporto del chirurgo nella pianificazione ed esecuzione dell'intervento e per facilitare la comunicazione con il paziente.

A partire da immagini mediche è possibile realizzare *modelli tridimensionali dell'anatomia di uno specifico paziente* che vanno ad evidenziare tutte le strutture chirurgicamente rilevanti. La casistica si rivolge a qualsiasi specialità medica e ad oggi, grazie alla collaborazione con numerose strutture ospedaliere, il nostro laboratorio ha maturato una pluriennale esperienza negli ambiti della chirurgia addominale, otorinolaringoiatria e chirurgia maxillo-facciale, ortopedia e chirurgia vascolare.

I modelli deformabili possono essere utilizzati per simulazioni realistiche della procedura chirurgica in esame, quelli trasparenti sono invece utili nella scelta della tipologia e della geometria di endoprotesi e nella pianificazione del suo posizionamento. I modelli scomponibili sono ampiamente utilizzati per valutare strutture o tumori altrimenti inaccessibili, e modelli ad elevata risoluzione cromatica, per una più semplice identificazione delle strutture anatomiche di interesse (Fig. 7).

In generale, i modelli stampati 3D permettono di apprezzare al meglio le distanze anatomiche e valutare i punti di accesso più idonei. Sono, inoltre, particolarmente utili per la valutazione di casi clinici atipici e grazie ad essi il chirurgo è in grado di pianificare al meglio l'intervento, di testare e scegliere gli strumenti chirurgici e i dispositivi più idonei, riducendo così i tempi operatori e anestesiologici, garantendo quindi un migliore risultato per il paziente sia in termini di precisione nell'esecuzione dell'intervento sia di degenza post-operatoria. A tal proposito, grazie alla proficua collaborazione tra Università di Pavia e Policlinico San Matteo, è stato recentemente inaugurato un laboratorio di stampa 3D unicamente dedicato al supporto dell'attività clinica e fisicamente allocato all'interno della realtà ospedaliera (http://3d4med.eu).

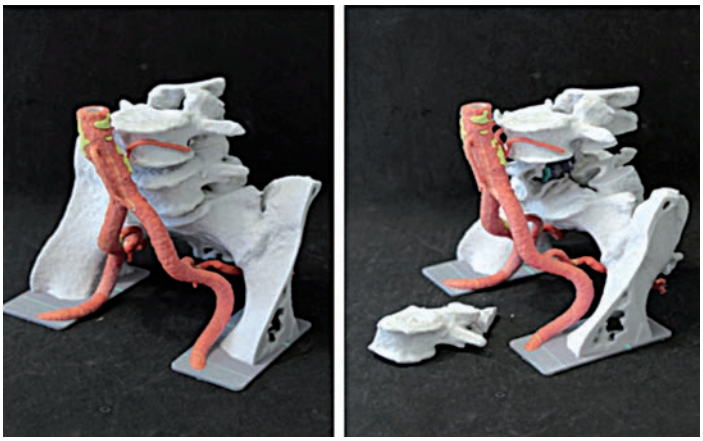


Fig. 7. Modello scomponibile per la resezione di un tumore della colonna vertebrale: miglioramento della visibilità del tumore, posizionato in un punto difficilmente accessibile.

Le potenzialità e l'elevata flessibilità della stampa 3D possono essere sfruttate anche in altri settori **socio-sanitari**, con la produzione di supporti e protesi per persone affette da **disabilità** o la creazione di dispositivi e **mappe tattili** per migliorare l'accessibilità degli edifici e degli spazi urbani a persone con disabilità visive. Il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Pavia, in collaborazione con il Museo della Tecnica Elettrica (MTE) di Pavia, ha svolto un accurato processo di ricerca che ha portato alla realizzazione di una mappa tattile del Museo, stampata 3D (Fig. 8), per fornire a persone ipovedenti tutte le informa-

Fig. 8. Mappa tattile del Museo della Tecnica Elettrica di Pavia realizzata tramite tecnologia di stampa 3D FDM.

zioni e gli strumenti necessari ad una visita esaustiva e autonoma. Tempi e costi di progettazione, processo e produzione risultano sensibilmente inferiori rispetto a quelli di sistemi di produzione standard di mappe tattili, come *embossing*, *thermoforming* o serigrafia.

