

NAUTICA +++ | Additive Manufacturing in campo Navale e Nautico | Arianna Bionda e Andrea Ratti

# NAUTICA +++

## Additive Manufacturing in campo Navale e Nautico

a cura di  
**Arianna Bionda | Andrea Ratti**

EDIZIONI  
POLI.DESIGN

EDIZIONI  
POLI.DESIGN

| **NAUTICA +++** | Additive Manufacturing in campo Navale e  
Nautico | Arianna Bionda | Andrea Ratti

ISBN: 978-88-95651-11-8  
© 2017 Edizioni POLI.design

via Durando 38/A – 20158 Milano  
Tel. 02-2399.7206 Fax 02-2399.5970  
e-mail: polidesign@mail.polimi.it  
internet: www.polidesign.net  
www.polidesign.net/myd

.....

Prima edizione novembre 2017

Stampa Litogì – Milano

Immagine di copertina tratta dal  
progetto STRIPS di Giorgio Nuzzo.  
<https://vimeo.com/237939631>



This Work is Licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike CC BY-NC-SA For full details on the license, go to: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>





# Indice

<b>Prefazione</b>	9
<b>Yacht Design e fabbricazione digitale: le nuove sfide di Industria 4.0</b> Arianna Bionda, Andrea Ratti	13

## Sezione 1 | Tecnologie per le applicazioni industriali

<b>1. Additive Manufacturing: le opportunità e le prospettive industriali</b> Alessandro Salmi	23
<b>2. Stampa 3d e Robotica. Nuovi orizzonti per la manifattura di compositi a fibra lunga</b> Marinella Levi	33
<b>3. Potenzialità e applicazioni delle tecnologie additive per la produzione di componenti e sistemi metallici</b> Maurizio Vedani	45
<b>4. Materializzare prodotti: stampa 3d &amp; design</b> Patrizia Bolzan	55

## Sezione 2 | Esperienze in campo Nautico

<b>5. Le barche si stampano. L'Additive Manufacturing come scenario futuro della progettazione nautica</b> Paolo Nazzarro, Guido Zannoni	73
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

- 6. Fabbricazione additiva nel comparto nautico: nuovi scenari e prospettive** 83  
Daniele Cevola
- 7. Tecnologie free-form per la realizzazione di componenti nautici tramite fiber placement** 93  
Francesco Braghin

### Sezione 3 | Esperienze in campo Navale

- 8. Esperienze e soluzioni di Additive Manufacturing nel settore navale** 105  
Riccardo Profumo
- 9. Additive Manufacturing: le esperienze Fincantieri-Unige su modelli in scala di eliche** 115  
Luigi Grossi, Tancredi Cilia, Daniele Bertetta
- 10. Potenzialità delle tecnologie Additive in contesti in via di sviluppo** 125  
Davide Telleschi

- Bibliografia** 135





## Prefazione

*Il testo raccoglie gli atti del seminario Additive Manufacturing in campo Navale e Nautico tenutosi presso il Politecnico di Milano lo scorso 17 Maggio 2017 e rappresenta una raccolta di riflessioni ed esperienze sul tema della fabbricazione additiva per lo Yacht Design. Ricostruisce una storia contenuta, ma molto densa, in cui le evoluzioni tecniche che si sono susseguite con inedita rapidità sono state particolarmente significative.*

*Il convegno è stato organizzato grazie alla collaborazione tra il Dipartimento di Design del Politecnico di Milano, Atena (Associazione Italiana di Tecnica Navale) e l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano, e ha visto la partecipazione di Università, Enti di ricerca e aziende del comparto nautico e navale. Il patrocinio di Ucina e Aspronadi ha inoltre rappresentato un prezioso supporto alla progettazione dell'evento con il coinvolgimento di realtà imprenditoriali che stanno spingendo al limite la sperimentazione in questo campo.*

*Le tre sessioni tecniche del convegno raccolgono le esperienze chiave nei diversi ambiti di ricerca, di sperimentazione e di applicazione della fabbricazione additiva. Interventi interessanti non solo per i risultati, raccolti in questa pubblicazione, ma, soprattutto, per le suggestioni e gli scenari che propongono e per l'apertura proposta nell'interpretare la concezione e la realizzazione stessa di manufatti industriali.*

*La commistione e la capacità di lavorare in sinergia con competenze disciplinari diverse è oggi più che mai indispensabile rispetto alla necessità di combinare know how sulle tecnologie e sui materiali con un'ampia visione di metodo progettuale. E la nautica rappresenta probabilmente un ambito in cui tale interdisciplinarietà offre grandi potenzialità, un contesto in cui occorre sapere immaginare il futuro sfruttando le potenzialità che le nuove tecnologie ci mettono a disposizione.*





## **Yacht Design e fabbricazione digitale: le nuove sfide di Industria 4.0**

*Arianna Bionda | Andrea Ratti*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Design | [arianna.bionda@polimi.it](mailto:arianna.bionda@polimi.it) | [andrea.ratti@polimi.it](mailto:andrea.ratti@polimi.it)*

Nell'ultimo decennio le tecnologie di manifattura digitale e additiva hanno dimostrato sempre più il loro carattere di innovazione rivoluzionaria. Accanto alle esperienze consolidate nei settori industriali del design, del biomedicale, dell'aerospazio anche il comparto nautico e navale assiste a un radicale cambio di prospettiva. Interconnessione di oggetti, velocità di prototipazione e nuove opportunità progettuali libere da vincoli di natura costruttiva sono gli elementi chiave di questa rivoluzione industriale, ormai nota come Industria 4.0.

La quarta rivoluzione industriale, presentata alla fiera Hannover Messe nel 2011, prende il nome dall'iniziativa del governo tedesco Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Concretizzato alla fine del 2013, il progetto per l'industria del futuro prevedeva investimenti su infrastrutture, scuole, sistemi energetici, enti di ricerca e aziende per ammodernare il sistema produttivo tedesco e riportare la manifattura tedesca competitiva a livello globale. In realtà il progetto Industrie 4.0 ha prodotto molto di più. Ha evidenziato le radicali trasformazioni che l'evoluzione digitale e la sua applicazione

nei più diversi settori industriali comporta in termini di innovazione di prodotto e di processo.

Se le precedenti rivoluzioni industriali, nel 1780 con la nascita della macchina a vapore, nel 1870 con l'avvento dell'elettricità e negli anni '70 grazie all'introduzione dell'informatica, sono state pienamente colte e teorizzate a posteriori, la quarta rivoluzione industriale è anch'essa ancora in fase embrionale. Le sfide che questa pone alla produzione industriale sono innumerevoli e trasformano profondamente non solo il modo di concepire e produrre beni e servizi, ma anche la loro relazione con l'uomo.

Secondo le recenti ricerche degli osservatori internazionali di Industria 4.0<sup>1</sup>, le nuove tecnologie digitali avranno un impatto profondo nell'ambito di quattro direttrici di sviluppo principali. La prima riguarda l'utilizzo e la sicurezza dei dati, la potenza di calcolo e la connettività, e si declina in Big Data, Internet of Things, Machine-to-Machine e Cloud Computing per la centralizzazione delle informazioni e la loro conservazione. La seconda, la diffusione di strumenti e sistemi sempre più sofisticati di business intelligence e analytics per la comprensione e la valorizzazione del dato. La terza direttrice di sviluppo è l'interazione tra uomo e macchina, che coinvolge le interfacce intelligenti e i device per la realtà aumentata. Infine il passaggio dal digitale al reale. Accanto a tecnologie ormai consolidate come quelle per asportazione di materiale, troviamo le tecniche di fabbricazione additiva. La stampa 3D, tra le innovazioni di Industria 4.0, è la più fisica che abilita profonde trasformazioni dell'oggetto prodotto e del modo di concepirlo. È interessante notare come per anni si sia assistito alla progressiva dematerializzazione della manifattura verso una economia di servizi. L'industria 4.0 oggi ci ripropone la sua rimaterializzazione, secondo nuovi criteri e prospettive.

<sup>1</sup> Politecnico di Milano, Osservatori.net – Digital Innovation, Industria 4.0. [https://www.osservatori.net/it\\_it/osservatori/osservatori/industria-4.0](https://www.osservatori.net/it_it/osservatori/osservatori/industria-4.0).  
McKinsey & Company, Industry 4.0 Survey. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-analytics/our-insights>  
EU Parliament, Industry 4.0. [www.europarl.europa.eu/.../EPRS\\_BRI\(2015\)568337\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/.../EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)  
PwC, Industry 4.0. <https://www.pwc.nl/en/assets/documents/pwc-industrie-4-0.pdf>

La recente estensione applicativa dei processi di Additive Manufacturing, che inizialmente hanno interessato unicamente i settori di rapid prototyping, rapid tooling e di preserie, ha oggi coinvolto la categoria dei prodotti reali, oltrepassando lo stadio di prototipo. L'articolo "Print me a Stradivarius. How a new manufacturing technology will change the world" pubblicato dalla rivista The Economist il 10 Febbraio 2011 ha segnato per primo questa tendenza, un salto che si sarebbe compiuto in pochi mesi e che avrebbe portato l'apertura di scenari nuovi per la manifattura digitale e additiva: la personalizzazione della produzione e la democratizzazione delle tecnologie.

*Three-dimensional printing makes it as cheap to create single items as it is to produce thousands and thus undermines economies of scale. It may have as profound an impact on the world as the coming of the factory did. [...] Just as nobody could have predicted the impact of the steam engine in 1750—or the printing press in 1450, or the transistor in 1950—it is impossible to foresee the long-term impact of 3D printing. But the technology is coming, and it is likely to disrupt every field it touches.*

*[La stampa tridimensionale rende economico creare singoli oggetti tanto quanto crearne migliaia e quindi mira le economie di scala. Essa potrebbe avere sul mondo un impatto così profondo come lo ebbe l'avvento della fabbrica. [...] Proprio come nessuno avrebbe potuto predire l'impatto del motore a vapore nel 1750 – o della macchina da stampa nel 1450, o del transistor nel 1950 – è impossibile prevedere l'impatto a lungo termine della stampa 3D. Ma la tecnologia sta arrivando, ed è probabile che sovverta ogni campo che tocchi.]*  
(The Economist, 2011).

Quali sono i motivi di una diffusione così rapida e pervasiva delle tecnologie additive? Il primo di essi è sicuramente quello economico. Ciò che costava caro con la produzione tradizionale diventa ora gratuito: Customization is free<sup>2</sup>, produrre oggetti personalizzati e differenti l'uno dall'altro non costa di più che fabbricarli tutti uguali, e complexity is free<sup>2</sup>, il

costo di elementi composti, anche di materiali differenti e con geometrie complesse dipende esclusivamente dalla quantità di materiale utilizzato, riducendo al minimo gli scarti di lavorazione. Inoltre, il processo stesso di stampa 3D, lavorando per addizione di materiale attraverso layer sovrapposti, rende questa tecnologia flessibile, trasversale e adattabile a diversi materiali: dai materiali tradizionali come polimeri, metalli e inerti, a cellule biologiche e alimenti. Sulla bilancia pesano però anche alcuni vantaggi, in particolar modo legati alle dimensioni dell'oggetto stampabile, al piano di stampa del macchinario utilizzato e ai tempi di produzione e finitura del singolo pezzo.

*If you want to make a million rubber duckies, you can't beat injection-molding. The first ducky may cost \$10,000 in tooling for a mold, but every one after that amortizes the one-off cost. By the time you've made a million, they cost just pennies for the raw materials. Make the same thing on a 3-D printer; on the other hand, and the first ducky might cost just \$20 in time and materials – a huge saving. But so, sadly, will the one-millionth – there is no volume discount.*

*[Se volete fabbricare un milione di paperette di gomma, non c'è nulla che possa battere lo stampaggio a iniezione. La prima potrebbe costarvi 10.000 dollari per attrezzare la macchina, ma ogni pezzo fabbricato in più va ad ammortizzare il costo iniziale. Quando ne avrete fabbricate un milione, vi saranno costate pochi centesimi, per la sola materia prima. Fate lo stesso lavoro su una stampante 3D, e la prima paperetta potrebbe costarvi appena 20 dollari tra tempo e materiali: un risparmio colossale. Ma purtroppo vi costerà 20 dollari anche la milionesima.]*  
(Campbell et al, 2012)

Il costo di produzione di un oggetto stampato in 3D è quindi (quasi) indipendente dai volumi stessi di produzione. Il venir meno delle economie

<sup>2</sup> Duann Scott on 3D printing market Shapeways, 2013.  
<https://qz.com/105063/3d-printing/>

di scala nella manifattura additiva può attivare un cambio di prospettiva del settore manifatturiero indirizzando la produzione verso elevata qualità e personalizzazione del prodotto stesso. Le tecnologie di fabbricazione additiva non rivoluzionano così le pratiche del design ma le espandono, aprendo nuove potenzialità di relazione fra gli oggetti e i soggetti protagonisti della trasformazione digitale, aziende, artigiani, autoproduttori e progettisti.

Elevata qualità e personalizzazione del prodotto sono le principali caratteristiche del settore nautico italiano, riconosciuto come eccellenza in tutto il mondo.

L'Italia è il secondo produttore mondiale di imbarcazioni da diporto, superato unicamente dagli Stati Uniti, e leader nel comparto Mega Yacht taylor made. Un settore in forte crescita, dopo la crisi del 2010, che vede un portafoglio ordini 2016 del valore di 1,8 Miliardi di euro e una stima di crescita del 9% entro il 2020<sup>3</sup>. Anche la cantieristica navale italiana si conferma ai primi posti con il settore Cruise a trainare l'intero comparto. Nonostante numeri importanti, la cantieristica italiana è rappresentata principalmente da micro e piccole imprese più vicine alla dimensione dell'artigianato che di una vera industria manifatturiera.

Ed è qui che la sfida di Industria 4.0 e della fabbricazione digitale e additiva si fa concreta: una imbarcazione artigianale prodotta con un sistema industriale evoluto.

Dai primi dati rilevati dal progetto Nautica 4.0 del Politecnico di Milano, Dipartimento di Design, si evince che solo alcune aziende dell'intero comparto nautico e navale stanno maturando una certa consapevolezza nei confronti dell'era 4.0 e delle ricadute positive che si possono riscontrare sull'intero processo produttivo.

Nel navale le nuove tecnologie digitali sono già presenti in ambito motoristico: Wartsila si connette alle sale macchina delle proprie installazioni marine per dare assistenza immediata e da remoto in caso di malfunzionamento o guasto, grazie alla dotazione di sensoristica avanzata applicata

<sup>3</sup> CNA, Pollicardo L. (2017). Dinamiche e prospettive della filiera nautical del diporto. CNA Produzione Nautica

ai suoi motori, mentre Rolls Royce punta al controllo a distanza per realizzare la guida da remoto, non solo della gestione dei motori, ma della stessa nave.

Alcuni recenti studi hanno già dimostrato la producibilità di eliche per additive manufacturing e di valvole per impianti di bordo rendendo tangibile quanto possa risultare interessante la possibilità di realizzare componentistica di ricambio e manutenzione solo al fabbisogno e potenzialmente anche a bordo. La combinazione delle tecnologie di scansione 3d abbinata alle tecniche di fabbricazione additiva si pone l'obiettivo di mitigare il rischio di obsolescenza dei prodotti. Alcuni casi applicativi sono stati condotti nel Fieldlab - Innovation Dock di Rotterdam, in cui l'introduzione di sensori a fibra ottica all'interno del componente ripristinato può diventare interessante strumento diagnostico e fonte di dati preziosi dell'assetto delle navi in esercizio. Inoltre, il percorso di ricerca per la qualifica delle parti di manutenzione ha l'obiettivo di garantire l'intercambiabilità delle parti prodotte in additive manufacturing con le precedenti realizzate mediante processi tradizionali.

In ambito nautico, il tessuto imprenditoriale, per questioni organizzative e di retaggio culturale, necessita ancora di una riflessione approfondita che possa fare luce sulle reali possibilità in campo e per costruire una visione del futuro della nautica.

Alcuni virtuosi esempi di applicazione delle tecnologie di Additive Manufacturing si riscontrano invece in start up innovative. È il caso di Livrea Yacht che dal 2014 ha avviato una attività di sperimentazione sul campo per la realizzazione della prima imbarcazione stampata in 3D. Il percorso progettuale ha stimolato la ricerca verso l'analisi delle strutture reticolari anisogrid, finalizzata all'ottimizzazione topologica per rendere più leggera e resistente l'imbarcazione. A partire da piccoli elementi di componentistica minore, la sperimentazione ha portato alla stampa di una porzione strutturale dell'imbarcazione Livrea 26' durante il RAPID + TCT di Pittsburgh 2017. La sfida lanciata da questa start up è ambiziosa e sfrutta al meglio le potenzialità offerte dalla fabbricazione digitale: partecipare alla Minitransat 2019, competizione transatlantica individuale che copre oltre 4000 miglia tra Francia e Brasile, con uno scafo completamente stampato

in additive manufacturing. Questa competizione si distingue infatti per l'alto valore tecnologico delle barche in acqua e per la libertà di totale customizzazione e prototipazione delle stesse imbarcazioni.

Questi valori sono elementi chiave nella lettura delle nuove potenzialità offerte dalla quarta rivoluzione industriale. Le tecnologie di fabbricazione digitale e additiva suggeriscono così un ampliamento degli obiettivi del comparto nautico e navale: la necessità di creare un network fra cantieri e subfornitura per l'accesso facilitato e condiviso alle tecnologie e per l'evoluzione dell'artigianato digitale, il ripensamento del prodotto barca nella relazione tra tecnologia e tradizione, e la connessione e interoperabilità dei principali sistemi di bordo per la comprensione delle dinamiche in navigazione e per la manutenzione in remoto.



## Sezione 1

### **Tecnologie per le applicazioni industriali**



## 1

# Additive Manufacturing: le opportunità e le prospettive industriali

*Alessandro Salmi*

*Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione (DIGEP) | [alessandro.salmi@polito.it](mailto:alessandro.salmi@polito.it)*

Scopo del presente intervento è fornire una panoramica dell'evoluzione dell'additive manufacturing, o la fabbricazione additiva, delle relative tecniche ad oggi disponibili sul mercato e delle possibilità che questa nuova tecnologia può fornire in termini di progettazione per l'ottimizzazione dei processi e dei materiali e per la sostenibilità.

La Fabbricazione Additiva (FA) è una tecnologia innovativa che rende possibile la produzione in tempi ridotti e senza l'uso di utensili di oggetti di geometria complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD 3D.

Abbiamo quindi la necessità, contrariamente ad alcune tecniche più tradizionali di produzione di oggetti in materiale plastico, metallico o ceramico, di avere un modello CAD 3D dell'elemento da realizzare. A partire da questo e per mezzo di specifici software di calcolo, la geometria è sezionata per piani ortogonali al piano di costruzione. Questo processo alla base di ogni tecnica di FA è denominato Slicing e consente di dividere

geometrie complesse in strati sovrapposti e realizzarli in sequenza fino ad ottenere l'oggetto finale.

### **Dalla Prototipazione Rapida all'Additive Manufacturing**

La fabbricazione additiva è nata alla metà degli anni '80 con il nome di prototipazione rapida, tecnica sviluppata esclusivamente per la produzione di prototipi industriali e incentrata sull'utilizzo di materiali plastici. L'esempio più noto è il caso della SLA, tecnica in stereolitografia che consente in breve tempo di realizzare componenti in materiali polimerici.

L'evoluzione della tecnologia ha portato, negli inizi degli anni '90 alla realizzazione di tools di produzione per il settore della meccanica e dei metalli con la realizzazione di anime in sabbia per i processi di fonderia, Rapid Casting, e la creazione di inserti utilizzati per lo stampaggio ad iniezione di materie plastiche. A partire dagli anni duemila la ricerca nel campo della fabbricazione additiva si è concentrata in particolare modo sulle tecniche del metallo, con lo scopo di produrre non più solo prototipi, ma componenti finali di forma complessa. È nel 2013 che la stampa 3D di materiali ha i suoi primi impieghi in ambiti industriali con un +76% di macchine vendute nel modo. Il numero rimane però ancora esiguo, circa 350 macchine disponibili a oggi sul mercato, con una evoluzione molto più lenta rispetto a quella delle tecnologie plastiche dovuta principalmente agli elevati costi sia dei macchinari che dei componenti finali prodotti.

Il termine Prototipazione Rapida non descrive quindi più le recenti applicazioni di questa tecnologia. Oggi si possono produrre parti finite e il termine adottato, Additive Manufacturing, mette perfettamente in luce la strategia di fabbricazione degli oggetti. Oggetti finali di forma complessa e con densità e strutture variabili sono realizzati aggiungendo materiale, con un processo contrario rispetto alle tradizionali operazioni di tornitura e di fresatura. Il materiale viene così posizionato per rispondere esclusivamente alle esigenze di rigidità e leggerezza del componente stesso. Numerosi sono i vantaggi che la fabbricazione additiva presenta sia dal punto di vista del processo che per quanto riguarda le innovazioni di prodotto.

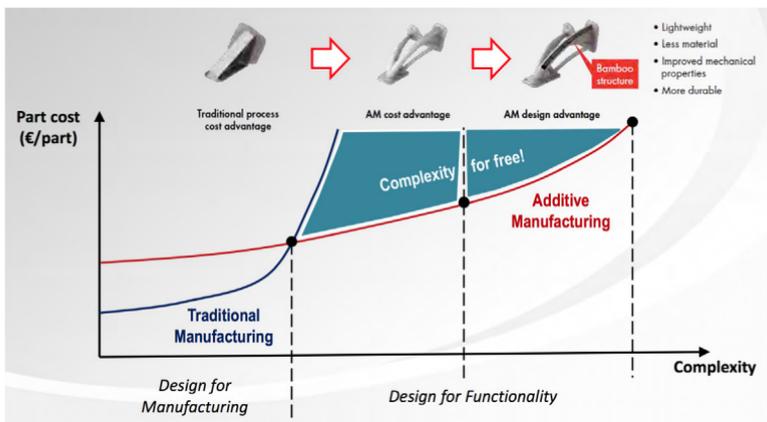
Per quanto riguarda il processo produttivo, l'innovazione principale è

l'utilizzo di un solo sistema "macchina" in grado di produrre una grande varietà di oggetti. Ogni elemento può essere creato senza l'utilizzo di attrezzature e di utensili di bloccaggio contrariamente a quanto avviene nel caso di tecnologie tradizionali in caso di geometrie complesse e sottosquadri. Inoltre, l'elemento finito viene realizzato in un solo step produttivo senza l'intervento manuale diretto di un operatore. Il file CAD 3D viene caricato sulla piattaforma software propria della stampante in uso e, all'avvio del programma, automaticamente la macchina realizzerà il pezzo, copia fisica dell'elemento virtuale precedentemente modellato. Si minimizza pertanto l'intervento degli operatori durante la fase di fabbricazione.

