

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO

(Classe delle Lauree Magistrali in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio – LM – 35)

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE & MBDA ITALIA

TESI DI LAUREA

**“ANALISI ENERGETICA, AMBIENTALE ED ECONOMICA DEL PROCESSO DI
ADDITIVE MANUFACTURING PER LA PRODUZIONE DI COMPONENTI MECCANICI:
UN CASO STUDIO PRESSO MBDA ITALIA S.P.A.”**

RELATORI

CH.MO PROF. ING. FRANCESCO CALISE – DII

CH.MO PROF. ING. MASSIMO DENTICE D'ACCADIA – DII

CO - RELATORI

CH.MO. ING. ANTONIO LA MARCA – MBDA ITALIA

ING. FRANCESCO DEL RE – DII

ING. MARIA VICIDOMINI – DII

CANDIDATO

MICHELE LUCCI MATR. M67/178

ANNO ACCADEMICO 2014 – 2015

Abstract

In un momento storico dell'umanità segnato da preoccupanti cambiamenti climatici derivanti in buona parte da un uso sproporzionato di risorse energetiche non rinnovabili nei processi produttivi, una produzione industriale ecocompatibile e sostenibile è di fondamentale importanza per la tutela imprescindibile della salute del pianeta. Questo è particolarmente vero in settori ad elevata intensità energetica, come quello del “*Manufacturing*” all'interno della quale le aziende che producono componenti meccanici consumano grandi quantità di energia e di materiali.

Fino alla fine del 1980, la maggior parte dei processi produttivi di componenti meccanici sono stati classificati come “*sottrattivi*” (asportazione di truciolo), o come “*formativi*” (fusione e stampaggio a iniezione): questi due metodi di produzione hanno letteralmente dominato la produzione sin dall'età della pietra.

Allo stato attuale, la maggior parte delle aziende misurano le emissioni di carbonio, la sostenibilità e l'impatto ambientale esclusivamente sulla base del loro uso interno di energia elettrica, gas, petrolio, carburanti, materie prime, acqua e dei rifiuti diretti che esse stesse producono. In realtà, se si vuole affrontare in maniera efficace e razionale il problema del cambiamento climatico e dell'efficienza nell'uso delle risorse naturali, bisogna monitorare su scala globale la “carbon footprint” ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{prodotto}}$) di un prodotto “dalla culla alla tomba”: ciò significa, dal punto di vista di un'azienda manifatturiera, guardare indietro lungo la catena di approvvigionamento delle materie prime utilizzate e guardare in avanti a come i propri clienti utilizzano e smaltiscono il prodotto che acquistano, secondo il principio della Life Cycle Assessment (LCA).

In particolare, le norme ISO 14044, evidenziano che bisognerebbe:

- cercare di riutilizzare o riciclare i prodotti al termine della loro vita utile;
- guardare alla progettazione di prodotti che richiedono la minima quantità di carbonio nel corso della loro vita utile;
- produrre componenti in una catena di produzione che riduca al minimo l'impatto dei trasporti e della logistica;
- utilizzare in minore quantità possibile la materia prima, con il minor spreco possibile generato lungo tutta la catena di produzione.

Alla maggior parte di queste esigenze risponde sicuramente l'**Additive Layer Manufacturing (ALM)**: con l'avvento e la crescita del 3-Dimensional Computer Aided Software Design (CAD 3D) è avvenuta una sorta di silenziosa rivoluzione industriale, nella quale i prodotti possono essere realizzati *particella by particella* mediante sinterizzazione laser di polvere metallica direttamente partendo dai dati del computer. Inoltre, questo modo di operare ha permesso di abolire la necessità di utensili tradizionali e vincoli "supply chain" tipicamente associati alla produzione convenzionale.

