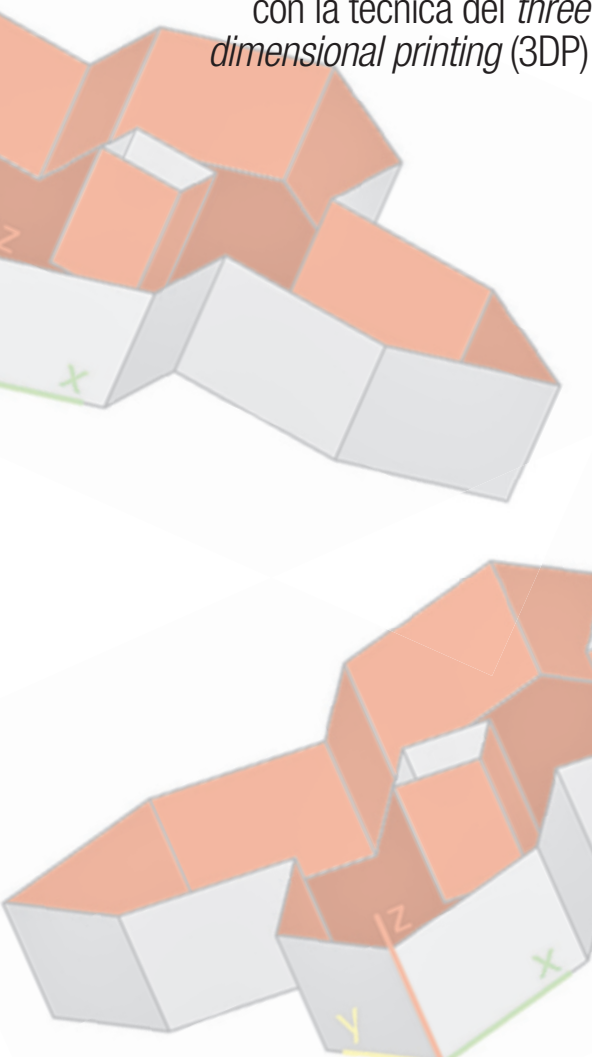


# 3DPrinting

## La polvere di ottone prende forma

Questo articolo si colloca all'interno delle attività di studio del settore della prototipazione rapida (RP) e si prefigge lo scopo di realizzare semplici componenti metallici (in particolare in ottone), con la tecnica del *three dimensional printing* (3DP)



L'articolo si colloca all'interno delle attività di studio delle tecnologie dei processi di prototipazione rapida (Rapid Prototyping RP) e descrive come sia possibile realizzare semplici componenti metallici (per la precisione in ottone) a partire da un'opportuna rappresentazione CAD del componente. A tale scopo viene descritto lo sviluppo di un'apparecchiatura semi automatica presso l'Università di Pisa che permette di realizzare l'oggetto desiderato (figura 1) con la tecnica della stampa tridimensionale Three Dimensional Printing 3DP (sviluppata per la prima volta al M.I.T. di Boston con brevetto depositato nel 1993 [2]).

In maniera analoga ad altri processi RP, la costruzione del prototipo avviene con la tecnica additiva strato su strato: il componente viene realizzato con la progressiva sovrapposizione di sezioni (slice) parallele al piano di lavoro, partendo dalla base fino ad arrivare alla sommità. Il numero delle

sezioni, dipende dall'estensione del componente lungo l'asse z (che rappresenta la direzione di costruzione) e dallo spessore di ciascuno strato (che costituisce invece un parametro specifico del singolo processo). Lo standard comune (figura 2), solitamente impiegato per la rappresentazione del componente, è il formato .STL (solid to layer), introdotto dalla ditta americana 3D System, fornitrice di macchinari per la stereolitografia, che consiste nella rappresentazione delle superfici interna ed esterna del pezzo con faccette triangolari (vedi anche figura 9). Il sistema RP, sulla base delle informazioni contenute nel file .STL, ricava (mediante operazione di slicing) la geometria di ogni sezione che concorre alla definizione del modello finale.

Le diverse tecniche di prototipazione differiscono sullo specifico processo chimico-fisico che porta alla formazione di ogni sezione (freccia rossa in figura 2) e sul tipo di materiale impiegato per la costruzione del manufatto: nello specifico la scelta

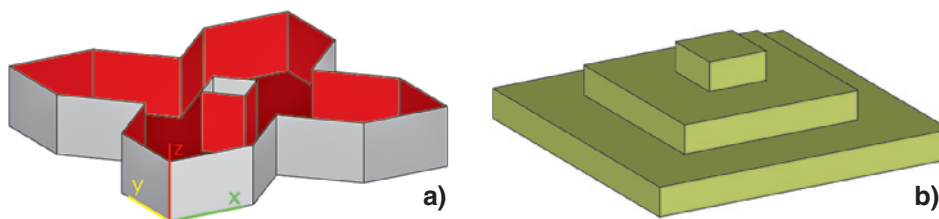


Fig. 1 – Provini per il 3DP: particolare di una sezione (a) ed una piramide (b)