I tempi e i costi di produzione non sono più funzione della complessità geometrica dell'elemento da realizzare ma sono legati alle sue dimensioni fisiche. Questo fattore economico ha stimolato la ricerca nel campo della progettazione, del design, dell'ergonomia e dell'ottimizzazione strutturale. Si possono così realizzare forme leggere e cave, oggetti con parti integrate e/o già assemblate, e si può procedere con un design ergonomico e una personalizzazione di ogni singolo prodotto senza aggiungere costi dal punto di vista del processo di fabbricazione.

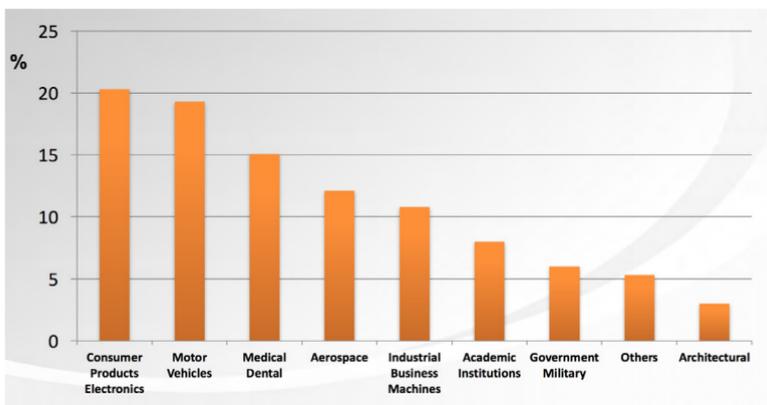
Il grafico seguente dimostra il variare dei costi in funzione della complessità geometrica confrontandolo con un processo tradizionale di realizzazione di un componente metallico (staffa per automazione robotica) ottenuto mediante piegatura e saldatura di lamiera.

La linea blu rappresenta l'oggetto realizzato con il processo tradizionale. Man mano che aumenta la complessità geometrica del componente stesso, così come mostra l'asse orizzontale, abbiamo un aumento repentino dei costi. Inoltre non è possibile realizzare forme molto complesse perché la tecnologia adottata non permette ciò. Se invece pensiamo di realizzare lo stesso oggetto dal punto di vista funzionale con tecniche di fabbricazione additiva allora possiamo spingere il design e la progettazione dell'oggetto ad un passo successivo ottenendo forme articolate, strutture reticolari e cave, con lo scopo di alleggerire l'elemento stesso. Abbiamo quindi un notevole incremento della complessità con un aumento di costo limitato.



[1 . 1]

*Variare dei costi in funzione della complessità geometrica*



[1 . 2]

*Applicazioni per settori industriali*

Organic materials	Ceramic materials	Polymeric materials	Metallic materials
Waxes	Alumina	ABS	Aluminium
Tissue / cells	Mullite	Polyamide (nylon)	Tool Steel
	Zirconia	Filled PA	Titanium
	Silicon Carbide	PEEK	Inconel
	Beta-Tri calcium Phosphate	Thermosetting epoxies	Cobalt Chrome
	Ceramic (nano) loaded epoxies		Copper
	Silica (sand)	PMMA	Stainless steel
	Plaster	Polycarbonate	Gold / platinum
	Graphite	Polyphenylsulfone	Hastelloy
		ULTEM	
		Aluminium loaded polyamide	

[1. 3]

*Materiali più comuni in ambito additive manufacturing*

Non dobbiamo dimenticare però che questa tecnologia, di recente introduzione nel sistema manifatturiero, presenta alcuni svantaggi: volumi di lavoro e dimensioni dell'oggetto limitati dalla capacità e dal volume di stampa della macchina adottata; limitato utilizzo di materie prime con costi elevati e scarsa adattabilità dei macchinari a supportare la lavorazione di differenti materiali; finitura superficiale non compatibile o non adeguata alle condizioni di accoppiamento con altri materiali. Inoltre, la velocità di costruzione del singolo pezzo è ancora inferiore alle tecniche più tradizionali. Se invece si amplia lo sguardo sui tempi, e sui relativi i costi, di realizzazione dell'intera attrezzatura di produzione, tools, stampi e bloccaggi, le tecniche di fabbricazione additiva risultano decisamente competitive.

Il problema della scarsa finitura superficiale dei componenti prodotti per additive manufacturing è presente in particolar modo nelle produzioni con materiali metallici. Anche se, teoricamente, le possibilità di finitura degli oggetti realizzati con queste tecniche sono le medesime di quelli realizzati tradizionalmente (metallizzazione, cromatura, metal plating, rivestimenti, verniciatura e lucidatura) si riscontrano numerose difficoltà a trattare un elemento con forme non convenzionali con tecniche classiche.

## **I materiali e le tecniche di Additive manufacturing**

I materiali a disposizione per le diverse tecniche di fabbricazione additiva possono essere di natura organica, ceramica, polimerica o metallica. In quest'ultima famiglia sono però generalmente presenti pochi materiali in lega pronti alla disponibilità e generalmente più cari delle alternative tradizionali.

La più antica tecnologia a disposizione è la fotopolimerizzazione di resina liquida in vasca, la SLA. Questa tecnica è utilizzata quasi esclusivamente per la realizzazione di prototipi, anche di grandi dimensioni. I fotopolimeri, utilizzati nei processi di fabbricazione additiva, non sono tendenzialmente considerati dei materiali finali per le scarse qualità meccaniche. Possono invece facilmente essere verniciati o trattati superficialmente con le tradizionali tecniche di finitura e sono considerati degli ottimi materiali prototipali. Un'ulteriore tecnica impiegata principalmente in campo pro-

totipale è la MJ-Getto di materiale con l'utilizzo di cere, di fotopolimeri e materiali ceramici. In questo caso abbiamo la possibilità di impiegare, all'interno dello stesso getto, materiali con comportamento rigido e con comportamento elastomerico.

Una tecnica che si sta ampiamente diffondendo è l'estrusione, meglio conosciuta come FDM. Esistono sul mercato sia sistemi a basso costo che con costi ben più elevati che permettono di avere una maggiore produttività, migliori qualità superficiali e tolleranze di realizzazione del componente più elevate. Con questa tecnica si possono realizzare componenti finiti in materiale plastico sia più economico come l'abs, sia ad elevata resistenza alle alte temperature e a sollecitazioni importanti come l'Ultem. Diversamente dalle precedenti, la tecnica a getto di legante vede come punto di partenza un letto di materiale, metallico, polimerico o ceramico. I layer sovrapposti vengono realizzati tramite il getto di un legante attraverso una testina di stampa simile alle comuni stampanti a getto di inchiostro. Gli strati così formati fungono da legante delle particelle di polvere. Anche in questo caso si ottengono principalmente prototipi. Solo nel caso di materiali ceramici si possono realizzare oggetti finali facendo seguire alla stampa una successiva fase di sinterizzazione.

Tra le tecniche proprie della lavorazione del metallo, la più diffusa è la DED, deposizione diretta di materiale. Questa può avere come sorgente un laser o un fascio elettronico. Il materiale adottato invece si trova, come nel precedente caso, sotto forma di polvere. Questa tecnica è particolarmente versatile perché può integrare materiali diversi e con proprietà variabili all'interno dello stesso getto colando insieme diverse tipologie di polvere.

La famiglia di tecniche che è maggiormente diffusa dal punto di vista della fabbricazione additiva è la PBF, fusione selettiva su letto di polvere. Essa può trattare sia metalli che polimeri e materiali ceramici, principalmente sabbie prerivestite. Nel caso del metallo possiamo utilizzare come sorgente tecnica un laser — laser melting — oppure un fascio elettronico — elettrobeam melting —. Le tecnologie a letto di polvere sono ampiamente diffuse nel campo elettronico, nel settore dei trasporti su strada, nel campo dentale e militare.

## La progettazione per la fabbricazione additiva

I principi della progettazione per la fabbricazione additiva (Design For Additive Manufacturing – DFAM) e le modifiche rispetto ai processi di produzione tradizionali sono stati oggetto di numerose ricerche scientifiche (Hague et al., 2003; Iuliano et al. 2004, Becker et al., 2005).

Scopo della riprogettazione per la Fabbricazione additiva è la massimizzazione delle prestazioni del prodotto attraverso una sintesi delle forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive.

Per perseguire tali obiettivi i progettisti devono tenere in considerazioni le specificità e i vantaggi che tale tecnica può portare, tra cui:

- possibilità di stampare sottosquadri, con spessori di parete variabile e canali profondi e di geometria complessa;
- produrre componenti con complessità geometrica illimitata, che ammette forme furi asse e svergolate, fori ciechi, filettature e viti;
- possibilità di produrre direttamente un assemblato come unico componente integrando giunti e cerniere, anche di materiali differenti.

Grazie alle ottimizzazioni topologiche degli elementi è possibile ridurre i pesi fino al 40% mantenendo inalterati i fattori di robustezza e di rigidità. Questo risulta fondamentale in diversi settori industriali del trasporto aereo, navale e su strada in cui il peso totale del componente ha un diretto rapporto sull'efficienza energetica e il relativo consumo di carburante. Inoltre, dal punto di vista della sostenibilità, la fabbricazione additiva consente una notevole riduzione dell'uso di materie prime e degli scarti di lavorazione.

## Sviluppi futuri

Negli ultimi anni stiamo assistendo a un'esplosione dell'utilizzo personale e industriale sistemi di stampante 3D di materiali polimerici a basso costo e con caratteristiche del prodotto finale spesso non conformi alle richieste industriali. Questa espansione del mercato ha fatto sì che la ricerca si stia orientando sulla definizione di standard qualitativi degli oggetti prodotti.

Anche il settore dell'informatica e dei software di progettazione sta subendo un'importante modifica con l'integrazione di comandi propri per l'ottimizzazione topologica di forme complesse.

Rimane invece aperta la strada per l'ottimizzazione di materiali ad hoc per la stampa additiva, principalmente nel settore dei metalli, e la possibilità di impiegare tecniche di finitura integrate o specifiche per la realizzazione di queste forme complesse.



## 2

### **Stampa 3d e Robotica. Nuovi orizzonti per la manifattura di compositi a fibra lunga**

*Marinella Levi*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica  
Giulio Natta | [marinella.levi@polimi.it](mailto:marinella.levi@polimi.it) | [www.piulab.it](http://www.piulab.it)*

Dal 2012, da quando con una piccola ed economica stampante 3D, un laboratorio e un piccolo gruppo di studenti coordinati dalla Professoressa Marinella Levi, il primo laboratorio embrionale di stampa 3d del Politecnico di Milano ha preso vita molte cose sono accadute. In una scala temporale che è propria della quarta rivoluzione industriale: esponenziale per ricerca, tecnologie e applicazioni industriali.

+LAB è il laboratorio di stampa 3D del Politecnico di Milano, con sede presso il Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”. La sua attività è iniziata a Novembre 2013, e da allora accoglie ogni giorno ingegneri, designer, ricercatori e makers, proponendo un approccio multidisciplinare alla stampa 3D dove ricerca, progettazione e didattica si fondono insieme per creare innovazione in ambito dei materiali e della tecnologia stessa. Al +LAB si studiano nuovi settori applicativi di potenziale interesse industriale, con particolare attenzione alle implicazioni sociali e ambientali. Questo laboratorio è per vocazione propenso

all'innovazione e al cambiamento, e per questo mette a disposizione le sue competenze per seguire i veloci sviluppi tecnologici e le accelerazioni di conoscenza in atto nel settore della stampa 3D, come in pochi altri in questo particolare momento storico. Questo gruppo di ricerca, nato con l'intento di sviluppare ricerca sui materiali, grazie alla fabbricazione additiva ha la possibilità di entrare pesantemente nel merito di quanto il materiale sia cruciale per definire i processi e i prodotti e quanto esso sia strategico nelle scelte di design.

Scelta strategica del gruppo di ricerca è stata quella di lavorare con tecnologie prevalentemente a basso costo, sia per ragioni di disponibilità economica sia perché all'inizio dell'attività la stampa 3D era ancora vista come una tecnologia prototipale di poco interesse per la ricerca scientifica. Inoltre, le macchine a basso costo sono facilmente accessibili, smontabili e personalizzabili proprio per rispondere a quelle esigenze di sperimentazione laboratoriale proprie del +LAB.

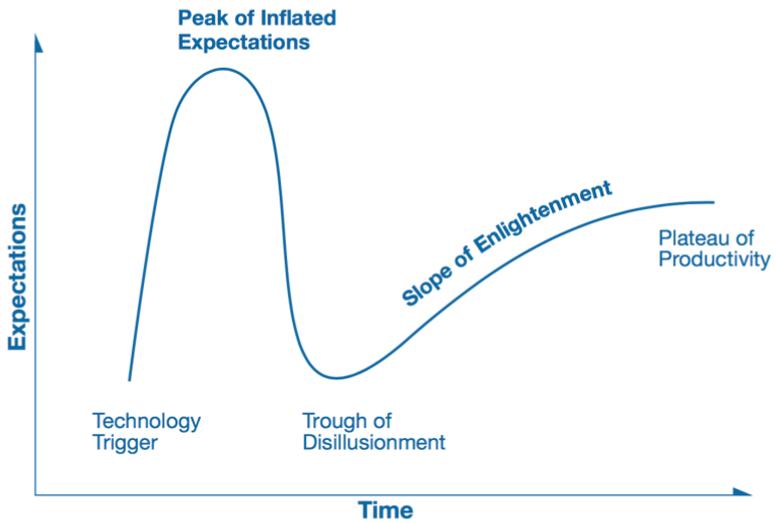
### **La rapida evoluzione della stampa 3D**

L'importanza che ha assunto oggi la fabbricazione additiva è dimostrata ulteriormente dall'analisi dei diagrammi Hype Cycles dell'agenzia Gartner. Questi grafici restituiscono una elaborazione grafica della maturità e dell'utilizzo in ambito industriale di tecnologie rilevanti, esplorando nuove possibilità tecniche. Attraverso la lettura degli scenari evolutivi presentati nei Gartner Hype Cycles si può dedurre l'andamento nel tempo delle diverse tecniche di manifattura all'interno di specifici processi produttivi. Ogni grafico è rappresentato da una curva caratteristica divisa in 5 fasi principali:

**Innovation trigger:** fase di esplorazione rapida e di lancio di una nuova tecnologia. Le prime ricerche e applicazioni sperimentali innescano un grosso interesse mediatico anche se non sono disponibili sul mercato prodotti utilizzabili o con una validità commerciale dimostrata.

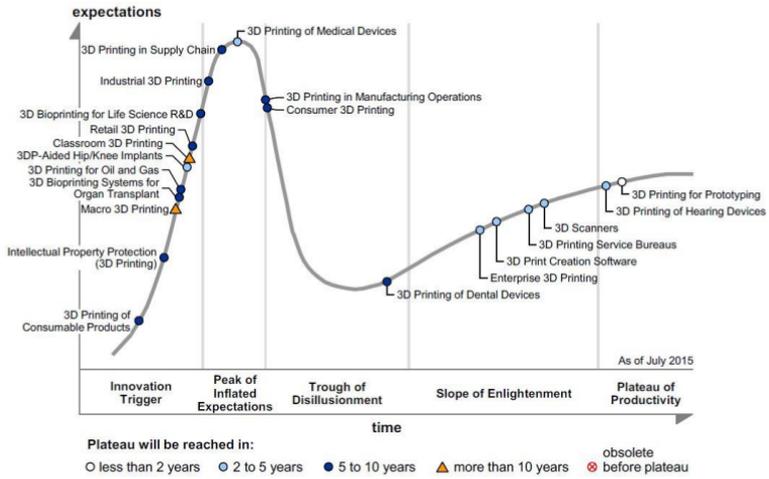
**Peak of Expectations Inflated:** L'interesse iniziale produce un picco di aspettative gonfiate dal riscontro dei media. In questa fase si alternano sperimentazioni in ambito industriale sia di successo sia fallimentari.

**Trough of Disillusionment:** l'interesse iniziale diminuisce e la tecnologia



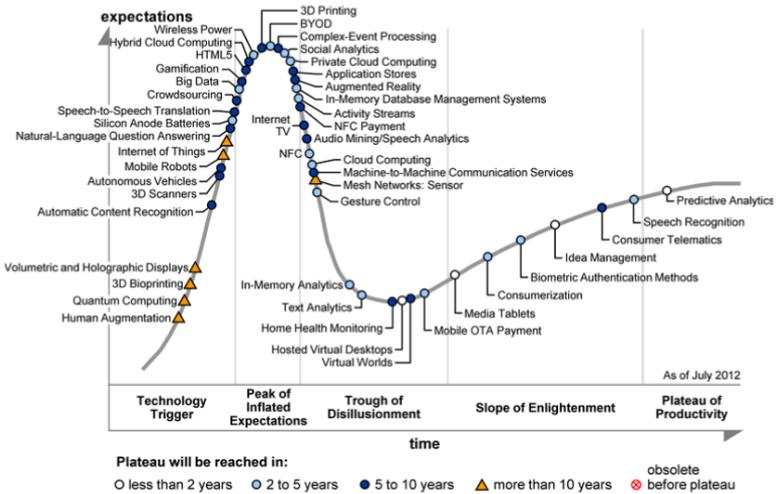
[2. 1]

*Curva caratteristica di un Gartner Hype Cycles. In ascissa il tempo e in ordinata l'aspettativa da parte del mercato prevalente.*



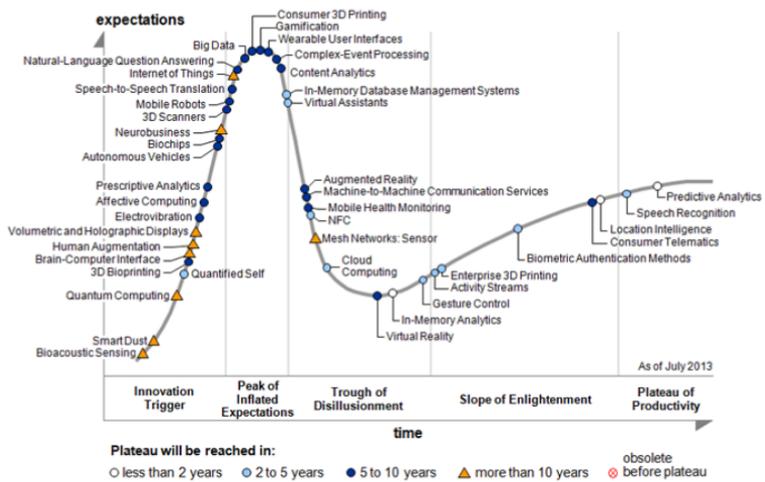
[2 . 2]

Diagrammi Hype Cycle 2012



[2 . 3]

Diagrammi Hype Cycle 20123



[2. 4]

Diagrammi Hype Cycle Luglio 2015

riesce a superare questa fase unicamente se chi la percorre riesce a rinforzarla di senso e significato.

**Slope of Enlightenment:** La tecnologia si rafforza di applicazioni industriali di successo e le sue potenzialità sono più ampiamente comprese.

**Plateau of Productivity:** fase di consolidamento delle tecnologie sia in ambito di ricerca scientifica che nella attività imprenditoriale.

La stampa 3D entra nella famiglia di tecnologie analizzate dai diagrammi Gartner nel 2011 grazie allo scadere dei brevetti che ne proteggevano la proprietà intellettuale. Lo sviluppo di macchine a basso costo ha permesso così al grande pubblico di entrare in contatto diretto con questa nuova tecnica di prototipizzazione e produzione rapida.

Il grafico Hype Cycles 2012, all'epoca delle prime ricerche del laboratorio +LAB, presenta le tecnologie di additive manufacturing all'apice del picco di aspettative con una previsione di raggiungere la fase di consolidamento dai 5 ai 10 anni. Già nell'anno 2013 si nota come la stessa voce 3D printing sia diventata insufficiente a descrivere il fenomeno che viene diviso in Consumer ed Enterprise 3D printing, quest'ultimo in fase di consolidamento. A luglio del 2015 le tecniche di stampa 3D sono ormai consolidate in diversi settori e viene divulgato un diagramma Hype Cycle interamente incentrato sulla fabbricazione additiva.

Le macchine per la stampa 3D diventano sia tecnologie industriali che prodotti di consumo. Questa tendenza stimola la ricerca verso la definizione di standard e certificazioni di qualità e la valorizzazione della proprietà intellettuale di oggetti open source.

### **Tre linee di ricerca del laboratorio +LAB e nuovi orizzonti per la manifattura dei compositi**

Punto di partenza della ricerca del laboratorio +LAB è un particolare relazione: la stampa 3D produce per sua natura oggetti anisotropi e i materiali compositi sono, per loro natura, anisotropi. Questo sillogismo ha aperto scenari di sperimentazione sui possibili ambiti di sovrapposizione tra questi materiali, le tecnologie additive e i sistemi di controllo di prodotti e processi. Inoltre, la possibilità di indagare materiali compositi a matrice termo- e foto- indurente, tra cui resine acriliche, poliesteri, poliu-

retaniche ed epossidiche, si è dimostrata di rilevante interesse scientifico e industriale per le elevate proprietà meccaniche, l'alta resistenza termica, la bassa igroscopicità e i costi estremamente contenuti.

