

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe 10

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Meccanica Razionale

Analisi dell'introduzione di tecniche additive nel processo
produttivo di airbox per il settore automotive.

CANDIDATO
Matteo Sanchi

RELATORE
Prof. Leonardo Seccia

CORRELATORI
Ing. Sara Bagassi
Ing. Francesca Lucchi

Anno Accademico 2013/2014
Sessione IIIa

INDICE

Introduzione	pag.5
Cap. 1 Tecnologia Additiva	pag.7
1.1 Cenni Storici	pag.7
1.2 Il Concetto	pag.9
1.3 La Prototipazione Rapida	pag.11
1.4 Campi d'impiego e Prospettive Future	pag.13
1.5 Tecniche Additive	pag.20
1.5.1 Processazione con materiale liquido	pag.21
- Stereolitografia SLA	pag.21
- <i>PolyJet</i> PJ	pag.23
- <i>MultyJet Modeling</i> MJM	pag.25
- <i>Drop on demand</i> DOP	pag.26
1.5.2 Processazione con materiale in polvere	pag.28
- <i>Selective Laser Sintering</i> SLS	pag.28
- <i>Selective Heat Sintering</i> SHS	pag.29
- <i>Selective Laser Melting</i> SLM	pag.29
- <i>Electron beam melting</i> EBM	pag.31
- <i>3D Printing</i> 3DP	pag.32
1.5.3 Processazione con materiale solido	pag.34
- <i>Fused Deposition Modeling</i> FDM	pag.34
- <i>Fused Filament Fabrication</i> FFF	pag.36
- <i>Laminated Object Manufacturing</i> LOM	pag.37

Cap. 2 Materiali Processati	pag.39
2.1 Metalli	pag.40
2.2 Plastica	pag.42
2.3 Cera	pag.45
2.4 Ceramica	pag.46
Cap.3 Caso di Studio	pag.47
3.1 BMC Air Filters	pag.47
3.2 Requisiti e Caratteristiche	pag.48
3.3 Attuali tecniche produttive	pag.52
3.3.1 Stampaggio per soffiaggio	pag.52
3.3.2 Stampaggio a iniezione	pag.54
3.4 Obiettivi e Aspettative	pag.56
Cap.4 Valutazione e Scelta della tecnica	pag.57
4.1 Valutazione delle Tecniche	pag.57
4.2 Valutazione dei Materiali	pag.59
4.2.1 I materiali processati nella tecnica FDM	pag.59
4.2.2 I materiali processati nella tecnica SLS	pag.64
4.3 Creazione del Prototipo	pag.67
Cap.5 Test ed Analisi prestazionale	pag.71
5.1 Test	pag.71
5.2 Analisi delle prestazioni	pag.73
5.3 Conclusioni	pag.78
Bibliografia	pag.79
Sitografia	pag.80

Introduzione

Lo studio che ha dato luogo a questa tesi nasce dall'esigenza di costante miglioramento dell'azienda BMC che opera in un mercato, quello dell'*automotive*, in continuo cambiamento.

La "velocità" è considerata un elemento fondamentale nel processo produttivo all'interno delle aziende per limitare i costi ed anticipare i concorrenti nella presentazione del prodotto finale.

Nel lavoro svolto, la "velocità" è stata uno dei punti sui quali si è focalizzata l'analisi, in modo da poter meglio comprendere i possibili miglioramenti per il processo produttivo che l'introduzione della tecnologia additiva porterebbe con sé. Sarà infatti lo studio dell'applicazione di questa tecnologia il campo nel quale si andranno a ricercare. In sostanza, l'innovazione consiste in un diverso processo di creazione del manufatto, che viene realizzato attraverso il supporto di computer e software connessi alle macchine additive. Fino alla scoperta di questa tecnologia i processi produttivi erano di due tipi: sottrattivo e formativo.

Il processo sottrattivo si basa sull'asportazione di materiale da un blocco, dal quale si ottiene il manufatto una volta eliminata la materia in eccesso.

Il processo formativo, al contrario, prevede la formatura dell'oggetto tramite una sequenza di azioni ad esso applicate.

Il processo additivo, in maniera del tutto innovativa, crea il manufatto tramite la sovrapposizione di strati, formati dall'apporto di materiale per ogni singolo strato. Questa tecnica è stata introdotta negli ultimi decenni dello secolo scorso, ed ha portato alla realizzazione di macchine in grado di produrre prototipi in breve tempo, da cui il nome di prototipazione rapida.

Il settore additivo è l'argomento principale della tesi: in particolare, nel primo capitolo si presenta una breve storia, le principali tecniche utilizzate, alcuni aspetti significativi del processo produttivo ed i possibili sviluppi futuri. Nel secondo capitolo, sono illustrati i principali materiali che le tecniche additive processano nella creazione del prototipo. In seguito, nel terzo capitolo, viene presentata l'azienda da cui è stato proposto il caso di studio, vale a dire l'airbox da realizzare con le relative caratteristiche e tecniche produttive.

Lo studio delle tecniche di prototipazione e le caratteristiche dei materiali sono argomento del quarto capitolo, nel quale si cerca di evidenziare le

potenzialità dei diversi tipi di tecnica additiva e di valutare quello che meglio può soddisfare le esigenze dell'azienda.

Infine, nel quinto capitolo, una volta prototipato l'involucro dell'airbox, si procede alla sua valutazione in base a prestazioni, costi e tempi di produzione, in modo da offrire un'analisi quanto più esaustiva possibile.

Capitolo 1

Tecnologia Additiva

1.1 Cenni Storici

La tecnologia additiva è un settore nato da pochi decenni e tuttora in fase evolutiva, ha le sue radici alla fine degli anni ottanta quando gli americani *A. Herbert, C. Hull*, e il giapponese *H. Kodama*, dopo anni di lavoro svilupparono un sistema in grado di solidificare in maniera selettiva un fotopolimero. Il loro intento fù quello di sfruttare questa scoperta per la creazione di oggetti tridimensionali formati da strati di materiale che, solidificati uno sull'altro potessero creare qualsiasi forma.

Nel 1986 *C. Hull* presenta con il nome di "Stereolitografia" questo nuovo processo produttivo ed insieme a *R. Fried*, nell'anno successivo fonda l'azienda *3DSystems* che a tutt'oggi rimane uno dei punti di riferimento per questa tecnologia, in particolar modo nel campo della sinterizzazione. Da questo momento in poi nasceranno molte altre aziende (tra le quali *Cubital, DTM, EOS, Helysys, Stratasys*) che porteranno sul mercato altre tecnologie in alternativa alla stereolitografia. L'evoluzione in questo campo è stata particolarmente rapida, infatti la *Sanders* (ora *SolidScape* dentro il gruppo *Stratasys*), nel 1994 propone in commercio una macchina "RP" sotto i 100.000\$ e poco dopo, nel 1996 la *Stratasys* insieme alla *3DSystems* presentano i modellatori concettuali destinati all'ufficio tecnico.

Fig.1 Tabella date fondamentali.

Year of Inception	Technology
1770	Mechanization
1946	First Computer
1952	First Numerical Control (NC) Machine Tool
1960	First commercial Laser
1961	First commercial Robot
1963	First Interactive Graphics System (early version of Computer-Aided Design)
1988	First commercial Rapid Prototyping System

Tratto da: Rapid Prototyping scritto da: Chua C.K. Leong K.F. Lim C.S.

Nel nuovo millennio queste tecnologie, grazie al calo di prezzo e all'aumento di popolarità, sono sempre più alla portata di tutti. Questo fenomeno ha incrementato gli sviluppi e le novità in questo campo, allargando i confini e le applicazioni che queste macchine possono avere.

1.2 Il concetto

Per poter proporre sul mercato prodotti con buone prestazioni, capaci di distinguersi dalla concorrenza, il processo produttivo è da sempre considerato di fondamentale importanza. Al suo interno la fase di prototipazione riveste un ruolo centrale per il raggiungimento del risultato finale. Negli ultimi decenni, nel mondo industriale la concorrenza e la competizione a livelli sempre più serrati, hanno portato a considerare sempre più importante, l'aspetto riguardante la velocità di processo. Con una produzione più rapida si rende possibile l'immissione di nuovi prodotti sui mercati prima dei propri concorrenti, permettendo così all'azienda di cogliere un significativo vantaggio competitivo. Tale mentalità ha portato a spremere il più possibile tutte le fasi produttive in termini di tempo, risorse e materiale, indirizzando quindi lo sviluppo verso la ricerca di tecnologie sempre più veloci e flessibili, capaci di poter sostenere più impieghi, ancor meglio se in maniera contemporanea. La spinta a questo cambio di rotta è stata data dall'introduzione dei computer all'interno del processo produttivo i quali si sono dapprima affiancati e in alcuni casi sostituito, gli operatori che venivano impiegati nella produzione. Questi computer hanno profondamente cambiato il modo di lavorare e di pensare il lavoro in quanto tale. E' grazie a loro infatti che si sono potute creare macchine automatizzate (*CAM Computer Aided Manufacturing*) a controllo numerico (*CNC Computer Numerical Control*) e sistemi di studio e progettazione (*CAD Computer Aided Design*), che hanno posto le basi per la nascita della tecnica additiva. L'introduzione di queste tecnologie, ha rivoluzionato la produzione, non solo in termini di numeri, ripetibilità del processo e garanzia degli standard qualitativi, ma ha fatto sì che anche il processo produttivo vero e proprio potesse essere ogni volta rivalutato. Il cambiamento maturato nel corso degli anni ha creato la possibilità di staccarsi dai tradizionali metodi produttivi, basati sulla creazione del manufatto tramite metodo sottrattivo (come lavorano ad esempio le macchine a espansione di truciolo) o formativo (produzione tramite applicazione di forze).

Si è venuta a creare la possibilità di realizzare prodotti attraverso una **PRODUZIONE ADDITIVA** cioè aggiungendo il solo materiale necessario al prodotto, in maniera del tutto slegata dai canoni a cui dovevano sottostare i vecchi metodi. Il procedimento additivo, a differenza di quanto avveniva prima, crea l'oggetto apportando materiale solo dove necessario, sui singoli strati in cui è scomposta la figura da creare. In questo modo, si è venuto a sviluppare un concetto del tutto nuovo che vede il modello da produrre non come una forma geometrica in quanto tale, ma come l'insieme di strati di spessore infinitesimale, formati da piccoli punti uniti tra loro, che andranno poi a sovrapporsi per comporre il corpo nella sua totalità. Si è potuto arrivare

a questo livello tecnologico grazie all'evoluzione dei sistemi CAD, CAM, CNC che hanno contribuito alla creazione di macchine, connesse a computer che ne coordinano i movimenti in maniera precisa e allo stesso tempo ne regolano la velocità ed altre azioni. L'innovativa modalità di creazione perstrati da la possibilità di poter creare qualsiasi figura, evitando i problemi relativi ai sottosquadri ed angoli di sforno che si incontravano con le tecniche consolidate.

Le macchine basate sulla tecnologia additiva, vengono impiegate nella fase di prototipazione dove garantiscono la massima flessibilità ed una riduzione dei tempi di tale processo.

Il termine *Rapid Prototyping* (Prototipazione Rapida) viene coniato per riferirsi a quelle nuove macchine che utilizzano la tecnologia additiva, nate per soddisfare l'esigenza di limare i tempi di produzione ed in particolare quelli riguardanti la prototipazione.

1.3 La Prototipazione Rapida

Il processo di prototipazione rapida prevede come prima fase, l'elaborazione della geometria attraverso la creazione di un file STL (*Solid to Layer*) utilizzando un software CAD tridimensionale (3D). Il *software* opera tramite modelli matematici che creano superfici chiuse che in seguito, una volta unite, producono il volume interno ed esterno del oggetto da realizzare.

Nel caso si debba riprodurre un oggetto già esistente è possibile ottenerne la forma tridimensionale senza doverla disegnare tramite *software* CAD, ma applicando il processo di Ingegneria Inversa. Tale processo consiste in diverse operazioni nelle quali vengono utilizzati sistemi ottici e tastori che scansionano le geometrie dell'oggetto riportandole in formato digitale. Le varie immagini in formato digitale delle forme scansionate (nuvola di punti) vengono processate con opportuni *software* dedicati, sino ad ottenere un unico *file* STL che contenga la geometria completa dell'oggetto.

In seguito a questa prima fase, dove si lavora all'elaborazione del prototipo virtuale, viene analizzato il relativo *file* STL attraverso il software della macchina da prototipazione rapida. Grazie a questo software si possono impostare vari setup del processo macchina, come la dimensione degli spessori, lo spessore bordi, la densità degli strati, l'angolo con cui viene stesa la trama interna agli strati ecc..

Terminata questa prima fase di settaggio è possibile scegliere l'orientamento di sviluppo del processo formativo. Questa scelta risulta essere molto importante sul risultato finale per quel che riguarda le finiture superficiali e le caratteristiche meccaniche data anche l'anisotropia di alcuni materiali plastici. Infatti, a seconda di come si pone il verso (verticale o longitudinale) di accrescimento della figura, le caratteristiche del materiale (plastico) possono dare risultati molto differenti e lo stesso vale per la scelta della tecnica utilizzata, argomento che verrà affrontato nei prossimi paragrafi.

Questa prima fase di elaborazione digitale accomuna tutti i processi, e prevede un dispendio di tempo di qualche ora, in seguito alla quale si può dare avvio al processo di creazione vera e propria del prototipo.

Per la descrizione dei vari processi di creazione si rimanda ai paragrafi seguenti.

Una volta terminata la creazione del prototipo questo viene sottoposto a test e verifiche per valutare la bontà del progetto. Gli aspetti sotto cui viene analizzato sono molteplici e tra questi troviamo verifiche sul *design*, la funzionalità, le prestazioni meccaniche, ecc..

Nei test di *design*, vengono analizzate le linee e le forme, per quanto riguarda le geometrie si controllano le tolleranze e gli spessori, del particolare o dell'insieme se formato da più parti. Per quel che riguarda la funzionalità,

nel caso in cui sia montato come componente valutandone le dimensioni e il rispetto delle distanze una volta installato.

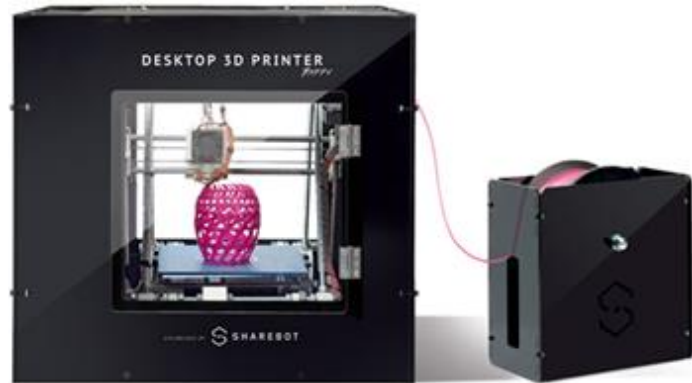
Altro punto rispetto al quale si attendono risposte dal prototipo, sono le prestazioni meccaniche, in base alle quali si valuteranno caratteristiche come la resistenza al calore, il punto di transizione vetrosa “Tg”, la temperatura di deviazione del calore, il comportamento di risposta ad urti o ad agenti chimici.

A questa fase di studio seguono solitamente modifiche che, in caso di piccoli accorgimenti, possono essere apportate direttamente sul prototipo per essere subito valutate e modificare poi il modello in digitale. Qualora si verificano problemi più gravi, si renderà necessario cambiare completamente il disegno del prototipo, per essere poi nuovamente creato e ripetere nuovamente i test e le verifiche. A causa di queste problematiche, il processo di prototipazione basato sulle vecchie tecnologie poteva richiedere parecchio tempo e un ingente esborso di denaro, ma grazie alla prototipazione rapida entrambi i fattori sono stati ridotti ed è questo il motivo del veloce sviluppo di tale tecnologia.

1.4 Campi d'impiego e Prospettive Future

Ad oggi le macchine da prototipazione rapida sono diventate molto comuni e grazie al calo dei prezzi è possibile avere, tramite le versioni *desktop*, dispositivi in grado di ricreare oggetti tramite la deposizione di modello fuso, direttamente sulla scrivania di casa propria (Figura 2).

Fig.2 Stampante versione *desktop*.



Se da una parte un obiettivo in questo campo è stato raggiunto (la tecnologia infatti è arrivata alla conoscenza e possibilità di tutti grazie alle versioni economiche), dall'altra le aziende *leader* del settore RP hanno ancora molte conquiste da fare per quel che riguarda il campo industriale. Proprio per questo, lo sviluppo del livello tecnologico e la propensione alla ricerca di nuove tecniche continua con l'obiettivo di poter creare manufatti con caratteristiche sempre più vicine a quelle ottenute con i classici metodi produttivi, grazie anche all'utilizzo di particolari materiali (dal titanio alla cartilagine umana) destinati esclusivamente a questa tecnologia.

Di seguito si può vedere una tabella riassuntiva (Fig.3), riguardo le possibili scelte in fatto di formato del materiale utilizzabile (fili, polveri, lamine ma anche liquidi fotosensibili) tipologie e tecniche produttive.

Fig.3 Tabella tecnologie materiali processati.

TIPOLOGIA	TECNOLOGIA	MATERIALI
Estrusione	Fused Deposition Modeling (FDM)	Materiali termoplastici (es. PLA o ABS), HDPE, euttici, edibili, gomma (Sugru), argilla, plastilina, silicone RTV, porcellana, paste metalliche
Filo	Electron Beam Freeform Fabrication (EBF)	Qualsiasi lega metallica
Granulare	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Qualsiasi lega metallica
	Electron Beam Melting (EBM)	Leghe di titanio
	Selective Laser Melting (SLM)	Leghe di titanio, leghe di cromo-cobalto, acciaio inossidabile, alluminio
	Selective Heat Sintering (SHS)	Polveri termoplastiche
	Selective Laser Sintering (SLS)	Materiali termoplastici, polveri metalliche, polveri di ceramica
Letto di polvere e testine inkjet	Plaster-based Printing (PP)	3D Gesso, amidi
Laminati	Laminated Object Manufacturing	Carta, fogli metallici, film plastici
Polimerizzazione attraverso la luce	Stereolitografia (SLA)	Fotopolimeri
	Digital Light Processing (DLP)	Fotopolimeri

Osservando la tabella è possibile notare come ci sono delle modalità che permettono di processare lo stesso formato (ad esempio polvere) con diversi tipi di materiale (metallo, ceramica, plastica). E' questo il caso della sinterizzazione laser, dove è possibile scegliere un materiale a seconda del prodotto che si vorrà ottenere e del ruolo che questo dovrà ricoprire. La vasta scelta riguardante il campo additivo è testimoniata anche dalle diverse tecnologie con cui si può lavorare lo stesso materiale. Ad esempio i polimeri plastici sono processabili tramite FDM, SLS, SHS, mentre per quanto riguarda i metalli la scelta della tecnologia è ancora più ampia.

Grazie alla capacità di rendere possibile la creazione di qualsiasi forma, la flessibilità e l'ampia offerta data dai materiali e dalle numerose tecniche, oggi la tecnologia additiva abbraccia la maggior parte dei settori produttivi, ma forse il settore in cui il concetto di libertà delle forme viene espresso al meglio è il *design*.