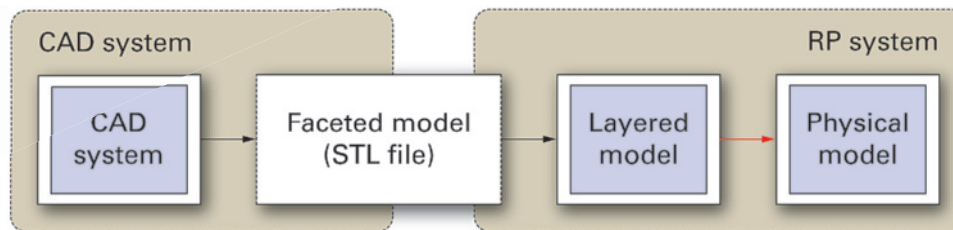


Fig. 2 – L'input del sistema RP: il file .STL

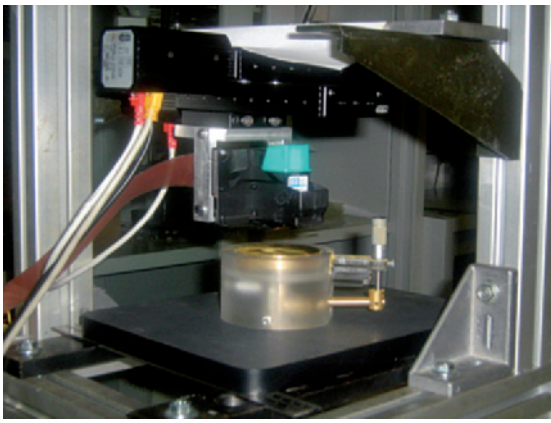


Fig. 3 – Postazione di lavoro 3DP

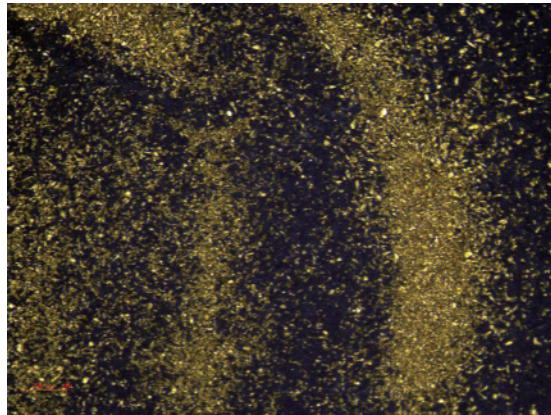


Fig. 4 – Polvere di ottone (CuZn)

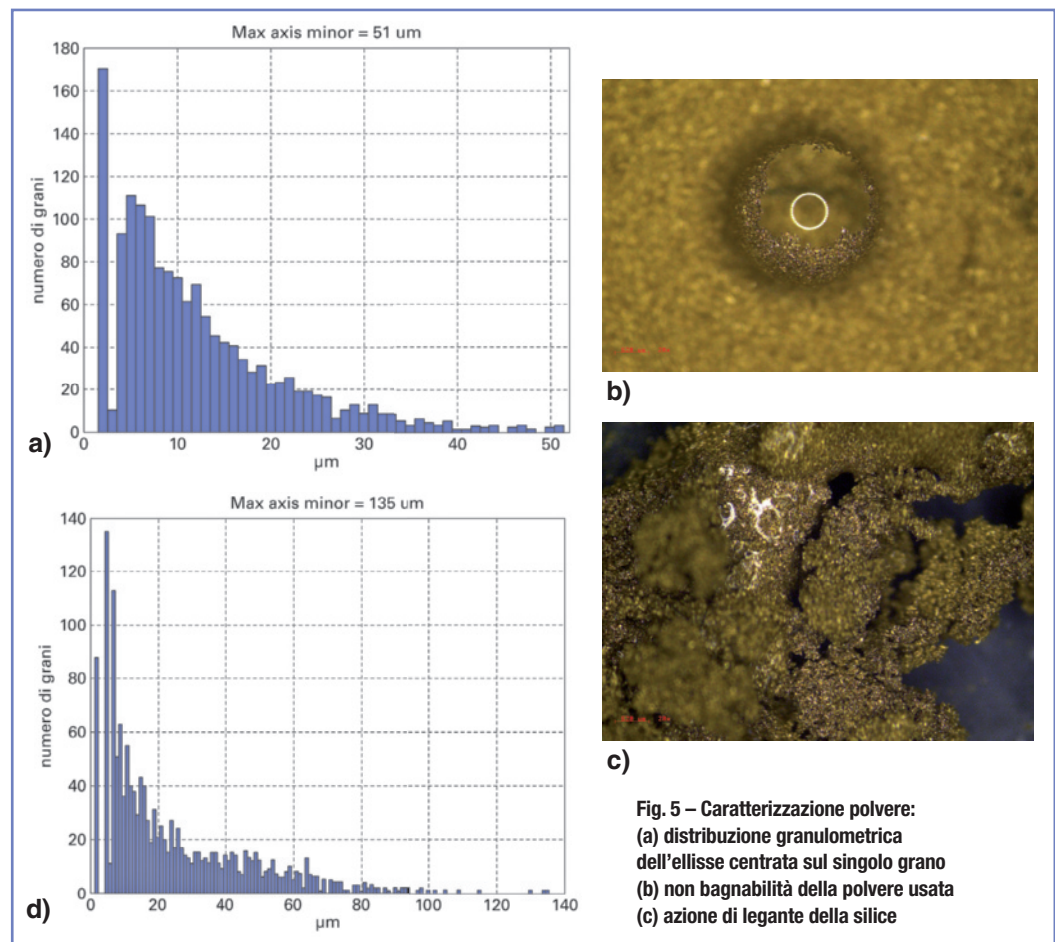


Fig. 5 – Caratterizzazione polvere:  
 (a) distribuzione granulometrica dell'ellisse centrata sul singolo grano  
 (b) non bagnabilità della polvere usata  
 (c) azione di legante della silice