L'impiego di materiale allo stato liquido ha reso necessarie alcune modifiche alle attrezzature a basso costo di stampa 3D, quali macchine a fusione di filamento continuo FDM. Un estrusore a siringa a vite continua, in sostituzione dei comuni estrusori a filamento caldo di materiale termoplastico, ha reso possibile depositare su un piatto di stampa la matrice allo stato liquido. Quest'apparato di estrusione può, inoltre, facilmente contenere cariche come particelle nano e corte. A fianco del terminale dell'estrusore a siringa è presente il cuore di questa innovativa tecnologia: due led UV che attivano la catalisi della matrice contestualmente alla deposizione della stessa. Questa tecnologia è stata denominata LDM, sistema Liquid Deposition Modelling.

All'interno della famiglia delle matrici termoindurenti sono state così individuate tre principali linee di ricerca: nanocompositi, compositi a fibre corte e a fibre continue.

La ricerca sui nanocompositi si è incentrata sulle loro proprietà conduttive. Grazie a resine caricate con nanotubi di carbonio e grafene è stato possibile realizzare circuiti costituiti da uno più filamenti a costituire geometrie complesse e tridimensionali. Questi componenti presentano elevate proprietà meccaniche, di conducibilità elettrica e termica.

La sostituzione di nanoparticelle con fibre corte ha portato alla sperimentazione preliminare di numerose soluzioni di resina + fibre. Tra le matrici troviamo resine epossidiche, acriliche, poliuretaniche e poliesteri, mentre tra le fibre sono state testate carbonio, vetro, kevlar e fibre naturali. Le ricerche sui compositi a fibra corta sono stati essenziali per i futuri sviluppi della stampa 3D di compositi a fibre continue e per la creazione del relativo G.code. Anche nel caso della stampa di fibre lunghe i primi test sono stati eseguiti con macchine a basso costo modificate per rispondere alle nuove esigenze tecniche con l'obiettivo di valutare e dimostrare la fattibilità del nuovo processo produttivo.

L'opportunità di realizzare un oggetto disponendo le fibre di rinforzo nella direzione delle sollecitazioni e dei carichi agenti sull'elemento stesso

ha orientato la ricerca nella definizione di una strategia additiva non più per piani paralleli ma free-form (smart slicing). La tecnologia AM di compositi a fibra lunga e continua, brevettata dal Politecnico di Milano nel 2015, prevede quindi un braccio robotico a sei assi in grado di prelevare il filamento di fibra da bobine, srotolarla, impregnarla di resina termoindurente, e infine comporre tramite percorsi antropomorfi le forme libere proprie della manifattura additiva. Questo processo non si classifica né tra i compositi laminati né tra gli ibridi. Costituisce pertanto una nuova famiglia di materiali: i continuous fiber smart manufacturing. Attraverso questa nuova tecnologia è possibile infatti stampare simultaneamente le pelli esterne, il rinforzo interno e la struttura di anima di un oggetto di forma complessa eliminando l'effetto scalino. Le fibre vengono depositate unicamente dove, quanto e quando servono senza l'impegno di tools di produzione e con l'eliminazione di materiali di scarto del processo produttivo. L'intero processo viene comandato attraverso software in grado di passare dall'analisi FEM al percorso macchina.

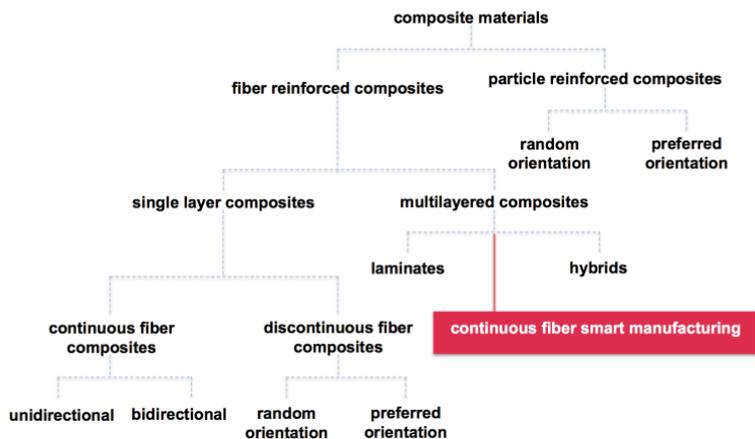
I test meccanici effettuati su provini realizzati con questa tecnologia, ad oggi unicamente con fibre disposte nel senso di trazione, hanno dimostrato comportamenti meccanici del tutto confrontabili con quelli realizzati con tecniche tradizionali di laminazione dei materiali compositi.

### **Nuovi scenari di ricerca applicata**

La ricerca proposta dimostra la versatilità di queste tecniche soprattutto quando sono chiamate a rispondere a prestazioni elevate con costi contenuti. Ad oggi la ricerca si è concentrata su fibre di rinforzo di colore chiaro quali vetro, basalto e fibre miste. Rimangono parzialmente esplorate le strade delle fibre più scure, quali kevlar e carbonio, le quali assorbono i raggi UV impiegati nel processo di catalisi sottraendo energia alla fotopolimerizzazione della matrice. Nonostante la risposta teorica a questa sfida sia piuttosto semplice, grazie all'impiego di fonti a raggi infrarossi, le tecnologie ad oggi presenti sul mercato hanno costi elevati e difficoltà in fase di controllo. Un'ulteriore sperimentazione in atto è l'utilizzo di fibre a memoria di forma che per effetto del calore siano in grado di modificare la loro geometria. Queste tecnologie sono ad oggi sviluppate principal-

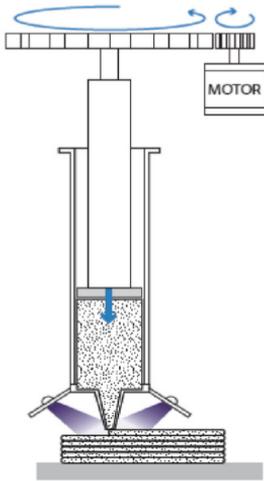
mente per il settore sensoristico e del aerospazio.

L'obiettivo di ricerca del laboratorio +LAB oggi è quello di affacciarsi al mercato dei materiali compositi delle grandi dimensioni. La tecnologia già sperimentata in questi anni è facilmente scalabile ed applicabile ad una macchina di grandi dimensioni come quelle utilizzate per i sistemi di fiber placement. Questa innovativa tecnica robot assistita, denominata BAAM (big area additive manufacturing) può risolvere il problema attuale della laminazione in stampi e quindi la necessità di costose attrezzature non in grado di rispondere alla flessibilità di personalizzazione della quarta rivoluzione industriale.



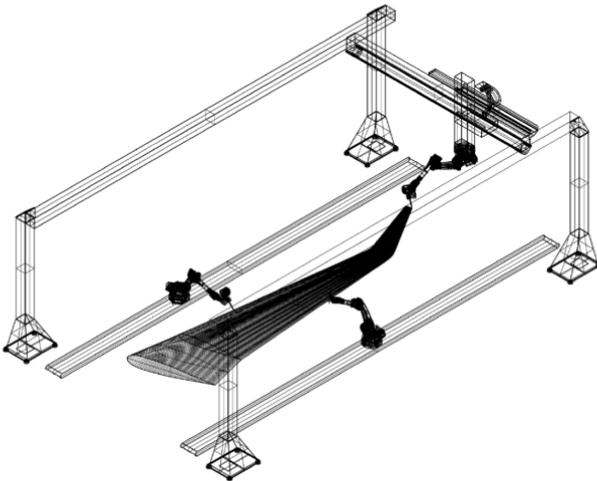
[2.5]

*Schema di classificazione della tecnologia continuous fiber smart manufacturing*



[2. 6]

*Liquid Deposition Modelling. Sistema a siringa con estrusore a vite senza fine*



[2. 7]

*BAAM, big area additive manufacturing*



### 3

## **Potenzialità e applicazioni delle tecnologie additive per la produzione di componenti e sistemi metallici**

*Maurizio Vedani*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica | [maurizio.vedani@polimi.it](mailto:maurizio.vedani@polimi.it)*

### **I principi dell'Additive Manufacturing con i metalli (SLM)**

Le tecniche di additive manufacturing per i materiali metallici comprendono due ampie famiglie di processi additivi: Direct Metal Deposition, deposizione diretta di polveri tipicamente attraverso l'utilizzo di bracci robotici, e Select Laser Melting, stampa a letto di polvere.

La prima tecnologia consente di creare geometrie di dimensioni medio-grandi, grazie alla deposizione di polveri mediante una torcia laser oppure utilizzando un filo continuo di materiale da depositare. È una tecnica relativamente consolidata che trae ispirazione dalle lavorazioni di laser cladding ora spinte a deposizione di spessori rilevanti non solo per volumi pieni ma anche per pareti. La possibile integrazione di processi di produzione additiva e sottrattiva ha portato alla creazione di centri di lavoro ibridi e combinati in grado di stampare un componente in metallo e, senza rimuovere il pezzo dal sistema, completare le fasi di finitura, filet-

tatura e foratura con la precisione di frese a controllo numerico.

La tecnica del Selective Laser Melting, processo a letto di polvere, è più recente rispetto alla precedente e consente di lavorare particolari di dimensioni contenute. Il processo prevede fasi successive di deposizione di uno strato sottile di fine polvere metallica, la fusione selettiva di una "sezione" del pezzo e la ripetizione ciclica di questo processo strato per strato, fino al completamento della forma 3D: all'interno di una camera protetta, la polvere viene quindi deposta su una superficie di stampa e consolidata attraverso un fascio laser che esegue una scansione su un'area localizzata definita da uno schema CAD. Il fascio laser fonde lo strato superiore di polvere, rifondendo parte degli strati precedenti per creare un volume continuo solido. Ogni nuovo layer ha spessore dell'ordine di 20-60  $\mu\text{m}$  e, a fine ciclo di lavorazione, la polvere non consolidata viene rimossa, filtrata e riciclata.

## I materiali per AM e le loro caratteristiche

Le polveri di leghe metalliche per SLM vengono prodotte per atomizzazione in gas, ricercando una forma sferica delle particelle che ne permetta la buona scorrevolezza e dimensioni molto fini ed uniformi. Esse vengono poi setacciate per utilizzare solo una finestra dimensionale piuttosto ristretta, centrata attorno ad un valore medio di 30-40  $\mu\text{m}$ . Commercialmente sono disponibili diverse leghe in forma adatta di polveri; esse sono però composizioni di materiali tradizionali, nonostante la ricerca si stia orientando nella definizione di specifiche leghe per le tecniche di fabbricazione additiva. In prima approssimazione le polveri impiegate nei processi di additive manufacturing possono essere leghe tradizionali da fonderia, leghe saldabili e leghe a matrice sufficientemente duttile a caldo, in grado di tollerare le tensioni dovute al rapido raffreddamento indotto dal processo.

Il costo delle polveri è piuttosto alto, ma questo non incide in modo rilevante sul costo del prodotto finale, soprattutto per particolari complessi che altrimenti andrebbero lavorati per asportazione. In un'ottica di analisi dei costi «buy-to-fly ratio» - il rapporto tra il volume di materiale acquistato per produrre un oggetto e il suo peso finale - il processo SLM prevede il riutilizzo della polvere non consolidata circa al 99%, con un elevatissimo

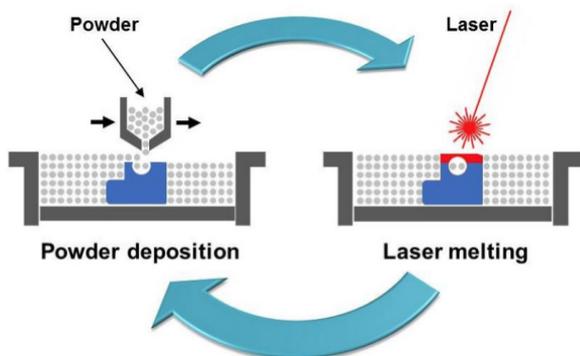
rendimento del materiale che effettivamente viene utilizzato per il componente finale.

Nonostante i materiali disponibili sul mercato nel campo dei metalli per additive manufacturing non siano molti, alcuni gruppi di ricerca stanno sviluppando nuove leghe. Nel grafico sottostante possiamo vedere come siano disponibili acciai, leghe di alluminio, titanio e materiali preziosi, e come il panorama sia sufficientemente completo dal punto di vista delle proprietà meccaniche del materiale per permettere differenti e molteplici applicazioni industriali.

I componenti prodotti utilizzando questi processi di stampa 3D hanno proprietà meccaniche confrontabili con i corrispondenti materiali prodotti con tecnologie più convenzionali come laminati o getti da fonderia. Dalle ricerche effettuate presso il laboratorio AddMe.Lab del Politecnico di Milano, su provini di differenti materiali metallici prodotti con la tecnica di Selective Laser Melting, si può notare come i valori riportati nei test e nelle curve di trazione siano del tutto confrontabili e più che soddisfacenti.

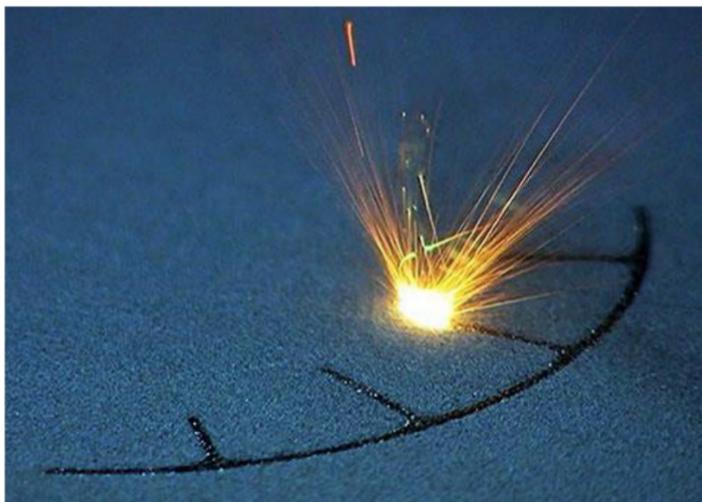
Di seguito l'esempio di un acciaio inossidabile AISI 316L comunemente utilizzato per diverse applicazioni in fabbricazione additive. I grafici riportano (a sinistra) la resistenza a trazione misurata in funzione della potenza specifica del laser utilizzato e (a sinistra) le curve di trazione per alcuni provini prodotti con processo ottimizzato. Dall'analisi della microstruttura del materiale solidificato possiamo invece desumere come il volume solido possa formarsi: si notano una serie di innumerevoli microsaldature che sovrapposte e accostate l'una all'altra producono il volume di riferimento. In un cubetto di 1cmq di materiale stampato con questa tecnologia si accumulano circa 300 metri di un fine cordone di saldatura.

Una caratteristica interessante del processo SLM per alcune leghe metalliche è la possibilità di non effettuare il trattamento termico di solubilizzazione, come convenzionalmente richiesto nei processi standard. È questo il caso dell'acciaio ad alta resistenza Maraging 300Ni18 (EN 1.2709) dove il rapido raffreddamento del materiale dopo il processo di fabbricazione additive consente di procedere direttamente alla fase di invecchiamento a 460°C, saltando la tempra di soluzione che viene convenzionalmente eseguita portando in un forno ad 815°C il pezzo e poi temprandolo in acqua.



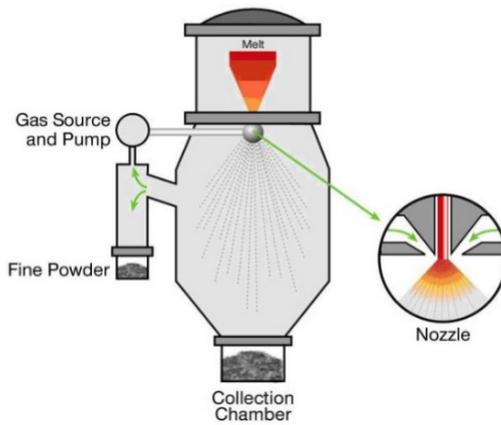
[3 . 1]

*Schema del processo di Selective Laser Melting*

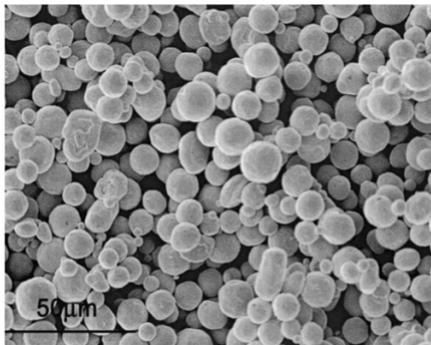


[3 . 2]

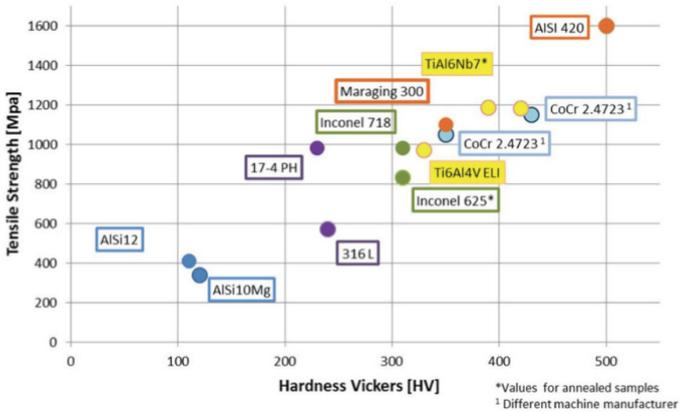
*Immagine della scansione del raggio laser (Ref: [www.ge-energy.com](http://www.ge-energy.com))*



[3.3]  
*Schema del processo di atomizzazione dei metalli*

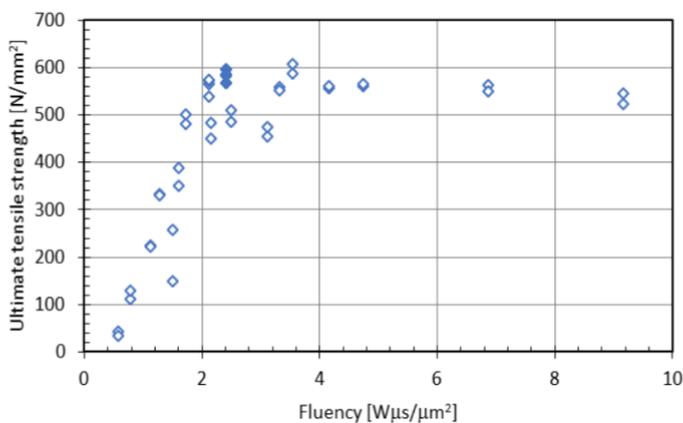


[3.4]  
*Polveri di metallo al microscopio*



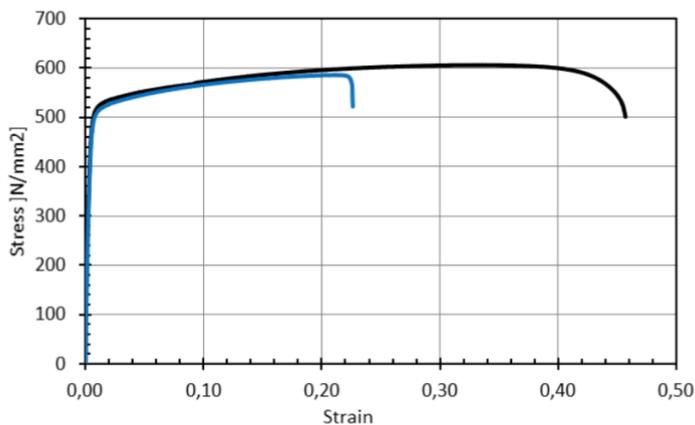
[3 . 5]

*Panorama delle polveri commerciali di leghe metalliche per SLM*



[3. 6]

*Acciaio AISI 316L : diagramma delle proprietà meccaniche al variare della potenza specifica del laser impiegato*



[3. 7]

*Acciaio AISI 316L : grafico della resistenza a trazione*

## Settori di maggiore interesse

Tra i settori di maggior interesse per le applicazioni industriali delle tecnologie di fabbricazione additive per i materiali metallici troviamo l'aerospazio e il trasporto su terra, con applicazioni che spaziano da componenti strutturali per motori e combustori, a pale per turbine, il settore medicale, con l'opportunità offerta da queste nuove tecnologie di produrre impianti e protesi su misura del paziente, e l'industria della componentistica idraulica. Qui, le opportunità offerte dalla libertà di creazione delle forme consentono molteplici opportunità nella progettazione di impianti di raffreddamento o condizionamento termico per stampicon canali che possono facilmente seguire le curvature delle figure degli stampie. Nel campo del design del gioiello sono in atto molteplici sperimentazioni con materiali preziosi dove è diventato possibile realizzare forme non convenzionali, leggere e con caratteristiche di resistenza estremamente elevata.

## I progetti «AddMe.Lab» e «Nuvole»

Il Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Politecnico di Milano, a fianco di altri Dipartimenti dell'ateneo, è attore privilegiato delle ricerche in ambito additive manufacturing per il settore dei metalli. In particolare, dal 2015, un sistema di Selective Laser Melting Renishaw 250 si è aggiunto alle attrezzature disponibili nei laboratori ed ha costituito il fulcro di un laboratorio per la produzione additiva di parti metalliche. L'obiettivo del progetto che ha portato alla nascita del laboratorio AddMe.Lab è la volontà di fondere diverse competenze di ricerca presenti al Dipartimento di Meccanica con le esperienze di partner industriali per creare un centro sulla fabbricazione additiva con i metalli. Le linee di ricerca promosse sono quattro: nuove polveri e formulazioni per migliorare le prestazioni dei materiali, processo SLM ed i parametri laser per migliorare qualità micro- e macro-geometrica, sensorizzazione della macchina per garantire la capacità di controllo e la retroazione on-line, prototipazione di parti per la validazione di prodotti di end user. L'attività del AddMe.Lab si affianca a quella degli altri laboratori dipartimentali e interdipartimentali presenti al Politecnico, lavorando in sinergia sulle potenzialità proprie

della fabbricazione additiva e sulle opportunità che questa offre alle imprese manifatturiere.