Molti sono gli studi presenti in letteratura che concentrano la loro attenzione sia sull'assorbimento energetico delle varie stampanti 3D presenti sul mercato e sia sull'alleggerimento e sulla performance dei pezzi meccanici prodotti in ALM, ma pochi di essi confrontano l'iter produttivo ALM con quello della manifattura convenzionale.

Il presente lavoro di tesi, dunque, ha come principale obiettivo l'analisi energetica, ambientale ed economica del processo di *Additive Manufacturing* per la realizzazione di pezzi meccanici presso MBDA Fusaro: nello specifico, verrà analizzata la possibilità di utilizzare tecniche di Additive Manufacturing (che utilizzano la tecnologia *Direct Metal Laser Sintering*) in luogo delle convenzionali metodiche basate su lavorazioni di tipo meccanico.

Il componente meccanico che è stato realizzato è stato denominato "RIB" (dall'inglese "costola", per la sua particolare forma geometrica che ricorda quella di una costola animale) ed è riportato in Fig. 1.

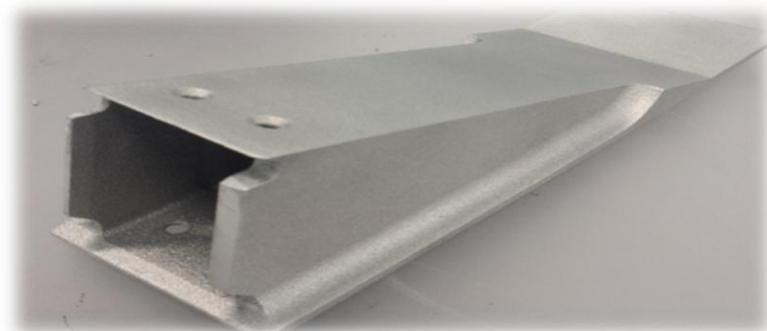


Figura 1 - Componente meccanico "RIB" realizzato in Additive Manufacturing presso MBDA Fusaro

I valori di energia primaria e di emissione di CO_{2eq} ottenuti mediante lavorazione di Additive Manufacturing sono stati confrontati con quelli caratteristici delle manifatture convenzionali ricavati dall'analisi in letteratura. Tra i numerosi processi manifatturieri

convenzionali si sono scelte due metodologie con le quali si realizzano tutt'oggi i componenti meccanici a geometria complessa, tra cui la stessa RIB: si tratta della *fresatura a 5 assi* (CNC Machining) e la *pressofusione* (High Pressure Die Casting).

La lavorazione CNC è una lavorazione “per asportazione di truciolo”: partendo da un semilavorato grezzo, quale un lingotto prodotto in fonderia, si asporta materiale in eccesso per ottenere la geometria e la forma dell'oggetto desiderato.

Nel processo di pressofusione, invece, la lega liquida è iniettata in pressione nella conchiglia (acciaio o ceramica): l'operazione richiede, oltre allo stampo, un contenitore riscaldato per mantenere il metallo allo stato liquido e un dispositivo per comprimere il metallo dentro lo stampo. La compressione del metallo liquido si realizza con *presse idrauliche* che chiudono lo stampo, mentre il metallo viene spinto nella forma da una *pompa a pistone*. Dopo il riempimento dello stampo, e la solidificazione, che avviene tramite raffreddamento con acqua, il getto viene estratto staccandolo dalle pareti dello stampo con *perni estrattori*. L'elevato costo degli stampi lo rende però adatto soltanto per le produzioni di grande serie.

Entrambe le tecnologie sono utilizzate per realizzare, con ottime tolleranze ed elevata velocità di produzione, oggetti di dimensioni medio-piccole, forma complessa e pareti sottili.

Dallo studio effettuato si evince che la realizzazione della “rib” tramite processi di manifattura convenzionale non solo risulta essere più energivora ed inquinante rispetto alla manifattura additiva, ma richiede un quantitativo maggiore di materie prime come si evince dai grafici riportati nelle Figg. 2, 3 e 4.