Questo è stato il settore in cui sin da subito la tecnologia RP ha potuto esprimere le proprie potenzialità, poiché non richiedeva standard troppo esigenti. In altri campi infatti, dove erano richiesti test funzionali, spesso i prototipi si dimostravano troppo fragili per superarli.

Nel campo del *design* oggi, possiamo trovare applicazione e creazioni di qualsiasi tipo. Per quanto riguarda l'arredo una particolare creazione riguarda la sedia di una giovane designer olandese Lilian van Daal creata ispirandosi alle forme delle strutture vegetali (Fig.4). Questo prodotto ha un design molto particolare e funzionale, è costruito in poliammide (PA o Nylon) e grazie alle particolari strutture da cui è composto riesce ad adattarsi

al meglio alle forme del corpo assorbendo il peso e distribuendolo sull'intera struttura per una comoda seduta.

Altra originale applicazione di design ma in ambito moda è la vistosa creazione del marchio Adidas che, in occasione del MICAM (Fiera della calzatura) a Milano, ha creato una coloratissima scarpa (Fig.4) sfruttando la possibilità di utilizzare più materiali per uno stesso oggetto.

Fig.4 Applicazioni di design.



Attraverso lo sviluppo tecnologico è stato possibile superare le iniziali difficoltà riguardanti la capacità di resistenza agli urti o sopportazione di carichi. Negli ultimi anni sono stati presentati esempi di produzione di veri e propri prototipi funzionali come nel caso della biciletta totalmente in titanio realizzata dall'azienda *Empire Cycles* con la collaborazione di *Renishaw* azienda che tratta da vicino il mondo della produzione additiva. Grazie alla tecnologia laser di *Renishaw* è stato possibile creare un telaio in titanio capace di sopportare i carichi e le sollecitazioni tipiche di una *mountain bike* (Fig.5).

Fig.5 Bici con telaio in titanio creato con fusione laser.



Questa biciletta esce dallo schema di prototipo, in quanto è un oggetto funzionale che garantisce prestazioni addirittura superiori a quelle che si otterrebbero con le classiche tecniche di lavorazione del titanio.

Nell'ambito produttivo la tecnica additiva viene utilizzata anche a sostegno ed integrazione delle tecniche tradizionali, come nel caso della creazione di

stampi in silicone. In questo ambito la produzione dei modelli è affidata alle macchine da prototipazione rapida che creano in breve tempo il prototipo che avrà la funzione di anima per la creazione dello stampo in silicone (Fig.6).

Fig.6 Modello per creazione stampo.



Nel campo dell'*automotive* riportiamo il caso dell'azienda Lamborghini, la quale si è avvalsa dell'esperienza nel campo additivo di *Stratasys*. Grazie a questa collaborazione ha prodotto, tramite la tecnica di deposizione di filamento fuso, il prototipo della scocca e del telaio della vettura *Aventador* in scala 1 a 6 (Fig.7). Il modello ottenuto è stato utilizzato nella fase di studio ed analisi delle forme potendo così valutare le caratteristiche e le potenzialità di quella che sarebbe diventata l'automobile vera e propria.

Fig.7 Prototipo in scala Lamborghini Aventador.



In ultimo per dare un'altra prospettiva di quello che può essere il vantaggio della produzione "additiva", oltre al processo produttivo vero e proprio, viene riportata un'immagine tridimensionale di uno studio effettuato su un parafango anteriore di una moto da corsa, la quale necessitava un maggiore apporto d'aria nella parte interna della moto, in particolare nel radiatore. Attraverso l'elaborazione di un modello virtuale si è riusciti a creare un parafango integrato di un convogliatore (nella figura 9 in azzurro), rispettando le geometrie già fissate, capace di portare l'aria dove altrimenti

non sarebbe potuta arrivare. Grazie quindi al sostegno dei software che dialogano direttamente con le stampanti si ottengono risultati che prima sarebbero stati molto complicati e avrebbero richiesto un elevato dispendio di tempo.

Fig.8 Parafanghi in 3D e dal vivo.



Il livello tecnologico di cui oggi si dispone è quindi il frutto del progressivo e continuo sviluppo che è maturato nel corso degli anni, nonostante sia nata da poco, ed inizialmente sviluppata per il campo della prototipazione, questa tecnologia che trova sviluppi in varie applicazioni industriali (*automotive*, *aerospaziale*, *medico*, *design*, *edile*), ora ha come principale obiettivo quello di arrivare a garantire la possibilità di creare prodotti che garantiscano le stesse prestazioni in modo affidabile e ripetibile, come le consolidate tecniche che hanno operato fino ad oggi.

Da questa idea/obiettivo nasce il nome di *ADDITIVE MANUFACTURING* (Produzione Additiva) o *DIRECT MANUFACTURING* (Produzione Diretta), cioè il fatto di poter utilizzare il prototipo non più come campione, sul quale vengano eseguiti dei test o utilizzato come rappresentazione per scopi di *design*, ma come manufatto per poter sostituire in tutto il prodotto finale.

L'obiettivo calamita su di sé le attenzioni dell'intero comparto produttivo e proprio per questo vi è un continuo aumento di interesse e ricerca, nonostante vi siano ostacoli e limiti, come gli alti volumi di produzione (non ancora possibili), gli alti costi delle nuove macchine e la loro scarsa dimensione produttiva. Nonostante ciò, lo sviluppo non si ferma, addirittura enti come la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) pensano che questa sia la via del futuro, lo dimostra il fatto di aver sperimentato la produzione di parti, in microgravità; anche la ESA (*European Space Agency*) ha lanciato in orbita una stampante 3D utilizzata dall'astronauta Samantha Cristoforetti per valutare la produzione additiva di strumenti in microgravità (Rivista *Office Automation* Dic. 2014). Questi sono alcuni dei test effettuati al fine di valutare il livello delle tecnologie per possibili applicazioni, in merito alla costruzione di basi spaziali su Luna e Marte e lo stesso intento lo si trova nel settore dell'architettura, dove si pensa

di poter arrivare a creare componenti e strumenti per l'edilizia e parti strutturali più avanti.

Vi sono però anche complicazioni in fatto di sviluppo, uno degli ostacoli principali è dato dai brevetti ancora in atto, questi infatti limitano le conoscenze e la ricerca, ed è anche per questo, che ad oggi ci sono ancora grandi divari tra le diverse tecnologie. Questa situazione nasce dal fatto che le prime tecnologie hanno già visto cadere i propri brevetti e quindi si sono rese pubbliche in precedenza rispetto alle ultime nate. Proprio nell'anno (2014) appena terminato, grazie alla caduta di questi brevetti, la tecnologia SLS ha visto un forte slancio e interesse da parte di aziende ed enti, per questo si può pensare che nel prossimo periodo si possa assistere a un calo del prezzo della tecnologia, al momento molto costosa, e un'incremento delle prestazioni delle macchine e dei materiali processabili, come è già avvenuto in passato per la FDM.

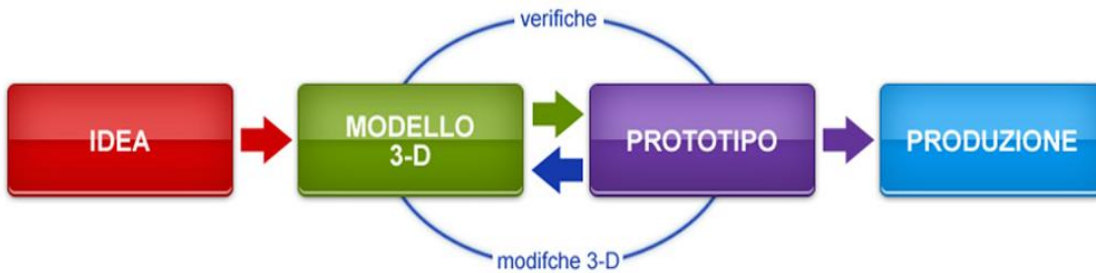
Un esempio, è quanto avvenuto durante il 2014 nel campo della stereolitografia, l'italiana *Lumi Industries* ha sviluppato la prima stampante portatile e pieghevole, che si basa sull'utilizzo di un materiale liquido fotosensibile posto all'interno di un contenitore che solidifica tramite un videoproiettore collegato ad un computer. Questa evoluzione permette di creare in maniera molto più rapida, con buone finiture e con vari materiali a disposizione, prodotti in tempo reale e ovunque. Può essere un piccolo punto di partenza per lo sviluppo della flessibilità di produzione che la tecnologia offre, ma che vede già come primo ostacolo le piccole dimensioni di costruzione del prodotto.

Aspetto che crea molto interesse soprattutto per quel che riguarda il comparto produttivo, sono proprio le dimensioni produttive che si possono ottenere, sono poche infatti le tecniche che raggiungono il metro di lato, sicuramente l'aumento delle misure di costruzione sarà uno dei punti fondamentali in merito a questo sviluppo. Altro punto non meno importante sarà, il miglioramento della definizione delle superfici, dove l'obiettivo è quello di creare manufatti tali da non riconoscere più la stratificazione evidente nelle prime tecnologie, soprattutto per quel che riguarda il campo della modellazione per deposizione di filamento fuso, oltre ad avere materiali che possano garantire caratteristiche omogenee, risolvendo quindi anche il problema dell'anisotropia. Nonostante i vari campi d'impiego e le diverse applicazioni, il mondo della tecnica additiva ha comunque un comun denominatore, la creazione per sovrapposizione di strati di materiale, ma ciascun metodo presenta vantaggi e svantaggi che vanno considerati al momento della scelta della tecnica, quali costo (materiali e macchina), velocità, caratteristiche del materiale, dimensioni dell'oggetto, ma anche la flessibilità, che la macchina può offrire, valutando possibili futuri impieghi che potrà sostenere. Per questo motivo si andranno ora a presentare le principali tecniche che il mondo additivo offre, per poter valutare quella che

più si avvicina alle esigenze richieste del caso di studio affidato dall'azienda BMC, la quale ha richiesto di valutare se la tecnologia additiva fosse in grado di riprodurre un airbox comparabile con quelli che l'azienda produce e constatarne poi le potenzialità.

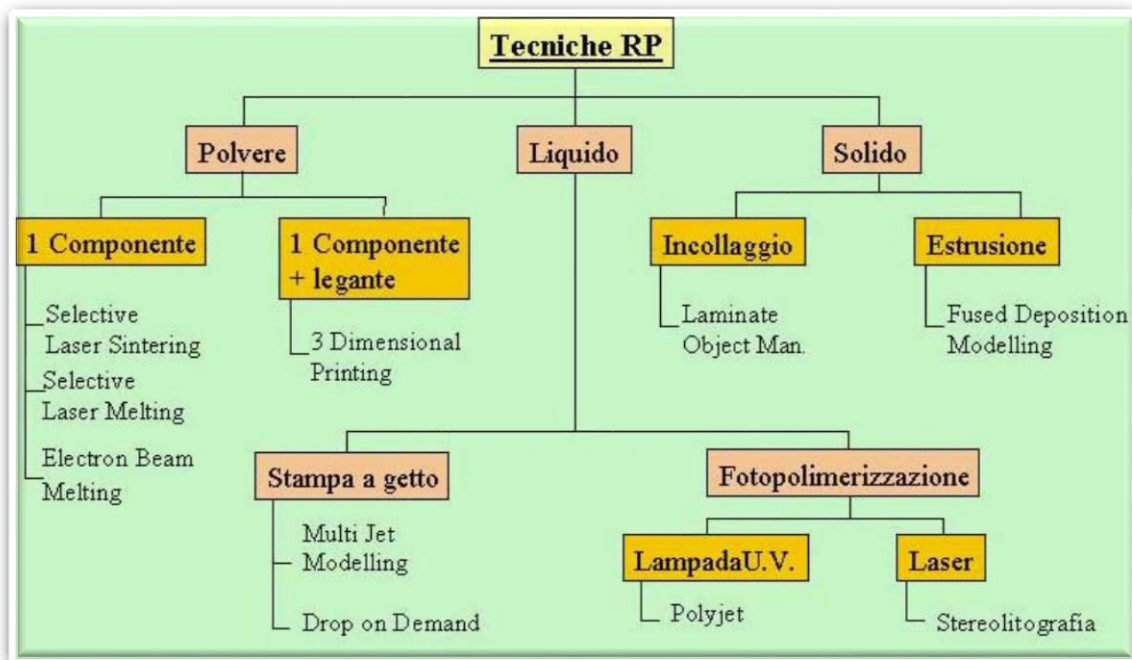
1.5 Tecniche additive

Fig.9 Schema processo produttivo.



Nell’immagine sopra rappresentata sono descritti i passaggi che caratterizzano la realizzazione di un prodotto. In questo processo le tecnologie convenzionali fino ad ora utilizzate, hanno tempi di avviamento del processo di produzione molto lunghi, basti solo pensare alla creazione e assemblaggio degli stampi. La tecnologia additiva offre tecniche di RP (*Rapid Prototyping*), che sono in grado di iniziare la creazione del modello CAD appena effettuata la richiesta terminandola in qualche ora di lavoro. Elaborato il *file* digitale, il processo di creazione del prototipo può iniziare il giorno stesso, abbreviando in questo modo anche i tempi che portano alla creazione del prodotto finito. Iniziamo a conoscere meglio le potenzialità delle tecniche additive in commercio, andando ad elencare quelle di maggior utilizzo e un consolidato valore produttivo.

Fig.10 Schema tecniche Prototipazione Rapida.



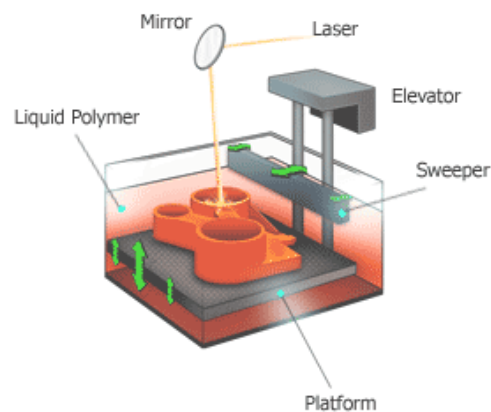
1.5.1 Processazione con materiale liquido

- Stereolitografia (SLA)

La prima tecnica additiva sviluppata basandosi sulla fotopolimerizzazione è stata la stereolitografia. Questa tecnologia, brevettata nel 1986, è una delle più note, essendo stata anche la prima tecnica di *Rapid Prototyping* ad essere introdotta sul mercato.

Il procedimento di sinterizzazione del materiale avviene grazie all'azione di un laser di luce ultravioletta che polimerizza strato su strato, una resina liquida (epossidica o di acrilato) contenuta in una vasca come riportato in figura 11.

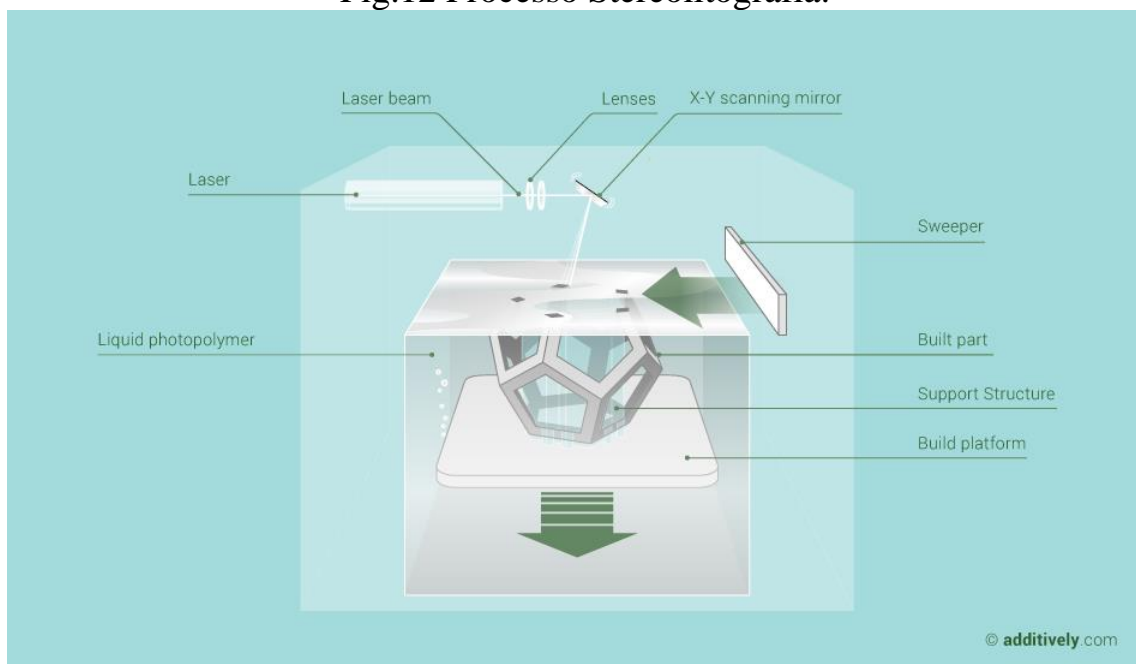
Fig.11 Processo produttivo Stereolitografia.



Il raggio laser colpisce la superficie del liquido secondo traiettorie stabilite da *software* che ne regolano i sistemi ottici, producendo il suo indurimento nei punti colpiti. La dimensione focale del raggio è di circa 0.25 mm per cui ogni linea tracciata ha come minimo questa larghezza. Quando uno strato viene completato il supporto si abbassa per consentire che il liquido lo ricopra, per poi rialzarsi e lasciare solo lo spessore necessario alla creazione dello strato successivo. Conclusa la realizzazione, il pezzo viene estratto dalla vasca e posto in un forno a raggi UV per completare l'indurimento della resina, successivamente si possono effettuare delle operazioni come rifinirne e verniciarne la superficie. I pezzi realizzati sono delicati rispetto a quelli creati con resine industriali, quindi non adatti a test funzionali. Un fattore che incide molto sulla durata del prodotto, è la polimerizzazione della resina, che inizia durante la sinterizzazione tramite il raggio laser ma che continua con l'esposizione alla luce del sole rendendo fragili i pezzi e riducendone drasticamente la vita utile.

Questo procedimento offre la possibilità di riprodurre geometrie complesse comune a questa tecnologia, con finiture superficiali migliori rispetto a molte altre tecniche. Per contro comporta però un problema nella creazione di parti che necessitano di un sostegno, in tal caso risulta necessario modificare il disegno prevedendo opportuni sostegni che dovranno essere apportati nel *file* CAD insieme al prototipo complicando così anche il processo di pulitura. Anche questi sostegni infatti saranno creati con lo stesso materiale e procedimento, a differenza di altre tecniche dove il materiale di supporto si distingue da quello di creazione e viene elaborato autonomamente dal *software*.

Fig.12 Processo Stereolitografia.



