

# Quando l'idea acquista spessore: tecnologie additive a confronto

» Giorgia Galimberti, Barbara Previtali - Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano

Le “nuove” tecnologie additive [1] stanno cambiando il mondo del manufacturing sia in termini di progettazione sia di modalità di produzione; tale rinnovamento si traduce, di fatto, nella realizzazione secondo una nuova modalità di oggetti dalle caratteristiche più svariate. Il miglioramento più evidente si è avuto grazie al superamento dei tradizionali vincoli che, per esempio, la produzione con stampi comporta; il principale vantaggio ottenuto è l'enorme flessibilità che le nuove tecnologie additive garantiscono, flessibilità da intendersi sia in termini di forme e materiali, sia in relazione alla grande varietà di pezzi differenti che è possibile realizzare contemporaneamente

**N**el seguito si affronta l'analisi delle tecniche additive emergenti, in particolare realizzate con sistemi personal o professional, ma in ogni caso di costo medio-basso per la realizzazione di prototipi e componenti sia per il settore delle costruzioni meccaniche che per quello della gioielleria.

## La terza rivoluzione industriale

Il contesto di partenza, da cui si muove l'intero studio, è caratterizzato da una grande fertilità progettuale e produttiva; tali condizioni hanno portato gli esperti a parlare di

terza rivoluzione industriale [2]. Il soggetto principale e protagonista di tale ambito è l'artigiano tecnologico, che sfruttando le capacità delle tecnologie additive, concretizza le proprie idee diventando una figura innovativa nel contesto industriale. La grande flessibilità che le tecnologie additive garantiscono, permette all'artigiano tecnologico di realizzare gli oggetti ideati in tempi ridotti e anche a casa propria; inoltre l'avvento delle piattaforme online a cui affidarsi per la vendita del prodotto, ha permesso al produttore di ampliare il proprio mercato. Tutto ciò si traduce in un'evidente trasformazione nel modo di lavorare e produrre. In tale ambito

si colloca la stampa 3D definibile come una tecnologia flessibile in grado di adattarsi ai contesti più diversificati; la sua crescente diffusione è stata accompagnata e favorita dalla concomitanza di alcuni fattori quali la riduzione delle dimensioni dei macchinari che ha permesso un più agevole acquisto e utilizzo della tecnologia, la nascita dei maker e dei FabLab e soprattutto la nascita di nuovo canale commerciale, quale la Rete come mezzo di promozione e diffusione della gamma di prodotti. In particolare la rete ha il grande pregio di velocizzare l'interazione tra utenti, limitando il problema della distanza territoriale e favorendo la nascita di comunità virtuali, che i FabLab realizzano diventando luoghi di ritrovo per le diverse figure professionali presenti sul mercato.

## Obiettivi dell'indagine e selezione dei casi di studio

Questo lavoro, sintesi di una tesi di laurea specialistica in Design and Engineering del Politecnico di Milano [3], presenta l'analisi delle qualità di prodotti ottenuti mediante alcune delle tecniche additive emergenti,



Figura 1 - Campione snodo sferico; foto complessiva dell'oggetto e ingrandimenti della testa, della canalina di lubrificazione e del filetto



Figura 2 - Campione ciondolo Moebius; foto complessiva dell'oggetto, ingrandimenti del gancio, delle guide e della superficie

in particolare realizzati con sistemi personal o professional, ma in ogni caso di costo medio-basso.

I prodotti analizzati appartengono a due classi molto diverse:

da una parte il settore delle costruzioni meccaniche, in cui prototipi e prodotti sono connotati da specifiche funzionali molto chiare e altrettanto misurabili;

dall'altra il settore del monile e del gioiello in cui le categorie di valutazione sono soprattutto legate alla forma, alla connotazione superficiale ed alle valenze estetiche.

La classe di tecnologie analizzate appartiene alle tecnologie additive che fanno uso di materiali non metallici (plastiche e gesso), di facile utilizzo e costo relativamente basso. Per la natura soprattutto dei materiali utilizzati i componenti stampati non possono venir considerati prodotti finiti ma più facilmente prototipi, che si inseriscono nel ciclo di progettazione che dall'idea porta al componente finale. E' interessante notare come l'analisi evidenzierà per ognuna delle tecnologie di stampa investigate un collocamento ottimale all'interno del ciclo di progettazione.