Un esempio di progetto multidisciplinare con apporti sia dal mondo accademico sia da quello industriale è Nuvole– “NUovi processi Volti alla costruzione di Oggetti Leggeri ed Ergonomici in composito e titanio” finanziato da Regione Lombardia per gli anni 2017-2019. Questa ricerca nasce proprio per il settore nautico e abbina i temi delle strutture leggere in composito con connessioni o sistemi di movimentazione in titanio prodotte per stampa additiva. La linea di sviluppo del manifatturiero avanzato, finanziata attraverso un bando di Regione Lombardia, promuove l’implementazione di tecnologie per processi di produzione avanzati di prodotti ad alto valore aggiunto. L’iniziativa è quindi orientata alla messa a punto delle metodologie di progettazione e allo sviluppo di tecniche di realizzazione di prodotti di design per il settore nautico caratterizzati da eleganza, leggerezza, personalizzazione, modularità ed ergonomia, sfruttando in modo innovativo l’abbinamento di materiali con proprietà differenti.



## 4

### **Materializzare prodotti: stampa 3d & design**

*Patrizia Bolzan*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Design | [patrizia.bolzan@polimi.it](mailto:patrizia.bolzan@polimi.it) | [www.polifactory.polimi.it](http://www.polifactory.polimi.it)*

La recente diffusione dell'Additive Manufacturing nei più diversificati ambiti e la crescente attenzione attorno al tema della fabbricazione digitale è un fenomeno che interessa le discipline del design sotto diversi aspetti. Grazie alla sua diffusione, infatti, gli oggetti realizzati con questa tecnologia possono essere molteplici e la tecnologia stessa si pensa possa arrivare a raggiungere ogni casa, in un processo di democratizzazione diffusa. Attorno al tema della stampa 3D stanno montando fenomeni di semplificazione e mistificazione, causati da un generalizzato interesse mediatico. Tale interesse non restituisce né il grande potenziale di trasformazione che questa tecnologia incorpora e offre, né un quadro delle reali prospettive di sviluppo che essa avrà all'interno dei processi di progettazione, produzione e distribuzione. Cosa si costruisce? Perché utilizzare strategie di stampa additiva per la costruzione di oggetti? Come la manifattura additiva influenza il modo in cui questi sono progettati e realizzati? Queste sono solo alcune delle domande che ad oggi non hanno ancora

trovato una risposta condivisa.

L'Additive Manufacturing ha un ruolo riconfiguratorio e ricombinatorio all'interno dei processi progettuali e produttivi, tuttavia è errato pensare che tale processo possa andare a sostituirsi ad altre forme di progettazione e produzione, ma si affianca ad esse, integrandole ed espandendole. Con queste premesse, l'utilizzo di macchine per la fabbricazione additiva, può produrre non solo materializzazione di oggetti (Rapid Prototyping) ma anche e, forse, soprattutto manifattura (Direct Digital Manufacturing). La manifattura prevede una filiera organizzata in cui essa si inserisce con i suoi ruoli produttivi; gli strumenti di 3D printing, invece, vengono impiegati per verifiche dimensionali, test, prove e valutazioni non solo dal punto di vista produttivo ma anche da quello progettuale. Attraverso analisi di tipo tecnico e progettuale è possibile definire il cambiamento in atto, anticipando le applicazioni future.

Le radici del fenomeno che sta portando ad un profondo cambiamento del sistema produttivo che si sta spostando da una produzione di massa a una micro-produzione diffusa possono essere identificate in tre driver: la democratizzazione delle tecnologie, la personalizzazione della produzione e l'indipendenza della distribuzione. Questi driver hanno generato una profusione del movimento dei Maker, rendendo possibile la diffusione esponenziale delle macchine di stampa 3D non professionali e la possibilità di fabbricare in ogni luogo e su differente scala dimensionale oggetti, anche di uso domestico.

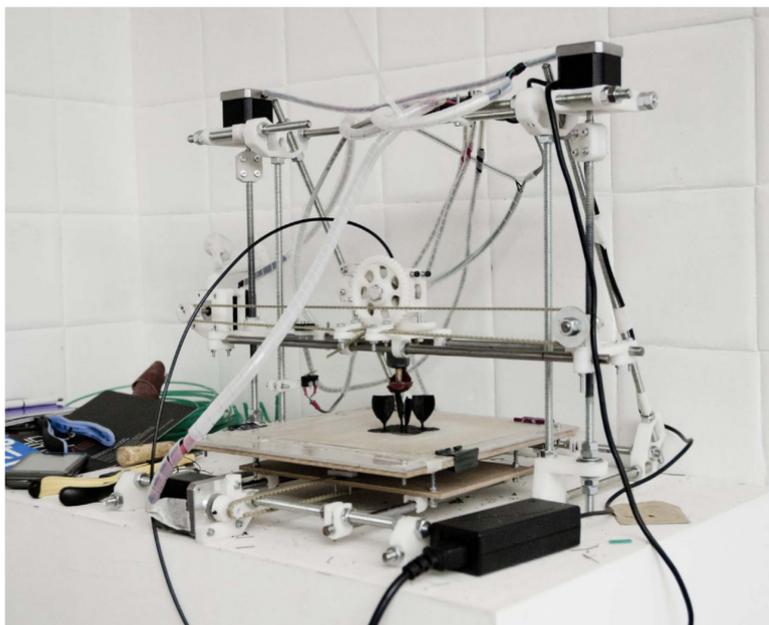
Fare le cose – diventare un maker – significa prima di tutto riappropriarsi di quella delega che, più o meno un secolo fa, abbiamo concesso senza troppi pensieri alle grandi aziende che stavano rapidamente imponendosi sul mercato grazie alle tecniche del marketing e della comunicazione (S. Micelli, 2011).

I modelli applicativi delle tecnologie di Additive Manufacturing, a oggi presenti, necessitano di una ulteriore comprensione e discussione per poter essere adeguatamente adottati nelle pratiche di design. La fabbricazione additiva ha portato a un cambiamento del rapporto tra progettista e tecnologia. Da un approccio di tipo individuale alla costituzione e valorizzazione di gruppi collettivi in un'ottica di adozione dell'approccio open

source. In questa crescita di gruppi collettivi, il design ha giocato spesso un ruolo rilevante nel definire, più che una rivoluzione, un'evoluzione industriale. L'Additive Manufacturing, infatti, non si può sviluppare in modo maturo esclusivamente attraverso un processo competitivo rispetto alle tecnologie precedenti, ma è chiamato ad effettuare un lavoro in continuità, dove le tecnologie innovative sono spesso impiegate per migliorare e implementare progetti condivisi. Nel processo di generazione dell'Additive Manufacturing non è talvolta la tecnologia in sé a essere determinante in senso assoluto sulle performance del prodotto stesso, ma il pensiero alla base della creazione di oggetti. Le macchine per l'Additive Manufacturing possono in potenza sono in grado di realizzare qualsiasi pezzo, ma non per questo è sensato sceglierle come strumento materializzante assoluto; piuttosto è maggiormente auspicabile ragionare su geometrie progettate per questo tipo di tecnologia, che tengano in considerazione i suoi gradi di libertà ma anche i vincoli progettuali propri delle stampanti 3D. In tal senso, una geometria ben progettata per una specifica tecnologia additiva potrà essere sempre realizzata da qualsiasi stampante 3D che adotta lo stesso tipo di logica produttiva. Ne sono un esempio le macchine entry-level presenti nelle abitazioni, nei laboratori condivisi e nei centri di ricerca di numerosi atenei. Esse, lontane dall'immagine delle prime stampanti della famiglia Rep-rap, fornite per pezzi e assemblabili dagli stessi utenti, conservano le stesse peculiarità proprie del processo di fabbricazione additiva, con un graduale e costante miglioramento delle performance.

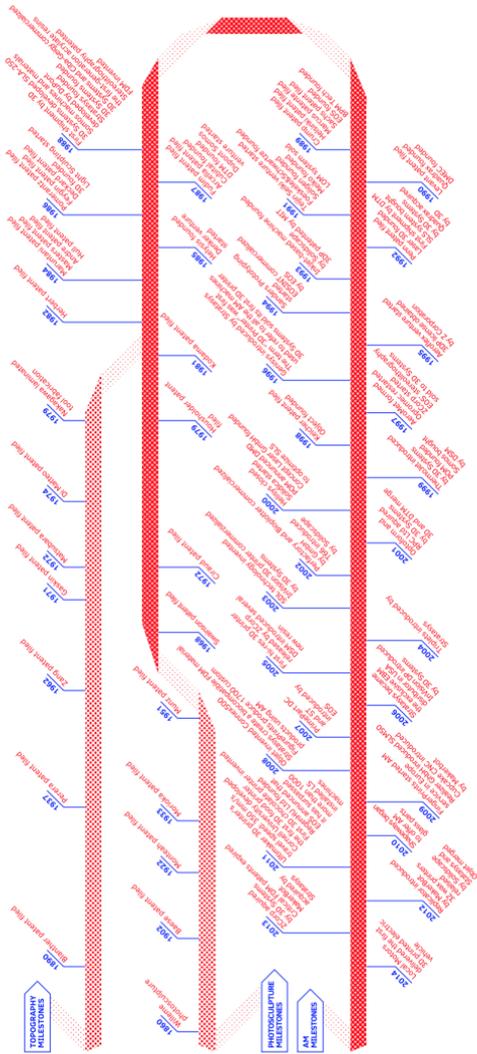
Nella storia dei processi e delle tecnologie di Additive Manufacturing notiamo come negli ultimi cinque anni i milestone siano molto più numerosi rispetto ai primi sviluppi che fanno derivare queste tecniche da altre strategie produttive quali la topografia e la scansione tridimensionale.

Ad oggi tutte le tecnologie di fabbricazione additiva possono essere ricondotte a due famiglie principali, che si differenziano in base al principio produttivo che adottano: Binding processes (SLA, SLS, LOM, 3DP) e Deposition Processes (FDM, FFF, Paste Ext, Moly/Multi Jet). Si deve però considerare come questa divisione non sia del tutto rappresentativa della lettura che si può effettuare sul fenomeno della produzione di macchine



[4. 1]

*Rep-**rap** modello Galileo by Kentstrapper, 2011*



[4.2]  
Storia dell'Additive Manufacturing

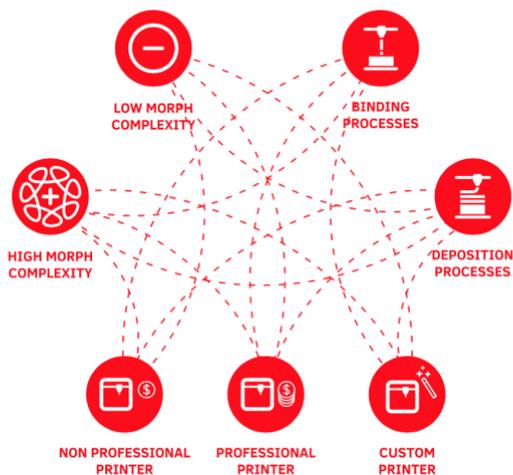
per la stampa 3D. Nonostante l'elevata flessibilità offerta da queste macchine, una nicchia di utenti mostra la necessità o la volontà di possedere una stampante 3D personalizzata; alle apparecchiature personali o professionali, spesso nel modo della ricerca accademica, industriale, ma anche artistica e artigianale, si assiste allo sviluppo di differenti dispositivi personalizzati per serie limitate e prodotti/materiali specifici. Si può, dunque, asserire che esistano altre due famiglie di stampanti personalizzate: stampanti 3D commerciali modificate e riadattate (haked printers) oppure altri strumenti trasformati a hoc per la fabbricazione additiva (switch into printers).

All'interno di questa varietà tipologica, non solo di attrezzatura ma anche di processi produttivi e materiali, possiamo compiere un'analisi preliminare per una valutazione della congruità tra prodotto/serie di prodotto da realizzare e strategia produttiva. Vi è uno strumento, il 3D Printing Compass, che consente di mettere in relazione la dimensione dell'oggetto con la complessità della sua geometria, il valore economico, l'ampiezza della serie di produzione e l'obiettivo funzionale o estetico dell'elemento. Nelle tecniche di Additive Manufacturing è, infatti, importante valutare il tipo di relazioni fisiognomiche alla base della creazione di un oggetto. I processi del design divengono così necessari per la comprensione di questi rapporti in chiave proiettiva, non esclusivamente dal punto di vista tecnologico ed economico.

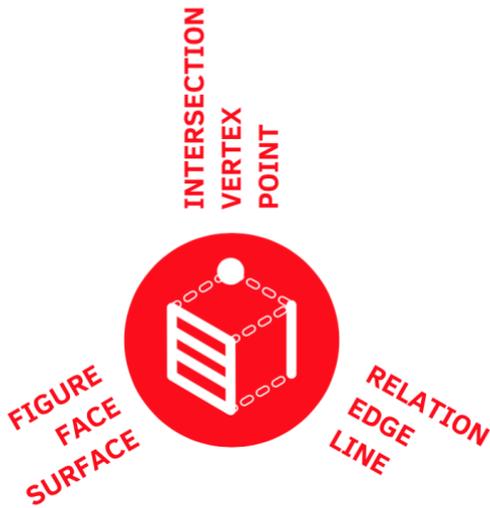
Per definire le regole progettuali di materializzazione attraverso queste tecnologie è possibile fare un parallelismo con gli elementi base della geometria descrittiva — punto, linea, superficie — e scomporre un qualunque oggetto in un sistema di elementi funzionali etici primari e secondari, le intersezioni fra gli stessi. Facendo una trasposizione tra questa disciplina e il processo di creazione di oggetti attraverso l'Additive Manufacturing, si può presumere che i punti diventino le articolazioni o giunti, le linee gli scheletri e le superfici le pelli. Inoltre, la combinazione di più elementi base può creare sottoinsiemi: pareti, apparati e organi, fino alla costituzione della totalità dei corpi.

PART SIZE	PART COMPLEXITY	PROJECT VALUE	SERIES SIZE	PURPOSE
+	+	+	+	+
		€1000		<b>FUNCTIONAL</b>
Ping pong ball	Many or difficult undercuts	Less than €1.000	100 to 1.000	Only functional
-	-	-	-	-

[4.3]  
3D Printing Compass (<http://3dprintbarometer.com>)



[4.4]  
Schema delle relazioni fisiognomiche



[4. 5]

*Architettura di prodotto. Secondo la geometria descrittiva, esistono tre tipi di costruzioni: di figure, di relazioni, di intersezioni. (Migliari, 2007)*

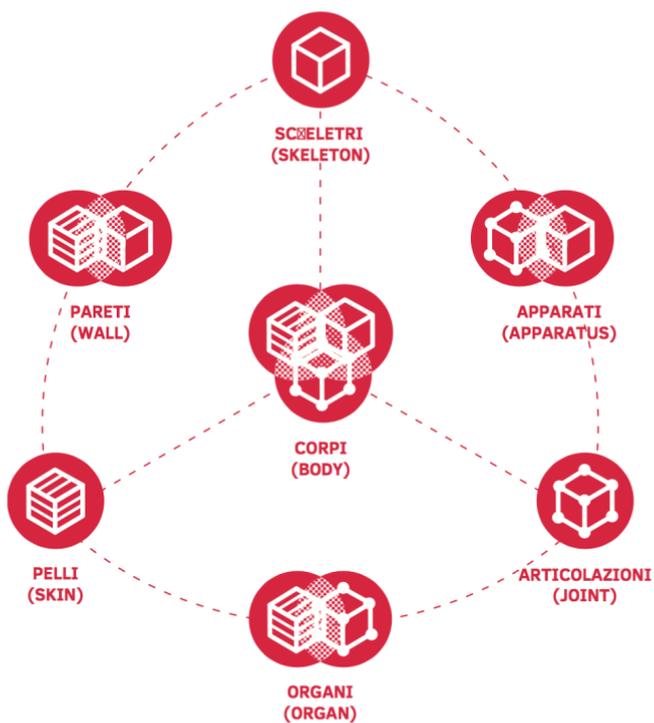
Le pelli stampate in 3D sono gli elementi di perimetro o di rivestimento di un oggetto, che possono apparire in forma unitaria o ripetuta. Possono auto-connettersi o necessitare di ulteriori elementi di giunzione e non hanno caratteristiche strutturali. Quest'ultime sono invece proprie degli scheletri, elementi in grado di definire il volume teorico di un oggetto. Possono presentarsi singolarmente o costruire relazioni fra altri e raramente sono in grado di costruire relazioni fra essi stessi. Le articolazioni sono i casi che più si manifestano nell'ambito dell'Additive Manufacturing e abilitano alla connessione fra due o più parti in tutte le direzioni dello spazio tridimensionale. Possono stabilire inoltre relazioni connettive con uno o più giunti della stessa tipologia e materiale o di differente carattere. Questa divisione in elementi base è, per sua natura, modulare. La somma di essi crea gli elementi secondari.

- **Pareti (pelle + scheletro):** strutture portanti con caratteristiche estetiche o di delimitazione spaziale effettiva. Esse non presentano caratteristiche intrinseche di cinematismo o di flessibilità.
- **Apparati (scheletro + articolazione):** strutture reticolari fisse, snodabili o estensibili. Hanno una naturale predisposizione alla modularità, tipica dei giunti, aumentando i gradi di libertà grazie alla componente strutturale degli scheletri.
- **Organi (articolazione + pelle):** sistemi privi di caratteristiche strutturali, che amplificano l'estensione in modo libero nello spazio. Sono tipicamente configurazioni in cui materiali rigidi si snodano ed eseguono cinematismi adattivi.

L'insieme di tutti gli elementi base all'interno di un unico oggetto per somma o integrazione crea i corpi. Si tratta prevalentemente di artefatti complessi, totalmente realizzati attraverso la manifattura additiva.

Nel relazionarsi alla tecnologia Additive Manufacturing il design traccia nuove possibili applicazioni, influenzando gli sviluppi futuri. Il designer non è un semplice utilizzatore, ma diventa un influenzatore dello sviluppo tecnologico e applicativo.

La possibilità di modificare sia l'estetica di prodotti che le relazioni stesse tra manifattura e progettisti, ha spinto i designer a creare forme impossibili per la fabbricazione tradizionale e a sperimentare filiere prodotti-



[4. 6]

*Architettura di prodotto: pelli, scheletri, articolazioni, pareti, apparati, organi e corpi.*



**PARETI  
(WALL)**



**APPARATI  
(APPARATUS)**



**ORGANI  
(ORGAN)**

[4. 7]

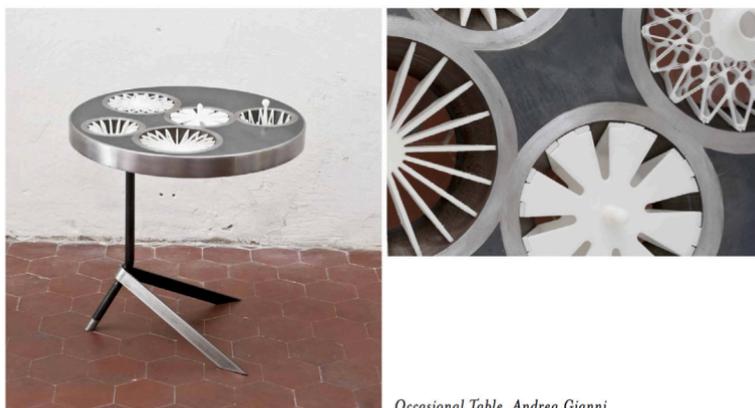
*Architettura di prodotto: pelli, scheletri, articolazioni, pareti, apparati, organi e corpi.*

ve insolite. Tra le prime applicazioni sperimentali più rappresentative di questa nuova ricerca troviamo l'iniziativa Analogico Digitale, organizzata presso lo spazio di Galleria Lambrate a Milano in occasione del Salone del Mobile 2012. In questa mostra sono stati presentati sette elementi d'arredo progettati e realizzati grazie alla commistione tra artigianato, design e tecnologie di fabbricazione digitale.

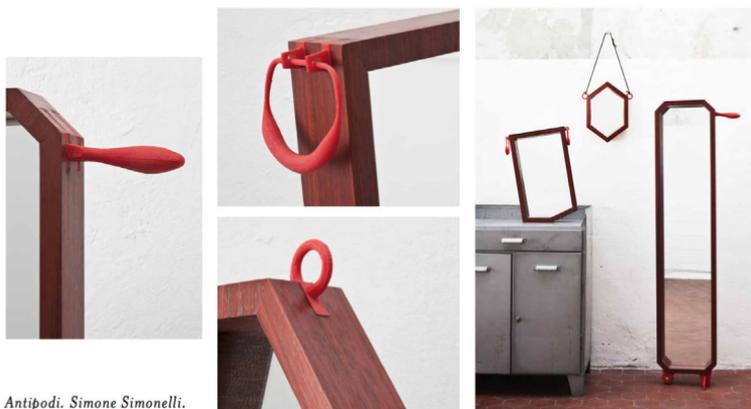
È interessante notare come l'impiego di tecnologie di manifattura additiva, spesso entry level, associato ad altre tecniche tradizionali di lavorazione di metallo, vetro e legno, crei elementi di arredo ibridi con funzioni aggiunte e complementari.

Un altro caso studio significativo, ospitato nuovamente nello spazio Subalterno della Galleria Lambrate a Milano, è Mondopasta — riflessioni sul tema della produzione artigianale ed industriale della pasta — predecessore delle iniziative di ricerca applicata dell'azienda alimentare Barilla proprio in questo settore. Anche in quest'occasione numerosi progettisti hanno preso parte all'iniziativa reinterpretando le tecnologie di fabbricazione digitale per creare tools di produzione personali e innovativi, o lavorando direttamente sugli impasti e le loro caratteristiche di colore e forma. Tra i progetti presentati che re-inventano approcci e strumenti per il mondo della pasta, vi è un progetto in cui, attraverso una macchina SLS, sono state realizzate delle rotelle per il taglio della pasta fatta in casa, con la possibilità di decorare la linea di taglio; un altro progetto ha creato una nuova tipologia di rulli per la macchina impastatrice Imperia funzionali alla generazione di spaghetti a sezione variabile, mettendo così fine al battibecco di numerose tavole: pasta al dente o troppo cotta? Inoltre, ancora in un altro progetto, la lasagna diventa supporto per la realizzazione di elementi decorativi con il nero di seppia, rubando il primato al cake design per la creazione di alimenti celebrativi; e ancora, in un'altra sperimentazione, lo spaghetti diviene unico e continuo attraverso la stampa 3d dell'impasto su un rocchetto girevole e automatizzato.