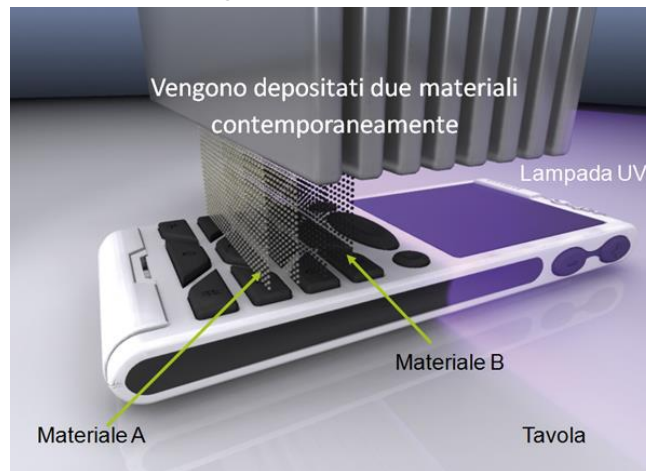
- Resistenza: 17.2 – 68.9Mpa;
- Finitura: 0.051 – 0.152mm;
- Materiale: Fotopolimeri;

- Punti di forza: Produce particolari con un'eccellente finitura superficiale ottimi per verifiche design e prove dimensionali. Il costo è molto competitivo e la tecnologia è fruibile da differenti risorse.

- Punti deboli: I prototipi risultano essere leggeri e quindi inadatti a test funzionali. L'esposizione continuata alla luce solare può rendere fragile l'oggetto. Il liquido polimerico può risultare molto tossico.

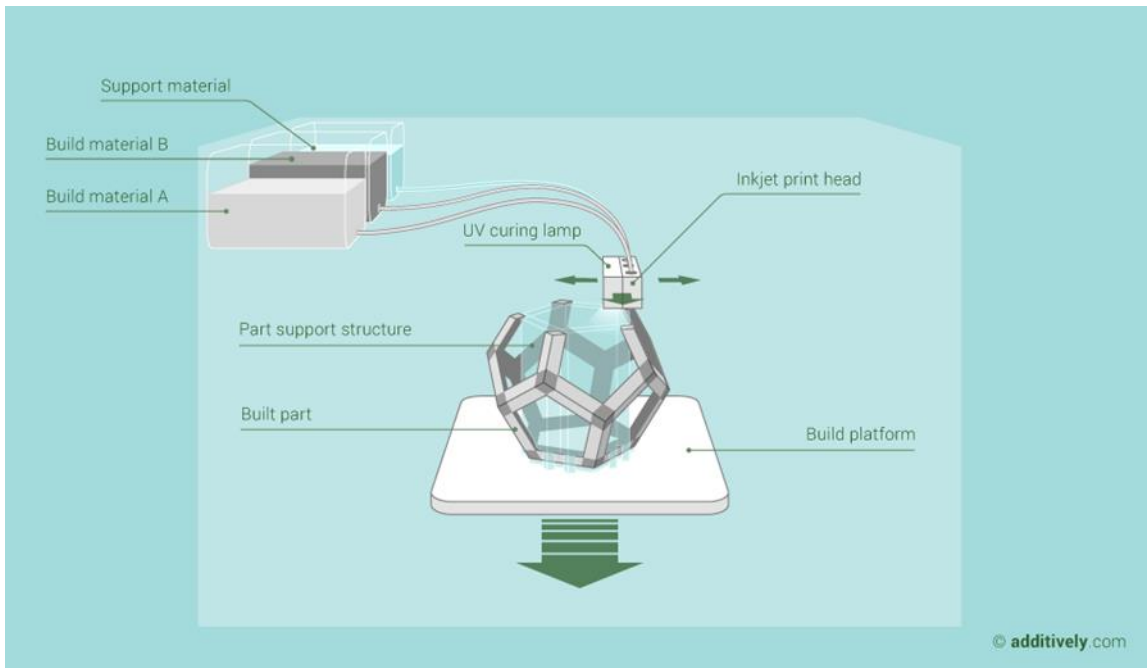
- *PolyJet* (PJ)

Fig.13 Processo PJ.



Nell'immagine sopra proposta (Fig.13) viene rappresentata la produzione con metodo *Polyjet* che può essere vista come un'evoluzione della comune stampa ad inchiostro. In questo caso però, invece che gettare inchiostro, vengono depositate gocce di materiale liquido tramite una testina che contiene un gran numero di ugelli che spruzzano gocce finissime di fotopolimeri. Questi, subito dopo la deposizione vengono trattati da una lampada UV per la solidificazione. Con questa tecnica si riescono ad ottenere forme con una risoluzione di 20 micron, con precisione fino a 0.1 mm, grazie all'azione della luce UV che tratta il materiale liquido appena depositato. Il processo pre-stampa è molto semplice tramite il file STL dell'oggetto il *software* della stampante calcola il posizionamento dei fotopolimeri e del materiale di supporto gelatinoso, utile per costruzioni complesse e di facile rimozione. Elaborato il prototipo, inizia il deposito dei fotopolimeri strato per strato con relativa polimerizzazione, in questo modo strati sottilissimi vengono ad accumularsi sul vassoio, assieme al materiale di supporto che viene posto in punti precisi per evitare il collasso o la deformazione. Terminato il processo il materiale di supporto viene rimosso facilmente con le mani o dell'acqua e l'oggetto è pronto per l'uso.

Fig.14 Processo *PolyJet*.

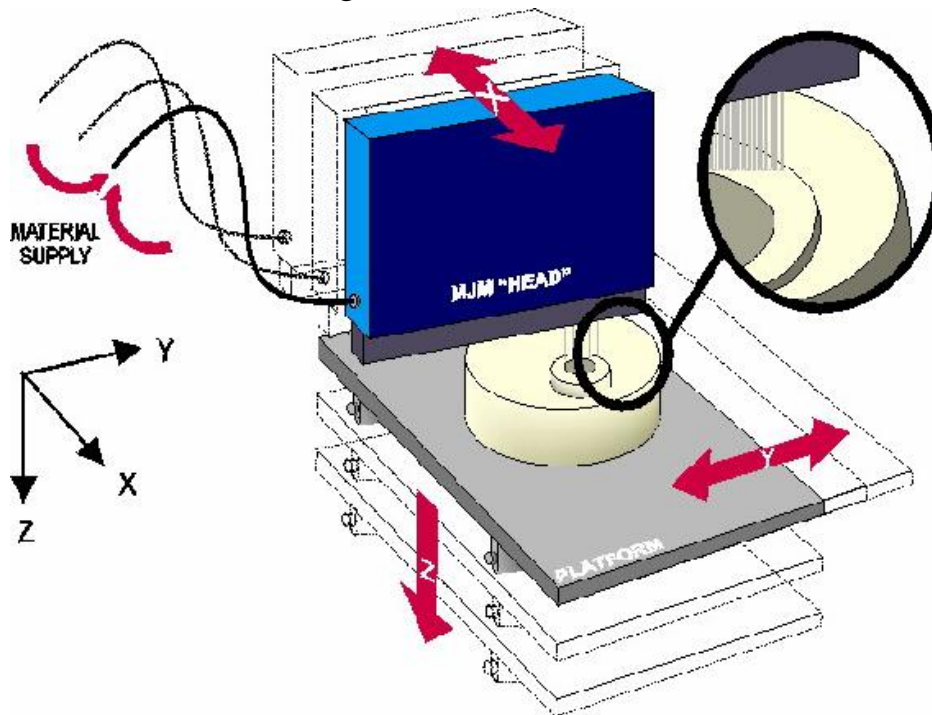


- Resistenza: 49.6 - 60.3Mpa;
- Finitura: 0.015 - 0.030mm;
- Materiale: Fotopolimeri acrilici ed elastomerici;
- Punti di forza: Realizza prototipi in costampato, ha elevata precisione di stampa (± 0.1 mm ogni dieci centimetri), rapidità di creazione, supporta un'ampia gamma di materiali con proprietà diverse: dalla gomma ai materiali rigidi, dai materiali opachi a quelli trasparenti.
- Punti deboli: Resistenza dei particolari prodotti simile alla SLA (fragile). Non permette di fare considerazioni sull'effettiva realizzabilità del pezzo.

- *MultiJet Modeling* (MJM)

Come nella stampa a getto d'inchiostro la deposizione di materiale è simile al processo delle comuni stampanti, ma in questo caso viene affidata ad un numero elevato di ugelli (352 da qui il nome *MultiJet*) che, tramite goccioline di materiale termoplastico o ceroso (deposto alla temperatura di 80°C circa) creano il modello. Durante il processo di stratificazione la testa che deposita il materiale si muove solo lungo l'asse X, mentre la base su cui viene depositato il materiale si muove sui due assi rimanenti (Y-Z) con estrema precisione, come illustrato dalla figura seguente.

Fig.15 Processo MJM.



Terminato questo processo si estrae il pezzo dalla macchina e si procede alla rimozione del supporto a mano libera o tramite trattamenti a caldo. La produzione garantisce ottime finiture superficiali (0.16 micron) ideali per effettuare test aerodinamici ed analisi dei flussi. Con questa tecnica è possibile creare stampi in silicone grazie al ruolo della cera che tende a diminuire le rugosità delle pareti inglobando eventuali residui.

La resistenza del prodotto non arriva ad alti livelli, per questo i prodotti dovranno essere immersi ripetutamente in bagni di gesso con successivo passaggio in forno, per essere utilizzati come stampi. Il procedimento, seppur veloce nella fase di creazione subisce un rallentamento per le fasi di

post produzione nelle quali il passaggio in forno è d'obbligo per far sì che il gesso asciughi e la cera evapori.

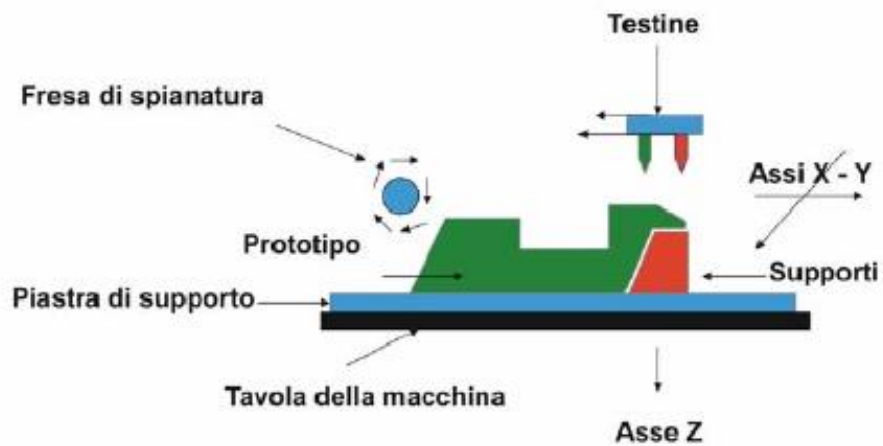
Le cere e in particolare la loro consistenza hanno un importante ruolo all'interno del processo, queste infatti si devono liquefare ed evaporare senza rilasciare alcun tipo di residuo.

- Punti di forza: Rapidità della costruzione del modello, impiegabile in ambienti d'ufficio, utilizzabile in processi di *design* grazie alla buona finitura del prototipo data dalla cera.
- Punti deboli: Necessita di passaggi post produzione per ottenere pezzi funzionali, limitate applicazioni data la debolezza strutturale e piccole dimensioni del prototipo.

- *Drop on demand (DOP)*

Uno dei processi additivi più particolari è quello chiamato *Drop on demand*, nel quale la deposizione è operata da una testa composta da due ugelli capaci di produrre singole gocce di materiale tramite un vaporizzatore. La caratteristica che distingue questa da tutte le altre tecniche additive, è quella dell'integrare al processo additivo un processo sottrattivo, compiuto da una fresa che spiana gli strati depositati ed esporta il materiale in eccesso. Grazie a questa particolarità si possono produrre prototipi molto precisi e con una ottima finitura superficiale. Come si può osservare nella figura sottostante (Fig.16), il prototipo viene costruito strato per strato attraverso la deposizione di materiale termoplastico (verde) e di una cera adibita al sostegno (rosso), da due differenti ugelli presenti in una testina che muove sul un piano (assi X-Y). La terza dimensione "asse Z", come in altre tecniche è creata dalla discesa della piastra di supporto dove si deposita il materiale, al termine di ogni strato. Una volta terminato il processo il materiale di supporto non asportato in precedenza dalla fresa può essere eliminato con bagni in solventi.

Fig.16 Processo DOP.



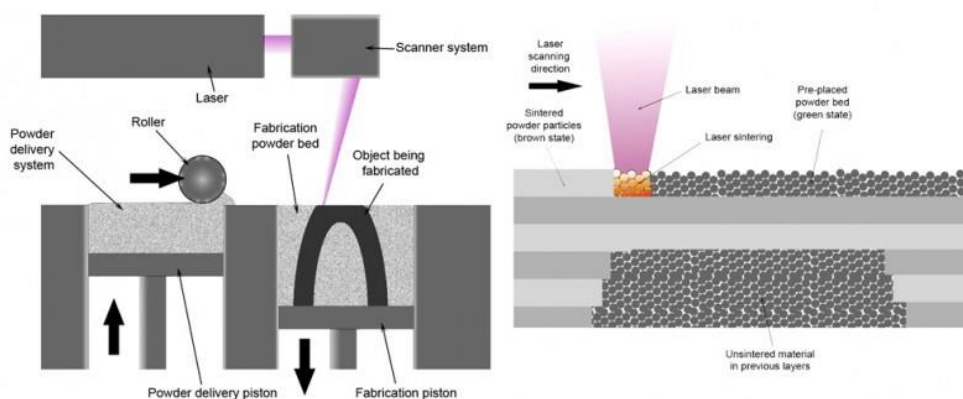
- Punti di forza: Estrema precisione (13 micron su 23 cm Asse Z; 25 micron su 15 cm sugli assi X ed Y), affidabilità e semplicità di utilizzo.
- Punti deboli: Limitata scelta dei materiali, la maggior parte sono cere, applicabile solo a modelli per stampi in silicone o per fusione (gioielleria);

1.5.2 Processazione con materiale in Polvere

- *Selective Laser Sintering (SLS)*

La tecnologia Selective Laser Sintering sfrutta la potenza di un fascio laser per sinterizzare le parti che andranno a formare uno strato di materiale composto da polvere steso su di un vassoio ad inizio processo. La figura sottostante (Fig.17) mette in mostra come avviene il procedimento: nel contenitore, posto all'interno di una camera riscaldata, viene steso tramite un rullo un sottile strato di polvere e successivamente pressato e riscaldato. In questo modo è possibile ridurre l'apporto di energia e le variazioni di volume durante la sinterizzazione per avere una migliore precisione per quel che riguarda lo spessore dello strato.

Fig.17 Processo SLS.



Durante la sinterizzazione il laser colpisce le polveri che fondono o rammolliscono legandosi tra loro formando uno strato circondato dal restante materiale rimasto in polvere che avrà la funzione di sostegno. Con l'utilizzo di questa tecnica è possibile processare molti materiali come plastiche (Policarbonato, Nylon, Acrilo-Butadiene-Stirolo), metalli (acciaio, titanio, alluminio) e ceramiche. Il prodotto finito può essere sottoposto a un trattamento termico per migliorarne le caratteristiche. Durante questo processo il prodotto "green" risultato della sinterizzazione delle particelle che si incollano tra loro viene impregnato di resine termoindurenti e trattato in forno per essere indurito "red". Nel caso dei metalli, la resina termoplastica è rivestita per permettere l'unione delle particelle di metallo, e ottenere un elemento inizialmente delicato ma che tramite il trattamento di

cottura in forno fa evaporare il “collante” e fondere il metallo riuscendo ad ottenere ottimi risultati. La finitura degli oggetti al termine delle lavorazioni è molto scarsa poiché granulosa, ma come caratteristiche meccaniche e precisione dimensionale si ottengono risultati superiori al metodo SLA.

- Resistenza: 36.5 - 77.9Mpa;
- Finitura: 0.102 mm;
- Materiale: Polimeri, Metalli, Ceramiche;

- Punti di forza: Elevate proprietà meccaniche, resistenza termica ottima per i polimeri (fino a 110° C), possibilità di realizzare prototipi carteggiabili e verniciabili.
- Punti Deboli: Elevata rugosità superficiale, richiesta di ampi spazi e alto consumo di energia per quel che riguarda la macchina.

- *Selective Heat Sintering (SHS)*

Una soluzione all’ingente consumo di energia nel metodo SLS può essere la soluzione messa a punto dalla danese *Blueprinter*. In questa tecnologia viene impiegata una testina termica, che applica ulteriore calore su strati di polvere mantenuti a temperatura elevata, così da poterli fondere con un laser di potenza inferiore e aver minor consumi rispetto alla totale fusione affidata al laser.

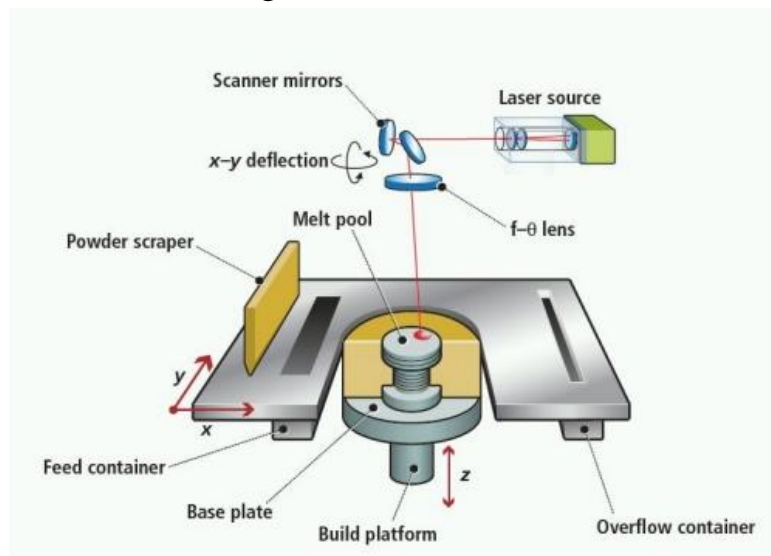
- Punti di forza: Tecnologia meno costosa rispetto alla SLS, non servono supporti o post trattamenti, impiega polimero atossico e riciclabile.
- Punti deboli: Elevata rugosità superficiale, richiesta di ampi spazi.

- *Selective Laser Melting (SLM)*

La fusione laser selettiva è un procedimento simile alla sinterizzazione laser selettiva, ma si differenzia da questa per il fatto che la polvere metallica si fonde del tutto senza l’aiuto di basso fondenti. Questo significa che, data la

fusione, l'apporto di energia da parte del laser è molto maggiore e ciò comporta un vantaggio per quel che riguarda le caratteristiche metallurgiche dell'oggetto che risulteranno pari a quelle ottenute con tecniche tradizionali. Ciò è reso possibile dalla completa saldatura delle micro particelle che risolve così i problemi di porosità e di disomogeneità della struttura interna, ma questo comporta anche un grande consumo d'energia superiore alla norma. Anche in questo caso il processo prevede uno strato di polvere metallica pressato e livellato sul piano di costruzione, colpito dalla radiazione laser che seleziona le particelle che andranno a formare una sezione della forma finale. All'interno della camera di costruzione viene utilizzato un gas inerte per evitare che il materiale si possa alterare ossidandosi durante la radiazione laser. Come per altri casi già esposti, anche in questo, la profondità (asse Z) è data dall'abbassamento di una base di sostegno al termine di ogni strato fino al completamento. Infine seguiranno le operazioni di estrazione e pulitura delle polveri dalla superficie.