Il primo oggetto è uno snodo sferico (si veda la Figura 1) prettamente funzionale su cui l'interesse si è focalizzato per le caratteristiche stesse che esso possiede [4], quali la molteplicità di materiali con cui è realizzato (acciaio per il corpo e bronzo per la bronzina che deve permettere la rotazione della sfera), le finiture superficiali che lo contraddistinguono (tal quale dal processo di stam-

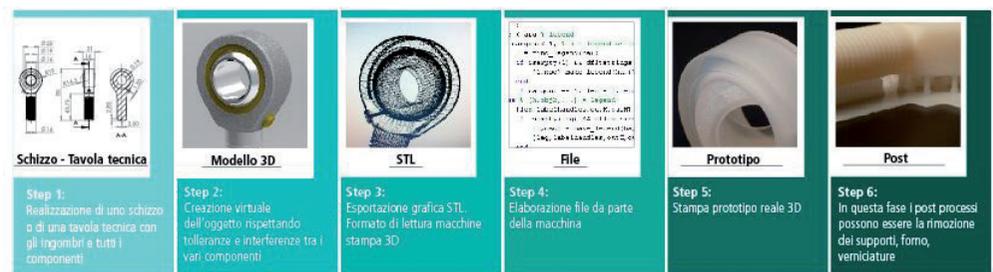


Figura 3 - Rappresentazione degli step che caratterizzano l'intero processo progettuale per le tecnologie additive, partendo dallo schizzo e arrivando all'oggetto finito

paggio, bassissima per la sfera e la sede della sfera, entrambe rettificata), i dettagli funzionali (filetto, sfera che ruota, cavità per l'adduzione del lubrificante, marcatura con il nome del produttore ASAHI e della serie JAM 16 ed estetici che lo costituiscono). I materiali con cui lo snodo viene realizzato sono acciaio e bronzo; l'acciaio presenta finiture superficiali diverse, in particolare la sfera è rettificata mentre il filetto è realizzato per asportazione di truciolo perché la prima deve garantire la rotazione del pezzo, mentre il secondo deve consentire l'accoppiamento con un dado. La testa dello snodo invece, non è lavorata e presenta solo la marcatura.

Tra sfera e testa è inoltre prevista una bronzina con un canale di lubrificazione per garantire la corretta movimentazione della sfera. La presenza dei materiali diversi risulta interessante non solo da un punto di vista meccanico, ma anche estetico poiché consente di giocare con più colori sullo stesso oggetto. Il secondo prodotto realizzato è un ciondolo caratterizzato da forme libere

ed astratte (si veda la Figura 2). In tale caso la scelta non è ricaduta su un oggetto reale già presente sul mercato, ma su un oggetto virtuale, frutto di un'idea non ancora riprodotta. Il ciondolo è stato selezionato dal sito Shapeways [5], che realizza oggetti tramite sinterizzazione laser selettiva (SLS) e costituisce un perfetto esempio di piattaforma online aperta alla vendita al pubblico. Il ciondolo riproduce l'anello di Moebius, una superficie non orientabile nello spazio; per tale ragione l'oggetto risulta particolarmente difficoltoso, se non impossibile, da realizzare con le tecnologie tradizionali di stampaggio e si presenta particolarmente interessante per il nostro studio. A differenza del caso precedente è opportuno sottolineare che il prodotto ha solo funzione decorativa e non è vincolato da necessità meccaniche; da evidenziare tuttavia la presenza di guide che hanno come unico requisito la movimentazione delle sferette contenute all'interno delle stesse.

Come evidente dalle descrizioni appena fornite, la scelta di due casi di studio così dif-

Fase	Descrizione	Tecnologia
CONCEPT	Nascita dell'idea, concretizzazione - visualizzazione dell'oggetto. E' un primo studio sulla forma e sulla funzione dell'oggetto.	Schizzo, modello in scala o reale, CAD, rendering.
FORMA	Definizione degli ingombri, rapporto tra le parti, estetica/forma, ergonomia.	FDM - Fused deposition molding FTI - Film transfer Imaging GESSO
FUNZIONE	Prototipo funzionale, utilizzato per lo studio degli accoppiamenti, per la movimentazione dei pezzi, la realizzazione di dettagli fini (es. scritte).	MJM - Multijet
OGGETTO	Oggetto reale. Dove sia la forma sia la movimentazione dei pezzi è realizzata secondo le specifiche dettate in fase di progettazione	Tecnologie tradizionali, sinterizzazione laser o stereolitografia.

Tabella 1 - Differenti fasi che caratterizzano la creazione di un progetto-prodotto, per ognuna fase sono state individuate le tecnologie più adatte allo scopo finale

esplicita un'idea passando attraverso la definizione di una forma, di una funzione e quindi alla realizzazione del progetto che viene delineato attraverso uno schizzo, allo scopo di determinare specifiche e caratteristiche che l'oggetto deve soddisfare. L'idea deve poi essere trasformata in un modello virtuale che simuli l'oggetto nella sua interezza attraverso un assemblaggio

delle diverse parti per emularne funzionalità e definire così il prodotto finale.

Per arrivare ad una effettiva realizzazione del prodotto si deve passare attraverso diverse fasi di prototipazione (Tabella 1) che permettano la realizzazione concreta dell'idea. Tutte le tecnologie e i prodotti realizzati con esse sono soggetti al processo di stampa come descritto nello schema sottostante (Figura 3).

Un primo prototipo viene realizzato allo scopo di eseguire una verifica dimensionale del dispositivo; vengono quindi stabilite le proporzioni, le dimensioni e l'ergonomia del pezzo stesso. Per tale fase sono da prediligere, tra le tecnologie analizzate, FDM (fused deposition molding), FTI (film transfer imaging) e Gesso.