Questi esempi sono dimostrazione del ruolo chiave del designer a fianco di produttori ed ingegneri nell'applicazione sapiente della tecnologia in filiere produttive inusuali e nella creazione di prodotti e processi che anticipano le necessità e i bisogni futuri.



*Occasional Table. Andrea Gianni.*



*Antipodi. Simone Simonelli.*

[4 . 8]

*Selezione di progetti esposti in Analogico Digitale*



Žag. Alessandro Stabile

Stracottoalente. Massimiliano Adami

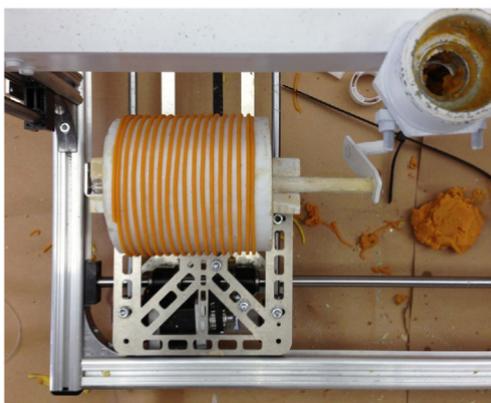
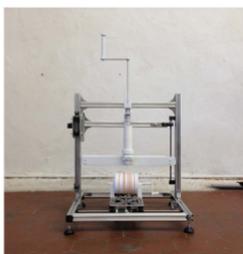


Nigredo. Tecnificio

[4.9]

Selezione di progetti esposti in Mondopasta

*Uncut. Lanzavecchia + Wai*



[4. 10]

*Selezione di progetti esposti in Mondopasta*



## Sezione 2

### **Esperienze in campo Nautico**



## 5

### **Le barche si stampano. L'Additive Manufacturing come scenario futuro della progettazione nautica**

*Paolo Nazzarro | Guido Zannoni*

*Superfici s.c.r.l. | [studio@superficilab.com](mailto:studio@superficilab.com) | [www.superficilab.com](http://www.superficilab.com)*

Le barche si stampano. O meglio, le barche si stampano?

Da questa provocazione nasce Superfici, dapprima start-up fondata da tre colleghi universitari, Paolo Nazzarro, Guido Zannoni e Davide Telleschi, e dal luglio 2016 società con attività affermata nel campo dell'additive manufacturing per il settore nautico.

Superfici offre servizi alla cantieristica nautica, ai progettisti, ai makers e inventori, in sei aree ben definite.

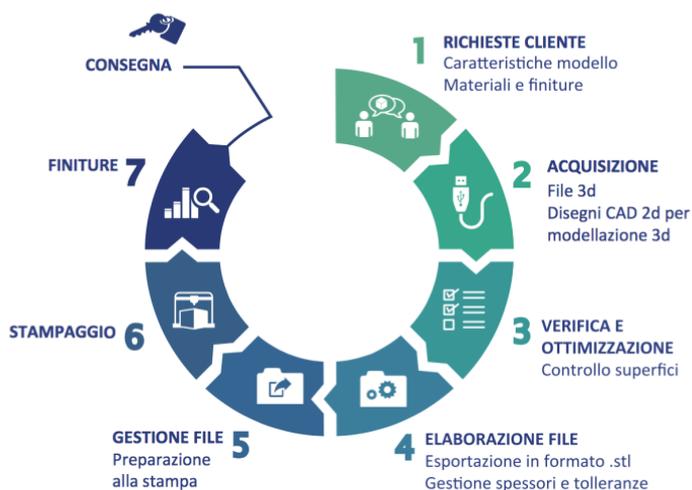
- Modelli in scala: analisi dimensionale, modelli da esposizione, studio di movimentazioni, domotica e animazioni
- Prototipi funzionali: supporto al design, verifica delle proporzioni, rapidità di realizzazione
- Prodotti industriali: lavorazioni CNC, tamponi per stampi in FRP, componentistica di bordo
- Ingegneria inversa: analisi dettagliata del funzionamento, scansione tridimensionale, modellazione e prototipizzazione

- Supporto alle aziende: progettazione e design, ingegneria industriale, sviluppo e gestione del progetto, consulenza per l'industria 4.0
- Progetti di ricerca: collaborazione con le università, rapporti con le associazioni di tutela del patrimonio storico nautico e navale, partecipazione a bandi di ricerca nazionali ed europei.

La realizzazione di modelli in scala è stato il punto di lancio dell'attività di Superfici. Questo ha permesso al team di lavoro di conoscere meglio le potenzialità e i limiti delle macchine a disposizione, di valutare le linee di ricerca e gli investimenti futuri e di mettere a punto un processo di progettazione-realizzazione-finitura ad hoc per ogni cliente in grado di soddisfare esigenze differenti con un discreto grado di libertà progettuale. Le tecniche di additive manufacturing per questo settore applicativo sono in particolar modo indicate per la rapidità delle lavorazioni, per il grado di dettaglio che è possibile realizzare e per la leggerezza del componente stampato.

Queste prime esperienze sono state arricchite dalla collaborazione con l'università di Genova, Polo Universitario Marconi, nel campo del restauro nautico. All'apparenza contraddittorio, il rapporto tra additive manufacturing e restauro nautico ha aperto nuove vie di ricerca per la digitalizzazione del patrimonio storico e per la riproduzione di componentistica di produzione artigianale. Le possibilità offerte dall'ingegneria inversa e dal rilievo digitale permettono di sviluppare modelli CAD stampabili e replicabili.

Il primo caso studio applicativo di questo nuovo processo di rilievo digitale e 3D printing per il restauro nautico è stato sviluppato proprio in collaborazione con il corso di laurea magistrale in Yacht Design del Polo Universitario G. Marconi di La Spezia, Università di Genova – Politecnico di Milano, e l'associazione Amici del Leudo di Sestri Levante. Oggetto di studio il leudo "Nuovo Aiuto di Dio". Gli studenti del corso di laurea specialistica, coordinati dalla Prof.ssa Maria Carola Morozzo, hanno effettuato un rilievo a bordo con strumenti analogici e digitali e riprodotto le geometrie come matematiche CAD con l'obiettivo di creare un catalogo digitale open source della componentistica dell'imbarcazione. Da qui sono stati realizzati i modelli fisici in scala 1:1 delle attrezzature di bordo e alcuni modelli costruttivi dell'imbarcazione.



[5. 1]

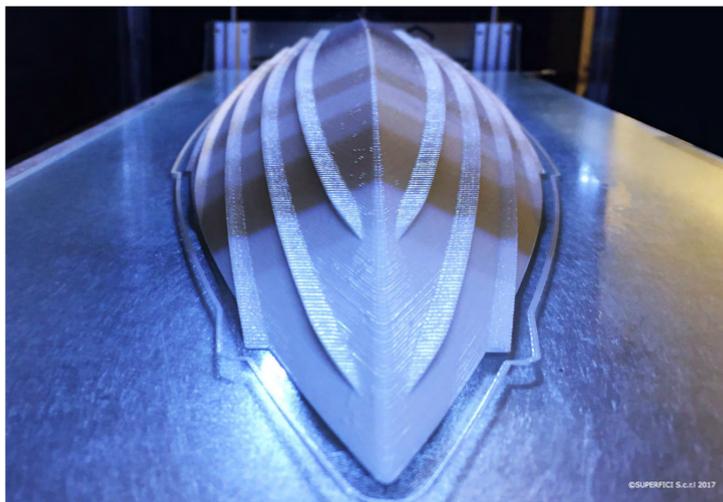
*Prototipi di studio: analisi di forma finiture e post produzione*



©SUPERFICI S.c.r.l 2017

[5 . 2]

*Fasi di realizzazione di un prototipo di studio, imbarcazione ASH*



©SUPERFICI S.c.r.l 2017

[5 . 3]

*Fasi di realizzazione di un prototipo di studio, imbarcazione ASH*



[5.4]

*Fasi di realizzazione di un prototipo di studio, imbarcazione ASH*



[5. 5]  
*Campagna di rilievo a bordo di "Nuovo Aiuto di Dio"*



[5. 6]  
*Particolare di attrezzatura originale e copia in 3D printing*

Questo lavoro di ricerca ha permesso all'associazione e alle università coinvolte di creare una piattaforma web per la tutela delle imbarcazioni d'epoca del territorio ligure utile sia come memoria storico-didattica che come supporto agli armatori e ai cantieri di restauro nautico.

Superfici affianca l'attività di ricerca con attività di supporto alle aziende, principalmente di campo nautico, per l'analisi formale e tecnica di componentistica di bordo progettata e realizzata in additive manufacturing. In questo caso, gli oggetti realizzati possono avere funzione sia estetica che funzionale e possono essere facilmente affiancati a componenti realizzati con tecniche tradizionali di lavorazioni in vetroresina. L'additive manufacturing consente in questo caso di lavorare direttamente su un file 3d per l'ottimizzazione delle superfici e dei materiali. È possibile creare strutture cave o a traliccio per enfatizzare allo stesso tempo principi di leggerezza e robustezza e per creare alloggi per componentistica funzionale elettrica e idraulica. Inoltre con questa tecnica è possibile realizzare i tools di produzione necessari alla cantieristica nautica sia per il settore dei compositi sia nell'allestimento della componentistica meccanica che di arredo interno ed esterno. Ne sono un esempio i tamponi e le portate per gli stampi di fabbricazione componenti in FRP, rimovibili dopo le fasi di laminazione ed estrazione dei pezzi finiti. In quest'applicazione le componenti di leggerezza proprie dell'additive manufacturing sono essenziali, oltre che per un fattore di ottimizzazione materiali, scarti e sostenibilità, per la maneggiabilità dell'oggetto stesso da parte degli operatori sugli stampi. Questa proprietà è sfruttata anche nella produzione di dime e riscontri di controllo grazie ai quali le maestranze sono in grado di verificare direttamente in fase di produzione dell'imbarcazione stessa la coerenza dell'oggetto manufatto rispetto al progetto 3D.

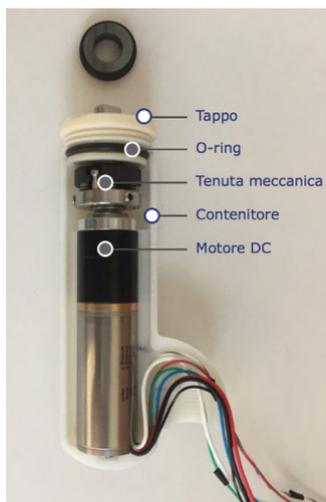
L'attività di supporto alle aziende non si limita alla produzione di componentistica con le tecniche di stampa 3D ma entra nel merito dei processi di ideazione e progettazione di oggetti custom che risulterebbero essere troppo costosi e complessi se realizzati con tecniche di manifattura tradizionale.

L'oggetto qui raffigurato è la sede di un motore elettrico di un veicolo autonomo sottomarino realizzato per fabbricazione additiva in policar-

bonato ABS, un materiale che nell'ambito delle tecniche a filo fuso è tra i più resistenti e tenaci. Al suo interno notiamo come la componentistica tradizionale meccanica (un O-ring e un motore elettrico DC con relativa tenuta meccanica) trova alloggio integrandosi perfettamente. Sulla testa di questo elemento è inoltre montata un'elica anch'essa realizzata con la stessa tecnica di 3D printing, opportunatamente ottimizzata tramite analisi fluidodinamica.

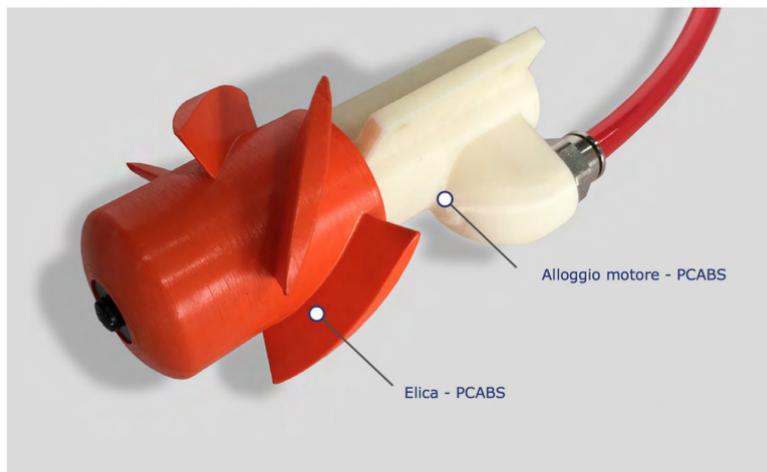
Questo componente, trattato superficialmente affinché possa risultare stagno, è stato testato in una camera iperbarica e risulta resistere ad una pressione fino di 50bar. In breve tempo, grazie all'impiego delle tecnologie di additive manufacturing, è stato possibile realizzare questo componente leggero e personalizzato che integra al suo interno elementi di fabbricazione tradizionale dell'ambito meccanico e tecnologie innovative di materiali plastici termoformabili.

Gli scenari futuri che questo tipo di applicazioni suggeriscono sono un ampliamento delle possibilità di stampare componentistica di grandi dimensioni integrando materiali differenti a densità e spessore variabili. La provocazione così lanciata da Superfici all'atto della sua fondazione "le barche si stampano" diventa una prospettiva reale. Sarà però necessario un ripensamento delle fasi progettuali di una imbarcazione perché le geometrie complesse dell'additive manufacturing possano essere per il settore nautico una risorsa e non più una limitazione.



[5.7]

*Particolare di truster per veicolo automomo sottomarino*



[5.8]

*Particolare di truster per veicolo automomo sottomarino*



## 6

### **Fabbricazione additiva nel comparto nautico: nuovi scenari e prospettive**

*Daniele Cevola*

*Livrea | [www.livreyacht.com](http://www.livreyacht.com)*

Le tecnologie di additive manufacturing, o più comunemente stampa 3d, offrono innumerevoli opportunità per le aziende che desiderano puntare sull'innovazione a costi contenuti. La possibilità di produrre geometrie differenti a partire da un modello digitale, sviluppato tramite specifici software di progettazione senza ricorrere all'ausilio di appositi stampi o tools di produzione, apre un panorama nuovo nel mondo della progettazione nautica. Questa tecnologia può aprire il mercato a piccole aziende che, prima di ora, erano escluse a causa dei costi elevati di prototipazione e sviluppo di imbarcazioni in piccole serie.

Proprio con l'obiettivo di esplorare le potenzialità offerte dalle emergenti tecnologie di additive manufacturing nasce la startup siciliana Livrea Yacht. I fondatori, Daniele Cevola e Francesco Belvisi, dal 2014 sviluppano attività di ricerca, progettazione e produzione di imbarcazioni e loro componentistica stampata in 3D. Livrea 26 Figlia del vento è il primo concept di imbarcazione per la produzione in additive manufacturing che

richiama le linee della barca tipica dell'isola pantese con una rivisitazione stilistica e tecnologica. La passione dei progettisti per questa tipologia di lancia ha permesso di portare avanti la grande tradizione siciliana della costruzione di barche, evolvendo la progettazione e la produzione a nuovi livelli. Il percorso progettuale ha portato così a una semplificazione e pulizia estrema delle linee dell'imbarcazione stessa aprendo le porte a tecniche di stampa 3d di materiali plastici per alcuni componenti sia di accessoristica sia strutturali.

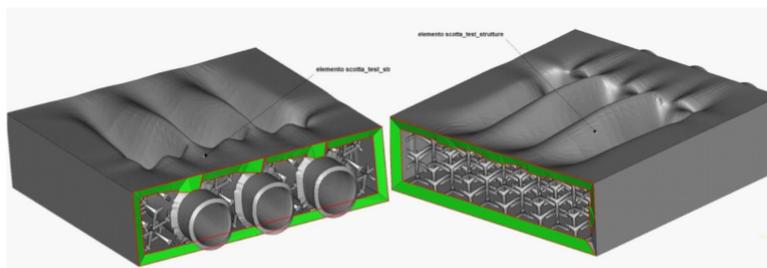
Il primo modello di questa imbarcazione realizzato interamente in scala 1:14 è stato costruito in Windform XT2.0, materiale a base poliammidica rinforzato con fibra di carbonio e particolarmente apprezzato nei settori del motorsport e dell'aerospazio. Esso esprime nella sua globalità l'essenza della tecnologia della stampa 3D. Un design che unisce la tradizione alla contemporaneità, abbinando processi costruttivi e materiali avveniristici. Grazie alle eccellenti proprietà meccaniche e la resistenza agli agenti esterni dei materiali scelti, la tecnologia di fabbricazione additiva è stata scelta per realizzare componentistica dell'imbarcazione Livrea 26. La collaborazione con CRP, azienda italiana che da più di 20anni si occupa di additive manufacturing ad alte prestazioni e lavorazioni cnc di meccanica e precisione, ha permesso di mettere a punto il nuovo processo di progettazione e fabbricazione riducendo i tempi di prototipazione da mesi a ore con un risparmio di risorse finanziarie e materiali costruttivi. Questo nuovo processo ha consolidato le prime esperienze di ricerca consentendo al gruppo di proseguire nell'attività di progettazione per rendere più leggeri i componenti e di sperimentare nuovi materiali. Infine, il processo ha permesso a Livrea di creare curvature complesse che migliorano le prestazioni della componentistica che non sarebbero state possibili con metodi di fabbricazione più tradizionali.

Ne è un esempio questo passadrizze, un innesto in area strategica finalizzato a integrare e nascondere le attrezzature di coperta. Questo elemento presenta al suo interno un sistema di drenaggio, per il deflusso dell'acqua piovana, e una struttura a traliccio che rende l'oggetto leggero e resistente.



[6. 1]

*Livrea 26 Figlia del vento*



[6. 2]

*Modello 3d del passadrizze di Livrea 26, Figlia del vento*

Il percorso progettuale ha stimolato la ricerca verso l'analisi delle strutture ad elementi reticolari anisogrid, finalizzata ad una ottimizzazione topologica delle strutture stesse in modo da rendere più leggera e resistente l'imbarcazione. I primi elementi strutturali di sperimentazione sono stati i core di pannelli sandwich. Fino ad oggi le strutture honeycomb sono le più performanti e per questo ampiamente impiegate nei settori in cui sono richieste alte prestazioni ed affidabilità, oltre che resistenza. Esse però non sono facilmente configurabili con forme complesse come curve di carena e geometrie di coperta. L'analisi ha quindi portato a realizzare in fabbricazione additiva strutture a traliccio, successivamente rivestite e finite con due pelli di laminato in fibra di carbonio. Queste configurazioni prendono spunto dagli studi di strutture fitomorfe e organiche che rappresentano in natura la migliore ottimizzazione topologica possibile. Si procede quindi verso una semplificazione dei calcoli di strutture generative che rendono il percorso progettuale più flessibile e dinamico. Le tecnologie di additive manufacturing diventano così una risposta reale ad una esigenza progettuale.

Dalla stampa 3D di componentistica nautica alla fabbricazione dell'intera imbarcazione si ha però un problema dimensionale che ha richiesto ulteriori ricerche in ambito tecnologico e di processo produttivo. Questa nuova fase del progetto vede la collaborazione di tre aziende internazionali: Kuka, fornitore di robot ad alta precisione, Lehmann & Voss, sviluppatore di nuovi materiali termoplastici, e Autodesk, supporto strategico e software per la modellazione e l'ottimizzazione dei percorsi macchina. Il progetto è uno dei primi esempi nell'ambito industriale, e non solo nautico, di sistemi di fabbricazione additiva robotizzati, multi-funzione e di grande formato. Il sistema sfrutta il controllo avanzato del movimento e le tecnologie dei sistemi di visione per sincronizzare la produzione robotizzata e quella di estrusione.

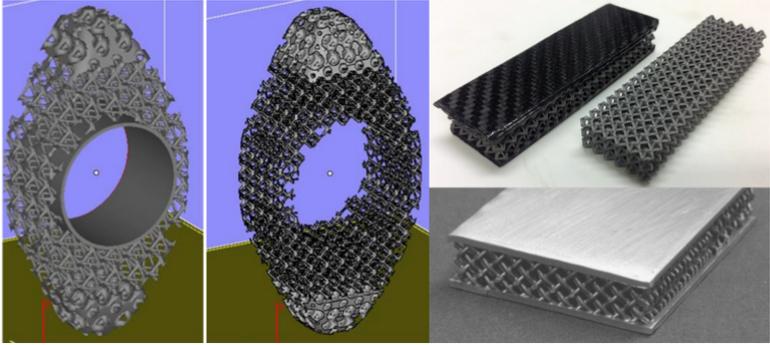
Dalle prime sperimentazioni pratiche del processo in scala 1:1 sono emerse alcune problematiche di deposizione del materiale. In primo luogo una scarsa aderenza al piano di lavoro, con prove sia su supporti in materiale plastico, che metallico e ligneo e una deposizione di materiale non uniforme. L'ottimizzazione dei materiali per la deposizione con tec-

nologie di 3d printing ha portato alla risoluzione di queste.

Un'altra problematica è dovuta alla scarsa capacità di fitting: il passaggio da una geometria alla seguente crea dei punti di unione non stabili con tendenza alla delaminazione per macroscopiche differenze di temperatura. Questo è amplificato dall'effetto corda del materiale in uscita dall'estrusore a vite.

La risoluzione di queste prime problematiche, grazie anche al supporto delle aziende partner del progetto, ha portato nel 2017 alla stampa della prima porzione di imbarcazione a scala reale del Livrea 26. Passando alla progettazione in Cloud, alla fabbricazione additiva robotizzata e all'utilizzo di nuovi materiali avanzati, la ricerca ha fatto numerosi passi avanti che avvicinano sempre di più il settore nautico all'additive manufacturing.