della materia prima (generalmente solido, liquido, polvere) dipende dalla destinazione finale del modello (si distinguono prototipi concettuali, funzionali, tecnici, per la pre-serie produttiva), si ripercuote sulle proprietà finali del medesimo (densità, rugosità superficiale, stabilità, caratteristiche meccaniche) ed indirizza l'utente nella selezione del processo RP appropriato. Non tutte le tecniche RP consentono di produrre manufatti in materiale definitivo (solitamente leghe metalliche): punto di forza dell'approccio 3DP è l'opportunità di produrre manufatti di qualsiasi materiale purché lo stesso sia disponibile sotto forma di polvere. Utilizzando ad esempio polveri metalliche è possibile ottenere, con buona % sul volume finale [4], prototipi in metallo.

### Il sistema sviluppato

Come noto ([1] e [2]) la tecnica del Three Dimensional Printing permette di agglomerare polveri solide, opportunamente stese

sull'area di lavoro, per mezzo di un liquido legante, selettivamente spruzzato da un ugello di una comune cartuccia a getto di inchiostro (inkjet). Il capitolo esplora ciascuna delle aree tematiche che concorrono alla definizione del processo di stampa: in particolare vengono presentate le componenti hardware (2.2 Il controllo dell'ugello di stampa e 2.3 Le guide ed il dispositivo con micrometro) software (2.5 L'interfaccia di controllo) del sistema sviluppato (figura 3) che consente di produrre semplici componenti in ottone (2.1 I materiali) a partire da un'opportuna rappresentazione .STL (2.4).

### I materiali

Il processo chimico-fisico che porta alla costruzione di ogni sezione del prototipo con la tecnica della stampa tridimensionale dipende essenzialmente dalle caratteristiche della polvere e dal tipo di liquido legante (la colla) iniettato all'interno della cartuccia di stampa.

### La polvere di ottone

La selezione della polvere (tipo di metallo, granulometria, forma) rappresenta il punto di partenza del processo di stampa che influenza lo spessore minimo dello strato, la rugosità della superficie, la facilità di stesura della stessa sull'area di lavoro. La scelta dell'ottone (lega principalmente binaria formata da rame e zinco) deriva dall'iniziale specifica di produrre manufatti inerenti al settore della bigiotteria (in realtà niente vieta di prendere in considerazione materiali diversi come ad esempio alluminio [5] od acciaio [1]). La polvere impiegata nelle prove (gentilmente concessa in omaggio dalla ditta Intermetal srl di Milano, prodotta da ECKA Granulate) si presenta come fine truciolato con dimensione dei grani (dal datasheet del produttore) inferiore ai 45 μm (figura 4 obiettivo 40x). In realtà al di sotto della soglia coesistono trucioli di dimensioni completamente diverse con una certa prevalenza di grani di piccole dimensioni e una minoranza di grani allungati che possono raggiungere un'estensione superiore anche ai 100 μm (figura 5a).

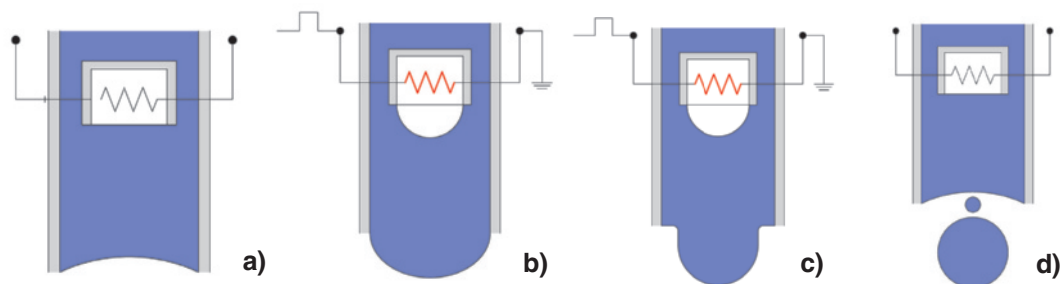


Fig. 6 – L’ugello inkjet termico: (a) condizione di riposo (b,c) produzione della gocciolina (d) espulsione dall’orifizio

*Il liquido legante*

Il passo successivo del processo 3DP consiste nella scelta di un opportuno liquido legante. Tra le numerose possibili opzioni [4], il presente lavoro ha coinvolto l’impiego di silice colloidale in glicole etilenico (tabella 1), prodotta dalla Nissan Chemical Industries Ltd., già impiegata in esperienze precedenti [3] ed il cui corretto funzionamento risulta comprovato dai test preliminari alle stampe con la cartuccia (figura 5c, 20x). La colla viene diluita (con rapporto 1:1) in acqua distillata per ridurne la viscosità ed aumentare la capacità di diffusione nel letto di polvere. I problemi legati all’utilizzo del liquido legante sono la mancanza di bagnabilità della polvere usata (dovuta alla formazione nel tempo di uno strato di ossido, figura 5b, 20x), che limita la possibilità di riciclo della stessa nelle prove di stampa, e soprattutto l’occlusione dei piccoli orifizi, dovuta alle particelle sospese di silice, nell’arco di poche ore dall’iniezione con siringa. Per aumentare la durata utile di impiego della cartuccia, al termine di ogni esperienza, risulta conveniente lasciare a molle gli ugelli in glicole etilenico.