La tecnologia FDM, in questa ricerca, è stata associata a una macchina makers, avente piccole dimensioni e basso costo d'acquisto, ma caratterizzata anche da un livello di dettaglio minimo; per tali ragioni l'FDM è usata principalmente per la realizzazione di piccoli oggetti e gadget. Il processo consiste nella fusione di un filo, ABS o PLA estruso, che viene depositato mediante un ugello e che muovendosi nello spazio segue le specifiche del file CAD relativo all'oggetto da realizzare. In questo caso il campione viene creato partendo dalla base e l'area di stampa si abbasserà o alzerà a seconda delle esigenze; in alcuni casi è possibile che siano presenti dei supporti, realizzati con materiale sacrificale, che in fase terminale di processo vanno eliminati. E' da notare che



Figura 5 - Campioni del ciondolo con una breve descrizione delle tecnologie utilizzate per la loro realizzazione, "campi applicativi" dei diversi prototipi

tale tecnologia è soggetta all'azione della forza di gravità che non può essere trascurata e che quindi va tenuta in considerazione poiché può incidere sulla realizzazione del campione.

La tecnologia FTI, al contrario, utilizza il materiale di partenza in forma liquida e solo durante le diverse fasi quest'ultimo viene solidificato. In questo processo, al contrario di quello precedente, sarà la base ad essere immersa nel liquido che sarà solidificato in maniera mirata attraverso una polimerizzazione a raggi UV; l'oggetto ottenuto sarà quindi capovolto.

Il sistema usato per la realizzazione di questi prototipi è un macchinario che può essere catalogato in posizione intermedia tra personal e professional.

E' importante a questo punto sottolineare che esiste una diversificazione riguardo ai macchinari che vengono suddivisi in famiglie diverse:

- ▶ personal o makers
- ▶ professional
- ▶ centri di lavoro.

Le tre categorie indicano il grado di precisione, le dimensioni della macchina, il costo, ma soprattutto le prestazioni produttive. La prima (personal o makers) è più indicata per un uso casalingo, hobbistico ed adatta alla creazione di piccoli oggetti personali, mentre la seconda è idonea per la realizzazione di prototipi; i centri di lavoro non sono stati analizzati in questo studio perché sfruttano tecnologie più complesse come SLS (sin-

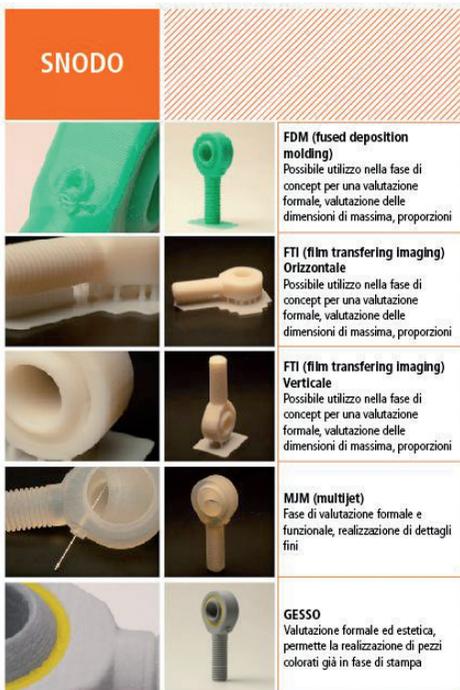


Figura 4 - Campioni dello snodo con una breve descrizione delle tecnologie utilizzate per la loro realizzazione, "campi applicativi" dei diversi prototipi

ferenti tra loro non è casuale, ma assolutamente voluta; tali differenze hanno infatti la pretesa di fornire informazioni riguardo limiti e nuovi orizzonti che le tecnologie additive comportano.

## Ciclo di progettazione di un prodotto e tecnologie additive

La nascita di un prodotto, e quindi anche quella dei due oggetti selezionati, inizia sempre con una fase di concept in cui si

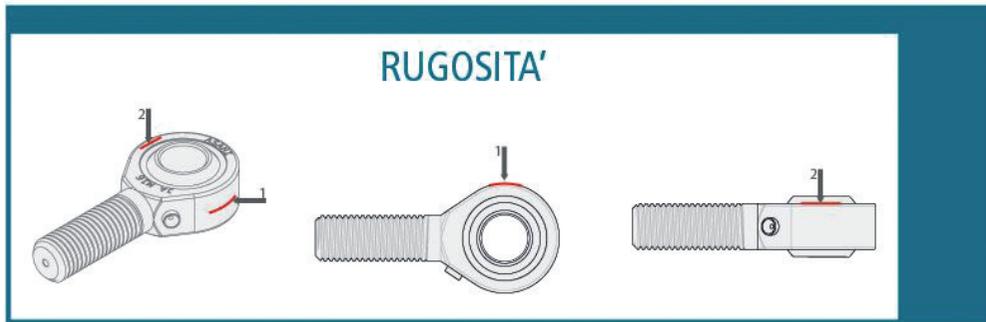


Figura 6 - Nell'immagine sono indicati i punti e le direzioni in cui è stato rilevato il profilo di rugosità dello snodo