L'evoluzione del 3D printing porta ad una visione sempre più ampia del concetto di industria 4.0 in cui è possibile realizzare grandi produzioni che possono essere completamente differenti abbattendo i gravosi costi di modelli, stampi e successivo loro smaltimento. Il comparto nautico può diventare flessibile rilanciando le capacità di eccellenza ed esclusività proprie della nautica italiana. Ai progettisti è lasciato quindi il compito di esplorare un nuovo metodo progettuale libero dai vincoli della produzione tradizionale e dalla necessità per i cantieri di produrre modelli in serie. La sperimentazione di Livrea Yacht continua con una nuova sfida: nel corso del prossimo anno verrà varato il primo prototipo per le qualificazioni alla Minitransat 2019, competizione transatlantica individuale che copre oltre 4000 miglia tra Francia e Brasile, completamente stampato in additive manufacturing.



[6.3]

*Studio delle strutture reticolari per alleggerire e rinforzare i pannelli sandwich*



[6.4]

*Scarsa aderenza al piano di lavoro e deposizione di materiale non uniforme*



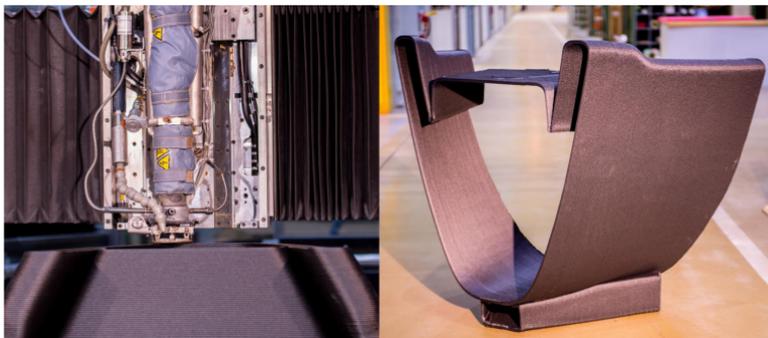
[6. 5]  
*Scarsa capacità di fitting*



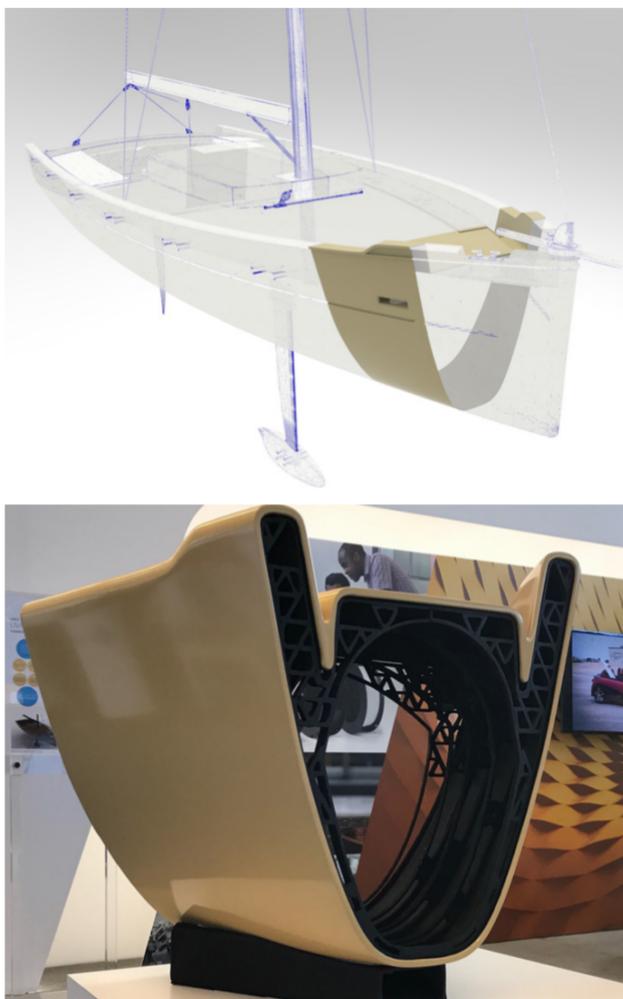
[6. 6]  
*Scarsa capacità di fitting*



[6. 7]  
*persistente memoria di forma dell'estrusore a vite causa di effetto corda*



[6. 8]  
*Sezione in scala 1:1 di Livrea 26 stampata durante il RAPID + TCT di Pittsburgh 2017*



[6.9]

*Sezione in scala 1:1 di Livrea 26 stampata durante il RAPID + TCT di Pittsburgh 2017*



## 7

### **Tecnologie free-form per la realizzazione di componenti nautici tramite fiber placement**

*Francesco Braghin*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica | francesco.braghin@polimi.it*

#### **La Barca Laboratorio a supporto della ricerca nautica**

Il presente intervento ha come oggetto una applicazione robotica di additive manufacturing per il settore nautico. Questa attività di ricerca si fonda su esperienze pregresse di background comune dei dipartimenti di Ingegneria Meccanica e Design del Politecnico di Milano. È proprio nel polo universitario di Lecco che dal 2011 è presente un laboratorio full scale per applicazioni nautiche: la Barca Laboratorio. Imbarcazione strumentata e concepita per funzionare come bilancia dinamometrica in grado di acquisire i dati relativi ai carichi aerodinamici e idrodinamici in navigazione, la Barca Laboratorio rappresenta un contributo fondamentale a supporto della progettazione nautica e un test-bench quasi unico per lo sviluppo delle metodologie progettuali e delle tecnologie costruttive. Questa facility è di estremo interesse per lo svolgimento di esperienze di ricerca e didattica di eccellenza. Gran parte dell'attività di ricerca svolta

dalla comunità scientifica nel settore della nautica è attualmente orientata allo sviluppo di metodi che permettano di definire i livelli di carico agenti sulle diverse strutture dell'imbarcazione, con un grado di accuratezza superiore a quello ad oggi disponibile. Ciò implica importanti ricadute dal punto di vista costruttivo e delle metodologie di progetto, per mezzo di un più appropriato utilizzo di materiali innovativi.

I dati scientifici attualmente a disposizione dei progettisti e dei costruttori derivano da studi effettuati su modelli in scala, su prototipi o su campioni di materiale analizzati in ambienti artificiali, quali la gallerie del vento o i banchi di prova. Il cuore della Barca laboratorio è invece un sistema costituito da un telaio interno allo scafo che permette di collegare l'intero arco e l'attrezzatura velica a un sistema di celle di carico per la misura delle forze e dei momenti globalmente trasmessi dal piano velico alla barca durante la navigazione.

Un ulteriore aspetto del progetto, unico nel suo genere, è la possibilità di rilevare dati riguardanti la forma geometrica assunta dalle vele in navigazione (*flying shape*) che differisce in maniera considerevole dalla cosiddetta *design shape*, la forma geometrica ipotizzata dal velaio in fase di progetto e di realizzazione della vela. Anche in questo caso, i dati attualmente disponibili per la progettazione derivano da prove in ambienti artificiali o da modelli di simulazione numerica che ancora oggi sono affetti da problemi di affidabilità dei risultati. L'esperienza maturata in tale ambito dal Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano nel corso di diverse campagne di misura, svolte presso la Galleria del Vento del Campus di Milano Bovisa per alcuni dei principali sindacati partecipanti alle edizioni di Coppa America dell'ultimo decennio, ha fornito il know-how necessario per la realizzazione di un sistema di misura utilizzabile in condizioni di navigazione.

Il valore aggiunto della Barca Laboratorio è dunque la possibilità di effettuare misure nelle reali condizioni di utilizzo, tenendo conto delle regolazioni impartite dall'equipaggio, e poter confrontare queste con i dati rilevati in scala in galleria del vento. Questa attività di confronto ha permesso l'evoluzione dei sistemi di misura per verificare sia la pressione sulle vele sia la sua geometria a tempo di volo: *strip pressure systems*,

per la misura locale e puntuale delle forze agenti sulle vele, una bilancia dinamometrica a sei componenti, per il rilevamento delle forze globali agenti sullo yacht, webcam e sensori a tempo di volo che permettono la scansione della geometria delle vele in navigazione.

Il rilevamento della flying shape prevede due variabili di condizione dell'imbarcazione. A condizioni stazionarie, i dati di forma delle vele vengono acquisiti tramite laser scanner, caratterizzato da elevata accuratezza di misura e velocità di rilievo delle informazioni. In situazioni dinamiche, sono invece impiegati sistemi basati su tecnologia a luce strutturata e su sensori di distanza a variazione di fase. La ricerca ha inoltre sviluppato algoritmi di elaborazione per l'utilizzo dei dati in tempo reale per controllare i parametri di regolazione delle vele in relazione alla prestazione dell'imbarcazione.

Tutte le informazioni acquisite direttamente in navigazione, siano esse di carattere meccanico-strutturale o di natura aerodinamica, sono correlate con la dinamica dell'imbarcazione allo scopo di valutare l'incidenza del movimento dello yacht sulle misurazioni effettuate. La caratteristica della dinamica dell'imbarcazione rappresenta di per sé un bagaglio di informazioni estremamente interessante nell'ambito dello sviluppo e della validazione delle metodologie numeriche di previsione delle prestazioni con software di simulazione.

## **Tecnologie additive manufacturing per la realizzazione di componenti nautici da test**

La Barca Laboratorio è stata concepita come una sorta di "kit di montaggio" per permettere la realizzazione in parallelo dei suoi componenti fondamentali e la successiva sperimentazione di alcune geometrie differenti di armo velico, di deriva e bulbo. In questo scenario, le ricerche in ambito di additive manufacturing sia per materiali metallici che in ambito polimerico sono estremamente adatte alla realizzazione e sperimentazione di geometrie complesse e ottimizzate fluidodinamicamente per le appendici dell'imbarcazione. La ricerca in oggetto si è orientata su materiali polimerici a matrice termoplastica rinforzati con fibre lunghe di carbonio.

Due i limiti principali della lavorazione in additive manufacturing di que-



[7 . 1]

*Barca Laboratorio, immagine di progetto*

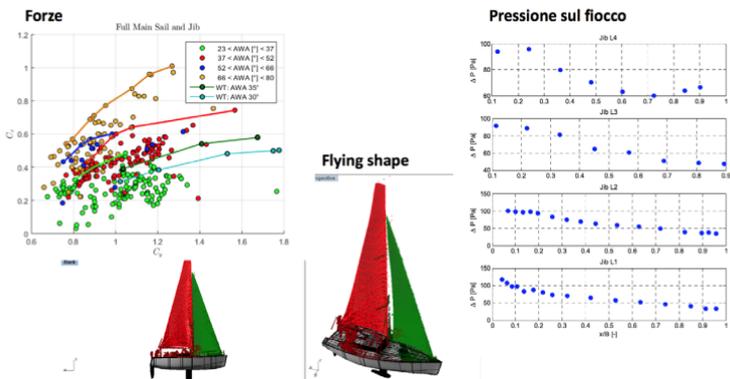


[7 . 2]

*Barca Laboratorio al varo inaugurale*



[7.3]  
Dettaglio delle vele della Barca Laboratorio



[7.4]  
Diagrammi delle pressioni sul fiocco, del carico totale agente sull'armo e forma delle vele risultante dalla campagna di rilievo con scansione laser

sto materiale per il settore nautico: la lavorazione per piani paralleli al piatto di stampa e le circoscritte dimensioni del volume di lavoro. La risposta a queste problematiche è stata individuata nella BAAM, big area additive manufacturing, con l'utilizzo di robot antropomorfi industriali su rotaia. Il volume di lavoro è quindi compreso tra lo sbraccio del robot e la corsa del settimo grado di libertà, la guida lineare.

Per ottenere le prestazioni necessarie, il progetto di ricerca si basa su quattro pilastri: le fibre di carbonio all'interno della matrice termoplastica devono essere stese secondo le direzioni di massimo sforzo, non devono esser presenti limitazioni dimensionali a piano di stampa, l'eliminazione degli stampi, l'elemento stampato deve contenere sensori per la diagnostica e/o prognostica.

L'utilizzo di un robot su rotaia come poltrusore permette la deposizione di materiale free-form su una superficie di stampa. Il progetto prevede l'utilizzo di un secondo braccio meccanico a far da contrasto per garantire la corretta compattazione del materiale impiegato nel processo di fabbricazione additiva garantendo così l'eliminazione dello stampo. Questa tecnologia consente inoltre di tessere insieme alle fibre di rinforzo anche una fibra ottica con cui eseguire test e monitoraggio del componente finale.

Il primo test effettuato per componentistica nautica da installare a bordo della Barca Laboratorio è un profilo di deriva ottimizzato fluidodinamicamente per una riduzione del 47% della componente di scarroccio laterale a pari lift performance.

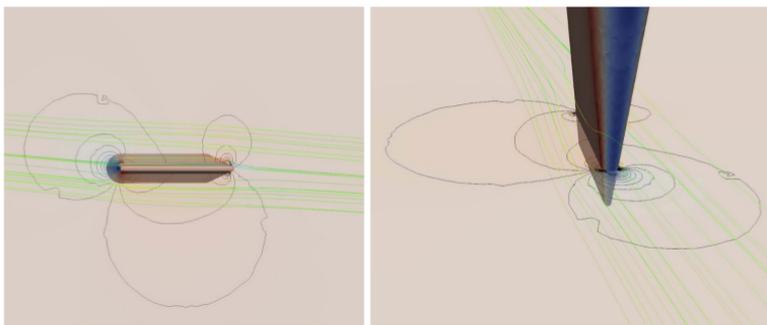
Questo elemento è stato stampato all'interno del laboratorio Indexlab del Politecnico di Milano con un filo di materiale termoplastico caricato con fibre lunghe di carbonio del diametro di 1,75 mm. Al suo interno il filo ingloba circa 80000 fibre di carbonio. Viene inoltre depositata una fibra ottica per per il rilievo dello stato di sollecitazioni del componente finale in navigazione. Ciò è consentito dalla maturità tecnologica dei sensori basati su celle di Bragg, adatti per un impiego in campo nautico, grazie all'ampio ventaglio applicativo che consente di effettuare misure di spostamento, temperatura, deformazione, inclinazione e accelerazione.

La ricerca si completa con lo sviluppo di un software, controllato in am-

biente di realtà virtuale, che è in grado di generare in automatico il percorso macchina per la disposizione delle fibre conoscendo il materiale impiegato e la geometria da realizzare. Sebbene il software sia programmato per la gestione di un robot poltrusore e un drum di riscontro, il primo test a ora effettuato ha visto l'utilizzo del solo robot di stampa con la deposizione di materiale su un elemento di lamiera appositamente curvata. La particolarità dei macchinari impiegati in questo processo di fabbricazione additiva è la presenza sulla testa del poltrusore di una cella di carico per la misura locale della pressione del filo fuso sulla superficie di stampa e di un termometro per il rilevamento della temperatura di estrusione.

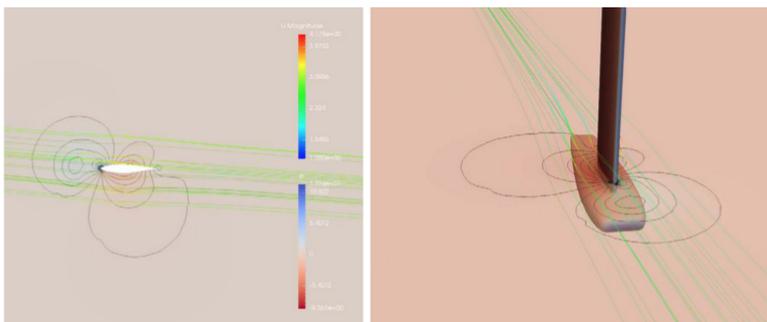
I risultati di stampa di questo primo elemento sono una valida conferma del processo progettuale adottato dal team di ricerca che ha integrato competenze in ambito nautico, fluidodinamico, robotico e di processi produttivi innovativi per materiali compositi.

La geometria finale della deriva potrà essere montata direttamente a bordo della Barca Laboratorio per il rilievo in condizione di navigazione delle sollecitazioni e delle componenti fluidodinamiche. La trasmissione wireless di tutti i dati dei sensori integrati nella componentistica dell'imbarcazione fornirà un quadro completo di riscontro e comparazione con dei test precedentemente effettuati sia in galleria del vento che per mezzo della simulazione di analisi fluidodinamica computerizzata.



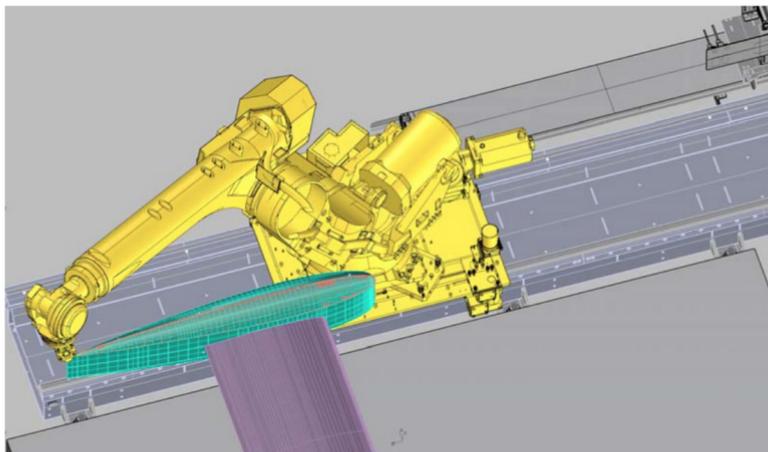
[7 . 5]

*Diagrammi delle pressioni sul fiocco, del carico totale agente sull'armo e forma delle vele risultante dalla campagna di rilievo con scansione laser*



[7 . 6]

*Diagrammi delle pressioni sul fiocco, del carico totale agente sull'armo e forma delle vele risultante dalla campagna di rilievo con scansione laser*



[7.7]

*Processo di additive manufacturing della deriva ottimizzata*



## Sezione 3

### Esperienze in campo Navale



## 8

### **Esperienze e soluzioni di Additive Manufacturing nel settore navale**

*Riccardo Profumo*

*Dragonfly s.r.l. | [riccardo.profumo@dragonfly.it](mailto:riccardo.profumo@dragonfly.it)*

I vantaggi che la fabbricazione additiva può portare e ha portato all'interno della produzione industriale di componenti prototipali e finali sono molteplici e di diversa natura. Dal punto di vista dei tempi e dei costi di sviluppo e produzione l'apporto di questa tecnologia permette di realizzare oggetti di prototipazione rapida riducendo le tempistiche dei test di validazione prodotto. I costi perciò non sono solo da considerarsi diretti, che talvolta possono risultare maggiori, ma anche dell'intero ciclo di progettazione/produzione/vita del prodotto stesso. Qui i vantaggi nei termini di flessibilità nell'assemblaggio, nella manutenzione e sostituzione rapida di parti sono particolarmente evidenti, così come i benefici di performance e ottimizzazione strutturale.

Le tecniche di additive manufacturing permettono perciò uno sviluppo industriale avanzato nella ricerca di ottimizzazioni funzionali e nel rispetto dei requisiti di leggerezza e robustezza necessari all'impiego nei particolari settori di sviluppo della difesa, dell'aerospazio e del navale, del mo-

transport e automobilistico. È necessario pertanto il supporto di centri, laboratori e aziende di ricerca e sviluppo per accompagnare l'industria nello sviluppo di nuovi prodotti con performance migliorate e ottimizzate per ottenere il miglior successo da queste tecnologie di fabbricazione additiva.

### **Dragonfly: ricerca e servizi per la stampa 3D industriale**

Dragonfly è una start-up innovativa che opera nell'ambito della ricerca e dei servizi Additive Manufacturing nei settori della meccanica di precisione, dell'aerospazio e dell'energia che si sta affacciando con alcune ricerche nel trasporto marittimo con ottimi risultati.

Costituita nell'Aprile 2015, con sede a Roma, Milano, Bologna e presso l'università degli studi di Brescia, l'azienda offre servizi integrati di consulenza, progettazione e gestione di impianti di stampa 3D industriale, di ingegneria di prodotto e processo, di system integration e di prototipazione per sostenere il cliente nelle trasformazioni di business abilitate dalle nuove tecnologie digitali legate alla quarta rivoluzione industriale. Attraverso un mix di competenze tecniche ed economico-gestionali, l'azienda offre un valido supporto al management del percorso di valutazione dell'adozione (make or buy) delle tecnologie additive all'interno dei processi produttivi aziendali.

In particolare, risulta innovativo lo sviluppo di una specifica metodologia di analisi di business cases: AMALFI, Additive Manufacturing Assessment for Lean and Fast Introduction. Questa metodologia è in grado di definire rapidamente il perimetro di fattibilità tecnica e la sostenibilità economica di un progetto, tramite l'individuazione delle parti meccaniche attualmente in produzione per cui stampare in 3D risulta fattibile, conveniente e interessante. Il processo di analisi viene applicato a tutti i componenti attualmente presenti nel bill of materials di un processo produttivo e consente un confronto "As is" vs "To be" specifico per ogni cliente. L'output dello studio di fattibilità è la definizione dell'impatto economico finanziario dell'introduzione delle tecnologie di manifattura additiva nel contesto di produzione analizzato. Questo si basa sul mix produttivo delle parti per le quali risulta conveniente la conversione tecnologica, valutando l'impat-

to dei tempi e dei costi dell'utilizzo della nuova tecnologia e includendo gli investimenti necessari all'installazione di impianti e infrastrutture di produzione additiva. La possibilità di rapida prototipazione dei nuovi componenti realizzati per additive manufacturing consente di eseguire test diretti sia meccanici che di usabilità e fattibilità del prodotto stesso.

## **Nuovi scenari e paradigmi di progettazione industriale**

Seppure i maggiori benefici derivino dalla produzione di nuovi prodotti, progettati e sviluppati appositamente per la Stampa 3D, la valutazione dell'impatto tecnico-economico su componenti di attuale produzione realizzato da AMALFI è una utile metodologia per avviare un percorso razionale e sostenibile di adozione di queste nuove tecnologie anche in ambiti più tradizionali.