Fig.18 Processo SLM.

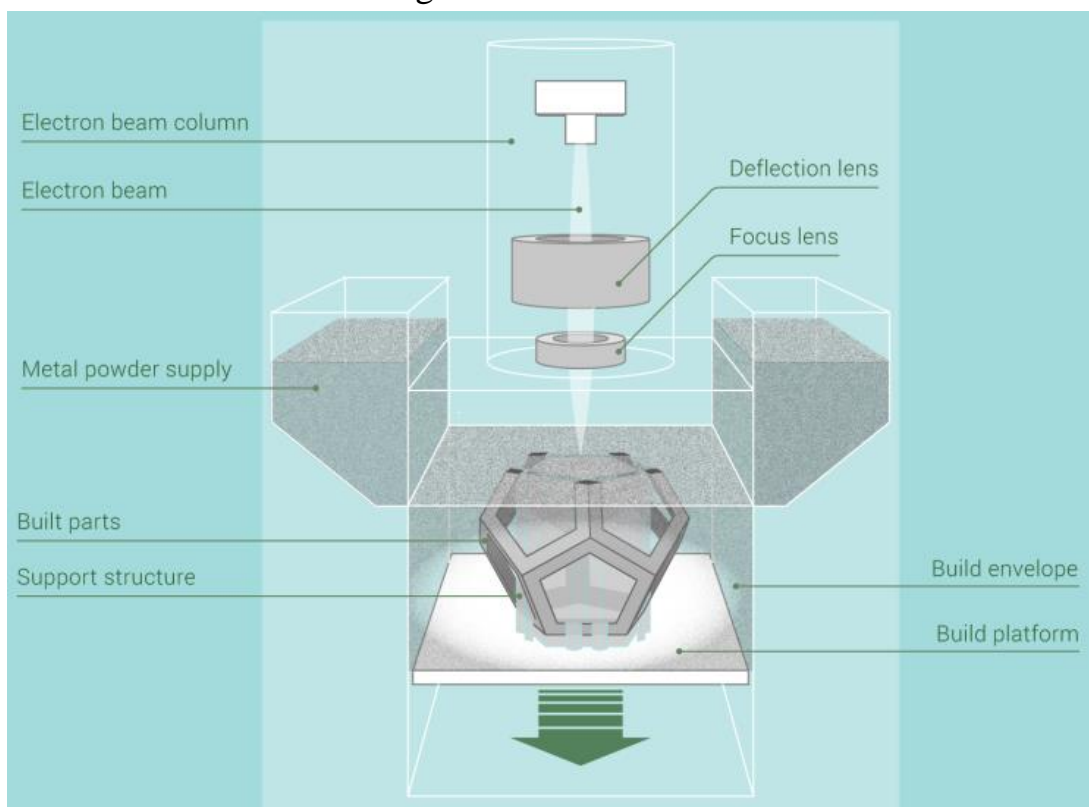


- Punti di forza: Il laser più potente rispetto a quello impiegato nella SLS permette di ottenere un prototipo del tutto simile alla produzione di serie.
- Punti Deboli: La potenza del laser richiede un impiego di energia molto maggiore, aumentando così i costi.

- *Electron beam melting (EBM)*

La tecnologia EBM (*Electron beam melting*) chiamata anche fusione a fascio di elettroni, è un processo additivo per la produzione di parti metalliche (tipicamente leghe di titanio e cromo-cobalto). Il modello, come nella SL, viene ricavato dalla sovrapposizione di vari strati che, tramite la fusione selettiva della polvere metallica (che avviene tra i 700 e 1000 °C), li unisce e forma il pezzo. La differenza rispetto i processi appena elencati, sta nel fatto che in questo caso la fusione avviene per mezzo di un fascio di elettroni e non laser, in un ambiente a vuoto spinto. I modelli creati con questo processo hanno proprietà meccaniche pressoché identiche a quelle ottenute con le tradizionali tecniche produttive. Le superfici sono esenti da ossidazioni quindi non hanno bisogno di finiture successive anche se questo implica costi molto elevati.

Fig.19 Processo EBM.



Con questa particolare tecnica possiamo ottenere delle parti densissime perché il fascio di elettroni che impatta la polvere metallica, grazie al rimbalzare degli elettroni, non colpisce la polvere in un unico punto ma in molteplici contemporaneamente, creando una struttura chiamata *Trabecular*

Titanium, che è caratterizzata da una densità (99.9%) addirittura superiore a quella di componenti realizzati con stampi ad iniezione e con qualità meccaniche altrettanto superiori.

Tale tecnologia, considerando le caratteristiche del titanio viene utilizzata soprattutto in campo aeronautico e medico.

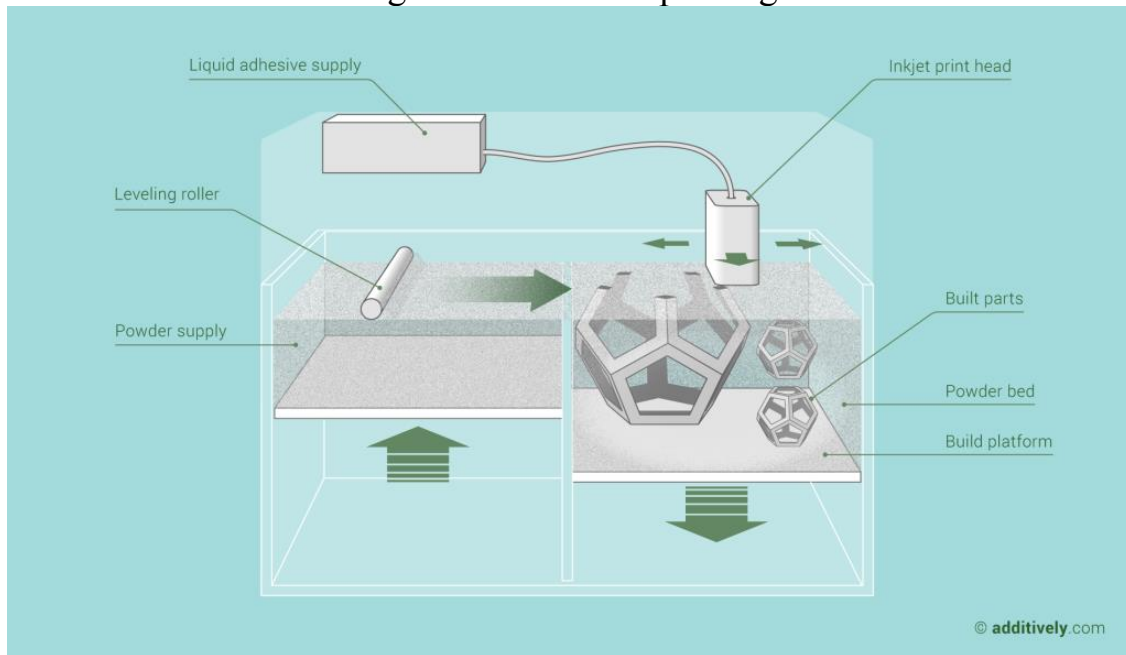
- Punti di Forza: Ottime caratteristiche del pezzo, in alcuni casi migliori rispetto al processo di stampaggio.
- Punti Deboli: Costi di processo molto elevati, limitato numero di metalli trattabili, tempi lunghi di processo.

- *3D Printing*

Questa tecnica ha una metodologia di creazione simile a quella della sinterizzazione laser, ma si caratterizza per l'uso di un collante che viene spruzzato per unire le particelle di materiale e completare lo strato. Il collante deve avere una consistenza né troppo viscosa poiché non raggiungerebbe la quantità di polvere richiesta, né troppo liquida, altrimenti si avrebbe l'effetto opposto, creando l'unione di strati anche al di sotto di quelli interessati, creando ugualmente un problema.

E' considerata una delle più veloci in assoluto nel mondo della stampa tridimensionale in quanto permette di ottenere tipicamente dai 2 ai 4 strati al minuto (e relativi modelli fisici ricreati in meno di un'ora), inoltre è il sistema più semplice ed economico per la realizzazione di prototipi. Al posto di ugelli o teste multi-spruzzo si compone di normali testine per la stampa inkjet che spruzzano un liquido a base di colla, su materiale in polvere che può essere composto da amido, gesso o polvere ceramica, procedendo strato per strato.

Fig.20 Processo 3D printing.



Terminato il processo è necessaria una fase post-trattamento sia termico che chimico per evitare che il pezzo subisca disgregazioni e per migliorarne le caratteristiche meccaniche. In particolare vengono effettuati trattamenti di infiltrazione per garantirne la compattezza.

La precisione, la finitura superficiale e la compattezza del pezzo non riescono ad arrivare a quelle dei pezzi realizzati con altri processi additivi perciò questa tecnologia non è adatta per realizzare prototipi soggetti a test funzionali a causa della debolezza intrinseca dei pezzi stessi.

- Resistenza: Bassa;
- Finitura: 0.089mm;
- Materiale: Polvere di gesso e liquido;
- Punti di forza: Alta velocità di produzione, semplice ed economico.
- Punti deboli: Scarsa finitura superficiale, fragilità del pezzo che necessita di fasi post creazione.

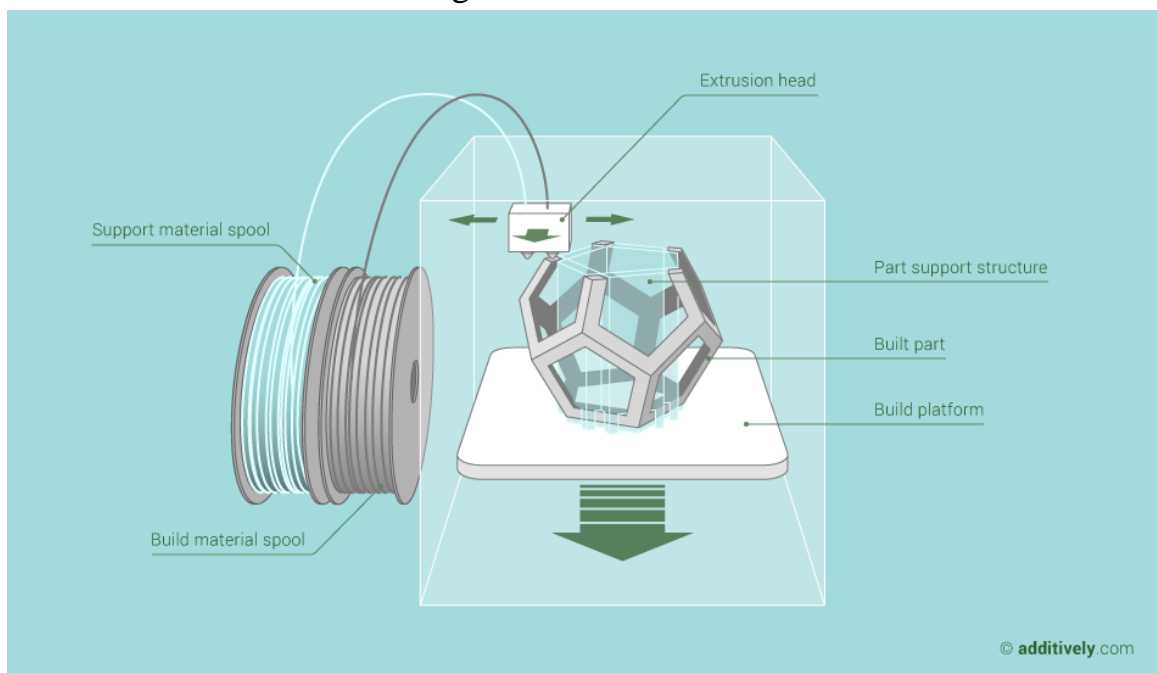
1.5.3 Processazione con materiale Solido

- *Fused Deposition Modeling (FDM)*

La tecnologia FDM è un processo che consiste nell'estrusione del materiale termoplastico allo stato semifuso (80 - 100 °C) che viene depositato strato su strato tramite un'unica testina con ugello che si muove su un piano X-Y. La testina deposita il materiale di costruzione e quello d'apporto, atto a creare sostegni, tramite due ugelli. Una volta completato uno strato la basetta (piano di sostegno) viene abbassata di un certo spessore che varia a seconda delle macchine (0.17-0.33 mm) creando così il terzo asse "Z".

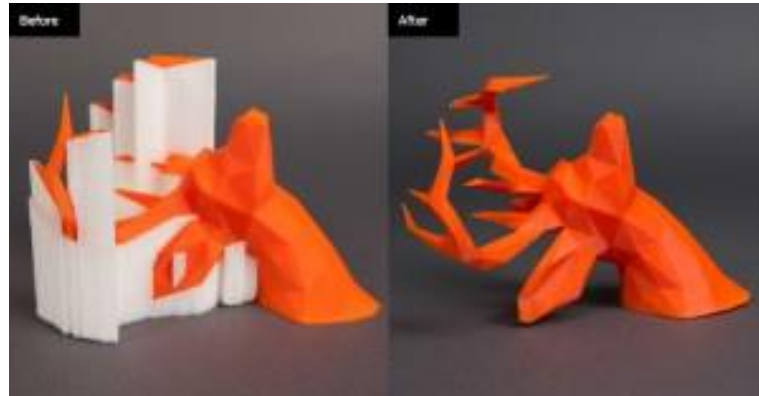
La stampante prima di iniziare la creazione del prototipo analizza il disegno tramite un software attraverso il quale viene elaborato virtualmente il prototipo con il materiale di supporto per sostenere bordi o elementi fragili della struttura per evitare possibili collassi.

Fig.21 Processo FDM



Il sostegno creato con il materiale d'apporto (FIG.22) verrà poi eliminato con bagni di solventi una volta terminato il processo di stampa per ottenere il prototipo pulito.

Fig.22 Prototipo con e senza materiale di supporto.



La scelta del materiale utilizzabile costituisce un limite del processo in quanto non può essere utilizzato a temperature troppo alte, per questo di solito si usano ABS o PC. Per ampliare il campo di applicazione di questa tecnologia si sta cercando di aumentare il numero di materiali processabili. Le caratteristiche meccaniche del prototipo sono del tutto simili a quelle ottenute dallo stampaggio ad iniezione. Le parti risultano più forti che in altri processi additivi ma a volte porose, perciò sono auspicabili delle lavorazioni per migliorarne la finitura superficiale (carteggiatura, verniciatura, metallizzazione), per aumentarne l'impermeabilità, la resistenza al calore ed alla pressione. I risultati che si ottengono dal punto di vista delle forme sono eccezionali.

- Resistenza: 35.9 - 67.6Mpa;
- Finitura: 0.127 - 0.330mm;
- Materiale: Polimeri (ABS, PLA, PC, PPSU);

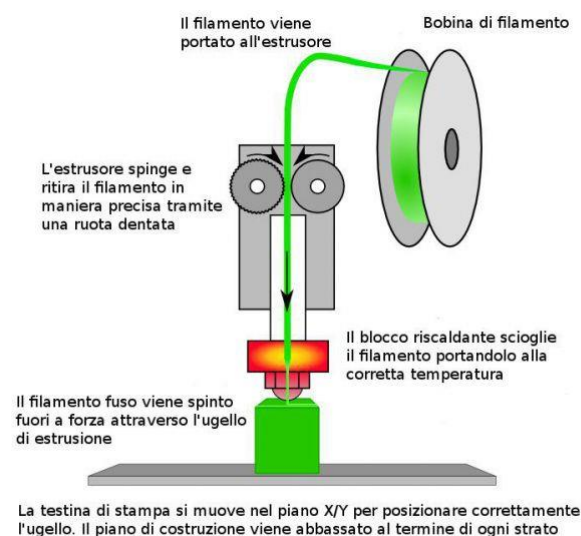
- Pregi: I prodotti possono essere molto duri quindi adatti a test funzionali. Consente di realizzare geometrie complesse. Materiali definitivi per il prototipo. Tecnologia a basso costo. Resistenza urti e alte temperature.

- Difetti: Scarsa resa quando si hanno effetti di ondulazione. Ha tempi di realizzazione maggiori rispetto alle tecniche SLA e SLS.

- Fused Filament Fabrication (FFF)

Questa tecnologia si differenzia dalla FDM per il fatto che l'ugello è unico, quindi il materiale adibito sia alla creazione del prototipo che quello di supporto è lo stesso, per questo motivo la rimozione risulta più complicata e avviene per questo motivo manualmente. Le caratteristiche ottenute sono pressochè simili alla FDM. La differente sigla è data soprattutto per questioni di brevetti, infatti l'azienda *Stratasys* ha commercializzato e depositato il brevetto di questa tecnologia con la sigla FDM.

Fig.23 Processo FFF



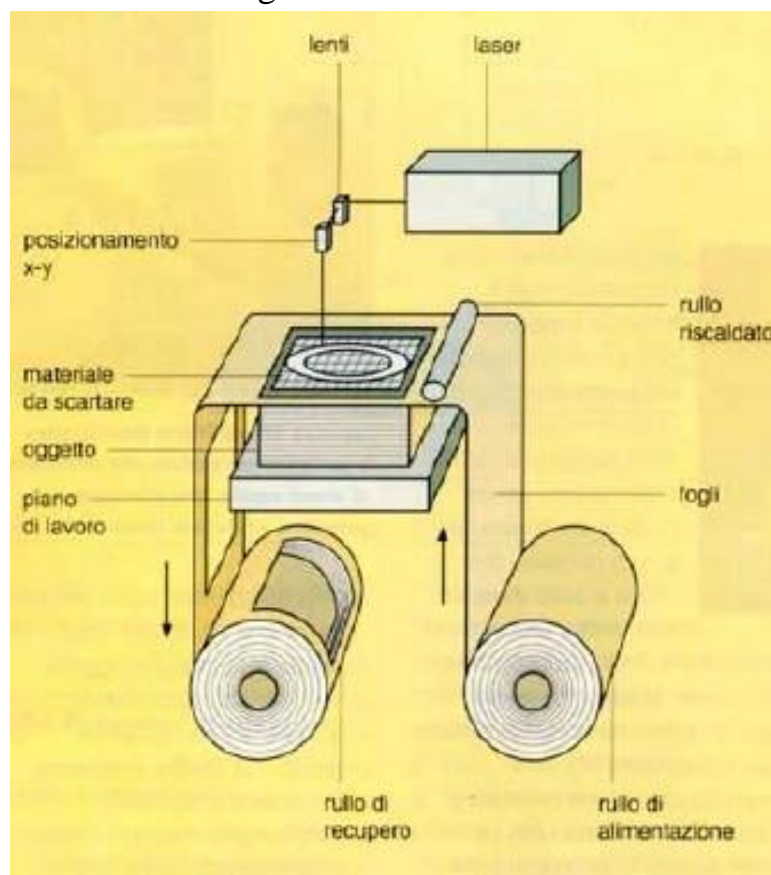
Per questo quando troviamo riferimenti per una o per l'altra tecnologia, possiamo considerarle come una unica per quel che riguarda il procedimento. Durante il processo produttivo l'estrusione può utilizzare materiali a freddo sotto forma di paste plastiche al posto dei comuni filamenti. Alcuni di questi sono materiali eutettici (materiali eterogenei con punto di fusione inferiore a quello dei singoli componenti della miscela), edibili (cioccolato, creme, e paste), materiali a solidificazione ritardata (silicone collanti chimici e resine) e materiali compositi (poliammide).