Come già sopra menzionato, la stampa 3D permette la realizzazione di forme anche molto complesse, tra cui meritano particolare menzione i *meta-materiali e i materiali reticolari* (noti anche come *lattice materials*). Le peculiarità di questi materiali, per cui essi suscitano grande interesse di carattere applicativo, possono essere di duplice natura. Da un lato, le strutture reticolari possono offrire adeguate prestazioni meccaniche con uso di materiale, e conseguentemente peso, notevolmente ridotto rispetto ad analoghe strutture realizzate con metodi standard. Dall'altro lato, le singole unità costitutive (celle) che compongono la struttura reticolare possono essere progettate in modo specifico per fare in modo che la struttura nel suo insieme esibisca comportamenti meccanici particolari. Per esempio, possono essere realizzate componenti che mostrano un cosiddetto comportamento *auxetico*, ovvero che, contrariamente ai materiali tradizionali, non mostrano fenomeni di strizione quando sottoposti a trazione ma, al contrario, si allargano.

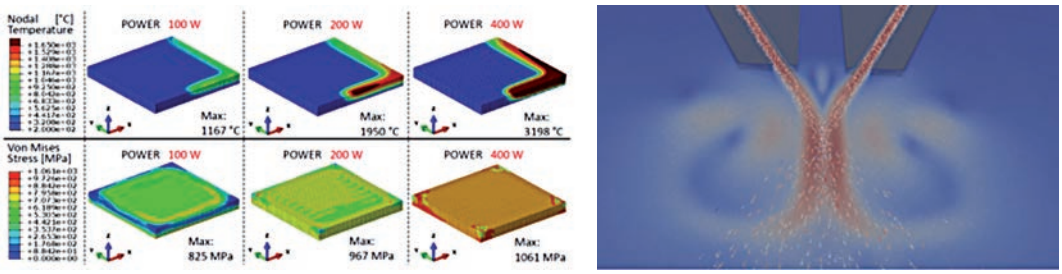
Caratterizzazione meccanica

Durante il processo di manifattura additiva un materiale di partenza (filamento termoplastico, resine fotopolimeriche, polveri metalliche…) viene utilizzato per realizzare strato dopo strato il componente desiderato. Questo apre una problematica di rilievo associata alle prestazioni meccaniche del componente stampato: le sue proprietà saranno infatti differenti dalle proprietà del puro materiale di partenza e risentiranno in modo significativo del processo stesso. Risulta quindi necessaria una caratterizzazione meccanica del componente stampato in 3D sia per la predizione del comportamento strutturale sia per l'ottimizzazione del processo ai fini di migliorare il più possibile le sue proprietà meccaniche.

Metodi computazionali per la stampa 3D (e non solo…)

Competenze di Meccanica Computazionale giocano un ruolo importante nel mondo della stampa 3D, in quanto necessarie non solo per la progettazione e validazione di dispositivi dalla forma complessa ottenuti con la stampa 3D o la cui geometria è ottimizzata grazie ai nuovi paradigmi di manifattura additiva, ma anche per la simulazione a livello micro o macro del processo additivo (Fig. 9).

Nel contesto della stampa 3D, *simulazioni numeriche* che mirano a prevedere gli stati tensionali residui e la deformazione delle parti stampate stanno attirando sempre più interessi da parte di università e industrie. Nuovi metodi numerici e tecnologie di simulazione stanno per essere messi a punto col fine di riprodurre vir-

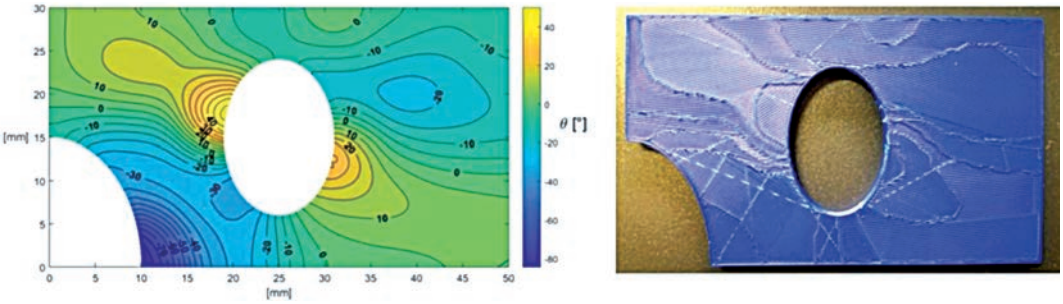


(a) (b)

Fig. 9. Simulazione di un processo di stampa 3D (a) *Powder Bed Fusion*, basata su fusione selettiva di polveri. Analisi dell'interazione del laser con uno strato di materiale; (b) *Direct Energy Deposition*, basata sulla deposizione diretta di un materiale. Analisi del flusso di polvere solida e creazione di un cono di polvere prima dell'interazione con il laser e dell'attivazione del processo di fusione e solidificazione.

tualmente (ma realisticamente) al computer il processo tecnologico di manifattura additiva.