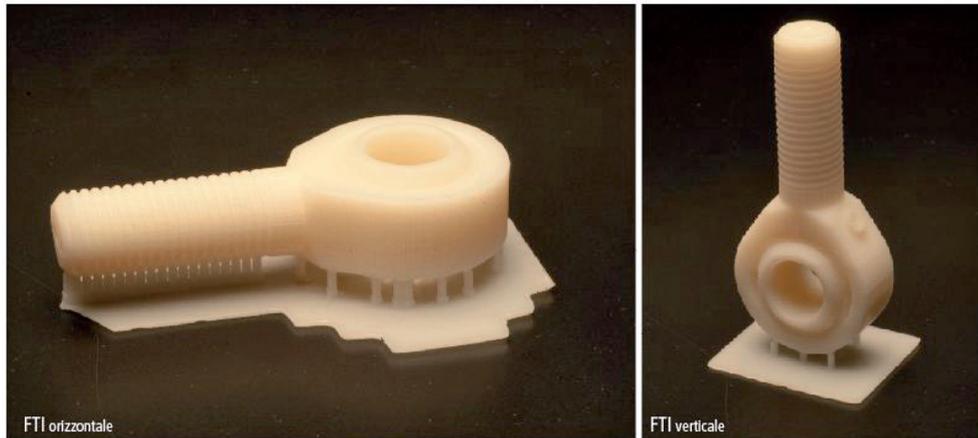


Figura 7 - Posizione dei supporti nei campioni FTI

terizzazione laser selettiva) e SLA (stereolitografia).

Tornando all'ambito del prototipo da realizzare i modelli in gesso possono essere ritenuti modelli formali o estetici. Questa tecnologia permette di ottenere prototipi colorati e formalmente corretti.

Il processo in gesso si avvicina molto all'idea di stampa a getto di inchiostro tipicamente usata per la stampa di testo su fogli. Viene steso un letto di materiale che viene colorato, e come passaggio successivo si avrà la stesura del collante che si indurrà in fase di post processo. Il vantaggio è l'ottenimento di prototipi già colorati in fase di stampa.

Per ottenere dei modelli che riproducano l'aspetto funzionale dell'oggetto si è osservato come la tecnologia MJM (multijet) permetta di ottenere attraverso la movimentazione delle parti dettagli fini e la possibilità di incidere delle scritte. La tecnologia multijet assomiglia alla tradizionale inkjet perché il materiale viene rilasciato da degli ugelli che strato dopo strato realizzano layers che sottoposti a fasi di post processo solidificano

dopo passaggio in forno; si ha quindi l'eliminazione dei supporti. Tale macchinario si può collocare nella categoria professional. Per ottenere un prodotto finito pronto per l'immissione sul mercato si deve spostare l'analisi su tecnologie più complesse come SLS e SLA che in questo percorso non sono state affrontate.

Le tecnologie additive offrono un'ampia gamma di materiali utilizzabili tra cui resine, plastiche e metalli, adatti a svariate esigenze. Il termine tecnologie additive, o additive manufacturing, indicano differenti processi produttivi che utilizzano la stratificazione (layer by layer) dei diversi materiali fino alla creazione dell'oggetto desiderato; queste tecnologie sono consigliate per piccoli lotti produttivi.

Esistono quindi molteplici tecnologie e macchinari con i quali è possibile realizzare i propri oggetti. La tecnologia ad oggi più diffusa è la stampa FDM poiché si presenta come un processo semplice e si presta ad essere applicata a macchinari di piccole dimensioni e dal costo contenuto; è quindi facilitata la sua diffusione su larga scala.

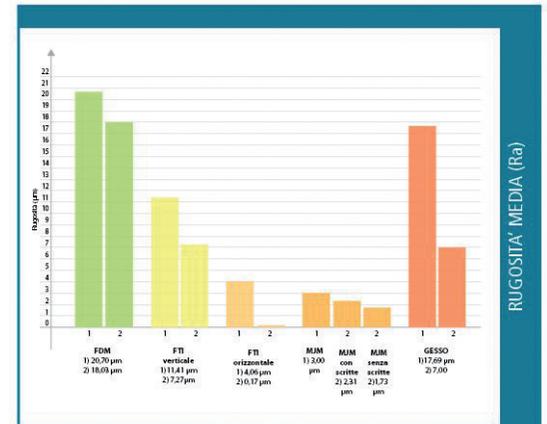


Figura 8 - Grafico relativo alla rugosità media rilevata nei punti 1 e 2 per i diversi prototipi

## Analisi dei casi di studio

Lo snodo sferico (Figura 4) ed il ciondolo (Figura 5) sono stati realizzati a partire dal disegno tecnico e dal modello CAD, come indicato nella Figura 3, rispettivamente mediante FDM, FTI, MJM, Gesso e successivamente caratterizzati in modo da confrontare le diverse tecnologie.