**Il controllo dell’ugello di stampa**

La cartuccia HP 51626A, largamente impiegata nel presente lavoro, dispone di 52 orifizi dal diametro medio di 60 µm da cui viene espulsa la gocciolina secondo il principio della stampa a getto termico di inchiostro (o stampa a caldo). Il segnale che consente di attivare l’ugello di stampa è un semplice impulso elettrico (14 V, durata 2 µs [3]) che ripetuto nel tempo, origina un’onda quadra la cui frequenza determina il numero delle goccioline prodotte.

In condizione di riposo la tensione superficiale contrasta la forza di gravità ed impedisce all’inchiostro di fuoriuscire dal piccolo orifizio (figura 6a), al momento dell’accensione la corrente che circola nel calorifero (una resistenza di 32 Ω) scalda repentinamente il liquido formando una bolla che forza lo stesso a fuoriuscire dall’orifizio (figura 6b e figura 6c). Quando la corrente cessa, la bolla esplosce e la gocciolina può staccarsi dal canale eventualmente accompagnata da altre di dimensioni inferiori (satelliti, figura 6d). Il volume

di ciascuna gocciolina (rilevato mediante acquisizione con fotocamera ad alta velocità e riscontrato con misurazioni con bilancia elettronica) risulta di circa 90 pl. La velocità delle goccioline dipende invece fortemente dalla frequenza di lavoro [1] e si assesta per un segnale a 400 Hz sui 5.8 cm/s. Un semplice circuito con microcontrollore (inserito su una scheda della Microchip figura 7) permette di impostare sia la frequenza (nell’intervallo di 10 – 100 Hz in modo da produrre un numero di goccioline gestibile all’interno del processo di stampa) sia la durata (range di interesse 1-35 µs) dell’onda quadra con cui pilotare il calorifero. Il PIC 16F690 è inoltre programmato per accendere o spegnere l’ugello selezionato in base al comando ricevuto, tramite RS-232, dall’interfaccia di controllo Visual Basic (figura 12).

**Le guide ed il dispositivo con micrometro**

La movimentazione della cartuccia HP nel piano di lavoro (quadrato di lato 50 mm) viene permessa con l’attivazione di due guide motorizzate Micos VT-80 fissate ad una struttura di sostegno composta da una lastra in alluminio e da profilati Bosch (figura 3). Un dispositivo meccanico con micrometro manuale (con risoluzione del centesimo di millimetro) accoglie progressivamente i diversi strati (layer) del componente durante il processo di stampa (vedi anche figura 15b). Prima della realizzazione di ogni sezione la polvere di ottone viene depositata sull’area di lavoro e stesa manualmente con una lama avendo

**Tabella 1 - Proprietà del liquido legante (colla)**

Proprietà della colla	voce/valore
nome chimico	silice colloidale in glicole etilenico
formula chimica	(SiO <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> CH <sub>2</sub> OHCH <sub>2</sub> OH
composizione (%)	silice 20-21% glicole 80-79%

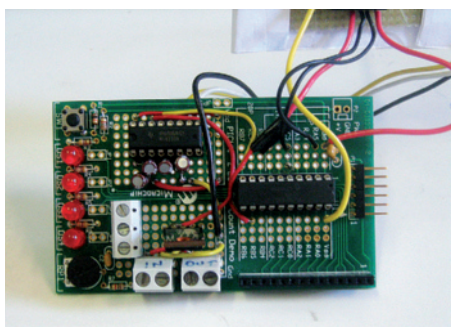


Fig. 7 – Circuito con PIC 16F690

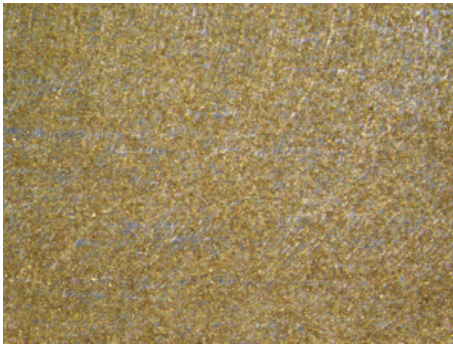


Fig. 8 – Stesura cava 50 µm

cura di ridurre al minimo il grado di vuoto nella copertura della superficie: evidentemente, un grado di vuoto elevato (ad esempio come in figura 8, 20x), comporterebbe una notevole fragilità della strato stampato una volta depositato il collante. Prove preliminari di stesura hanno permesso di quantificare il minimo spessore (100 µm) sotto il quale non è più possibile stratificare in modo corretto la polvere di ottone. Una volta terminata la stampa dello strato corrente il piano di lavoro opportunamente abbassato e nuova polvere può essere stesa e stampata sull'area di lavoro. Il processo procede iterativamente layer by layer fino al completamento della parte.