- Punti di Forza: Bassi costi di acquisto macchinari e materie.
- Punti deboli: Difficile pulitura post-processo.

- *Laminated Object Manufacturing (LOM)*

Il concetto su cui si basa questa tecnologia è molto semplice: il materiale del modello è composto da fogli di grandi dimensioni di metallo, plastica, carta o altri materiali che vengono rivestiti di resine termo plastiche prima dell'uso. Ogni foglio posto da un sistema di alimentazione sopra il precedente viene incollato a questo tramite un rullo caldo che fa ammorbidire la resina di cui è rivestito. Una volta incollato, il foglio viene tagliato tramite un laser che ne delinea la forma e terminato uno strato la base si abbassa ed un nuovo foglio viene steso fino al completamento dell'oggetto.

Fig.24 Processo LOM.



Per questa tecnologia il processo di sgrezzatura del pezzo è impegnativo poiché l'estrazione del materiale in eccesso è complicata, per ciò si usano i comuni attrezzi impiegati per la lavorazione del legno. Il prodotto finale ha l'aspetto simile al compensato, per questo viene impermeabilizzato e carteggiato. Le caratteristiche di questa tecnica permettono precisioni

abbastanza buone (± 0.1 mm dato che i fogli non subiscono mutamenti di stato, per dimensioni sui 100 mm). E' adatto a creare solidi di grandi dimensioni come pannelli o parti di carrozzerie.

- Punti di forza: Buona finitura superficiale, nessuna deformazione dovuta alle tensioni interne perché non avviene fusione, processo molto veloce.
- Punti deboli: Necessità di parecchie operazioni di sgrezzatura a fine processo.

Capitolo 2

Materiali processati

Per quanto riguarda il campo dei materiali processati la tecnologia additiva riesce, tramite le sue molteplici tecnologie, a ricoprire la gamma di materiali che solitamente vengono utilizzati nelle consolidate tecniche produttive, arrivando in alcuni casi a proporre di nuovi. La novità rispetto alle classiche tecnologie, oltre che per il procedimento “Additivo” rispetto al solito “Sottrattivo” e “Formativo”, sta nel fatto che il materiale di produzione viene processato in diversi stati (solido in polvere o lastre, liquido) con risultati talvolta migliori di quelli ottenuti precedentemente.

I materiali processati sono:

- Metalli
- Materie Plastiche
- Fotopolimeri
- Cere
- Ceramiche

2.1 Metalli

Il campo dei metalli, vede nella maggior parte dei casi, l'utilizzo degli stessi che vengono processati nelle tradizionali tecniche produttive, talvolta però questa tecnologia da la possibilità di utilizzare metalli diversi da quelli usuali. Anche se i materiali sono gli stessi, con queste nuove tecniche si possono ottenere comunque buoni risultati e talvolta migliori, come nel caso di studio della *RENISHAW*, che ha creato in un'unica stampa, un telaio funzionale per *mountain bike* riuscendo ad alleggerirlo del 33% rispetto ai 2.1kg iniziali utilizzando lo stesso titanio con cui veniva già prodotto.

Fig.25 Telaio di una bici creato tramite tecnica additiva.



Altro campo di applicazione della tecnologia additiva per *Renishaw* è stato quello della *FORMULA STUDENT*. La *Formula Student* è una competizione automobilistica internazionale tra studenti universitari organizzata per la prima volta nel 1981 dalla SAE (*Society of Automotive Engineers*) in America che dal 1988 si svolge anche in Europa. Con l'utilizzo della tecnologia additiva *Renishaw* è riuscita a sviluppare un progetto di un componente per una vettura partecipante a questo evento senza il vincolo delle geometrie (Fig.26), che spesso rende i processi molto costosi.

Fig.26 Mozzo ruota creato con tecnica additiva.



In particolare tramite la tecnologia AM 250, *Renishaw* è riuscita a produrre mozzi ruote per la competizione, riducendo il peso della vettura di 1.5 kg che è risultata così la più leggera della competizione. Questo è un esempio di come, anche con l'utilizzo degli stessi materiali utilizzati per la "classica" produzione, con questa tecnologia si possano ottenere dei vantaggi tangibili. La possibilità di utilizzare metalli che con le tradizionali tecniche non avremmo potuto lavorare o processarli in maniera differente alle solite può portare, come in questo caso alla riduzione del peso, ma anche a quella dei costi. Se prima il costo di produzione era dato anche dalla complessità dell'elaborazione ora questo concetto sparisce e l'unico costo che avremo sarà quello del materiale utilizzato.

2.2 Plastica

Il mondo plastica è un campo su cui si concentrano molti studi e ricerche in fatto di sviluppo, questo perché tale materiale non esiste in natura, ma viene creato tramite l'unione di molte molecole e per questo il nome di polimero. La trasformazione della materia prima avviene attraverso la polimerizzazione che permette di trasformare le materie prime in materie plastiche, create sotto forma di granuli, pastiglie, polveri o liquidi.

Le plastiche sono state create nei primi anni del 900 ed oggi grazie anche alla tecnologia additiva hanno avuto un ulteriore sviluppo. Tutt'ora vengono creati nuovi polimeri aventi caratteristiche di volta in volta migliori che non hanno niente da invidiare rispetto ai materiali dei quali provano a riprodurre le caratteristiche.

Inizialmente create tramite la manipolazione di catene di molecole (strutture macromolecolari) di resine di origine vegetale, come la cellulosa (dal cotone), i derivati dell'amido (vegetale), oli (dai semi di alcune piante), il carbone e tra i materiali non vegetali la caseina ricavata dal latte. Ad oggi la produzione è derivata dalla lavorazione di prodotti petrolchimici che risultano facilmente manipolabili e a basso costo.

I vantaggi che possiamo ottenere dall'uso di materie plastiche rispetto ad altri materiali, sono innanzitutto la grande facilità con cui le possiamo lavorare, il loro basso costo, l'isolamento acustico, termico, elettrico, meccanico (vibrazioni), la resistenza agli agenti chimici, l'idrorepellenza ed anche la resistenza per quel che riguarda muffe, funghi e batteri.

Sono 3 le principali tipologie di plastiche che possiamo trovare in commercio Termoplastici, Termoindurenti ed Elastomeri.

➤ Termoplastici

Le termoplastiche hanno la caratteristica di rammollire sotto l'azione del calore, acquistando malleabilità. Per questo possono essere modellate sino ad ottenere oggetti finiti, dopo di che vengono raffreddate ritornando ad essere rigide. Teoricamente questo tipo di plastica può anche essere rimodellato più volte. I materiali termoplastici sono quelli più utilizzati nel campo delle plastiche da parte delle tecnologie additive per via della loro facile

lavorazione e per le caratteristiche che offrono. I materiali più comunemente usati di questa categoria sono:

- Il Polietilene Tereftalato (PET), dotato di grande resistenza al calore (fino a 250 C°).
- Il Polipropilene (PP), anch'esso molto resistente al calore ma soprattutto agli agenti chimici.
- Il Poliammide (PA o nylon) molto usato poiché non infiammabile può essere miscelato con altri materiali quali vetro (aumenta la resistenza termica) carbonio, alluminio (parti simili al metallo, resistenti ad alte temperature e alle macchine utensili), Acido Polilattico (PLA) derivato dal mais attraverso un processo biotecnologico, viene utilizzato per la sua natura biodegradabile.
- L' ABS (Acrilonitrile-Butadiene-Stirene) è un copolimero di largo uso nella tecnologia additiva, ha caratteristiche ottime per la creazione di oggetti funzionali in quanto presenta elevata resistenza agli urti alle fratture ed elevata resistenza termica.

➤ Termoindurenti

Sono materie plastiche o resine che dopo una fase di rammollimento dovuto al riscaldamento, induriscono per un effetto chiamato reticolazione tridimensionale. Dopo l'indurimento i prodotti realizzati con questo materiale hanno una resistenza pari a quell'acciaio, ma non possono essere riscaldati nuovamente poiché si decompongono carbonizzandosi. Per questo non vengono utilizzati nel campo della Direct Manufacturing ad eccezione del Policarbonato che è utilizzato per la sua leggerezza ed infrangibilità, unita ad un periodo di utilizzazione praticamente illimitato.

Le resine Fenoliche come la bachelite, generalmente sono utilizzate come collanti o impregnanti per rivestire i componenti a termine della creazione, hanno lo scopo di rivestire indurire e proteggere le superfici che ricoprono.

Anche le resine Epossidiche sono molto resistenti ad agenti chimici ed ai solventi, garantiscono ottime caratteristiche meccaniche ed elettriche per questo sono utilizzate per incollare e proteggere da agenti corrosivi.

Nella produzione additiva le resine termoindurenti vengono impiegate ma non garantiscono una elevata resistenza al calore. Per questo subiscono trattamenti specifici al fine di ottenere risultati migliori, aumentandone anche

i costi, inoltre alcune di queste resine sono potenzialmente tossiche e quindi difficili da trattare. Fanno parte di questa categoria anche le resine fotosensibili che non sono caratterizzate da una lunga vita poiché la luce del sole le degrada modificandone anche le caratteristiche meccaniche (e quindi la durata). Per ovviare a questo problema e poter essere utilizzate, devono anch'esse subire dei trattamenti che finiscono per aumentarne il prezzo.

➤ Elastomeri

Possono essere di natura sintetica o naturale e la loro caratteristica principale è quella di potersi allungare sotto sforzo da 1 a 10 volte rispetto alle dimensioni iniziali. Questo avviene perché le macromolecole di cui sono composti a riposo tendono ad aggrovigliarsi e quindi, una volta messe sotto sforzo, si allungano distendendosi. Non vengono utilizzati per la produzione diretta ma nella produzione additiva svolgono il ruolo di additivi solitamente dei termoplastici.

2.3 Cera

Materiale comunemente utilizzato nelle tecniche di produzione tradizionali la cera trova utilizzo anche nella produzione additiva con la stessa funzionalità, cioè quella di produrre non il prodotto finito o funzionale, ma attrezzi “*tool*” per la produzione del pezzo finito, come nel processo *MultiJet Modeling*, dove viene utilizzata per creare master da utilizzare in produzioni per fusioni a cera persa. Grazie a questo materiale possiamo ottenere ottimi risultati per quel che riguarda le finiture superficiali, ottenute dalla particolare consistenza della cera che tende ad inglobare particelle di materiale limitando eventuali imperfezioni superficiali. Queste caratteristiche sono fondamentali per creare forme nelle quali verrà colato metallo fuso con il quale verrà realizzato l’oggetto finale.

2.4 Ceramica

La ceramica viene utilizzata per la produzione di prodotti finiti, ma data la sua estrema rigidità trova utilizzo nella produzione additiva in particolari e limitate applicazioni. Con questo materiale otteniamo ottime finiture superficiali, alta definizione di particolari e ottimo grado di densità. Viene utilizzato nelle tecnologie laser poiché necessita di un apporto di calore importante per fondere le micro particelle di polvere del materiale adibito alla creazione del prodotto finale. Trova impiego in ambito aerospaziale, produzione di motori e componenti annessi, ma soprattutto nel campo medico e nel raffreddamento conforme in inserti per utensili.

Capitolo 3

Caso di Studio

3.1 BMC *Air Filters*

Il caso di studio che si andrà ad illustrare è stato proposto dalla BMC *Air Filters*, azienda del settore automotive con sede a Medicina, un piccolo paese in provincia di Bologna. La BMC *Air Filters* non opera solo sul territorio italiano ma ha anche filiali in Germania, Giappone e Stati Uniti.

Nasce nel 1973 come importatrice di kit d'aspirazione della azienda specializzata giapponese *Yoshimura*. Fino al '91 ricopre il ruolo di importatore e distributore di componenti per moto, dopodichè inizia a distribuire materiale tecnico anche per il settore di automotive, nel quale inizia una collaborazione con Ferrari per la quale sviluppa uno speciale elemento filtrante. Grazie a questo successo BMC diventa fornitrice di diversi team di Formula 1, WTCC, *American Le Mans*, DTM, *Superbike* e MotoGP.

Ad oggi l'azienda continua l'evoluzione e lo sviluppo nel settore *automotive* dove ricopre un ruolo fondamentale nell'industria dei motori ad alte prestazioni, sia nel reparto corse che in quello di serie. In questa maniera si concretizza l'obiettivo aziendale che è quello di portare la tecnologia e l'esperienza maturata nel settore corse nei veicoli di tutti i giorni per ottenere il massimo delle prestazioni.

3.2 Requisiti e Caratteristiche

La propensione all'innovazione che caratterizza l'azienda e la costante richiesta da parte del mercato di novità, l'ha spinta a collaborare con la sede di ingegneria di Forlì al fine di valutare l'applicazione di nuove tecnologie all'interno dei suoi processi produttivi.

In particolare BMC ci ha chiesto di valutare se ci fosse la possibilità di riprodurre gli *airbox* illustrati nella figura sottostante tramite tecnologia additiva e di fornire un quadro delle possibili tecniche alternative.

Fig.27 Versione universale (a sinistra) e customizzata del filtro.



Tale richiesta è finalizzata alla valutazione dei risultati e delle prestazioni ottenibili in vista di una possibile introduzione della tecnica all'interno del proprio processo produttivo.

L'interesse riguardo l'utilizzo di questa nuova tecnologia nasce dalla possibilità di poter sviluppare nuovi prodotti in meno tempo ottenendo risparmi nel processo di produzione ed un vantaggio competitivo nei confronti dei concorrenti. Lo studio si è incentrato sull'analisi di due *airbox* mostrati nella figura sopra: il primo è la versione universale prodotta da BMC, il secondo è un particolare derivato del primo (versione customizzata).

L'*airbox* nella versione universale ha una produzione consolidata di circa 500 pezzi all'anno ed è formato da un involucro con ai lati due "orecchie" utilizzate per il suo fissaggio. Posto all'interno dell'involucro, vi è un cono di materiale filtrante unito ad un deviatore di flusso per l'aria entrante (spina) ed un coperchio che ha il compito di tenere spina e cono in posizione (Si veda la figura 28).

Fig.28 Vista dell'ingresso dell'aria nel filtro.



I pezzi che compongono l'*airbox*, ad eccezione del cono filtrante, vengono creati tramite due modalità di stampaggio distinte.

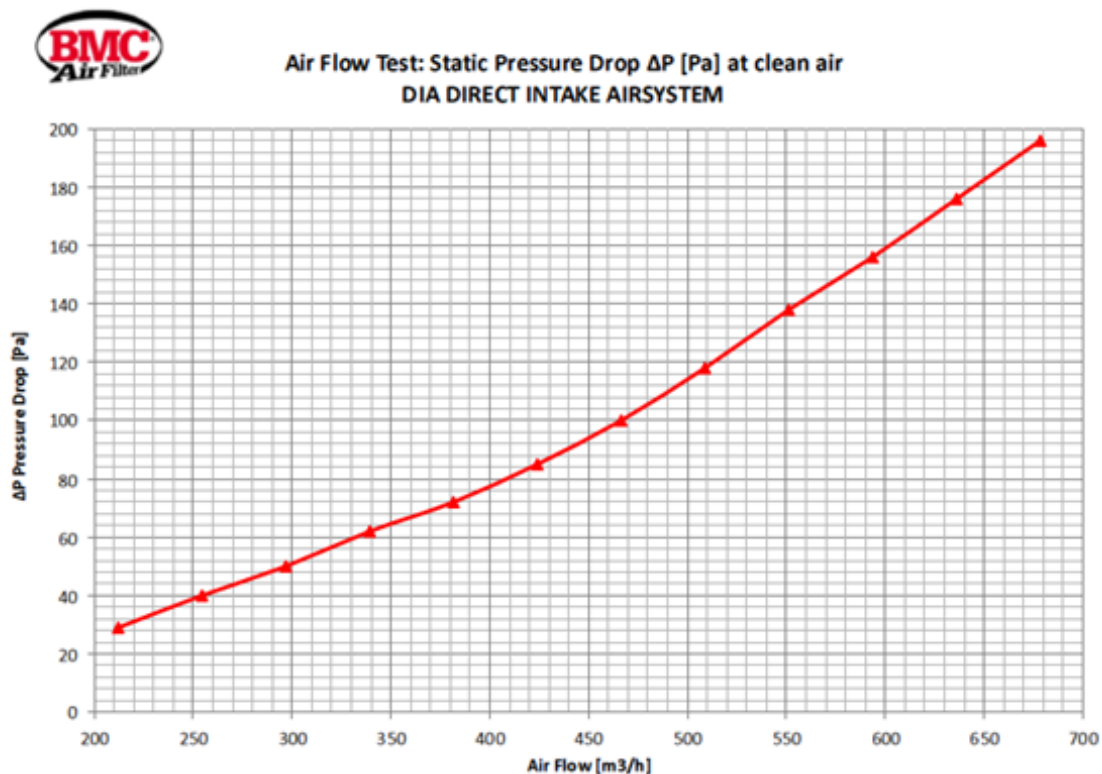
L'involucro esterno viene creato con la tecnica dello stampaggio per soffiaggio, mentre la spina e il coperchio vengono realizzati con la tecnica dello stampaggio a iniezione.

L'involucro non ha grandi dimensioni (15 cm di diametro base, 8 cm all'imbocco e 25 cm circa in altezza), pesa 222 grammi (quello costruito con tecnica FDM 238gr) ed ha pareti sottili che misurano 2 mm circa. Lo spessore delle pareti può variare poiché la tecnica dello stampaggio per soffiaggio non garantisce uno spessore standard, ma ha una tolleranza che varia tra gli 0.1 e 0.3 mm.

Nel caso di studio lo spessore non ha un'influenza determinante sul risultato finale, mentre una caratteristica sulla quale ci è stato richiesto di porre attenzione riguarda le pareti interne che devono essere il più liscio possibile per evitare perdite da attrito e permettere all'aria di fluire all'interno del filtro.

Come è possibile vedere dalla tabella sottostante, l'azienda concentra già il suo interesse sull'andamento dell'aria all'interno dell'*airbox*, compiendo test di flussaggio ed analizzando l'andamento della pressione al suo interno per valutare la quantità d'aria filtrata. In particolare, nella figura 29 possiamo vedere sull'asse delle ordinate la perdita di pressione (Pressure Drop) in funzione del flusso d'aria (Air Flow) indicato sull'asse ascisse.

Fig.29 Tabella relativa a test di flussaggio.



Nella versione customizzata riportata sotto (Fig.30), l'*airbox* ha il tratto di imbocco più lungo sulla cui parete è presente un foro con applicata una placca di alluminio per applicare una sonda per debimetro che ne valuta l'andamento dell'aria all'interno. Questo *airbox*, non essendo possibile altra sistemazione, viene montato direttamente al collettore e ciò permette anche di avere un'aspirazione diretta.

Il volume annuo di produzione è di circa 20 pezzi, poiché viene costruito su misura per particolari modelli di automobili nelle quali la versione standard non può essere montata.

Fig.30 Filtro customizzato montato direttamente sul collettore di un'auto.