L'analisi quantitativa è stata condotta sul solo snodo sferico perché caratterizzato sin dall'inizio da delle specifiche funzionali a cui corrispondono altrettante grandezze misurabili. In particolare si è valutato la rugosità superficiale, il profilo del filetto e la misura del diametro della sfera.

Occorre notare che per i prototipi realizzati in gesso come la caratterizzazione dell'oggetto sia stata difficoltosa in quanto il materiale è morbido e quindi può cedere una vota a contatto con i diversi strumenti di misura. Per questo motivo i valori ottenuti possono essere soggetti ad una maggiore dispersione ed errore.

Il ciondolo, a differenza dello snodo, non è stato analizzato utilizzando i parametri precedentemente citati perché non ritenuti adatti al prodotto. Esso è stato considerato come punto di partenza per orizzonti progettuali futuri ed adatto ad indagini in campi differenti come ergonomia, forma, funzione e finitura superficiale.



Figura 9 - Macro ingrandimento delle superfici dei prototipi al variare delle tecnologie additive

## Analisi della rugosità superficiale

Una prima analisi è stata fatta partendo dalla rugosità superficiale, indagata nel punto 1 e 2 della Figura 6 con un tastatore per contatto Mahr PGK Mahr PCMESS 7024357 Perthometer Concept.

Prima di analizzare la rugosità superficiale dei diversi snodi è necessario specificare l'orientamento di stampa dei componenti. Lo snodo FDM è stato orientato perpendicolarmente rispetto all'area di stampa per riuscire a realizzare il filetto, che in altro modo, non sarebbe stato possibile riprodurre. Gli altri campioni, MJM e Gesso, sono stati orientati parallelamente all'area di stampa così da avere a contatto tutto lo snodo (testa e filetto). Tale scelta consente di sfruttare meglio l'area di lavoro e quindi risulta maggiormente produttiva sia e perchè riduce i tempi sia perchè permette un uso più efficiente del materiale stampato.

Il campione FTI è stato realizzato in due versioni che differiscono per il numero e la posizione dei supporti (Figura 7). Nel campione orizzontale, parallelo all'area di stampa, i supporti sono posizionati lungo l'intera superficie, sono perciò coinvolti sia la testa che il filetto. Con questa configurazione tutto il filetto è danneggiato perchè la rimozione dei supporti e la successiva carteggiatura ne comprometterebbero il profilo. Il caso

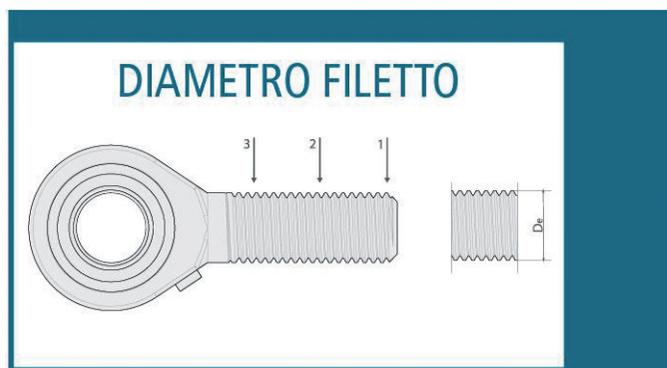


Figura 10 - Indicazione grafica dei punti di rilievo del diametro del filetto

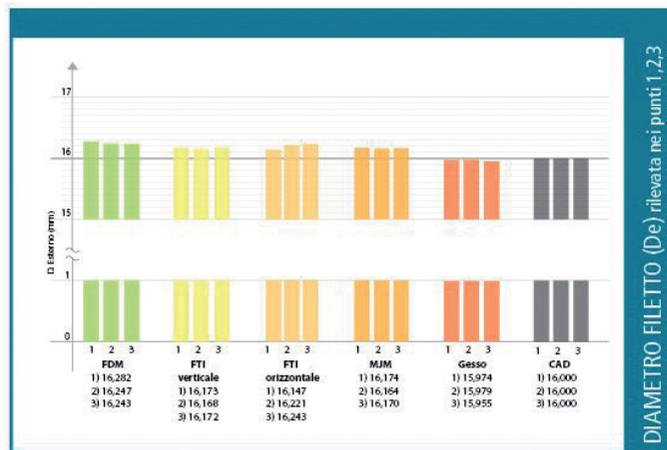


Figura 11 - Grafico relativo al diametro del filetto rilevato nei punti 1,2,3

2: il primo risulta maggiore di un ordine di grandezza rispetto al secondo, a suggerire che la misura è molto variabile e necessita

per un'analisi più accurata di numerose repliche. Nel complesso la tecnologia che garantisce buona qualità e uniformità su tutte le superfici dello snodo è la MJM, nonostante la rugosità sia maggiore rispetto al campione orizzontale in FTI.