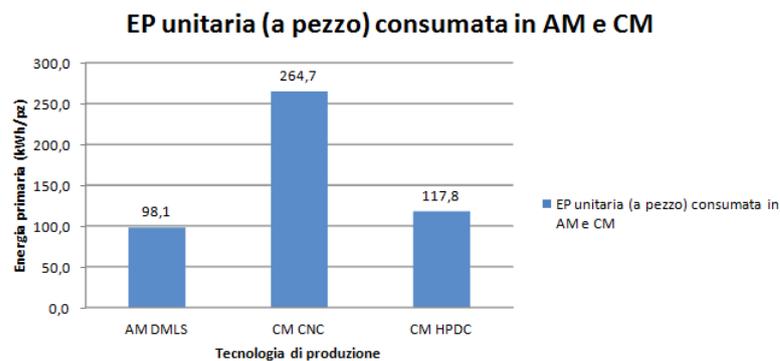


Figura 2 - Consumo di energia primaria della manifattura additiva e di quella convenzionale (from cradle to gate)

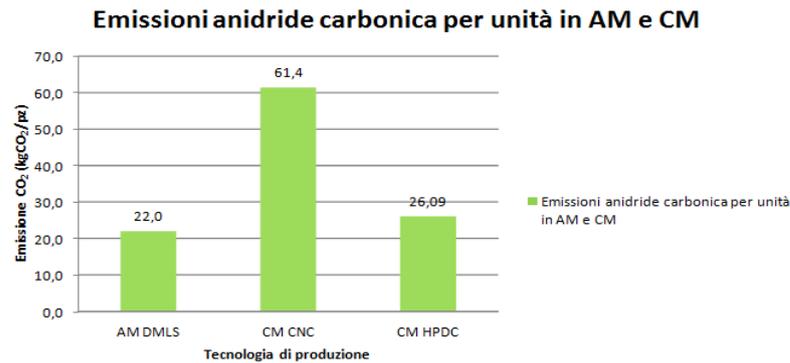


Figura 3 - Emissioni di CO_{2eq} della manifattura additiva e di quella convenzionale (from cradle to gate)

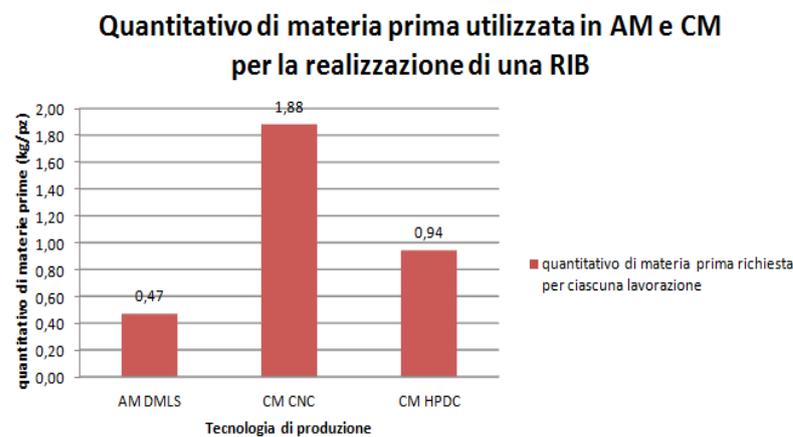


Figura 4 – Utilizzo di materie prime della manifattura additiva e di quella convenzionale (from cradle to gate)

In tabella 1 sono riportati i risparmi percentuali di materia prima, di energia primaria e di emissioni in termini di CO_{2eq} della manifattura additiva rispetto a quella convenzionale.