Il materiale utilizzato dall'azienda per la produzione dell'involucro è il Polietilene ottenuto tramite la polimerizzazione dell'etilene, con nome commerciale di RIGIDEX HD 5502S. Questo materiale è un polimero termoplastico ad alta densità (come indica la sigla HD) della famiglia delle poliolefine. E' dotato di caratteristiche quali la facile processabilità, una buona rigidità ed una buona resistenza ai test di rottura e agli urti. Solitamente viene utilizzato per la produzione di contenitori o forme tubolari (di capacità massima pari a 30 litri) per il confezionamento di prodotti chimici, farmaceutici e per la casa.

Riportiamo qui la tabella del materiale fornita dall'azienda.

Fig.31 Scheda tecnica materiale utilizzato dall'azienda.

Rigidex® HD5502S				
Applications				
Properties	Conditions	Test Methods	Values	Units
Physical				
Density		ISO 1183-1 & 1872-1	954	kg/m ³
Melt Flow Rate	190°C/2.16Kg	ISO 1133-1	0.2	g/10min
Mechanical				
Flexural Modulus	23°C, 100 mm/min	ISO 178	1050	MPa
Tensile Strength at Yield	23°C, Type 2 Speed D	ISO 527-1,-2	26	MPa
Elongation at break	23°C, Type 2 Speed D	ISO 527-1,-2	>300	%
Charpy Impact Strength		ISO 179	12	kJ/m ²
BTT stress crack resistance	F50 at 50°C, 100% concentration	ASTM D 1693	50	hours
Bottle stress crack resistance		Ineos Method	6	hours

Data should not be used for specification work

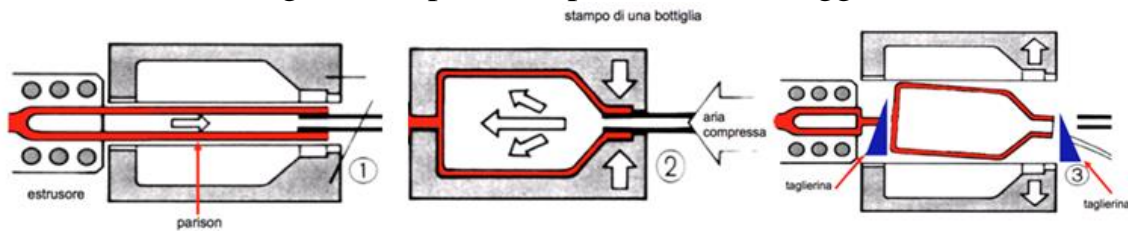
Published by
INEOS Olefins & Polymers Europe

3.3 Attuali tecniche di produzione

- 3.3.1 Stampaggio per soffiaggio

Il processo produttivo con cui l'azienda attualmente produce l'involucro dell'*airbox* è basato sulla tecnica di stampaggio per soffiaggio (*blow moulding*). Nella sequenza sottostante possiamo vedere schematizzate le fasi del processo produttivo di una bottiglia utilizzando questa tecnica.

Fig.32 Fasi processo produttivo soffiaggio.



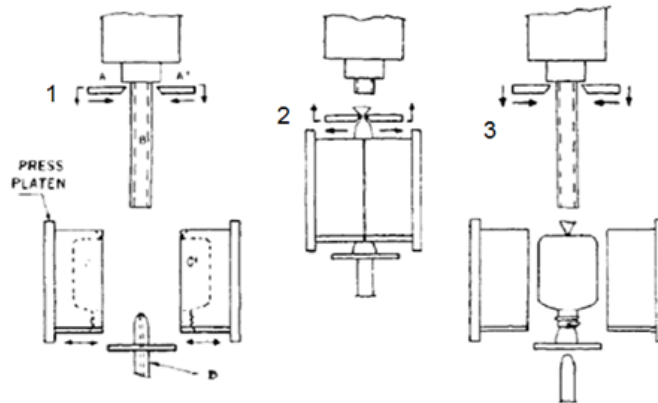
Il processo inizia con l'inserimento del *parison*, materiale fuso avente una particolare forma cilindrica simmetrica, in uno stampo dove poi verrà soffiato. Durante la soffiatura il *parison* tende a gonfiarsi avvicinandosi alle pareti dello stampo con l'aumento di pressione al suo interno. Una volta che tutto il materiale è a contatto con le pareti, non riscaldate, il flusso d'aria si arresta e la forma viene lasciata raffreddare. Il processo si conclude aprendo lo stampo per far uscire l'oggetto già solidificato.

Il processo di formatura del *parison* può avvenire in due modi a seconda delle dimensioni che il manufatto dovrà avere: ad estrusione continua o con accumulo.

Il processo di produzione con estrusione continua (Figura 33) è caratterizzato dalla presenza di una vite che, girando su se stessa, assicura il flusso di materiale in modo continuo nello stampo con velocità pari a quella di formazione del pezzo. Generalmente viene utilizzato per la produzione di manufatti di piccole e medie dimensioni.

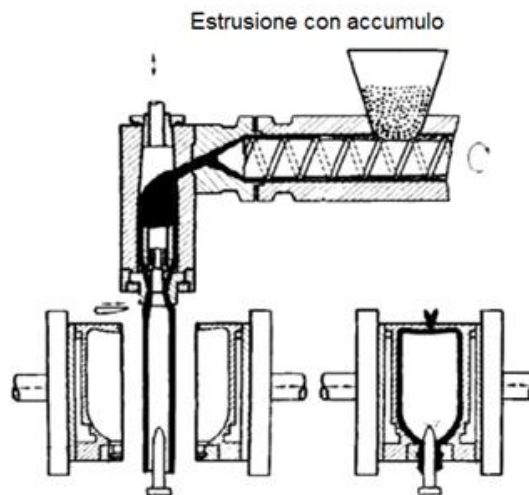
Fig.33 Fasi del processo di soffiaggio ad estrusione continua.

Schema del processo di soffiaggio con estrusione continua:
(A:Taglio del Parison; B: Parison; C: Cavità di stampo; D:Ugello di soffiaggio)



La produzione con estrusione e accumulo (Figura 34) unisce i principi del soffiaggio con quelli dell'iniezione per riuscire a formare il *parison* in maniera più rapida. In questo caso la vite adibita al flusso del materiale, oltre a girare su se stessa, può anche muoversi longitudinalmente verso il fondo dell'estrusore ogni qual volta la quantità di materiale prestabilita è stata raggiunta. In questo modo può comportarsi come un pistone che spinge il materiale che andrà a formare il *parison* all'interno dello stampo dove verrà processato.

Fig.34 Processo di soffiaggio tramite estrusione con accumulo.



L'estrusione con accumulo, consente di formare il *parison* più velocemente per questo la tecnica è utilizzata per oggetti di dimensioni più grandi, per i quali non è conveniente l'estrusione continua. Utilizzando l'estrusione continua, infatti, il *parison* potrebbe collassare per via del suo stesso peso provocando disomogeneità nello spessore.

Il processo di soffiaggio viene utilizzato principalmente per la produzione di manufatti cavi come bottiglie, flaconi e serbatoi. Con questa tecnica si

possono ottenere forme complesse con buona accuratezza delle superfici e spessori caratterizzati da piccole variazioni di *range* (0.1- 0.3 mm).

Una caratteristica fondamentale del processo di soffiaggio è quella riguardante le tensioni interne che risultano molto più basse rispetto a quello del metodo ad iniezione. Ciò avviene grazie alla bassa pressione (0.2-1 Mpa) con cui il *parison* viene soffiato rispetto al metodo ad iniezione nel quale, l'alta pressione con cui viene spinto il polimero fuso all'interno dello stampo, provoca l'orientazione che determina una distribuzione disomogenea delle tensioni interne. Le basse pressioni favoriscono un aumento della resistenza alle sollecitazioni dovute alla tensione, alla flessione ed agli urti.

- 3.3.2 Stampaggio a Iniezione

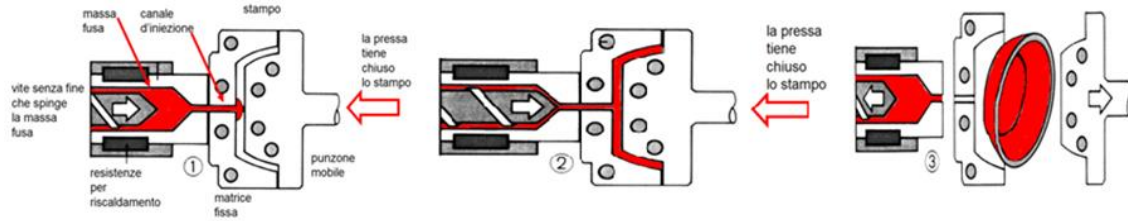
A completamento dell'*airbox* vi sono altri due particolari: una spina (di colore rosso) posta all'interno del materiale filtrante, che servirà a deviare il flusso d'aria in tutto il cono e un coperchio che andrà a mantenere le componenti all'interno dell'involucro.

Fig.35 Viste di ingresso (a sinistra) e uscita dell'aria.



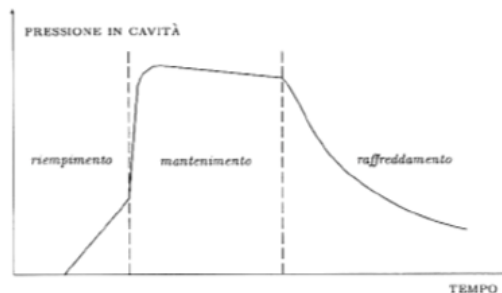
A differenza di quanto avviene per l'involucro esterno, questi due oggetti sono prodotti con la tecnica dello stampaggio ad iniezione. Tale tecnica è molto diffusa nella produzione di manufatti in polimero termoplastico poiché da la possibilità di creare in maniera rapida oggetti di qualsiasi dimensione (dai pochi millimetri ad alcuni metri).

Fig.36 Processo di stampaggio ad iniezione.



In questo caso il processo produttivo inizia quando il materiale in granuli viene fatto entrare in un cilindro riscaldato e qui portato a fusione. Dentro al tubo cilindrico vi è posta una vite punzonante che, girando su stessa convoglia il polimero fuso in prossimità del canale di iniezione, all'interno del quale viene spinto una volta raggiunta la quantità necessaria. A questo punto il materiale fuso raggiunge un ugello che lo inietta all'interno di uno stampo mantenuto ad alta temperatura (40 e 60 °C). Durante l'iniezione la pressione nello stampo aumenta sino a circa 180 Mpa, livello al quale viene mantenuta per permettere ad altro materiale di entrare in modo da compensare il ritiro plastico causato dal raffreddamento.

Fig.37 Schema dell'andamento della pressione nelle cavità durante l'iniezione.



Come mostrato in figura 37, terminata la fase di mantenimento, la pressione si abbassa mentre il pezzo solidifica. Una volta completata la solidificazione lo stampo viene aperto e tramite degli estrattori automatici viene fatto uscire il manufatto, potendo poi ricominciare un nuovo processo. I pezzi ottenuti con questo processo di produzione possono richiedere operazioni accessorie come l'asportazione di materiale dagli attacchi dell'iniezione (materozze) o la sbavatura.

3.4 Obiettivi e aspettative

L'obiettivo di questa analisi è quello di capire quali sviluppi possa avere l'introduzione della tecnica additiva all'interno del processo produttivo, in modo da valutare la possibilità di affiancamento o di sostituzione della attuale metodologia di produzione.

Punto di partenza di queste valutazioni è quindi la definizione dei campi di applicazione e la valutazione delle tempistiche di produzione, dei costi associati e della capacità produttiva. Come già anticipato la produzione annua dell'*airbox* in versione standard si attesta sui 500 pezzi, mentre la produzione della versione *customizzata* è di circa 20 unità all'anno.

Con l'utilizzo della nuova tecnologia sarà possibile valutare se sostituire alcuni service esterni con cui l'azienda collabora e da cui si rifornisce di componenti che dovranno poi essere assemblati per ottenere il prodotto finito. L'analisi si deve quindi concentrare sull'evoluzione che potrebbe avere il processo produttivo attuale e quali possano essere i vantaggi derivati dall'applicazione della nuova tecnica.

Come si può intuire, per massimizzare i risultati ottenibili dall'introduzione, sarà necessario cambiare le metodologie di produzione, riprogettando e riorganizzando l'intero processo che porta alla creazione del pezzo finito.

Da questa analisi si aspettano risposte in merito alla capacità della tecnologia additiva di fornire un guadagno in termini di tempo senza incidere sulle prestazioni del prodotto e comportando un calo dei costi di produzione.

Capitolo 4

Valutazione e Scelta Tecnica

4.1 Valutazione delle tecniche

Per capire quale tecnologia possa offrire risultati validi in base alle necessità richieste dal caso di studio, si può iniziare l'analisi andando a considerare il materiale utilizzato in azienda. Come già anticipato nel capitolo 4, il materiale utilizzato è il Rigidex HD5502S un polietilene ad alta densità, del quale si riportano le principali caratteristiche nella tabella sottostante.









Fig.38 Scheda tecnica Rigidex

Rigidex® HD5502S				
Applications				
Properties	Conditions	Test Methods	Values	Units
Physical				
Density		ISO 1183-1 & 1872-1	954	kg/m ³
Melt Flow Rate	190°C/2.16Kg	ISO 1133-1	0.2	g/10min
Mechanical				
Flexural Modulus	23°C, 100 mm/min	ISO 178	1050	MPa
Tensile Strength at Yield	23°C, Type 2 Speed D	ISO 527-1,-2	26	MPa
Elongation at break	23°C, Type 2 Speed D	ISO 527-1,-2	>300	%
Charpy Impact Strength		ISO 179	12	kJ/m ²
BTT stress crack resistance	F50 at 50°C, 100% concentration	ASTM D 1693	50	hours
Bottle stress crack resistance		Ineos Method	6	hours
Data should not be used for specification work				
Published by				
INEOS Olefins & Polymers Europe				

Per quel che riguarda la possibile produzione del filtro tramite tecnica additiva, si devono considerare le tecnologie che possono permettere di processare il materiale plastico. Data la necessità di una produzione che dovrà garantire buoni standard riguardo alla resistenza ad alte temperature e buoni valori di carico, le tecniche additive che verranno prese in considerazione sono: la FDM (*Fused Deposition Modeling*) e la SLS (*Selective Laser Sintering*). Come già illustrato nei paragrafi precedenti, la maggior parte delle tecnologie può processare i polimeri plastici, ma le due

tecniche appena menzionate sono quelle che, a differenza delle altre, permettono di creare parti funzionali garantendo una lunga durata dei prodotti (vedi tabella Fig.39).

Fig.39 Tabella teniche-materiali processabili

Materials	Technologies		
	Parts built through polymerization	Parts built through bonding agent	Parts built through melting
Ceramic		 BJ	 LM
Metal			 EBM
Sand			
Plastic	 SL  PJ		 FDM  LS
Wax			 MJ*

Lower	Durability	Higher
Smoother	Surface finish	Rougher
Higher	Detail	Lower
Prototypes Indirect processes	Application	Functional parts

* MJ achieves smooth surface finish and high detail

© additively.com

Tra le principali aziende produttrici di stampanti a deposizione di filamento fuso (FDM) è stata presa come riferimento la *Stratasys*, una delle prime grandi aziende a nascere ed investire in questa tecnologia e che mantiene tuttora un ruolo importante all'interno del settore.

Per quel che riguarda la tecnica di sinterizzazione laser SLS, è stata considerata la *3DSystems*, azienda leader nel proprio settore che ha incentrato la propria ricerca sulla tecnologia laser, diventando punto di riferimento per quel che riguarda la tecnica di sinterizzazione.

4.2 Valutazione dei materiali

- 4.2.1 I materiali processati nella tecnica FDM

Tra i materiali creati appositamente da *Stratasys* per essere utilizzati con la tecnica FDM, l'*ABSplus-P430* rappresenta un primo esempio di materiale valido per la creazione di prototipi funzionali. Con questo materiale i prodotti ottenuti risultano robusti e stabili nel tempo ed è possibile avere buone finiture superficiali. Riportiamo la tabella riguardante le proprietà del materiale reperibile sul sito dell'azienda.

Fig.40 Scheda tecnica del materiale *ABSplus*.

ABSplus™ -P430			
Mechanical Properties	Test Method	English	Metric
		XZ Axis	XZ Axis
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,700 psi	33 MPa
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,500 psi	8 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi	2,200 MPa
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%	2%
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in	106 J/m

Mechanical Properties	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,450 psi	5,050 psi	58 MPa	35 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	240,000 psi	2,100 MPa	1,650 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	4%	2%	2%

Thermal Properties ²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	180°F	82°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C
Melt Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	4.90E-05 in/in/°F	8.82E-05 mm/mm/°C

Electrical Properties ⁴	Test Method	Value Range
Volume Resistivity	ASTM D257	2.6E15 - 5.0E16 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.3 - 2.85
Dissipation Factor	ASTM D150-98	0.0046 - 0.0053
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A, XZ Orientation	130 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A, ZX Orientation	290 V/mil

Dalla tabella si può avere un primo riscontro sulle caratteristiche del materiale considerando test come, la resistenza alla trazione (*Tensile Strength Ultimate/Yield*) a rottura o snervamento, resistenza a flessione (*Flexural Strength*) ed i relativi moduli. Non meno importante, è la prova d'impatto riportata con il nome *IZOD Impact* (o prova Charpy) utilizzata per valutare la resistenza agli urti. In questo test il provino, che può essere

intagliato o meno (*notched* o *unnotched*) viene colpito da un martello per valutarne la capacità di assorbire l'urto. Il test si ripete aumentando la forza e sostituendo il provino ad ogni prova, sino a che questo non si rompe. Una volta avvenuta la rottura si calcola la forza che è stata necessaria.

Nella tabella viene riportata anche la temperatura di deviazione del calore (*Heat Deflection Temperature*). Il test per valutare questo parametro, prevede che un provino venga immerso in olio ad una temperatura accuratamente calibrata e sottoposto a flessione con carico di 0.45 o 1.82 MPa. La temperatura dell'olio viene gradualmente aumentata finché la barra non devia di 0.25 millimetri al centro. I gradi centigradi a cui il provino devia definiscono la temperatura di deviazione del calore.

Un test che indaga sui cambiamenti che avvengono alla struttura dei polimeri, è quello riguardante la temperatura di transizione vetrosa (*Glass transition temperature*) chiamata "Tg". È la temperatura alla quale la resina passa dallo stato vetroso (solido) allo stato gommoso. Può essere considerato il punto in cui si verifica una riduzione misurabile delle proprietà fisiche per via dell'esposizione a temperature elevate. Lo studio di questo parametro è importante in quanto un alto valore di Tg indicherà la possibilità di utilizzo del materiale a contatto con fonti di calore senza il rischio di incorrere in problematiche dovute al cambiamento fisico del polimero.

Relativamente allo studio della temperatura di combustione, si segnala che non è possibile avere un valore preciso di questo dato a causa della natura amorfa del materiale.

Alternativa all'ABS*plus*, avente caratteristiche differenti, è il Nylon 12. Dai dati riportati nella scheda sottostante e da quanto riferito dall'azienda, questo materiale ha una grande capacità di allungamento, risultando quindi molto meno rigido rispetto all'ABS*plus*.

Fig.41 Scheda tecnica del materiale Nylon 12.