### Scomposizione del modello CAD

Il software Magics, prodotto dalla ditta belga Materialise, rappresenta l'applicativo di riferimento basato sul formato .STL per i processi di prototipazione rapida (figura 2) anche se questo formato di output è disponibile in tutti i più comuni pacchetti CAD. Le forme utilizzate nei test sono semplici oggetti 3D creati con gli strumenti Create Object e Boolean: a ciascuna corrisponde una rappresentazione .STL, ad esempio il puzzle in primo piano in figura 9 è descritto da ben 946 triangoli (o faccette). A partire dal file CAD, previa specifica dello spessore, si esegue lo slicing (scomposizione in strati) e si rappresenta la geometria di ogni sezione con un insieme ordinato di coppie di punti raccolti in un file di testo con estensione .SSL (figura 12, riquadro rosso centrale) che costituisce l'input per l'interfaccia di controllo descritto di seguito.

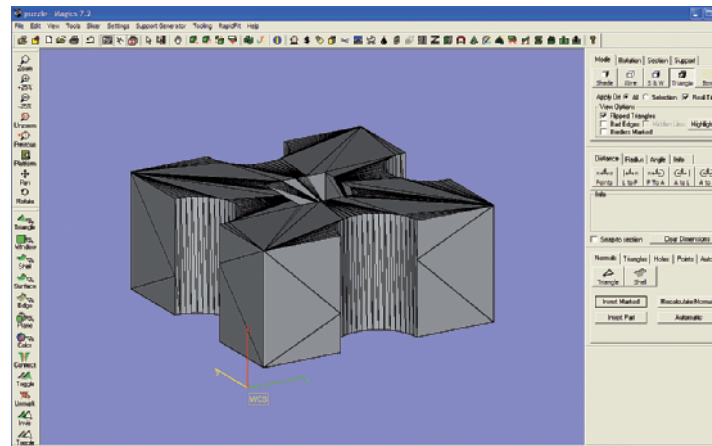


Fig. 9 – Interfaccia del sistema CAD

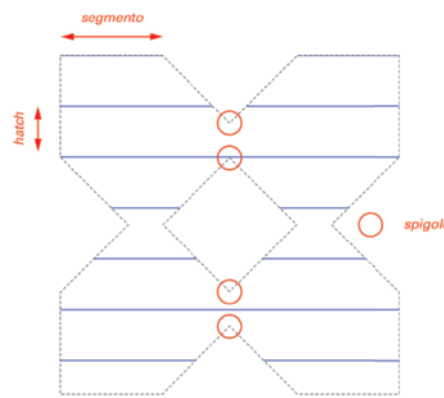


Fig. 10 – Scansione raster



Fig. 11 – Layered model

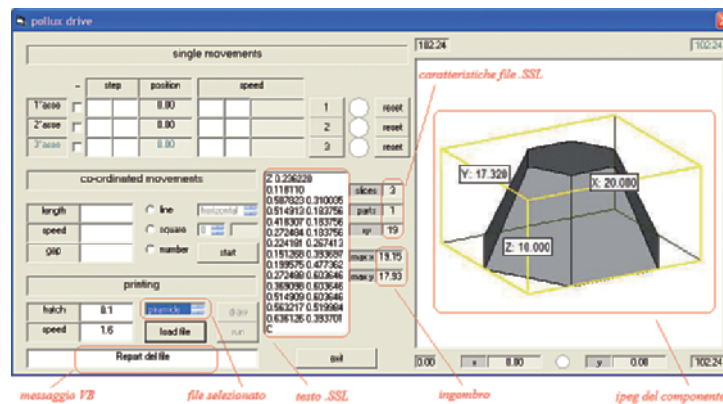


Fig. 12 – Attivazione del pulsante load file

### L'interfaccia di controllo

L'applicativo, sviluppato in Visual Basic 6.0, permette di stampare la generica sezione del componente 3D prescelto. L'interfaccia utente risulta divisa in 2 macro-aree: la plancia lato comandi (a sinistra), ove sono impostabili i parametri per la movimen-

tazione delle guide ed il controllo del processo di stampa, ed il display (a destra) che visualizza con puntatore la posizione corrente, riporta con effetti grafici le traiettorie percorse nel piano cartesiano (linea, numero, greca), e presenta il jpeg del componente selezionato (esportato da CAD) nel

caso di attivazione del processo di stampa (la piramide a base esagonale in figura 12). La generica sezione (figura 10) viene rappresentata con una successione di linee parallele equidistanti lo stesso valore, hatch, impostato dall'utente sulla plancia di controllo, insieme alla velocità di scansione della linea (ad esempio sempre in figura 12 hatch = 0.1 mm, speed = 1.6 mm/s). Il codice elabora il file di testo relativo al componente selezionato (pulsante load file), visualizza sul display il modello a strati ricostruito (pulsante draw, figura 11) e coordina opportunamente gli spostamenti delle guide motorizzate con il controllo dell'attivazione dell'ugello di stampa (pulsante run) in modo da realizzare la geometria richiesta. In particolare la velocità di scansione della linea determina, insieme alla frequenza di lavoro, la distanza media (gap) delle goccioline spruzzate.