Tabella 1 - Consumo di materia prima, energia primaria ed emissioni di CO_{2eq} per la tecnologia DMLS, HPDC e CNC Machining

	Materia prima [kg/pz]	Energia primaria "from cradle to gate" [kWh/pz]	Emissioni CO _{2eq} "from cradle to gate" [kgCO _{2eq} /pz]
AM: DMLS	0.47	98.12	21.99
CM: HPDC	0.94	117.78	26.09
CM: CNC	1.88	264.68	59.64
DMLS vs CNC	-75%	-63%	-63%
DMLS vs HPDC	-50%	-17%	-16%

Nella manifattura convenzionale l'uso di energia è largamente dipendente dal tempo di lavorazione di ogni singolo step che risulta essere dipendente, a sua volta, dalla complessità geometrica e dalla qualità finale del componente meccanico che si intende realizzare. Maggiore è la complessità geometrica del pezzo da realizzare e maggiori risultano i tempi di ogni singola lavorazione (tornitura, fresatura, saldatura e così via) che il semilavorato deve subire, con conseguenti consumi energetici elevati.

Anche nel caso della pressofusione la realizzazione preliminare di stampi, forme, calchi e così via risulta essere lunga e laboriosa dal punto di vista della manodopera e con ingenti valori di energia elettrica richiesta. Nel caso della lavorazione CNC, la notevole quantità di energia primaria consumata dipende dalla quantità di “materiale asportato” dal semilavorato (che nella maggior parte dei casi è 5-8 volte superiore a quella del pezzo finito) per produrre il pezzo finito. In ALM, invece, nonostante il consumo di energia primaria per la produzione di 1 kg di acciaio GP1 (polvere metallica), paragonabile ad un acciaio 17-4 PH convenzionale (208.60 kWh/kg_{GP1}), sia superiore a quella necessaria per asportare in CNC machining 1 kg di acciaio (166.7 kWh/kg_{acciaio}), l’energia primaria complessiva nel processo risulta essere inferiore data la minor quantità di materiale da lavorare. In generale non può essere affermato categoricamente che la stampa 3D sia meno energivora e rispettosa dell’ambiente: questo dipenderà dalla tipologia di lavorazione che si è vincolati a scegliere (per questioni economiche) data la complessità o la semplicità geometrica del componente meccanico. Realizzare in manifattura convenzionale un cilindretto forgiato con le stesse dimensioni della rib risulterebbe alquanto conveniente sia dal punto di vista energetico (e quindi ambientale), sia dal punto di vista economico: questo perché in tal caso, nel processo di “colata in sabbia”, gli stampi e le anime utilizzati saranno di notevole semplicità realizzativa; allo stesso tempo nella lavorazione CNC si impiegherà molto poco tempo per forare, tramite un trapano a colonna, un lingotto metallico precedentemente realizzato in fonderia.

Realizzare un cilindretto forgiato (delle stesse dimensioni della rib) mediante Additive Manufacturing inquinerebbe tanto quanto la realizzazione del componente meccanico prodotto in MBDA: la stampante 3D, ovviamente, non fa alcuna differenza energivora tra la realizzazione di pezzi a geometria semplice e quelli a geometria complessa, ma consuma in base alla massa volumetrica (a parità di tecnologia e di parametri di stampa selezionati) del componente meccanico che si intende realizzare.

Attraverso lo studio LCA della tecnologia DMLS, utilizzando il Software SimaPro, si sono messi in evidenza i comparti ambientali più “danneggiati” durante l’iter di realizzazione di un componente meccanico “from cradle to gate”.