FDM [®] Nylon 12			
Production-Grade Thermoplastic for Fortus 3D Production Systems			
Thermal Properties ¹	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi annealed	ASTM D648	207°F	97°C
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi unannealed	ASTM D649	167°F	75°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi annealed	ASTM D650	180°F	82°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi unannealed	ASTM D651	131°F	55°C
Melting Point	-----	352°F	178°C

Mechanical Properties	Test Method	English		Metric	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7,700 psi	6,900 psi	53 MPa	48 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	190,000 psi	180,000 psi	1,310 MPa	1,241 MPa
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	9.5%	5%	9.5%	5%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6.5%	5%	6.5%	5%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	10,200 psi	8,600 psi	0 MPa	0 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	190,000 psi	180,000 psi	0 MPa	0 MPa
Flexural Strain at Break	ASTM D790	No Break	>10%	No Break	>10%
IZOD impact - notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.8 ft-lb/in	0.9 ft-lb/in	150 J/m	50 J/m
IZOD impact - unnotched (Method A, 23°C)	ASTM D256	>37.4 ft-lb/in	5.1 ft-lb/in	>2,000 J/m	275 J/m

Osservando i dati caratterizzanti questo materiale, relativamente ai carichi di resistenza a trazione e flessione si possono notare valori di poco superiori all'ABSplus. Per quanto riguarda la temperatura di inflessione al calore i valori sono di poco differenti. In questo caso, viene riportata anche la temperatura di combustione di 178°C data l'isotropia del materiale.

Nella sostanza tale materiale risulta perciò simile all'ABSplus, differenziandosi esclusivamente per quanto riguarda i valori dell'allungamento a rottura "*elongation at break*" e dell'allungamento a snervamento "*elongation at yield*" che evidenziano un comportamento più elastico.

In fine come ulteriore alternativa marchiata *Stratasys*, è possibile considerare un materiale di ultima generazione dalle prestazioni nettamente superiori, l'ULTEM 9085. Questo materiale viene utilizzato per la produzione diretta di componenti che richiedono, oltre ad elevate prestazioni meccaniche, una resistenza chimica e termica elevata. Si riporta di seguito la scheda tecnica fornita dall'azienda.

Fig.42 Scheda tecnica del materiale Ultem 9085.

ULTEM™ 9085			
Mechanical Properties¹	Test Method	English	Metric
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	10,400 psi	71.6 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	322 kpsi	2,200 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%	6%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	16,700 psi	115.1 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	362.6 kpsi	2,500 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.0 ft-lb f/in	106 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	11.5 ft-lb f/in	613.8 J/m
Compression Strength	ASTM D695	15.2 ksi	104 MPa
Compression Modulus	ASTM D732	280 ksi	1930 MPa
Shear Strength (0.25" thick coupon)	ASTM D732	8.3 ksi	57 MPa
Thermal Properties²	Test Method	English	Metric
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	-----	-----	-----
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	307 °F	153°C
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC (SSYS)	367°F	186°C
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E228	3.67e-05 in/(in-F°)	65.27 µm/(m-C°)
Melt Point	-----	Not Applicable ³	Not Applicable ³
Electrical Properties⁴	Test Method	Value Range	
Volume Resistivity	ASTM D257	4.9e15 - 8.2e15 ohm-cm	
Dielectric Constant	ASTM D150-98	3.2 - 3.0	
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0027 - .0026	
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	290 - 110 V/mil	
Other²	Test Method	Value	
Specific Gravity	ASTM D792	1.34	
Rockwell Hardness	ASTM D785	---	
Flame Classification	UL94	V-0	
Oxygen Index	ASTM D2863	0.49	
Vertical Burn	FAR 25.853 (Test a (60s), passes at)	2 seconds	
FAA Flammability	FAR 25.853 (Method A/B)	< 5	
OSU Total Heat Release (5 min test)	FAR 25.853	36 kW/m²	
OSU Total Heat Release (2 min test)	FAR 25.853	16 kW min/m²	
UL File Number	-----	E345258	
Outgassing			
Total Mass Loss (TML)	ASTM E595	0.41% (1.00% maximum)	
Collected Volatile Condensable Material (CVCM)	ASTM E595	-0.1% (0.10% maximum)	
Water Vapor Recovered (WVR)	ASTM E595	-0.37% (report)	
Fungus Resistance (Method 508.6)	MIL-STD-810G	Passed	
Burn Testing			
Vertical Burn (60 sec)	FAR 25.853	Passed (0.040" - 0.250" thick)	
Heat Release 65/65	FAR 25.853	Passed (<40HR Peak, 0.060" thick)	
NBS Smoke Density (flaming)	ASTM F814/E662	Passed	
NBS Smoke Density (non-flaming)	ASTM F814/E662	Passed	

I dati riportati dall'azienda mostrano come i parametri dell'Ultem risultino superiori a quelli dei materiali fino ad ora considerati.

Le differenze riscontrabili nei valori della resistenza alla trazione "tensile strength", della temperatura di deviazione del calore "HDT" e della Tg

rendono evidenti le motivazioni per cui questo materiale venga destinato esclusivamente alla produzione di manufatti funzionali realizzati attraverso stampanti altamente performanti.

- 4.2.2 I materiali processati nella sinterizzazione SLS

Per quanto riguarda la tecnica SLS, il materiale prodotto e sviluppato dall'azienda *3DSystems* che si andrà a considerare, è il DURAFORM che viene proposto in diverse varianti.

Tra queste, la prima che verrà analizzata è il DuraForm PA *plastic* del quale riportiamo nella tabella sottostante le principali caratteristiche.

Fig.43 Scheda tecnica del materiale DuraForm Pa *Plastic*.

DuraForm® PA Plastic			
Technical Data			
General Properties			
Measurement	Condition	Metric	U.S.
Specific Gravity	ASTM D792	1.00 g/cm ³	1.00 g/cm ³
Moisture Absorption - 24 hours	ASTM D570	0.07%	0.07%
Mechanical Properties			
Measurement	Condition	Metric	U.S.
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	N/A*	N/A*
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	43 MPa	6237 psi
Tensile Modulus	ASTM D638	1586 MPa	230 ksi
Elongation at Yield	ASTM D638	N/A*	N/A*
Elongation at Break	ASTM D638	14%	14%
Flexural Strength, Yield	ASTM D790	N/A*	N/A*
Flexural Strength, Ultimate	ASTM D790	48 MPa	6962 psi
Flexural Modulus	ASTM D790	1387 MPa	201 ksi
Hardness, Shore D	ASTM D2240	73	73
Impact Strength (notched Izod, 23°C)	ASTM D256	32 J/m	0.6 ft-lb/in
Impact Strength (unnotched Izod, 23°C)	ASTM D256	336 J/m	6.3 ft-lb/in
Gardner Impact	ASTM D5420	2.7 J	2.0 ft-lb
Thermal Properties			
Measurement	Condition	Metric	U.S.
Heat Deflection Temperature (HDT)	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.82 MPa	180 °C 95 °C	356 °F 203 °F
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831 @ 0 - 50 °C @ 85 - 145 °C	82.6 µm/m-°C 179.2 µm/m-°C	45.9 µin/in-°F 99.6 µin/in-°F
Specific Heat Capacity	ASTM E1269	1.64 J/g-°C	0.392 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	ASTM E1225	0.70 W/m-K	4.86 BTU-in/hr-ft ² -°F
Flammability	UL 94	HB	HB

Come si può evincere dalla tabella, il PA Plastic ha buone caratteristiche di resistenza a trazione e flessione, paragonabili a quelle dell'ABS di produzione *Stratasys*.

Di particolare interesse è il dato riguardante la percentuale di allungamento a rottura che risulta molto più alto dei materiali fino adesso considerati, ciò significa che il materiale è poco rigido e che un suo possibile utilizzo per la creazione di questo tipo di prodotti potrebbe causare, nel caso non avesse la rigidità necessaria "l'effetto polmone", questo effetto modifica

l'andamento dell'aria all'interno dell'airbox provocando picchi di alta pressione e forti depressioni che devono essere assolutamente evitati.

È possibile notare anche che questo materiale ha una buona temperatura di inflessione sotto carico, ciò significa che in un ambiente come il vano motore, dove le temperature dell'aria possono arrivare a circa 70-80 gradi centigradi, questo materiale non subirebbe variazioni.

Vi sono altre versioni di DURAFORM disponibili a catalogo ma hanno caratteristiche molto simili tra loro e quindi di poco rilievo.

Riportiamo ora la variante più performante, il DURAFORM HST Composite che offre prestazioni di livello superiore rispetto ai materiali di produzione 3DSystems.

Fig.44 Scheda tecnica del materiale DuraForm HST Composite.

DuraForm® HST Composite

Technical Data

General Properties					
Measurement	Condition	Metric		U.S.	
Specific Gravity	ASTM D792	1.20 g/cm³		1.20 g/cm³	

Mechanical Properties					
Measurement	Condition	Metric		U.S.	
		X-direction	Z-direction	X-direction	Z-direction
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	N/A*		N/A*	
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	48-51 MPa	31-34 MPa	7050-7350 psi	4500-4900 psi
Tensile Modulus	ASTM D638	5475-5725 MPa	2900-3000 MPa	795-831 ksi	421-434 ksi
Elongation at Yield	ASTM D638	N/A		N/A	
Elongation at Break	ASTM D638	4.5 %	2.7 %	4.5 %	2.7 %
Flexural Strength, Yield	ASTM D790	N/A		N/A	
Flexural Strength, Ultimate	ASTM D790	83-89 MPa	64-68 MPa	12000-12900 psi	9275-9850 psi
Flexural Modulus	ASTM D790	4400-4550 MPa	2625-2825 MPa	638-660 ksi	381-410 ksi
Hardness, Shore D	ASTM D2240	75		75	
Impact Strength (notched Izod, 23 °C)	ASTM D256	37.4 J/m		0.7 ft-lb/in	
Impact Strength (unnotched Izod, 23 °C)	ASTM D256	310 J/m		5.8 ft-lb/in	
Gardner Impact	ASTM D5420	5 J		3.7 ft-lb	

Thermal Properties					
Heat Deflection Temperature (HDT)	ASTM D648 @ 0.45 MPa @ 1.82 MPa	184 °C 179 °C	178.8 °C 135 °C	363 °F 355 °F	354 °F 276 °F
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831 @ 0-50 °C @ 85-145 °C	138.3 µm/m-°C 267.2 µm/m-°C	102.7 µm/m-°C 184.2 µm/m-°C	76.8 µin/in-°F 148.4 µin/in-°F	57 µin/in-°F 102.3 µin/in-°F
Specific Heat Capacity	ASTM E1269	1.503 J/g-°C		0.359 BTU/lb-°F	
Flammability (3 mm)	UL 94	HB		HB	

Questo materiale viene utilizzato per la realizzazione di pezzi funzionali che richiedono elevata resistenza alla temperatura e rigidità. Ciò appare evidente analizzando i dati riguardanti i moduli della tensione e flessione considerati insieme alla percentuale di allungamento a rottura che risultano di molto inferiori alla versione PA presentata in precedenza.

Il DURAFORM HST Composite è sicuramente un ottimo materiale, paragonabile all'Ultem di casa Stratasys, quindi da considerarsi nel caso si vogliano ottenere manufatti dalle alte prestazioni utilizzando la sinterizzazione.

4.3 Creazione del prototipo

Dall'analisi delle tecnologie prese in considerazione e dei relativi materiali utilizzabili ci si può aspettare che entrambe le tecniche permettano di ricreare oggetti funzionali come il filtro che sarà protagonista del caso di studio.

Per poter offrire una visione più completa di queste due tecnologie, che comprenda anche i costi di produzione, si è provveduto a richiedere un preventivo in rete presso un sito specializzato in prototipazione. Grazie al sito www.zoomrp.com è stato possibile ottenere il prezzo della produzione di un filtro, come quello al centro del nostro studio, utilizzando entrambe le tecniche.

Fig.45 Preventivi delle tecniche a confronto.

Item	File Name Dimensions (X x Y x Z)	Product	Quantity	Unit Price	Extended Price
1	involucro_std.stl (189.8 x 243 x 154.2)	ABS White	1	\$534.50	\$534.50
FEDEX PRIORITY OVERNIGHT SHIPPING:				\$24.99	
SUB TOTAL:					\$559.49

Item	File Name Dimensions (X x Y x Z)	Product	Quantity	Unit Price	Extended Price
1	involucro_std.stl (189.8 x 243 x 154.2)	SLS White	1	\$1,008.74	\$1,008.74
FEDEX PRIORITY OVERNIGHT SHIPPING:				\$24.99	
SUB TOTAL:					\$1,033.73

Osservando il preventivo appare chiaro che la tecnica FDM è molto più conveniente rispetto a quella laser. L'elevato prezzo della sinterizzazione può essere il frutto di una tecnologia molto più complessa rispetto alla deposizione di filamento fuso. Inoltre, come detto nei capitoli precedenti, la SLS ha visto cadere i suoi brevetti solo nel 2014 e ciò comporta che il calo dei prezzi di tale tecnologia, dovuti alla sua diffusione, non si sia ancora realizzato.

Data la possibilità di poter sfruttare la tecnologia FDM presente nel laboratorio di realtà virtuale della Facoltà di Ingegneria di Forlì, si è deciso di provvedere alla creazione dell'involucro del filtro utilizzando la stampante *Stratasys Fortus 250mc* che processa l'*ABSplus*, materiale le cui caratteristiche permettono il suo utilizzo per la creazione di prodotti

funzionali. Per valutare la reale funzionalità e le prestazioni del prototipo, grazie all'interesse e alla disponibilità offerta dall'azienda BMC, si è pensato di effettuare un test di flusso che permettesse di evidenziarne le prestazioni.

Per la realizzazione del prototipo l'azienda BMC ha fornito il file STL dell'*airbox* il quale è stato processato attraverso il *software Insight 8.1* che guida la stampante nel processo di creazione.

Prima di avviare la stampa si sono impostati sul *software* i parametri del percorso macchina riguardanti lo spessore dei *layer* e la finitura delle pareti. Nelle immagini sottostanti vengono rappresentate le schermate delle viste dell'involucro aperto nel *software* (Fig.46 immagini lilla), seguite dall'immagine del filtro una volta processato (Fig.47 immagine rossa) con il relativo materiale di supporto (Fig.47 colore grigio) che il *software* provvede a predisporre in automatico.

Fig.46 Viste dell'elaborazione del *file* STL dell'involucro.

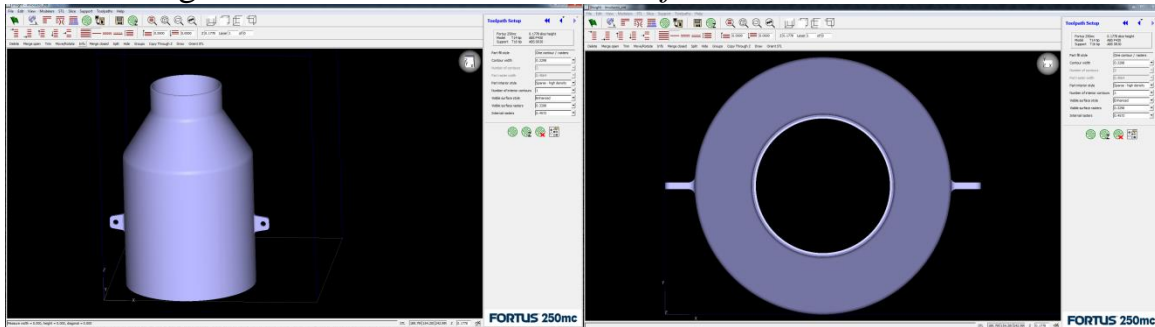
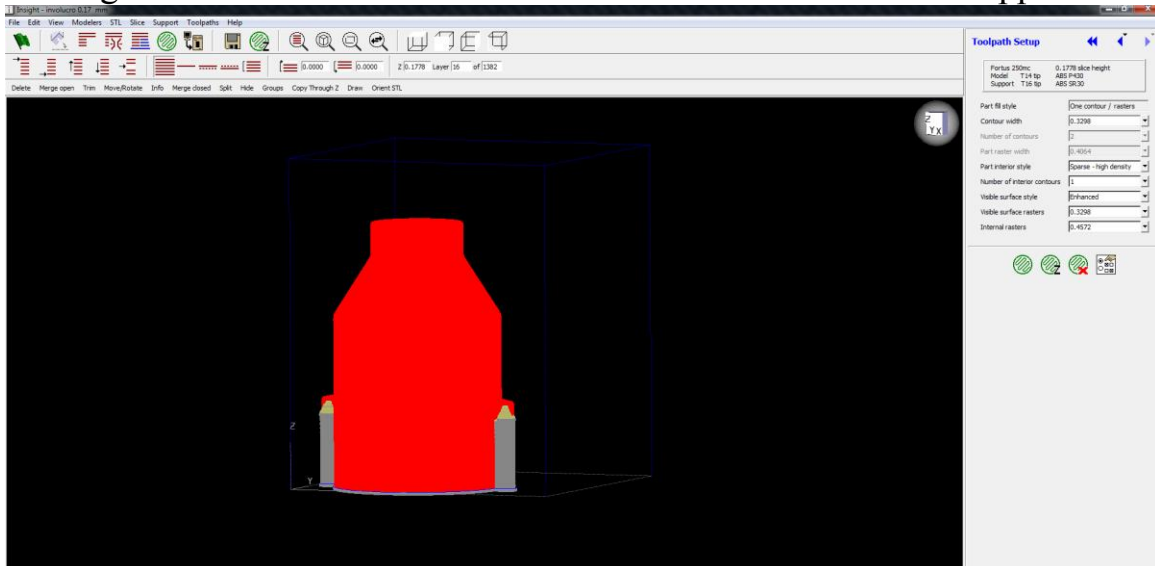


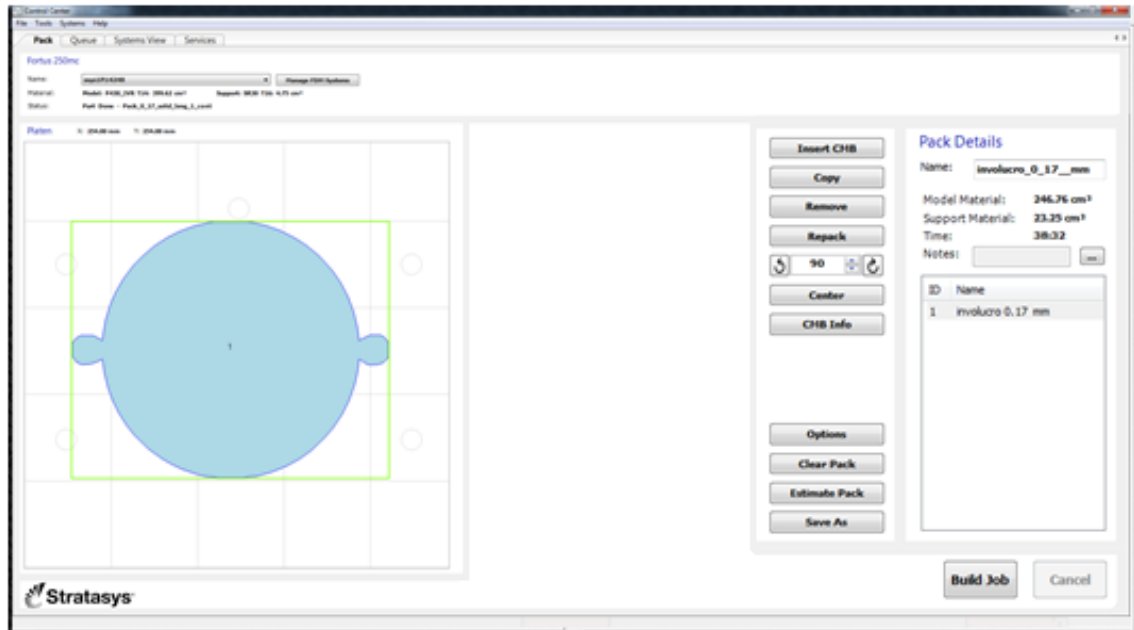
Fig.47 Schermata dell'involucro con il relativo materiale di supporto



A seguito di questo processo, il *file* viene esportato in formato CMB per poter essere processato dal *software ControlCenter* che dialoga con la stampante. Grazie a questo *software*, come è possibile vedere nella figura 48,

si possono avere informazioni riguardo alla quantità di materiale di costruzione e di supporto che verrà utilizzato ed alla durata del processo di creazione.