L'adozione di strategie di fabbricazione additiva apre nuovi scenari sia nel redesign, in termini di alleggerimento, che nell'ingegnerizzazione di architetture e strutture specifiche dell'additive manufacturing non riproducibili tramite tecnologie CNC. La progettazione di prodotti ottimizzati per essere realizzati con le tecnologie additive richiede un approccio concettuale che stravolge i canoni attuali, in quanto la possibilità di realizzare parti per apporto di materiale, svincola dai vecchi paradigmi. Un esempio è la realizzazione di sistemi di raffreddamento, in cui la progettazione del modello fluidodinamico ottimale è guida nella definizione dell'intero sistema. Inoltre, la possibilità di mettere il materiale solo dove ha funzioni meccaniche necessarie, permette di costruire parti con ottimizzazione topologica e con strutture trabecolari che mediamente consentono un risparmio di peso dal 20% al 60%, a beneficio delle funzionalità dell'oggetto finale in cui sono integrate. In particolare, l'utilizzo di software specifici per la progettazione e produzione di componenti additive consente di progettare strutture Lattice ottenendo performance specifiche in termini di rigidità e flessibilità, peso, cavità, e centri di massa e di gravità.

Questa attenzione alla progettazione ottimizzata è di particolare importanza nel settore dei trasporti, in primis l'aerospazio. Di seguito possiamo vedere una parte di carrozza di un satellite realizzata per additive manufacturing in lega di titanio. I requisiti di robustezza e resistenza a

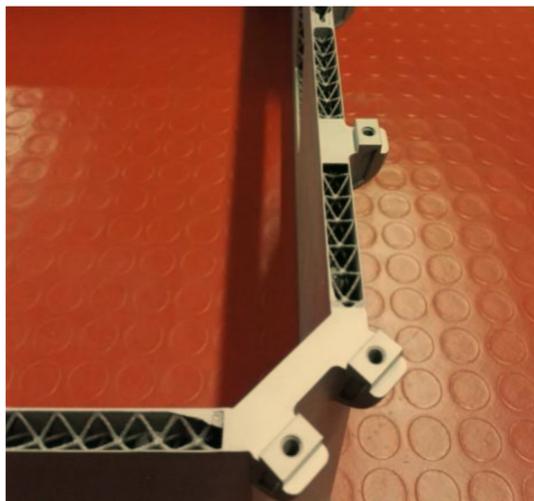
pressione elevata, richiesti in fase di progettazione, sono dovuti alle sollecitazioni del componente stesso durante le fasi di lancio. L'oggetto finale presenta una configurazione a sandwich con struttura reticolare all'interno con una riduzione di peso del 30% rispetto alla stessa geometria realizzata piena con tecniche di produzione tradizionali.

Le tecnologie di fabbricazione additiva consentono la realizzazione del prodotto finale in un'unica fase di produzione, al netto di eventuali lavorazioni di finitura, a partire da un unico file 3D, abilitando innovazioni radicali anche nella gestione della supply chain. I vantaggi che l'adozione di questa tecnologia può dare all'intero ciclo di gestione del progetto e prodotto sono pertanto una riduzione o annullamento degli stock di magazzino con significative ricadute sui costi di gestione della logistica e sulle immobilizzazioni di materiale e una delocalizzazione produttiva. Oltre che per i vantaggi di tempi e costi, i progetti di revisione della supply chain sono particolarmente apprezzati in logica di sostenibilità ambientale e green economy, grazie alla riduzione di emissioni CO2 nel trasporto di materie prime e componentistica.

### **Applicazioni speciali: finitura con nano particelle e sensoristica stampata in 3D**

Per la finitura e verniciatura di componenti in additive manufacturing una possibilità è offerta dall'integrazione nel processo produttivo di applicazioni superficiali di nano materiali. Grazie alla partnership con l'azienda Nanocrome di Sassuolo, Modena, è stato possibile sviluppare una tecnologia in cui le nano-particelle sono disposte in livelli sottili che si auto-organizzano su una superficie metallica prodotta per additive manufacturing. Questo offre una protezione altamente stabile e completa agli agenti esterni, ad alte temperature e a fenomeni corrosivi.

Un'altra applicazione particolare delle tecnologie di stampa 3D per il settore industriale è offerta dalla tecnologia Aerosol Jet Printing dell'azienda partner Optomec. Le ricerche effettuate presso i laboratori dell'università di Brescia hanno permesso di mettere a punto una tecnologia per la stampa di materiale metallico o ceramico su superfici esistenti di diversa natura. È stato così possibile stampare antenne per l'amplificazione del



[8. 1]  
*Dragonfly Satellite Carriage*



[8. 2]  
*Esempio di provino sottoposto a processi di corrosione. A destra il materiale senza finitura superficiale, a sinistra trattato con verniciatura a nano particelle Polisil – Nanoprom*

campo wifi direttamente sulla superficie di uno smartphone, così come realizzare elementi di sensoristica in ceramica su parti di turbine a gas e motori. L'importanza di quest'ultima applicazione risiede nella possibilità di individuare a tempo reale la formazione di cricche e di effettuare manutenzione preventiva per fermare così la produzione esclusivamente quando serve e non nelle fasi di controllo e gestione del quotidiano.

È evidente come queste applicazioni possano essere sviluppate in molteplici settori dalla manifattura meccanica di precisione al trasporto aereo/aerospazio e marittimo.

### **L'impatto delle tecnologie di additive manufacturing nel settore navale**

Le possibili applicazioni di tecnologie di Additive manufacturing sono svariate e di interesse nel panorama attuale di ricerca e di sviluppo industriale sia per la produzione di prototipi in tempi rapidi sia per lo sviluppo di piccole serie di componentistica.

Nel comparto nautico e navale la realizzazione di modelli in scala di scafi di imbarcazioni o di componenti minori per test fluidodinamici è nota e la stampa 3D trova le prime applicazioni proprio in questi settori. Ne è un esempio la realizzazione di eliche in lega di alluminio per test fluidodinamici e di resistenza meccanica direttamente in vasca navale presso l'Università Federico II di Napoli. Essi sono un reale riscontro delle analisi e simulazioni numeriche offerte dai più recenti software. La manifattura additiva ha reso possibile la realizzazione del componente in soli due giorni di lavoro e la simulazione di possibili varianti e difetti a costi contenuti e in tempi rapidi.

Nello specifico, questa ricerca ha interessato test di cavitazione di eliche nuove e danneggiate simulando e verificando al vero le condizioni di eliche di navi commerciali grazie alla scansione 3D delle stesse e successiva stampa 3D di prototipi in scala reale. Un'ulteriore applicazione in ambito nautico è l'ottimizzazione per alleggerimento di attrezzature di imbarcazioni a vela da competizione. L'utilizzo di materiali leggeri e altamente resistenti quali leghe di titanio in processi di additive manufacturing consente di risparmiare il 50% del peso con una riduzione di costo di fabbri-

cazione fino al 30%.

Un tema di particolare interesse in ambito navale è inoltre la possibilità di realizzare in breve tempo e con semplici strumenti particolari di ricambio. La combinazione delle tecnologie di scansione 3d abbinata con le tecniche di fabbricazione additiva mitiga il rischio di obsolescenza dei prodotti e l'introduzione di sensori a fibra ottica all'interno del componente ripristinato può essere interessante strumento diagnostico per gli armatori e fonte di dati preziosi in navigazione per la cantieristica.

Tre i modelli di applicazione di additive manufacturing al particolare settore della produzione di pezzi di ricambio:

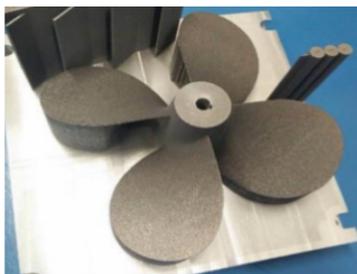
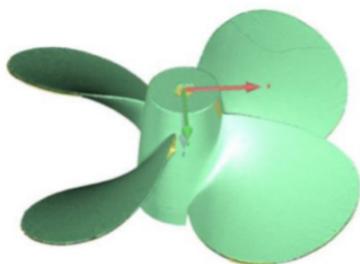
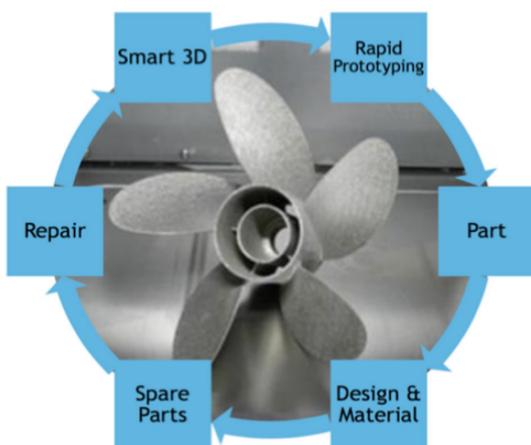
- **Maintenance effectiveness: 3D scanning + 3D printing.** Questo modello si applica nei casi di componentistica fuori produzione e di restauro/ripristino di imbarcazioni d'epoca e nell'eventualità di avere componentistica di ricambio a tempi ristretti in aree geografiche difficilmente raggiungibili da spedizioni commerciali.
- **Warehouse management: digital cad + 3D printing.** Produzione da un magazzino digitale di particolari creati ad hoc per una specifica linea di imbarcazioni per la riduzione di stock di magazzino.
- **New service model: digital library/remote eng + 3D printing.** Questo modello ormai diffuso nel settore militare della difesa e dell'aerospazio sfrutta la connessione satellitare a centri di ingegneria remota in grado di realizzare virtualmente in 3D componenti di ricambio per differenti sistemi di bordo. La stampa effettiva del componente stesso viene effettuata direttamente a bordo nave riducendo notevolmente i rischi di ulteriori guasti e malfunzionamento dell'intero sistema.

I primi esperimenti in ambito navale di questo nuovo paradigma di gestione della manutenzione grazie a tecniche di manifattura additiva sono stati fatti nel porto di Rotterdam grazie alla collaborazione di più aziende tra cui grandi cantieri navali, associazioni portuali e agenzie di trasporti marittimi. Questo progetto iniziato nell'aprile 2015 e tuttora in corso, ha portato alla costruzione nel porto di Rotterdam di un laboratorio condiviso di manifattura additiva, il RamLab, e all'installazione di stampanti 3D a filo continuo di materiali polimerici e per deposizione diretta di materiali metallici a bordo di 2 navi mercantili. Il successo di questo progetto

ha portato all'adesione successiva non solo di innumerevoli aziende nel comparto navale e subfornitura ma anche di enti che, pur non avendo applicazione in ambito marino, hanno saputo cogliere l'importanza dell'innovazione tecnologica alla portata di tutti.

Infine, una applicazione particolare della stampa 3D è la deposizione diretta su superfici esistenti per la riparazione di componenti in metallo. La sperimentazione in corso nei centri di ricerca Americani NUWC a Keyport e ARL in Penn State hanno identificato interessanti opportunità per la riparazione di assi e alberi motore, eliche e turbine, scocche di sottomarini e componentistica per valvole a pressione. Si stima così un risparmio di 18 milioni di dollari in 5 anni per la manutenzione di imbarcazioni militari della marina statunitense.

Il percorso di ricerca per la qualifica delle parti per la produzione seriale e di manutenzione ha l'obiettivo di garantire l'intercambiabilità delle parti prodotte in additive manufacturing con le precedenti realizzate con processi tradizionali nella definizione dei requisiti e allineamento delle aree di produzione, nella caratterizzazione e certificazione delle materie prime e del loro processo di produzione e nell'esecuzione di test e prove specifiche sui componenti quali, ad esempio, verifica della rispondenza a specifica, a rottura e a fatica.



[8. 3]

*Prototipazione rapida di eliche a profilo variabile. Dal concept di progetto al progetto 3D e relativa stampa in lega di alluminio AlSi10Mg*



## 9

### **Additive Manufacturing: le esperienze Fincantieri-Unige su modelli in scala di eliche**

*Luigi Grossi | Tancredi Cilia | Daniele Bertetta*

*Distretto Ligure Tecnologie Marine (DLTM) s.c.r.l. | OSN Orizzonti Sistemi Navali | Fincantieri*

La progettazione di prodotti ad alto valore tecnologico aggiunto è uno dei cardini fondativi dell'attività di Fincantieri, gruppo di cantieristica italiana leader mondiale nella costruzione di navi passeggeri. È per questo che assieme all'Università di Genova, dipartimento di Ingegneria Navale, l'azienda ha avviato progetti di ricerca per esplorare le nuove tecnologie di additive manufacturing dedicate alla costruzione di componentistica per il settore navale. Questa tecnologia presenta numerosi vantaggi e opportunità offerte dall'intrinseca flessibilità produttiva e versatilità, riducendo considerevolmente i tempi e costi delle lavorazioni manuali e mantenendo costante la qualità del prodotto finale. I limiti nell'introduzione di tali lavorazioni nello scenario della cantieristica navale sono di carattere dimensionale. Fincantieri produce infatti navi da diporto, trasporto passeggeri e commerciali con dimensioni medie di 200 metri in cui anche la componentistica presenta volumi considerevoli.

Ad oggi, presso Fincantieri, sono presenti esperienze di produzioni di

valvole, flange e componenti minori stampate per fabbricazione additiva perlopiù promosse da aziende subfornitrici della cantieristica navale.

Lo scopo delle ricerche avviate in questo settore con la collaborazione dell'Università di Genova è una iniziale indagine conoscitiva dei possibili punti di forza e debolezza di questa tecnologia applicata al navale. Oggetto di test modelli in scala di eliche di propulsione, driver la riduzione di tempi e costi della manifattura tradizionale.

Attualmente la produzione di eliche per navi è estremamente personalizzata. Ogni nave è spinta da una particolare elica che differisce da quelle in uso su altre imbarcazioni. Essa può avere un diametro compreso tra 2 metri e 6 metri e la sua geometria influisce massivamente sulle prestazioni in navigazione. Per questo la possibilità di effettuare test su modelli in scala è pratica consolidata nel settore e di particolare rilevanza sia per i progettisti che per il cantiere stesso. I test su modelli in scala oltre che evidenziare le prestazioni meccaniche e di rendimento dell'elica stessa sono utilizzati per previsioni di effetti cavitazionali, di rumore o di prestazioni indotte.

L'attività del progetto di ricerca ha interessato le seguenti fasi:

- selezione di una geometria test di elica e selezione dell'elica di riscontro realizzata con manifattura tradizionale
- selezione della tecnologia 3D printing più adeguata e del materiale di produzione
- produzione di n.10 pale con tecnologia di manifattura additiva
- esecuzione di test dimensionali sulla totalità dei campioni
- esecuzione test di resistenza meccanica su n. 4 campioni fino a rottura del componente stesso
- esecuzione di test di cavitazione in tunnel

L'elica selezionata, copia di un modello in bronzo navale prodotto per fusione e lisciatura a mano già in uso test a Fincantieri, ha un diametro di 200mm, 4 pale e geometria a passo variabile.

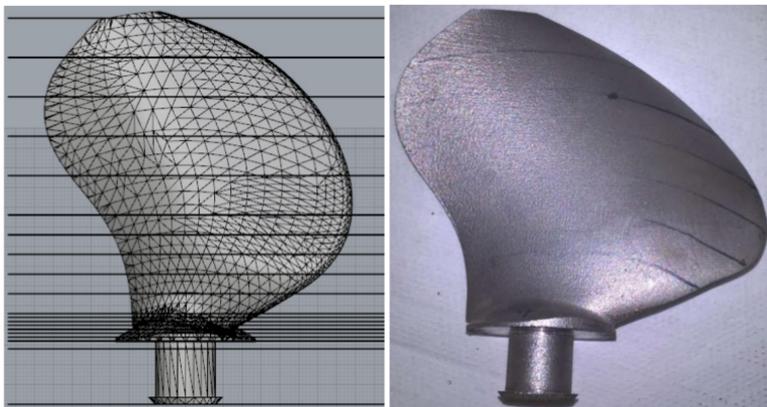
Il caso applicativo della nuova tecnologia si è dimostrato semplice poiché il processo tradizionale di costruzione di una elica navale ad alte prestazioni, in ambito FINCANTIERI, già comporta il disegno della geometria tramite software 3D. Essa infatti, dopo la fusione del pezzo, è lavorata

a controllo numerico tramite una fresa ad altra precisione. Il modello virtuale è stato così utilizzato, senza modifiche aggiunte, nel processo di Selective laser melting selezionato. Il materiale di stampa è stato individuato nella famiglia di materiali disponibili. Non potendo impiegare il tradizionale bronzo navale, la scelta è ricaduta su Acciaio Inox EOS SS PH1. Nonostante le sue ottime proprietà meccaniche, questo materiale non è pienamente adatto alla fabbricazione di eliche finali in quanto presenta numerose difficoltà di riparazioni a seguito ad eventuali di urti in navigazione.

I test dimensionali di controllo di geometria dei campioni realizzati con stampa 3D sono stati eseguiti presso il cantiere navale Riva Trigoso. Sono stati controllati 20 punti del profilo della lama su tre parti di ciascuna pala (radice, mid span, punta). Solo pochi punti sono conformi alle tolleranze ITTC ( $\pm 0,05$  mm) con una deviazione media tra 0,1 mm e 0,4 mm a seconda della sezione della pala. Le deviazioni più alte sono state notate nella sezione punta della pala e per tutti i punti sul lembo di ingresso e sul lembo di uscita del profilo delle pale. Inoltre, è stata individuata una mancanza di coerenza tra le pale. Da notare però che generalmente nel controllo delle eliche ad alte prestazioni è considerata sufficiente una differenza minore di 0,5 mm.

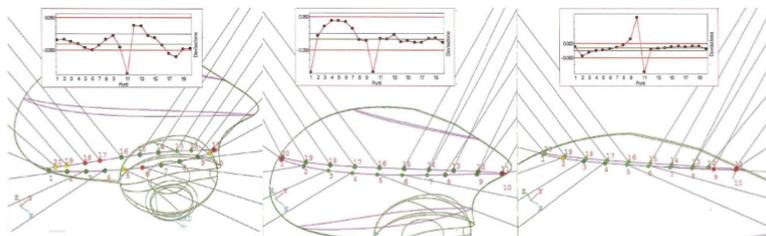
A fianco dei test dimensionali sono state eseguite prove di resistenza per verificare le caratteristiche meccaniche del materiale e per misurare le deformazioni con una condizione di carico simile a quella che la pala deve affrontare durante i test di tunnel di cavitazione. I risultati di tali test hanno confermato le proprietà di trazione nominale del materiale adottato per le pale di produzione additiva, significativamente migliori rispetto a quanto necessario per eseguire le prove in acqua.

La campagna di test di cavitazione standard per la caratterizzazione del comportamento dell'elica in acqua è stata eseguita in comparazione ad un modello di elica realizzato con tecniche convenzionali. Parallelamente, è stato eseguito un controllo sulle curve caratteristiche delle spinte e della coppia di eliche.



[9 . 1]

*Immagine della geometria virtuale della pala di elica selezionata e un campione da test prodotto in additive manufacturing*



[9 . 2]

*Test dimensionali di controllo della geometria*

Un primo confronto ci indica che la rugosità superficiale, risultato del processo di fabbricazione additiva, causa una diminuzione fino al 4% del rendimento dell'elica stessa. Differenze significative sono state osservate nel comportamento di cavitazione dell'elica rispetto all'elica di produzione convenzionale, così come nel comportamento cavitante di ciascuna pala. Le deviazioni dimensionali e la rugosità possono essere identificate come cause delle diverse caratteristiche dell'acqua aperta e della cavitazione osservata durante le prove di tunnel di cavitazione rispetto all'elica originale. È quindi necessario lavorare sulla precisione dell'intero processo produttivo per una maggiore corrispondenza con la geometria attesa. I test effettuati hanno permesso di delineare un quadro chiaro delle potenzialità e delle problematiche nell'utilizzo di tecnologie di fabbricazione additiva per il settore delle eliche navali.

Sebbene la sperimentazione abbia riguardato modelli in scala, i risultati sono di facile trasferimento a scala reale e indirizzano i futuri progetti di ricerca del gruppo Fincantieri-Unige verso due percorsi privilegiati: materiali specifici per il settore navale e attenzione alla finitura superficiale dei componenti finiti.

La scelta del materiale di costruzione deve essere effettuata con una conoscenza approfondita delle tecnologie da adottare che si concentrano sulla dissipazione termica. La sperimentazione di nuove leghe metalliche con un elevato margine strutturale potrebbe ridurre i fenomeni di cavitazione di vortex di estremità. È inoltre necessario verificare differenti posizioni della geometria da produrre all'interno del volume di stampa per evitare difetti dovuti al mancato avviamento delle superfici dei profili d'uscita delle pale.

La finitura superficiale, attualmente non paragonabile all'elica del modello realizzata con tecniche convenzionali, potrebbe essere effettuata con processi automatizzati e integrati nel processo di additive manufacturing così da evitare processi di lucidatura manuale.