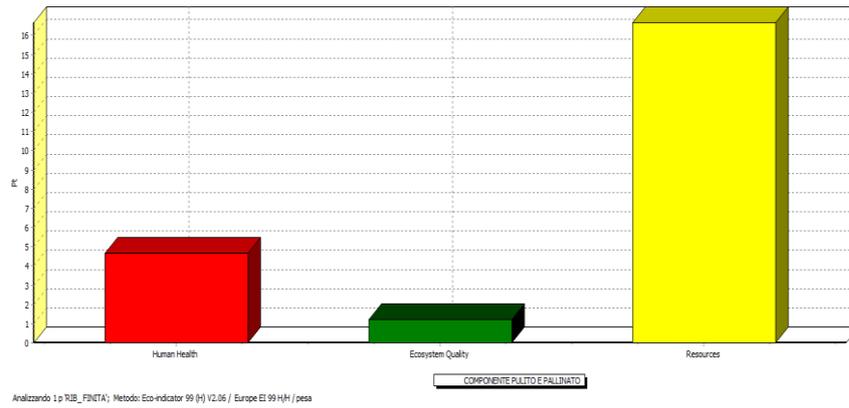


Figura 5 - Valutazione del danno ambientale per macro-categorie

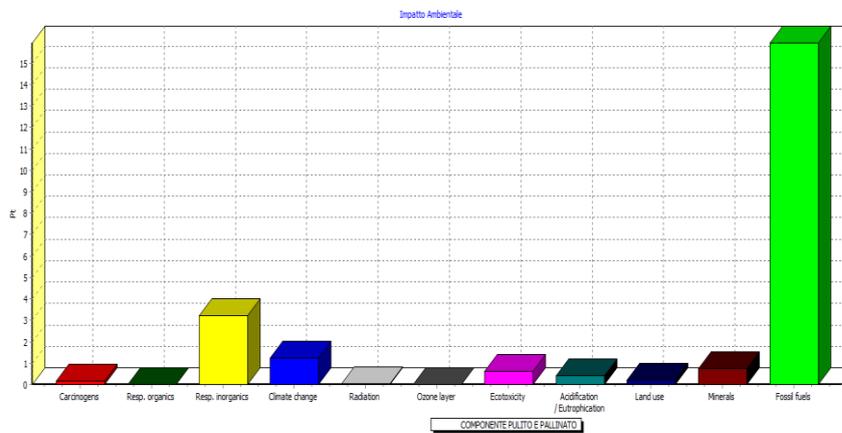


Figura 6 - Valutazione del danno ambientale per micro-categorie di impatto – “peso”

Il grafico mostrato in Fig. 7 mostra come la fase maggiormente responsabile dell’impatto ambientale è quella di printing che assorbe la gran parte di energia elettrica con circa 260 punti ecopoint.

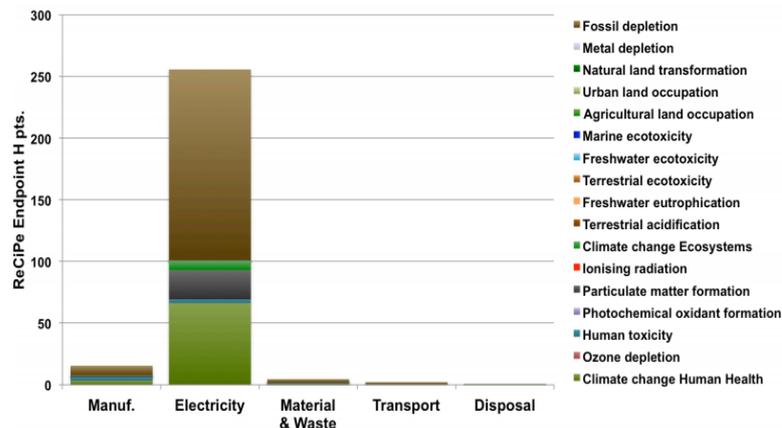


Figura 7 - Valutazione dell’impatto ambientale diviso per macro-gruppi

Da notare come l'aliquota del materiale di scarto e quella del materiale smaltito in discarica sia assolutamente trascurabile: uno dei vantaggi dell'ALM è quello di sinterizzare strato dopo strato l'esatta quantità di polvere che serve per la realizzazione dei componenti meccanici, minimizzando così i trucioli da smaltire in discarica. Nella manifattura convenzionale questo non accade poiché, la maggior parte delle volte si opera per asportazione, partendo da un lingotto semilavorato e giungendo al prodotto finito per fresatura e/o tornitura: i trucioli asportati verranno poi in parte smaltiti e in parte riciclati.