Fig.48 Schermata dell'elaborazione del *file* CMB dell'involucro.



A questo punto è possibile avviare il processo di prototipazione, terminato il quale l'involucro creato in laboratorio si presenta con il relativo materiale di supporto a sostegno delle orecchie laterali.

Fig.49 Il prototipo prima dell'estrazione dalla camera di stampa.

Vista dall'esterno



Vista dall'interno



Una volta terminato il processo di creazione dell'involucro, questo viene estratto dalla camera di stampa e portato al lavaggio dove verrà pulito dal materiale di sostegno, in tal modo sarà pronto per essere testato.

Capitolo 5

Test ed analisi prestazionale

5.1 Test

Terminato il processo di stampa l'involucro è stato staccato dalla bassetta di sostegno sulla quale è stato costruito (Figura 50) ed in seguito portato al lavaggio per pulirlo dal materiale di supporto (Figura 51).

Fig.50 Involucro su bassetta, si noti la presenza di materiale di supporto sotto le orecchie e la base.



Fig. 51 Involucro pulito dal materiale di supporto.



Una volta pulito dal materiale di supporto, l'involucro è stato assemblato con le restanti parti dell'airbox (spina, cono filtrante e coperchio) e con le

attrezzature messe a disposizione dall'azienda BMC, si è proceduto ad effettuare il test di flussaggio per valutare le effettive prestazioni del prototipo.

La fase di test si è svolta partendo dall'analisi della versione prodotta dall'azienda. Questo procedimento è stato effettuato per poter avere un preciso riscontro sulle prestazioni dei due *airbox* a parità di condizioni ambientali. E' importante valutare le prestazioni a parità di condizioni ambientali in quanto parametri come l'umidità e la temperatura possono influenzare significativamente l'andamento dei test.

Fig.52 Test di flussaggio su *airbox* prodotto dall'azienda.



Terminato il primo test, si è proceduto a montare la versione creata in Facoltà sul macchinario, controllando che non ci fossero perdite che potessero influenzare il risultato finale.

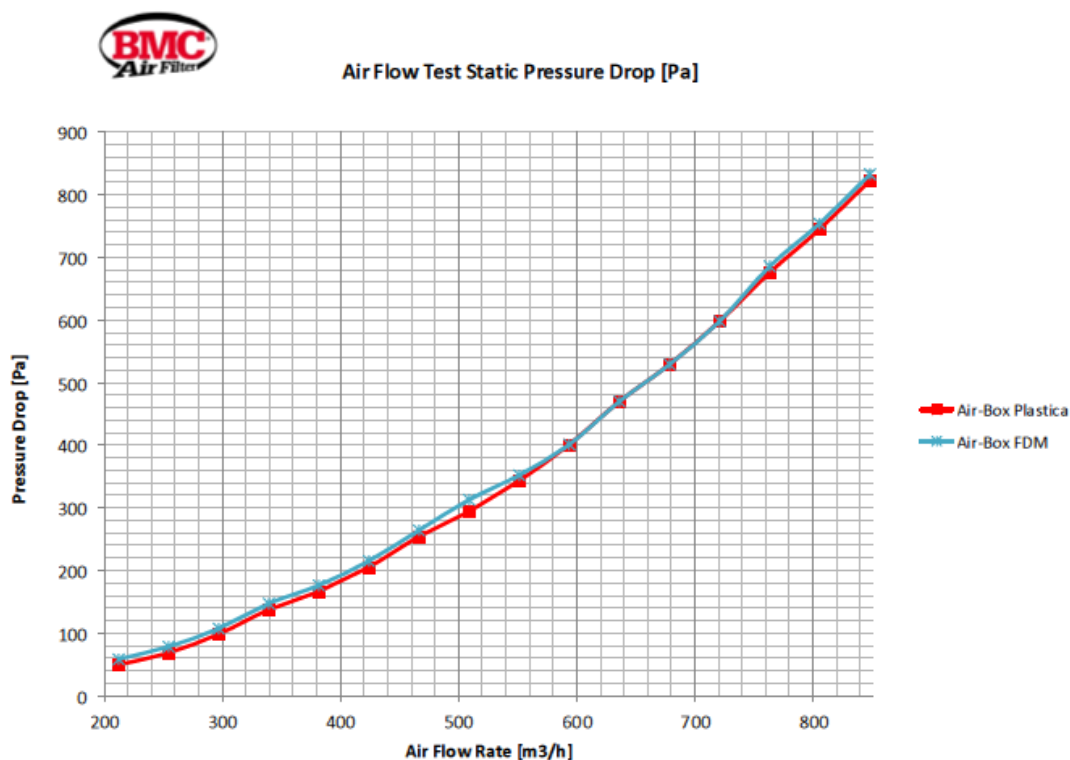
Fig.53 Test di flussaggio su *airbox* prodotto in facoltà



Una volta terminati i test si è provveduto all'estrapolazione e conversione dei dati numerici acquisiti, in modo da ricreare un grafico che potesse rendere chiaro il livello prestazionale ed il confronto tra le due versioni.

5.2 Analisi delle prestazioni

Fig.54 Grafico prestazionale dei due *airbox*.



Nel grafico *Pressure Drop* “asse Y” – *Air Flow Rate* “asse X” (Caduta di pressione – Portata d’aria) posto sopra (Fig.54), in rosso sono stati riportati i risultati relativi al primo test ovvero del modello aziendale realizzato con tecnologia tradizionale, mentre in azzurro sono evidenziati i dati relativi al test *sull’Air-Box FDM* con involucro costruito in Facoltà. Dal grafico si evince che nell’insieme le prestazioni dei due prodotti sono pressoché identiche. E’ possibile notare che in alcuni tratti la curva *dell’Air-Box FDM* presenta piccoli scostamenti in negativo (ovvero una perdita di carico superiore) rispetto *all’Air-Box* originale. E’ stato però valutato che tali differenze rientrano nel margine di tolleranza dell’impianto di prova.

Il processo di creazione dell’involucro *dell’airbox* all’interno del laboratorio della facoltà di Ingegneria di Forlì ha permesso di monitorare anche i prezzi e le tempistiche del processo di creazione dell’involucro. In questo modo è stato possibile valutare altri due aspetti di fondamentale importanza per il processo produttivo e porli a confronto con quelli che si sarebbero avuti in caso di utilizzo della tecnica tradizionale.

L'analisi parte dalla valutazione del tempo impiegato, considerando tre tempistiche diverse che possono permettere un confronto più completo. Il primo dato che viene riportato nella tabella sottostante è il tempo impiegato per arrivare ad ottenere il prototipo (TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA PROTOTIPAZIONE). Per la tecnica tradizionale è stata considerata la fase di realizzazione degli stampi, mentre per la tecnica RP questo dato si riferisce al tempo impiegato per l'elaborazione di un modello CAD, la sua conversione in *file* STL e la consecutiva processazione da parte della stampante. E' stato poi riportato il tempo impiegato per l'intero processo (progettazione - prototipazione - test - approvazione) che porta all'approvazione del prodotto (TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA COMMERCIALIZZAZIONE) ed infine il tempo di produzione una volta avviata la sua commercializzazione (TEMPO PRODUZIONE).

Fig.55 Tabella dei tempi.

TEMPI DI PRODUZIONE TECNICA TRADIZIONALE (STAMPAGGIO PLASTICA)			
	TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA PROTOTIPAZIONE	TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA COMMERCIALIZZAZIONE	TEMPO PRODUZIONE
AIRBOX UNIVERSALE	2 mesi	3 mesi	2 min/pz
AIRBOX CUSTOMIZZATO	2 mesi	3 mesi	2 min/pz
TEMPI DI PRODUZIONE TECNICA RP (RAPID PROTOTYPING)			
	TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA PROTOTIPAZIONE	TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA COMMERCIALIZZAZIONE	TEMPO PRODUZIONE
AIRBOX UNIVERSALE	3 giorni	1 settimana	40 h/pz
AIRBOX CUSTOMIZZATO	3 giorni	1 settimana	40 h/pz

Osservando la tabella (Fig.55) appare evidente come il processo che incide maggiormente in termini di tempo sul processo produttivo è quello riguardante il "TEMPO DI CONFIGURAZIONE PER LA PROTOTIPAZIONE". In particolare possiamo notare che, applicando il procedimento standard l'azienda ha impiegato due mesi rispetto ai tre giorni che sono stati necessari applicando

la prototipazione rapida in Facoltà. Ciò dimostra il guadagno in termini di tempo che la tecnica additiva può portare all'azienda, diminuendo il tempo di prototipazione da 60 a 3 giorni, con un risparmio del 95%. Per quel che riguarda l'intero processo produttivo il risparmio appare ancor più evidente, infatti l'azienda utilizzando le tecnologie tradizionali ha impiegato 90 giorni per poter commercializzare il prodotto finito. Al contrario, con la tecnica additiva si sono impiegati solo 7 giorni con un risparmio in questo caso del 92%.

Osservando il dato riguardante la produzione del singolo pezzo si può notare come le parti si invertano. Nei processi sino ad ora analizzati infatti la tecnica standard è stata molto più lenta rispetto alla prototipazione rapida, ma sulla produzione in serie le tempistiche risultano a favore delle tecniche consolidate. Valutando i dati di produzione di BMC è possibile notare che per la produzione di 500 *airbox* standard (quantità annua attualmente prodotta) la tecnica additiva impiegherebbe più di 800 giorni, non riuscendo perciò soddisfare il quantitativo produttivo necessario all'azienda. Al contrario, per la produzione di 20 *airbox* customizzati la produzione additiva impiegherebbe poco più di un mese, potendo quindi soddisfare la produzione annua e garantendo un risparmio in termini di tempistiche di produzione.

Si riporta ora l'analisi dei costi relativi alle due tecniche nella tabella sottostante.

Fig.56 Tabella dei costi

COSTI PER TECNOLOGIA TRADIZIONALE (STAMPAGGIO PER SOFFIAGGIO)			
	COSTI DI ATTREZZATURA	Q.TA' VENDUTE 2 ANNI	COSTO AMMORTAMENTO ATTREZZATURE BASATO SU 2 ANNI
AIRBOX UNIVERSALE	€ 15.000,00	n.1000	€ 15,00
AIRBOX CUSTOMIZZATO	€ 20.000,00	n.40	€ 500,00
	COSTO DI PRODUZIONE (COMPONENTI IN PLASTICA + ASSEMBLAGGIO)		
AIRBOX UNIVERSALE			€ 20,00
AIRBOX CUSTOMIZZATO			€ 30,00
	COSTO TOTALE (AMMORTAMENTO ATTREZZATURE + COSTO DI PRODUZIONE)		
AIRBOX UNIVERSALE			€ 35,00
AIRBOX CUSTOMIZZATO			€ 530,00
COSTI PER TECNOLOGIA RP			
	COSTI DI ATTREZZATURA	Q.TA' VENDUTE 2 ANNI	COSTO AMMORTAMENTO ATTREZZATURE BASATO SU 2 ANNI
AIRBOX UNIVERSALE	€ -	n.1000	€ -
AIRBOX CUSTOMIZZATO	€ -	n.40	€ -
	COSTO DI PRODUZIONE (COMPONENTI IN RP + ASSEMBLAGGIO)		
AIRBOX UNIVERSALE			€ 130,00
AIRBOX CUSTOMIZZATO			€ 150,00
	COSTO TOTALE (AMMORTAMENTO ATTREZZATURE + COSTO DI PRODUZIONE)		
AIRBOX UNIVERSALE			€ 130,00
AIRBOX CUSTOMIZZATO			€ 150,00

Nella parte superiore della tabella vengono riportati i dati riguardo ai costi forniti dall'azienda. Si può notare come, anche una piccola modifica di un progetto possa portare degli aumenti di costo nella fase di prototipazione, alla voce "COSTI DI ATTREZZATURA", ma quello che va ad influire maggiormente sul costo finale del manufatto è il dato relativo alle quantità prodotte. Analizzando quindi i due casi di produzione in azienda, abbiamo che con una produzione di 500 pezzi annui per la versione universale, il costo di ammortamento è molto minore rispetto alla produzione della versione customizzata dove ad aggiungersi alle basse quantità c'è anche il maggior costo di attrezzatura dato dal fatto che il prodotto risulta più complesso e

necessità quindi di più accorgimenti per la sua creazione con tecnica tradizionale.

Va inoltre considerato il costo riguardante i materiali e l'assemblaggio delle componenti per completare il filtro che si trovano alla voce "COSTO DI PRODUZIONE", in questo caso le differenze di prezzo tra i due modelli sono di poco conto.

Il costo finale che avranno le due versioni sarà dunque la somma delle voci "COSTI DI ATTREZZATURA + COSTO DI PRODUZIONE" balza subito agli occhi la grande differenza tra i due costi finali data dai fattori appena esposti.

Di tutt'altro valore sono i costi con la tecnica additiva, in questo caso non si hanno si hanno risultati per quel che riguarda le voci "COSTI DI ATTREZZATURA" e "COSTO AMMORTAMENTO DELLE ATTREZZATURE BASATO SU 2 ANNI" questo perché la tecnica additiva non comporta attrezzaggi come già illustrato nei capitoli precedenti. Il costo del filtro quindi sarà dato dal solo costo del materiale e assemblaggio come riportato nella tabella sopra.

In ultimo si riporta una tabella semplificativa che riporta i risultati riguardo ai tempi e ai costi.

Fig.57 Tabella riassuntiva costi – tempi.

SINTESI					
	NUM. PEZZI	TECN. TRADIZIONALE (STAMPAGGIO PLASTICA)		TECNOLOGIA RP	
		COSTO	TEMPO	COSTO	TEMPO
AIRBOX UNIVERSALE	n. 1000	€ 35,00	3 MESI	€ 130,00	1 SETTIMANA
AIRBOX CUSTOMIZZATO	n. 40	€ 530,00	3 MESI	€ 150,00	1 SETTIMANA

5.3 Conclusioni

Grazie all'analisi del settore additivo, argomento di questa tesi, è stato possibile capire le caratteristiche principali su cui si basa questo innovativo processo produttivo, approfondendo le diverse modalità di realizzazione di questa tecnologia.

Inoltre, grazie alla grande disponibilità e collaborazione offerta dall'azienda *BMC Air Filters* è stato possibile affrontare un caso reale molto interessante e significativo.

In definitiva, il lavoro svolto in questa tesi ha mostrato come la tecnologia additiva possa offrire valide alternative ai processi usuali, capaci di produrre pezzi finiti già utilizzabili. Infatti, da questo studio appare chiaro come la prototipazione rapida permetta di ottenere risultati migliori, sia in termini di costo che di risparmio di tempo, soprattutto nell'ambito della produzione di un limitato numero di pezzi (40 – 100 pezzi circa).

Nel caso di realizzazione dell'*airbox* customizzato, questa tecnica può soddisfare l'intera richiesta annuale e produrre il prodotto finito in una settimana, fornendo così un servizio estremamente rapido, cosa che per la produzione dell'*airbox* universale non è possibile. Per quel che riguarda quindi il solo settore della prototipazione, la tecnica additiva può garantire un grande vantaggio rispetto a quelle tradizionali. Infatti, in questo caso la prototipazione rapida a fronte della richiesta di un particolare creato su misura come nel caso in esame, dà i risultati migliori, fornendo il prodotto finito in breve tempo con un risparmio sui tempi ed una diminuzione rilevante dei costi, in quanto non implica alcuna spesa aggiuntiva al di fuori di quella del materiale e dell'eventuale assemblaggio del componente.

Infine, va comunque sottolineato che nell'ambito produttivo il vantaggio che la tecnica additiva può offrire in termini di tempo e costi è limitato alla piccola produzione, in quanto ad esempio, come visto nei capitoli precedenti, dai dati ottenuti dall'analisi sviluppata, la produzione di 500 pezzi richiederebbe più di due anni con questo processo produttivo.

BIBLIOGRAFIA

- Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing.

Scritto da: Andreas Gebhardt.

Editore: Hanser Gardner Pubns (2012)

- Rapid Prototyping: Principles and Applications 2nd Edition

Scritto da: C. K. Chua, K. F. Leong, C. S. Lim

Editore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (2006)

- Fondamenti di Scienza dei Polimeri.

Scritto da: M. Guaita, F. Ciardelli, F. La Mantia, E. Pedemonte.

Editore: Nuova Cultura, Roma (2006)

- Fabbricazione di componenti in materiali polimerici

Scritto da: Augusto Mario De Filippi.

Editore: Hoepli, Milano (2004)

- COSA DOBBIAMO ASPETTARCI

Scritto da: Giancarlo Magnaghi

Rivista: Office Automation NR. 12, Dic. 2014

Sitografia (elenco dei siti da cui sono state prese alcune delle informazioni tecniche con le relative immagini)

<http://www.3dprintingcreative.it/>

<http://www.greenmaker.it/produzione-additiva/tecnologia-additiva/>

<http://www.sharemind.eu>

<http://www.tecnopolo.enea.it>

<http://www.stratasys.com/>

<http://www.3dsystems.com/it>

<http://www.sharebot.it/>

www.manufacturingthefuture.co.uk/

<https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>

www.milanomeccanica.com

<http://www.aero.polimi.it/~sala/bacheca/PROTOTIPAZIONE.pdf>

<http://reformation.utk.edu/fabrication/3d-printing/>

http://www.consorziotecnopolio.it/prora_prod.html

<http://www.plasticseurope.it/cose-la-plastica/tipi-di-plastica.aspx>

<http://www.setvis.com/termoplastici/>

<http://www.setvis.com/termoindurenti/>

www.renishaw.it/additive

http://eprints.unife.it/143/10/Pag. 91-154_Cap.3_Materiali_e_Prodotti.pdf

<http://www.westsysteminternational.com/it/pro-set/proprieta-termiche.html>

<http://www.tecnologicamente.info/studio/la-plastica/>

http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/interactive_charts/strength-density/NS6Chart.html

<http://lilianvandaal.com/>

<https://tecmatied.wordpress.com/category/tecnologie/stampaggio-per-soffiaggio/http://soiel.it/sfogliabili/officeautomation/2014/dicembre/files/assets/common/downloads/publication.pdf>