L'unica differenza che si nota è tra la superficie dove sono state realizzate le scritte e quella opposta: attribuibile all'orientamento del pezzo nello spazio, al contatto con l'area di stampa o alla configurazione dei supporti, che incide sulla rugosità superficiale. Le diverse tecnologie inoltre caratterizzano l'aspetto dell'oggetto riproducendo una texture sullo stesso; nella Figura 9, attraverso degli ingrandimenti fotografici, si può notare come le diverse tecnologie realizzino superfici differenti, diventando una caratteristica propria conferita dalla tecnologia.

verticale è stato scelto perché non prevede la creazione di supporti sul filetto, ma solo sulla testa. Questa scelta però comporta altri problemi, come la mancanza di materiale tra la bronzina e la testa dello snodo, oltre che un errato profilo del filetto. Ogni prototipo è stato caratterizzato singolarmente ed è emerso come le diverse tecnologie producano profili di rugosità e di ondulazione differenti. In questa fase è stata rilevata la rugosità media: i risultati finali rivelano una forte dipendenza dalla spessore dei layer strutturali, diversi per ogni tecnologia. I layer che costituiscono il campione in FDM non solo determinano un particolare aspetto visivo ed estetico del pezzo, ma anche un preciso profilo di rugosità. Lo snodo sferico FDM presenta infatti la rugosità superficiale maggiore. La qualità superficiale dello snodo sferico realizzato in FTI dipende dall'orientamento del pezzo all'interno dell'area di stampa, come indicato dalle misure di Figura 8. Il campione orientato in modo orizzontale ottiene dei valori inferiori rispetto al campione verticale, inoltre, come si può osservare in Figura 8, sono presenti delle discordanze anche tra il punto 1 e il

per un'analisi più accurata di numerose repliche. Nel complesso la tecnologia che garantisce buona qualità e uniformità su tutte le superfici dello snodo è la MJM, nonostante la rugosità sia maggiore rispetto al campione orizzontale in FTI.

L'unica differenza che si nota è tra la superficie dove sono state realizzate le scritte e quella opposta: attribuibile all'orientamento del pezzo nello spazio, al contatto con l'area di stampa o alla configurazione dei supporti, che incide sulla rugosità superficiale. Le diverse tecnologie inoltre caratterizzano l'aspetto dell'oggetto riproducendo una texture sullo stesso; nella Figura 9, attraverso degli ingrandimenti fotografici, si può notare come le diverse tecnologie realizzino superfici differenti, diventando una caratteristica propria conferita dalla tecnologia.

## Analisi del filetto

L'analisi sul filetto è stata eseguita mettendo a confronto l'oggetto fisico con le specifiche tecniche desumibili dal file CAD, dove lo snodo ha un diametro nominale 16.00 mm. Inizialmente si è misurato, con la macchina per misure lineari Joint Instruments DMS

680, il diametro esterno dei filetti realizzati con i processi investigati; successivamente si è svolto un confronto di profili utilizzando una maschera del filetto M16 passo 2 con un'inclinazione di 60°.

I valori concernenti il diametro esterno del filetto sono stati rilevati in tre differenti punti (si veda la Figura 10). Tutte le tecnologie, esclusa quella a gesso, presentano valori superiori al valore nominale del file CAD e secondo il quale è stato realizzato il modello (Figura 11). Le tecnologie MJM e FTI verticale presentano valori inferiori rispetto alle altre, inoltre FTI verticale è inferiore anche rispetto alla multijet. Lo scostamento massimo misurato rimane inferiore a 0,5 mm. Probabilmente per ottenere diametri esterni del filetto corrispondenti a quelli indicati dalla norma si sarebbe dovuto introdurre un fattore correttivo nel modello 3D CAD che tenesse conto della tecnologia di stampa 3D (ad esempio per la tecnologia FDM del diametro del filo utilizzato).

## Profilo del filetto

Per quanto riguarda l'analisi della geometria del profilo del filetto, si è proceduto ad un esame visivo, utilizzando una maschera M16 passo 2 con inclinazione 60° concordemente alla normativa UNI 4536-64.

Dall'analisi della Figura 12 è sempre la tecnologia MJM che risulta più adeguata, poiché l'unica che si avvicina al profilo indicato sulla maschera, solo la cresta è leggermente abbassata rispetto al profilo reale. Il profilo che si discosta maggiormente è quello FTI verticale, che oltre a presentare un profilo errato, risente della forza di gravità come il campione FDM.