### I risultati del processo di stampa

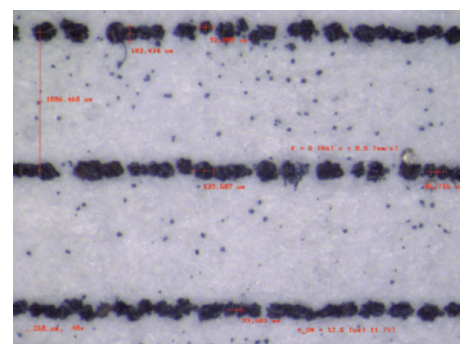
La stampa con inchiostro rappresenta lo step preliminare per la caratterizzazione della testina inkjet indispensabile (alla luce dell'occlusione dei piccoli orifizi) per le successive esperienze con il liquido legante.

### Stampe con inchiostro

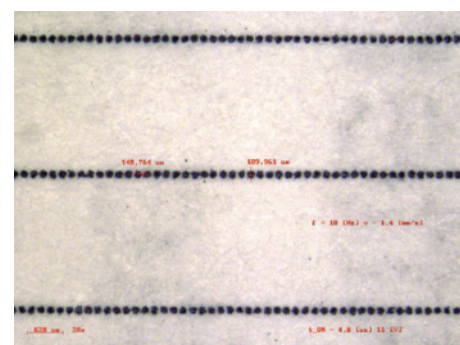
La corretta formazione della gocciolina di inchiostro e l'espulsione della stessa dall'ugello della testina inkjet dipendono dal valore della corrente e dalla durata del piccolo lasso di tempo durante il quale il calorifero risulta sollecitato dall'impulso elettrico. Se la corrente risulta troppo elevata oppure il calorifero risulta sottoposto ad una corrente seppur moderata ma per un periodo temporale eccessivo, il comportamento

dell'ugello si scosta da quello ideale, le linee prodotte presentano satelliti più marcati, andamenti diversi all'interno della stessa sezione, goccioline differenti all'interno della stessa linea (figura 13a). Le prove sperimentali evidenziano la possibilità di attivare l'ugello di stampa con impulsi di tensione di 11 V (maggior margine di sicurezza rispetto alla soglia di 17 V [3] da non oltrepassare per non incorrere nel rischio di bruciare la piccola resistenza e di dover sostituire l'ugello) e durata di 4.8  $\mu$ s (con produzione di goccioline regolari di diametro, sul foglio di carta, di circa 100-100  $\mu$ m, con piccoli satelliti, perfettamente equidistanziate, 140  $\mu$ m nell'esempio di figura 13b). I test rivelano inoltre come non sia possibile impostare in modo arbitrario la frequenza dell'onda quadra in quanto essa incide sul transitorio iniziale di accensione dell'ugello (figura 13c).

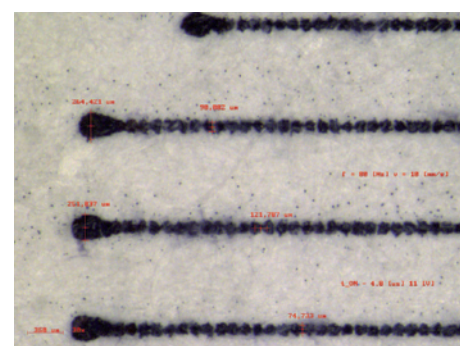
Il fenomeno risulta paragonabile all'apertura di un comune rubinetto idraulico: se la pressione del liquido è troppo elevata si verifica un getto iniziale improvviso maggiore del flusso in condizioni di regime. Risulta dunque opportuno limitare la frequenza di lavoro nell'intervallo di 10 – 20 Hz il che comporta maggiori tempi di scansione della superficie. Le prove su una superficie non assorbente permettono infine di apprezzare la scarsa bagnabilità del metallo e la distanza minima (160  $\mu$ m) sotto la quale non è più possibile ravvicinare le goccioline (nell'esempio di figura 13d le goccioline immediatamente vicine formano gruppi distinti, che non riescono ad interagire con i gruppi contigui precludendo la possibilità della stampa di una linea continua sulla superficie di metallo).



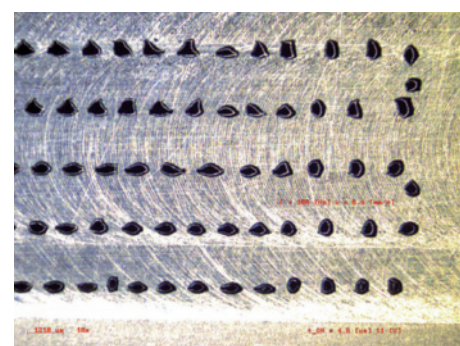
a)



b)