[9 . 3]

*Elica realizzata con tecnologia convenzionale: vista frontale*

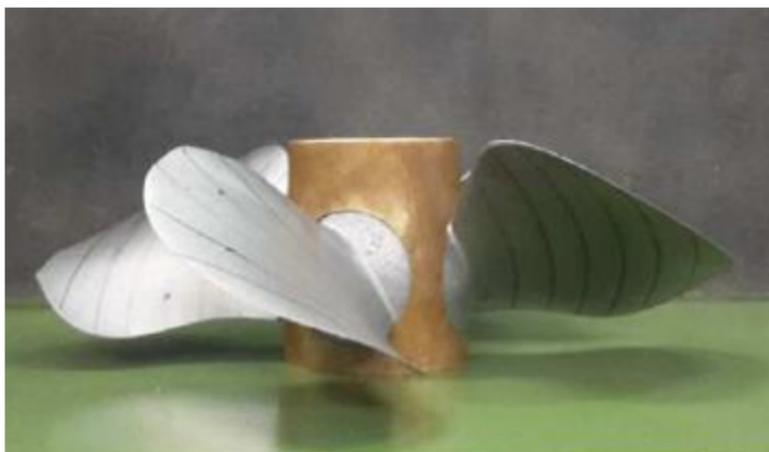


[9 . 4]

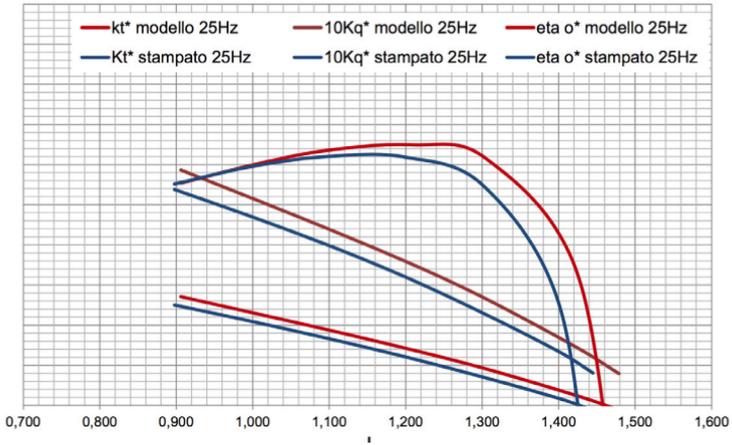
*Elica realizzata con tecnologia convenzionale: vista laterale*



[9 . 5]  
*Elica realizzata in additive manufacturing: vista frontale*

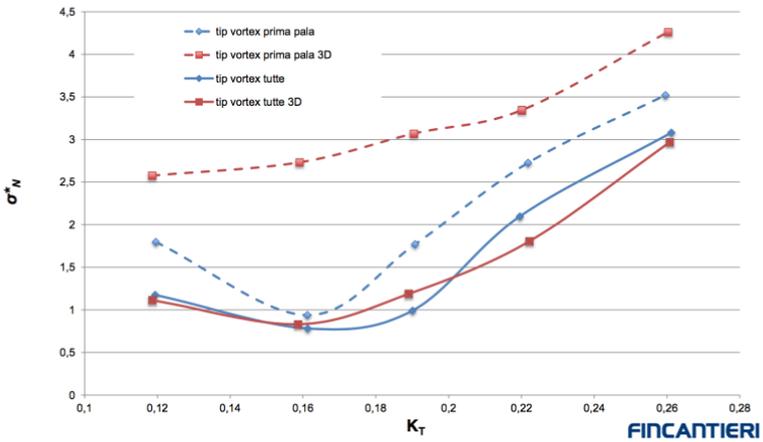


[9 . 6]  
*Elica realizzata in additive manufacturing: vista laterale*



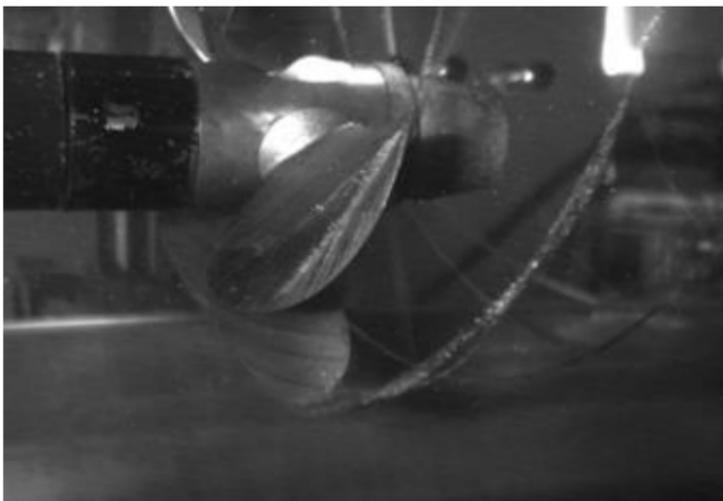
[9 . 7]

Test di cavitazione in tunnel: *KT* and *KQ* diagrams



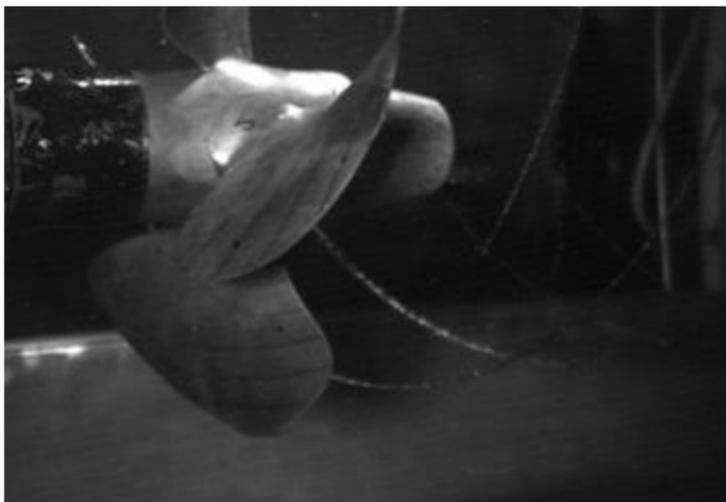
[9 . 8]

Test di cavitazione in tunnel: *Tip Vortex cavitation inception*



[9 . 9]

*Conronto test di cavitazione in tunnel: elica prodotta in additive manufacturing*



[9 . 10]

*Conronto test di cavitazione in tunnel: elica prodotta per processi convenzionali*



## **Potenzialità delle tecnologie Additive in contesti in via di sviluppo**

*Davide Telleschi*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Design | [davide.telleschi@polimi.it](mailto:davide.telleschi@polimi.it)*

### **La stampa 3D in contesti fragili**

Le tecnologie di stampa 3D stanno offrendo al mondo una nuova prospettiva e un nuovo modello per concepire l'artigianalità e l'industria del settore manifatturiero. Non solo soddisfa le richieste della rivoluzione industriale in atto, ormai nota come Industria 4.0, nei suoi principi di automazione, integrazione e real time capability, ma risponde in modo chiaro e diretto ai bisogni assistenziali e alle emergenze sociali con un approccio libero, etico e, per certi aspetti, di rivoluzione democratica. Ciò che oggi offre questa tecnologia è la possibilità di immaginare una soluzione e renderla possibile in qualsiasi luogo. La stampa 3D è una tecnologia a basso costo, flessibile. Proprio per questo è adatta in contesti di fragilità ed emergenza in cui versatilità e risorse del territorio sono il motore del progresso sociale. Ne sono un esempio i progetti avviati negli ultimi anni in diversi contesti in via

di sviluppo e transizione.

Dall'emergenza abitativa nascono i progetti 3Dprinted-House di Win-Sun Decoration Design Engineering, e Maker Economy Starter Kit dell'azienda italiana WASP.

WinSun in collaborazione con l'università inglese Loughborough ha messo a punto una stampante 3D di elevate dimensioni (15m di lunghezza per 10m di larghezza e una altezza pari a 6m) per componenti edilizie portanti, pareti e solai, fabbricate in calcestruzzo con un modello di stampa diagonale di rinforzo. Queste, costruite fuori sede e poi spedite e assemblate con l'inserimento di travi e barre in acciaio per il fissaggio delle parti, sono state montate a formare ambienti abitativi di rapida costruzione. Il sistema utilizzato risponde alla necessità di alloggio in breve tempo ed è adatto a contesti di rapida evoluzione.

Il Maker Economy Starter Kit nasce invece per un'economia di auto-produzione, impiantabile in paesi con infrastrutture non ancora sviluppate. L'obiettivo è in apparenza semplice: creare micro comunità autosufficienti che nascono e crescono sulla base del sapere collettivo grazie a mezzi di autoproduzione avanzati, accessibili a tutti. La stampa 3D è il processo produttivo in grado di realizzare un modulo abitativo con costi contenuti per rispondere ai bisogni primari di casa, cibo, energia, salute, lavoro e cultura. Può essere di aiuto in situazioni di emergenza umanitaria generate da crisi economiche o calamità naturali. Uno strumento utile a Organizzazioni umanitarie, Protezione Civile, Onlus, Enti Statali e internazionali per operare agilmente in territori difficili. Per questo il Maker Economy starter Kit è un container di dimensioni standard, facile da spedire via nave e trasportabile su ruota o rotaia. All'interno si possono trovare i componenti per assemblare una stampante 3D per argilla e paglia alta 12 metri, stampanti 3D comuni e relativo mulino per polimeri plastici, pannelli fotovoltaici, un sistema di connessione internet satellitare, un kit base di utensili manuali, una motozappa e un setaccio. Sfruttando i materiali reperibili sul territorio, naturali o riciclati, non solo è quindi possibile costruire abitazioni e oggetti di uso comune ovunque ci si

trovi ma anche connettersi alla rete per scambiare dati, scaricare file 3d e tutorial. Il progetto della casa e dei suoi contenuti diviene così open source e apre le porte alla democratizzazione della produzione additiva.

Anche in ambito medico abbiamo molti esempi di sviluppo di tecnologie di fabbricazione additiva per i contesti in via di sviluppo. Il campo medicale è infatti uno dei settori in cui le tecnologie di additive manufacturing prospettano alcune delle innovazioni più radicali nell'ambito dei processi produttivi, e ne è dimostrazione la quantità e qualità di progetti che stanno coinvolgendo i principali centri di ricerca scientifica al mondo in collaborazione con le organizzazioni umanitarie non governative.

I-Lab Haiti, nato dopo il terremoto del 2010, svolge attività sul campo nella produzione di attrezzatura a supporto della chirurgia e pediatria neonatale come ad esempio clamp per cordoni ombelicali valvole e supporti per catetere che, stampati in ABS con tecnologia FDM, possono essere sterilizzati con facilità.

Sempre nel settore neonatale il progetto italiano BOB – Baby On Board – propone una incubatrice open source e low cost realizzabile in sole 20 ore con stampanti 3D comuni sul mercato. L'incubatrice permette di mantenere costanti i parametri vitali di un bimbo nato in condizioni precarie in zone dove la mortalità infantile raggiunge percentuali elevate e dove la strumentazione medica è purtroppo carente o inesistente.

Anche il settore delle protesi si sta rivolgendo sempre più alla stampa 3D integrata a sistemi di scanner 3D. Il progetto sviluppato in Uganda da un professore dell'università di Toronto, RattoMatt, non solo è un laboratorio per la fabbricazione additiva di protesi a basso costo presso l'ospedale Christian Blind Mission ma anche un centro per la formazione in loco di figure in grado di effettuare scansioni e stampe 3d in totale autonomia. La formazione di figure qualificate ha consentito di creare in autonomia i profili delle protesi personalizzati su base individuale, permettendo di ridurre i tempi di sviluppo da alcune settimane a poche ore.



[10 . 1]

*Immagine di presentazione del progetto Maker Economy Starter Kit di WASP (ref. <http://www.wasproject.it>)*



[10 . 2]

*Immagine di presentazione del progetto Maker Economy Starter Kit di WASP (ref. <http://www.wasproject.it>)*



[10 . 3]

*Attrezzatura per chirurgia neonatale stampata in ABS presso ILab Haiti*



[10 . 4]

*Render dell'incubatrice BOB – Baby On Board (ref. <http://www.openbiomedical.org/bob>)*

## L'impegno e la ricerca del Politecnico di Milano: Tambali Fii

Proprio sui concetti di trasferimento di tecnologia e conoscenza nasce Tambali Fii (Partiamo da qui), progetto del Politecnico di Milano che rientra nell'ambito dell'iniziativa di impegno e responsabilità sociale Polisocial.

Questo progetto si inserisce nel panorama delle nuove tecnologie applicate ad iniziative a sfondo sociale a supporto dello sviluppo di paesi emergenti. Il suo obiettivo è la creazione e start up di un polo di innovazione tecnologica e sociale nel territorio di Dakar dove trasferire modelli formativi consolidati, avviare attività di ricerca sul campo e promuovere le sinergie tra centri di ricerca e imprese sia locali che italiane per la crescita della filiera legata alla produzione di attrezzature e imbarcazioni per la pesca e il conseguente potenziamento del settore ittico senegalese.

All'interno del laboratorio condiviso con l'università locale IPP — Institut Polytechnique Panafricain de Dakar — e le associazioni a sostegno della pesca ADAF-Yungar e Cooperativa Pescatori di M'bour saranno installate alcune stampanti 3D con l'obiettivo di incoraggiare attività di ricerca e di produzione di componentistica di bordo da parte degli artigiani e designer del luogo.

Il mercato della pesca è uno dei principali motori economici dell'economia del Senegal in costante crescita nell'ultimo decennio, rappresenta la prima area di impiego nel settore primario, fonte di sostentamento per più di 600.000 famiglie. Questo è alimentato non solo dalla richiesta interna ma, soprattutto, da una pressante e crescente domanda dei paesi stranieri che operano in acque territoriali senegalesi servendosi di moderne e attrezzate barche per la pesca industriale. Sebbene il governo senegalese stia investendo sulla crescita e sull'autonomia della pesca locale, non sono previsti finanziamenti destinati allo sviluppo di centri di formazione e di ricerca a sostegno di attività produttive del settore nautico. Il livello tecnologico delle imbarcazioni e attrezzature da lavoro rimane così arretrato e non permette ai pescatori e alle imprese locali di competere con quelle occidentali.

L'impatto sociale principale che il progetto si pone di raggiungere è la generazione di nuove opportunità di reddito sostenibile per i beneficiari



[10 . 5]

*Imbarcazioni tradizionali senegalesi per la pesca*



[10 . 6]

*Imbarcazioni tradizionali senegalesi per la pesca in fase di costruzione presso il cantiere nautico di M'bour*

diretti e indiretti, in particolare supportando gli attori della filiera della pesca, che oggi appartengono alle fasce deboli della popolazione senegalese. Tale risultato è destinato a produrre condizioni di attrattività occupazionale con la possibilità di creare nel territorio competenze diffuse di tipo tecnico e manageriale che possono essere, in prospettiva, facilmente trasferite anche ad altri settori applicativi

L'esperienza sviluppata in Senegal vuole inoltre costituire un caso studio significativo per l'affinamento di un modello formativo per l'innovazione tecnica e sociale replicabile e trasferibile anche in altre realtà in via di sviluppo.





## Bibliografia

Abernathy W.J., Utterback J. (1978). Patterns of industrial innovation, *Technology Review*, vol. 80(7), 40-47.

Anderson, C. H. R. I. S. (2007). *La lunga coda, da un mercato di massa ad una massa di mercati*. Torino, Italia: Codice Edizioni.

Atzeni E., Salmi A. (2012), Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(9-12), 1147-1155.

Atzeni, E., & Salmi, A. (2015). Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 500-506.

Atzeni, E., Iuliano, L., Marchiandi, G., Minetola, P., Salmi, A., Bassoli, E., Gatto, A. (2013). Additive manufacturing as a cost-effective way to produce metal parts. In Bartolo PJ et al., *High Value Manufacturing*, CRC Press, 3-8.

Atzeni, E., Iuliano, L., Minetola, P., & Salmi, A. (2010). Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 308-317.

Bassani, P., Biffi, C. A., Casati, R., Zanatta Alarcon, A., Tuissi, A., & Vedani, M. (2016). Properties of Aluminium Alloys Produced by Selective Laser Melting. *Trans Tech Publications: Key Engineering Materials*, 710, 83-88.

Baur, C., & Wee, D. (2015). *Manufacturings Next Act*. McKinsey and Company.

Beltrametti, L., & Gasparre, A. (2014). La stampa 3D come nuova sfida tecnologica al lavoro manifatturiero. Atti del XXVI Convegno annuale di Sinergie.

Berta G. (2014), *Produzione intelligente. Un viaggio nelle nuove fabbriche*. Torino, Italia: Einaudi.

Bifulco F. (2004), I percorsi di innovazione nelle imprese industriali: un approccio olistico, *Sinergie*, (64-65), 135-154.

Boccardi, A., Marzi, G., Zollo, L., Ciappei, C., & Pellegrini, M. (2014). Gli effetti della Stampa 3D sulla competitività aziendale. Atti del XXVI Convegno annuale di Sinergie.

Bolzan, P. (2015). Additive manufacturing technologies for materialization processes in design practice.

Bonacina, M. (2015). Progettazione e realizzazione di un sistema prototipale per SLM e caratterizzazione dei primi componenti in acciaio inossidabile AISI 316L.

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593-612.

Campbell, I., Bourell, D., & Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid prototyping journal*, 18(4), 255-258.

Casati, R., Lemke, J. N., Alarcon, A. Z., & Vedani, M. (2017). Aging Behavior of High-Strength Al Alloy 2618 Produced by Selective Laser Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(2), 575-579.

Chiumenti, M., Cervera, M., Salmi, A., De Saracibar, C. A., Dialami, N., & Matsui, K. (2010). Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 199(37), 2343-2359.

De Jong J.P.J., De Bruijn E. (2013), Innovation lessons from 3-D printing, *MIT Sloan Management Review*, 54(2), 42-52.

Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.

Fossati, F., Bayati, I., Muggiasca, S., Vandone, A., Campanardi, G., Burch, T., & Malandra, M. (2016). Pressure Measurements on Yacht Sails: Development of a New System for Wind Tunnel and Full Scale Testing. In *The 22nd Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, pp. 84-97.

Fossati, F., Bayati, I., Orlandini, F., Muggiasca, S., Vandone, A., Mainetti, G., Begovic, E. (2015). A novel full scale laboratory for yacht engineering research. *Ocean Engineering*, 104, 219-237.

Fossati, F., Muggiasca, S., Bayati, I., & Bertorello, C. (2013). Lecco Innovation Hub sailing yacht lab project. In *Proceedings of the 3rd International Conference Innovation in High Performance Sailing Yachts*, Lorient France (Vol. 1).

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.

- Griffini, G., Invernizzi, M., Levi, M., Natale, G., Postiglione, G., & Turri, S. (2016). 3D-printable CFR polymer composites with dual-cure sequential IPNs. *Polymer*, 91, 174-179.
- Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., & Griffini, G. (2016). UV-assisted 3D printing of glass and carbon fiber-reinforced dual-cure polymer composites. *Materials*, 9(7), 583.
- Jared, B. H., Aguilo, M. A., Beghini, L. L., Boyce, B. L., Clark, B. W., Cook, A., Robbins, J. (2017). Additive manufacturing: Toward holistic design. *Scripta Materialia*, 135, 141-147.
- Kellens, K., Baemers, M., Gutowski, T. G., Flanagan, W., Lifset, R., & Duflou, J. R. (2017). Environmental dimensions of additive manufacturing: Mapping application domains and their environmental implications. *Journal of Industrial Ecology*.
- Kühnle, H. (2009) *Distributed Manufacturing: Paradigm, Concepts, Solutions and Examples*, Springer.
- Leadbeater, C. (2009). *We-Think: Mass innovation, not mass production*. Great Britain, London: Profile Books.
- Lipson H., Kurman M. (2013), *Fabricated. The new world of 3D printing*, United States, Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc.
- Maffei, S. (2011). Artigiano oggi. Comprendere i processi innovativi contemporanei tra design, nuove forme di progetto e creatività e evoluzione dei modelli di produzione, in V. Arquilla, *Intenzioni creative. Design e artigianato per il Trentino*, Italia, Rimini: Maggioli.
- Magone, A., & Mazali, T. (2016). *Industria 4.0. Uomini e macchine nella fabbrica digitale*. goWare & Guerini e Associati SpA.
- Mellor S., Hao L., Zhang D. (2014) Additive manufacturing: A framework for implementation, *International Journal of Production Economics*, vol. 149, March, pp. 194-201.
- Moretto, A. (2017). *Strategie sostenibili nell'industria 4.0*.
- Murr, L. E. (2015). Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 5, 40-53.
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ramirez, D. A., Martinez, E., Hernandez, J., Amato, K. N., Wicker, R. B. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(1), 1-14.
- Piller, F. (2006). *Mass Customization*, Germany, Berlino: Gabler Verlag.
- Postiglione, G., Natale, G., Griffini, G., Levi, M., & Turri, S. (2015). Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 110-114.

Postiglione, G., Natale, G., Griffini, G., Levi, M., & Turri, S. (2015). UV assisted three dimensional printing of polymer nanocomposites based on inorganic fillers. *Polymer Composites*.

Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R. J., & Moultrie, J. (2017). Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice.

Reeves, P., Tuck, C., Hague, R. (2011), Additive Manufacturing for Mass Customization, in F.S. Fogliatto, G.J.C. da Silveira, Mass Customization, Springer London.

Rullani, E. (2014), Manifattura in transizione. *Sinergie*, 93, 141-152.

Seravalli, A. (2013). Prototyping for opening production: from designing for to designing in the making together. Proceedings of Crafting the future - 10th European Academy of Design Conference, Gothenburg, 17-19.

Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M. (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, 8, 12-35.

Thomas, D. (2016). Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5-8), 1857-1876.

Tuulenmäki, A., Välikangas, L. (2011) The art of rapid, hands-on execution Innovation. *Strategy & Leadership*, 39(2)

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012.



ISBN 978-88-95665-1-11-8

Questo testo raccoglie gli atti del seminario *Additive Manufacturing in campo Navale e Nautico* tenutosi presso il Politecnico di Milano il 17 Maggio 2017 e rappresenta una raccolta di riflessioni ed esperienze sul tema della fabbricazione additiva per lo Yacht Design. Ricostruisce una storia contenuta, ma molto densa, in cui le evoluzioni tecniche che si sono susseguite con inedita rapidità sono state particolarmente significative.

Le tre sessione tecniche del convegno raccolgono le esperienze chiave nei diversi ambiti di ricerca, di sperimentazione e di applicazione della fabbricazione additiva. Interventi interessanti non solo per i risultati, raccolti in questa pubblicazione, ma, soprattutto, per le suggestioni e gli scenari che propongono e per l'apertura proposta nell'interpretare la concezione e la realizzazione stessa di manufatti industriali.

La commistione e la capacità di lavorare in sinergia con competenze disciplinari diverse è oggi più che mai indispensabile rispetto alla necessità di combinare know how sulle tecnologie e sui materiali con un'ampia visione di metodo progettuale. E la nautica rappresenta probabilmente un ambito in cui tale interdisciplinarietà offre grandi potenzialità, un contesto in cui occorre sapere immaginare il futuro sfruttando le potenzialità che le nuove tecnologie ci mettono a disposizione.