## Sfera diametro interno

L'analisi del diametro della sfera è stata eseguita mettendo a confronto l'oggetto fisico con le specifiche tecniche per la sfera, che ha un foro interno di diametro 16.00 mm per permettere la rotazione del pezzo. I componenti sono stati misurati in due punti tra loro ortogonali, secondo le indicazioni di Figura 13 mediante un ingrandimento 10x. Occorre os-

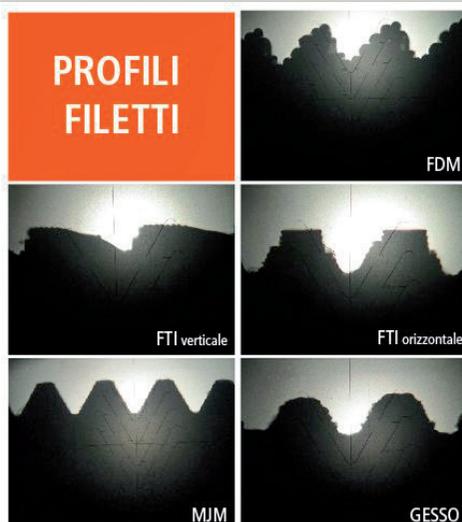


Figura 12 - Ingrandimento del profilo dei filetti per le differenti tecnologie, confrontato con la maschera M16, passo 2 ed inclinazione 60°

servare che lo snodo sferico in gesso è stato realizzato in due versioni diverse, una mantenendo le dimensioni nominali indicate dalle specifiche tecniche, la seconda cambiando le tolleranze tra la bronzina e la sfera in modo da consentire la rotazione della sfera. Questa tecnologia è condizionata dalla solidificazione dell'infiltrante e dall'impossibilità di pulire al meglio i piccoli spazi, che ha impedito nella prima versione la rotazione della sfera.

E' ora possibile procedere con un confronto tra le quattro tecnologie facendo riferimento alla movimentazione della sfera. Si nota come per le tecnologie FDM e FTI, in entrambi i campioni, la movimentazione della sfera è impedita. Entrambe le tecnologie realizzano pezzi monolitici, creando così campioni solamente formali e non funzionali. Al contrario con la tecnologia gesso e quella multijet si possono ottenere campioni dove la rotazione è consentita. La tecnologia più performante risulta la tecnologia MJM perché la movimentazione è ottenuta senza alcuna modifica alle quote dettate dalla normativa e grazie a supporti, realizzati con il materiale sacrificale tra la sferetta e la bronzina, eliminati poi in fase di post processo in forno. Anche con la tecnologia gesso è stato ottenuto un campione nel quale viene garantita la rotazione. Al contrario della tecnologia MJM, in questo campione, le quote della sferetta e della bronzina sono state modificate per consentire una pulizia più accurata, facilitando così la rimozione del materiale in eccesso che



Figura 13 - Quote interne del diametro della sfera, rilevate perpendicolarmente tra loro

avrebbe bloccato il movimento una volta inserito l'infiltrante. Dai risultati si può notare come il campione in gesso, che rispetta le quote dettate dalle specifiche della scheda tecnica, non permette in realtà la rotazione della sfera. Il campione FDM è quello che si discosta maggiormente dal valore CAD, questo perché la tecnologia è fortemente condizionata dal diametro del filo e, come abbiamo già potuto notare nel filetto, si ottiene quindi un foro di diametro inferiore (con riferimento all'istogramma verde in Figura 14). Per i campioni FTI il rilievo è stato realizzato solo per il campione FTI verticale perché in quello orizzontale il supporto ha impedito la proiezione e il relativo ingrandimento. Nel campione verticale i valori ottenuti in A e in B sono differenti e la conseguenza è un foro con un profilo ellittico e non circolare.

La tecnologia MJM è l'unica che supera il valore nominale dettato dal CAD generando un foro maggiore, dovuto probabilmente al ritiro del materiale o all'asportazione dei supporti.

## Altre considerazioni

Da un confronto tra le tecnologie analizzate è emerso che l'unica tecnologia che consente di ottenere dettagli fini è la MJM; dettagli da intendersi in termini di profilo del filetto pressoché identico al profilo reale dello snodo e pezzi che permettano la corretta movimentazione della sfera (Figura 15). Tra la sfera e la bronzina è infatti previsto uno spazio di 0,19 mm che dovrebbe consentire la rotazione del pezzo. Per la tecnologia MJM si ipotizza l'utilizzo del materiale sacrificale durante la fase di stampa; tale materiale viene poi eliminato nel successivo passaggio in forno. Un particolare su cui focalizzare l'interesse è la canalina di lubrificazione, avente un foro di diametro di 1,50 mm completamente passante (la Fi-