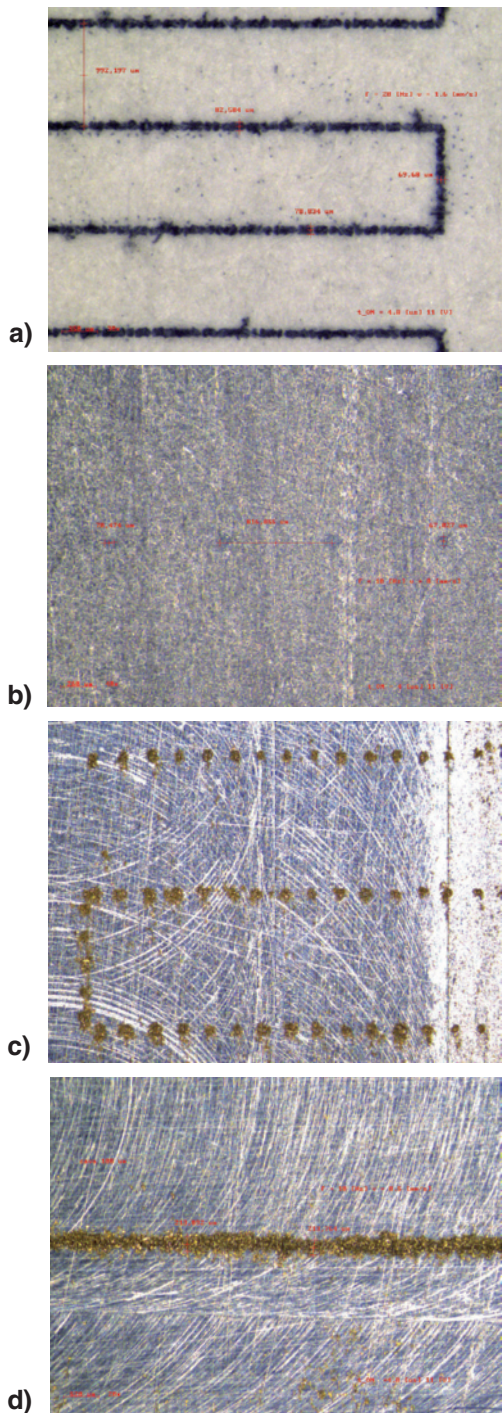


c)



d)

Fig. 13 – Printing con inchiostro con impulso di 11 V: (a) goccioline di forma diversa con satelliti marcati, (b) regolari, (c) transitorio di accensione, (d) interazione con l'alluminio



**Fig. 14 – Risultati preliminari del processo di stampa con il liquido legante:**  
**(a) stampa su carta (b) stampa su alluminio**  
**(c) punti isolati (d) linea continua**

### Stampe con liquido legante

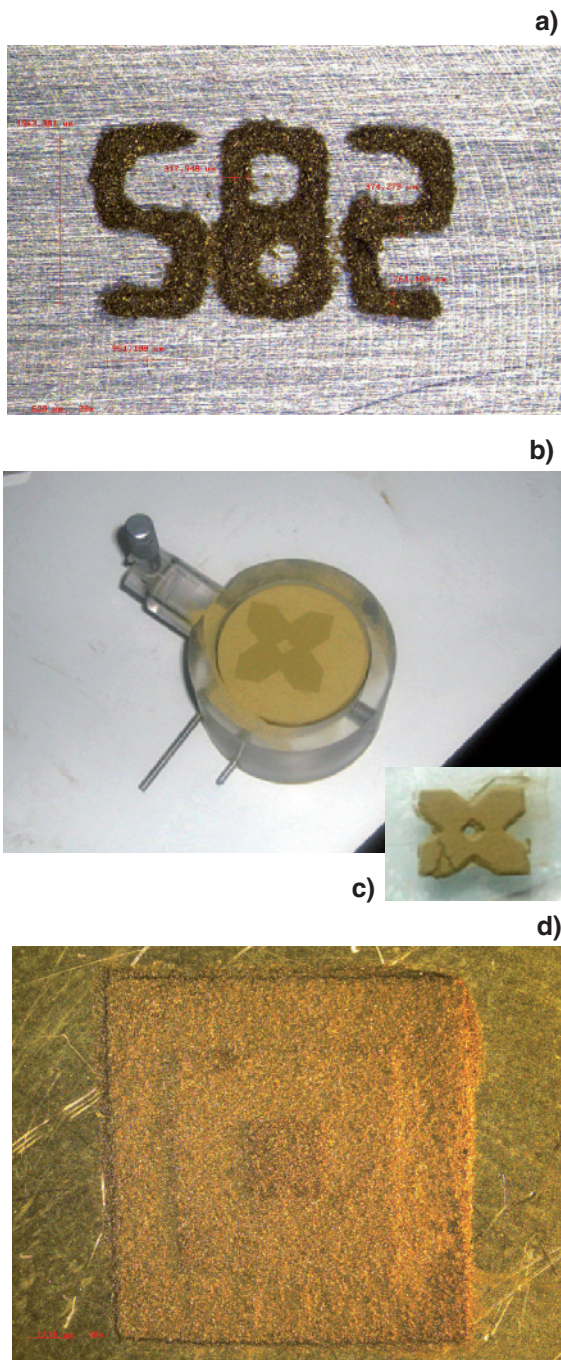
L'interazione fra la singola stilla di collante ed il letto di polvere origina la primitiva di stampa che rappresenta l'elemento più piccolo che può essere creato con la tecnica 3DP. Le dimensioni della primitiva dipendono essenzialmente dal volume della gocciolina. Le prove preliminari sul foglio di carta (figura 14a) e sul metallo (figura 14b) rivelano come i risultati di printing con la silice siano comparabili alle stampe tradizionali con inchiostro, a conferma del fatto che il processo di stampa di una testina inkjet risulti indipendente dal tipo di liquido contenuto all'interno di essa. Ciascuna gocciolina di liquido legante trasporta mediamente appena 9 pl di particelle sospese di silice colloidale che sono responsabili della locale aggregazione della polvere di ottone (figura 14c). La successione di primitive, opportunamente distanziate, forma ciascuna linea della sezione che si vuole rappresentare (figura 14d).