Inoltre, la possibilità di ottenere manufatti di forma anche molto complessa ha portato allo studio e allo sviluppo di tecniche di ottimizzazione, topologica e di forma, dedicate alla stampa 3D. Tali tecniche infatti, permettono l'identificazione razionale di soluzioni progettuali ottimali, la cui definizione è resa complessa dall'elevato numero di nuove variabili e dalle numerose differenti possibilità offerte al progettista dal processo tecnologico additivo (Fig. 10). Da queste considerazioni emerge anche *la complementarietà tra stampa 3D e tecniche di ottimizzazione*, che insieme possiedono un elevato potenziale, tuttora non completamente espresso.



(a) (b)

Fig. 10. Stampa 3D di componente strutturale ottimizzato, realizzato in polimero termoplastico. La progettazione ha avuto come obiettivo la massimizzazione del carico di snervamento, agendo sull'orientamento del filamento estruso: (a) Mappa degli orientamenti ottimali del filamento, ottenuta tramite ottimizzazione topologica; (b) Prototipo del componente strutturale prodotto tramite tecnologia FDM.

La stampa 3D all'Università di Pavia

Nel 2015 l'Università degli Studi di Pavia ha scelto di investire considerevoli risorse per lo sviluppo di attività interdisciplinari in ambito stampa 3D, ambito riconosciuto, insieme ad altri quattro, come *strategico* per la crescita dell'Ateneo. Il piano strategico 3D@Unipv (http://www.unipv.it/3d/) nasce dall'esperienza maturata a partire dal 2011 sulle tecnologie additive, nelle loro diverse applicazioni, in particolare in campo medicale. L'investimento correlato al piano strategico ha promosso la realizzazione di un centro per lo studio della prototipazione rapida additiva, che risponda alla crescente domanda proveniente da vari campi applicativi del mondo industriale e medicale e che si pone come riferimento nazionale ed internazionale, non solo per lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali di stampa, ma anche come promotore di nuove applicazioni nei diversi ambiti prima citati.

Ad oggi, il laboratorio di stampa 3D Protolab, sito nel Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, può vantare un parco macchine in grado di coprire un ampio spettro di applicazioni. Sono presenti macchine FDM professionali (3NTR A4v3 e A4v2), in grado di affrontare la produzione di componenti in materiali termoplastici ad alte prestazioni. Sono anche presenti stampanti FDM di più basso profilo dedicate maggiormente alla ricerca su nuovi materiali (Leapfrog Creatr Dual Extruder e Creatr HS).

Il laboratorio è dotato anche di una stampante Binder Jetting (Projet460Plus – 3D Systems) in grado di realizzare modelli in gesso con altissima risoluzione cromatica ed una stampante Vat photo-polymerization (Form2 - Formlabs) per la stampa di un'ampia gamma di resine fotopolimeriche e utile anche per lo sviluppo ed il test di nuove formulazioni. Il parco macchine comprende anche una stampante Material Jetting (Objet 260 Connex 3) in grado di realizzare oggetti con altissima precisione (altezza del layer pari a 16μm): la stampante offre la possibilità di controllare localmente le proprietà meccaniche e cromatiche dell'oggetto, grazie alla combinazione di più resine fotopolimeriche con diverso grado di deformabilità.

Ultimamente, grazie alla collaborazione con due aziende italiane leader nel settore manifatturiero, il laboratorio si è anche dotato di una stampante metallica Renishaw AM400 (e di un centro di lavoro a tre assi), con il quale si vuole esplorare la possibilità di fornire componenti metallici avanzati per la creazione di dispositivi e componenti innovativi.

Le stampanti sono utilizzate non solo per scopi di ricerca, ma anche per fornire un servizio professionale di prototipazione ad aziende e professionisti di vari settori. Sono infatti attive anche molte collaborazioni industriali (http://www.unipv.it/3d/original-proposal/networks/companies/).

Ovviamente tutto quanto descritto è il risultato di un gruppo dinamico di ricerca e sviluppo … qui a sinistra riportato ed al quale va il nostro sentito ringraziamento!