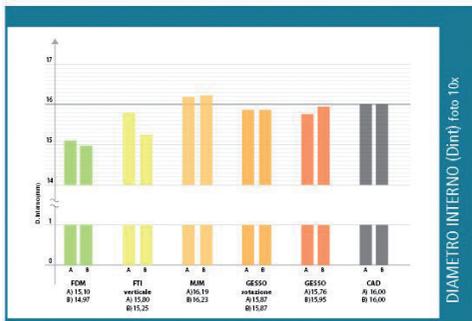


Figura 14 - Grafico dei valori rilevati per il diametro interno della sfera

gura 15 mostra come un ago lo attraversi interamente). Purtroppo non molto visibili nella foto, ma presenti sul campione, sono le scritte col nome del produttore e della serie: esse si presentano come lievi incisioni, ma sono state realizzate direttamente durante la stampa. La medesima situazione è riproposta per la bronzina, leggermente arretrata rispetto all'intero corpo dello snodo, essa però è parte integrante del pezzo e non risulta essere un componente autonomo come la sfera. Si possono fare alcune considerazioni riguardo al campione del ciondolo (Figura 16). Esso non è stato analizzato secondo le categorie identificate per lo snodo, ma si è notato come ogni tecnologia si comporti in modo differente avendo a che fare con la geometria della spirale di Moebius, ovvero una forma completamente astratta e illusoria. Questa tipologia di oggetti apre nuove possibilità progettuali, eliminando i tradizionali vincoli produttivi e introducendone di nuovi; la limitazione della forma viene così superata. Nasce da qui la necessità di una riprogettazione adeguata per le tecnologie additive. Il ciondolo FDM non è stato stampato perché è risultato una forma troppo complessa per essere realizzata con questa tecnologia; la ragione è riconducibile al tipo di stampante utilizzata che, nel caso in esame, è una personal. Il campione FTI è proposto in due versioni, che differiscono per orientamento all'interno dell'area di stampa; questa variazione spaziale evidenzia come i supporti sono diversamente posizionati nei due campioni. Con questa tecnologia si ottengono delle guide equidistanti tra loro e abbastanza rigide da poter contenere le sferette, tuttavia la movimentazione di quest'ultime è impe-



Figura 16 - A sinistra il campione del ciondolo in gesso, nel centro un dettaglio dei supporti del campione FTI e a destra il prototipo in MJM

ditata dalla presenza dei supporti che le bloccano. Per ottenere l'oggetto finito, i supporti dovranno essere eliminati in fase di post processo, sia quelli interni al ciondolo (tra le guide e le sferette), sia quelli che sorreggono l'oggetto nell'area di stampa.

Con la tecnologia gesso è possibile ottenere campioni colorati già in fase di stampa permettendo così di avere un'idea più precisa dell'oggetto reale finale. Anche per il campione in gesso sono state realizzate due versioni modificando lo spazio tra le guide e le sferette. In un campione sono state mantenute le distanze dettate dal file originale, ma lo spazio è risultato insufficiente e, quando è stato inserito l'infiltrante, l'oggetto si è solidificato diventando un unico blocco. Nell'altro campione la distanza è stata notevolmente aumentata, riuscendo così ad ottenere la movimentazione delle sferette nelle guide, ma danneggiando l'intera struttura rendendola flessibile e poco contenitiva. La tecnologia MJM permette di ottenere la movimentazione delle sferette direttamente in fase di stampa ma, questa struttura come quella in gesso, è molto flessibile e le sferette fuoriescono dalle guide.

## Conclusioni

In conclusione si può evidenziare come le tecnologie additive non siano tutte uguali e si prestino in maniera differente a realizzare prototipi per i diversi steps del processo di progettazione. Le tecnologie FDM, Gesso e FTI sono utilizzate maggiormente per valutazioni formali e dimensionali, esse però non permettono la movimentazione relativa delle parti, come nel caso della sfera dello snodo. Dai campioni FDM si nota come questi siano condizionati dal diametro del filo, utilizzato per la loro realizzazione; con i campioni in gesso invece si nota come è possibile ottenere campioni colorati direttamente in fase di stampa. Infine quelli FTI evidenziano come l'orientamento all'interno dell'area di stampa influisca sulle caratteristiche del pezzo, come ad esempio rugosità

superficiale e posizionamento dei supporti. In ultimo si osservi che la tecnologia MJM permette di ottenere prototipi funzionali con la movimentazione della sfera, dettagli accurati e un filetto adeguato.

Il secondo oggetto scelto, il ciondolo, è esempio di come queste tecnologie riescano a realizzare oggetti di difficile lavorabilità se realizzati con tecnologie produttive tradizionali. Questo prototipo mostra oltre ai vantaggi progettuali anche i possibili limiti di queste tecnologie: un esempio sono le guide risultate flessibili e perciò inadatte a contenere le sfere.

Le considerazioni fatte offrono uno spunto di riflessione progettuale sulle tecnologie additive: il designer deve riuscire ad equilibrare la spinta creativa con le possibilità tecnologiche e i loro limiti. ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la 3DZ Rapid Prototyping nella persona dell'ing. Marco Panizzoli per la realizzazione dei prototipi realizzati per questo studio e per le preziose indicazioni e suggerimenti forniti durante lo svolgimento del lavoro di tesi.

## Bibliografia

- [1] ASTM INTERNATIONAL F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies 1,2
- [2] The Economist, "The third industrial devolution" April 21st – 27th 2012 pag.15, Special Report "Manufacturing and innovation" April 21st 2012
- [3] Giorgia Galimberti, Quando l'idea acquista spessore. Tecnologie additive a confronto, Tesi di Laurea Specialistica in Design and Engineering, Politecnico di Milano, 22 Aprile 2013.
- [4] International Standard ISO 6126 Second Edition 1987-12-01, "Spherical plain bearing rod ends – Dimension series E and JK boundary dimensions and tolerance"
- [5] www.shapeways.com