La dimensione della linea di stampa risulta inversamente proporzionale alla distanza media (gap) delle goccioline spruzzate sul letto di polvere (ad esempio un gap di 25 µm determina linee con spessore medio di circa 170 µm) e non dipende, almeno nel range di lavoro compreso fra i 10 ed i 100 Hz, dalla frequenza di attivazione del calorifero e quindi dalla velocità delle goccioline (che influenza la dinamica dell'impatto iniziale con il letto di polvere). La figura 15a presenta il risultato della stampa di numeri (cifre di un comune display a 7 segmenti, opzione number in figura 12) su un supporto in alluminio: ciascun segmento (di lunghezza 1 mm) costituisce una singola linea con spessore medio di 320 µm prodotta in

seguito all'attivazione dell'ugello con gap di 12.5 µm (valore opportunamente dimensionato in modo da garantire l'integrità della stampa durante la delicata operazione di rimozione della polvere). La caratterizzazione della linea specifica inoltre la distanza limite (hatch) da non superare per garantire una minima continuità, e per estensione una minima consistenza, nel printing della superficie desiderata. La figura 15b visualizza il piano di lavoro con la polvere in ottone al termine della stampa della generica sezione del provino di figura 1a. Il provino prima di essere estratto dal letto di polvere è sottoposto ad un breve riscaldamento per facilitare l'operazione di asciugatura. Al termine del post-processo il componente si presenta come in figura 15c ove risulta visibile una linea di frattura (larga circa 1 mm) che testimonia la fragilità del modello stampato. La figura 15d riporta infine il risultato della stampa di strati successivi: la piramide (figura 1b) ha una base di lato 10 mm con spessore di circa 200 µm (per garantire l'adesione al supporto) e due strati successivi di spessore di 100 µm originati in seguito all'abbassamento del piano di lavoro (layer) di 150 µm (ogni strato aderisce al sottostante per circa 50 µm).

### Conclusioni

La piccola piramide a 3 piani (figura 15d) rappresenta il punto di arrivo del lavoro brevemente descritto. Il sistema semi automatico sviluppato consente di riprodurre, layer by layer, i semplici modelli 3D specificati in ingresso (figura 1) a partire dalla polvere di ottone, materiale per la prima volta impiegato in esperienze di stampa, opportunamente stesa sul piano di lavoro. La caratte-



**Fig. 15 – Stampa di una etichetta con numeri (a), di una sezione, prima della rimozione dal letto di polvere (b) e dopo la pulizia (c), e di una piccola piramide (d)**

rizzazione della testina inkjet (analisi della forma, dimensioni, velocità delle goccioline in funzione del segnale elettrico che consente di attivare la resistenza) rappresenta la fase preliminare indispensabile alle successive esperienze con il liquido legante (silice colloidale in glicole etilenico diluita con rapporto 1:1 in acqua distillata, tabella 1). Il programma di controllo (figura 12), sulla base delle informazioni contenute nel file prodotto in output dal tool di slicing del software commerciale per la generazione dei file .STL (figura 9), coordina lo spostamento della testina con il controllo dell'attivazione dell'ugello selezionato, in modo da aggregare soltanto i singoli grani che concorrono a determinare la sezione richiesta. Il tuning dei parametri gap (distanza media fra goccioline), hatch (distanza linee adiacenti nella scansione raster), layer (spostamento verticale del piano di lavoro) delinea un set di valori che consente di riprodurre la forma desiderata (con risoluzione del processo di stampa, spessore minimo dello strato, dell'ordine dei 100  $\mu\text{m}$ ) garantendone al frattempo una minima consistenza in maniera da salvaguardarne l'integrità durante la delicata successiva operazione di pulizia e rimozione della polvere. Sviluppi futuri possono proficuamente coinvolgere la valutazione delle prestazioni del sistema di stampa, ad esempio analisi del modello in termini di caratteristiche meccaniche e finitura superficiale in modo da comparare il prototipo con i risultati ottenibili dai processi tradizionali della tecnologia classica, l'estensione del codice di controllo in modo da realizzare componenti con sezioni con geometria arbitraria, con profili non lineari e un numero illimitato di cavità, ed, infine, la progettazione di un sistema

completamente automatizzato, che preveda in particolare la deposizione e la steccatura meccanica della polvere sul piano di lavoro sempre avendo cura di ridurre al minimo il grado di vuoto nella copertura della superficie, compito già non banale con operazioni manuali.

### Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto come tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione dell'ing. Alessandro Chiocchetti presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, con il valido supporto dei tecnici Flavio Antonelli (sistema di elevazione del letto di polvere), Gabriele Moretti (supporti) e Salvatore Balestrino (elettronica).

### Bibliografia

- Baker P.R. JR., "Three dimensional printing with fine metal powders", Masters Thesis MIT, May, 1997
- Sachs et al., "Three-dimensional printing techniques", United States Patent 5,204,255
- Lanzetta M., "An experimental model of the line formation and a new approach to the optimization of the line quality in the drop on demand three dimensional printing of dry powders", working report # 327, M.I.T., 2000
- Utela et al., "A review of process development steps for new materials in Three Dimensional Printing (3DP)", SME J. Manufacturing Processes
- Lanzetta M., Sachs E., "The line formation with alumina powders in drop on demand Three Dimensional Printing", PRIME 2001, 1st International Seminar on Progress in Innovative Manufacturing Engineering, Italy.