Dal grafico riportato in Fig. 6 si nota, in maniera ancora più esplicita, come l'impatto più rilevante (circa 16 ecopoint su 22 totali disponibili) sia da imputare al consumo di risorse ambientali, cioè di combustibili fossili per la produzione di energia elettrica; seguono l'impatto sull'apparato respiratorio che provoca danni alla salute umana (dato da agenti inorganici – probabilmente dalle stesse polveri metalliche usate nella manifattura convenzionale) e il cambiamento climatico che crea danni alla salute del nostro Pianeta. Questi impatti andranno a creare soprattutto danni relativi al consumo di risorse non rinnovabili (per quanto riguarda l'impatto dei combustibili fossili); sono poi non trascurabili i valori relativi ai danni alla salute umana per gli impatti sul sistema respiratorio, e all'ecosistema.

Successivamente all'analisi energetica ed ambientale, i valori dei costi unitari in funzione del volume di produzione ottenuti mediante lavorazione in Additive Manufacturing sono stati confrontati con quelli caratteristici delle due manifatture convenzionali prese in esame, analizzando quello che in economia aziendale viene detto "breakeven point" (Fig. 8).

Dall'analisi del breakeven point si può valutare quanto le varie tecnologie risultino convenienti (dal punto di vista economico) in funzione del numero di rib da realizzare.

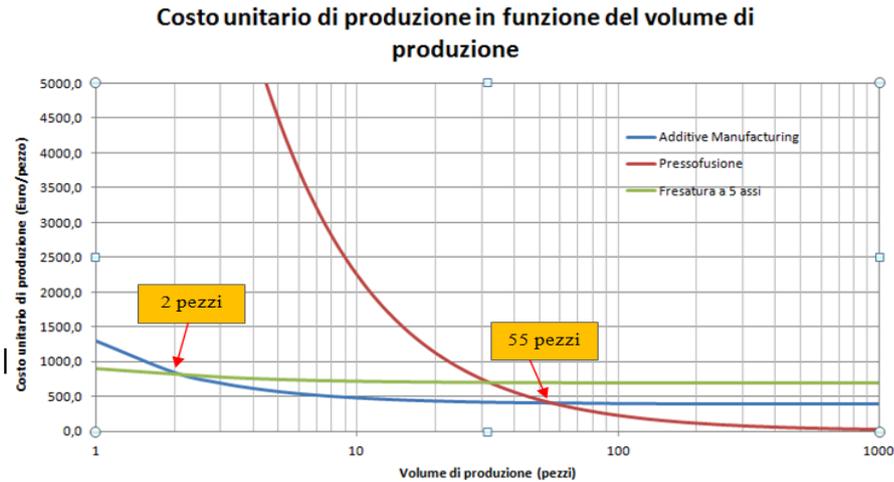


Figura 8 - Analisi del breakevenpoint tra l'additive manufacturing e la conventional manufacturing

L'Additive Manufacturing si posiziona in corrispondenza della bassa-media produzione risultando la tecnologia più conveniente se si intendono realizzare dai 3 ai 55 pezzi. Al di sotto di un volume di produzione di 3 pezzi la fresatura a 5 assi trova il suo campo di applicazione mentre, per la produzione su larga scala (55 pezzi in su) la pressofusione è l'unica tecnologia oggi, per la produzione di componenti meccanici a geometria complessa, che risulta essere più conveniente.

Il presente lavoro di tesi ha focalizzato la sua attenzione sul confronto energetico, ambientale ed economico tra la manifattura additiva e due tra le più costose utilizzate in manifattura convenzionale per la realizzazione di componenti meccanici.

E' utile precisare che nella realizzazione di pezzi meccanici con geometria semplice (quali potrebbero essere ad esempio cilindri o bussolotti forgiati), l'ALM non avrebbe modo di esistere sia dal punto di vista economico che dal punto di vista energetico. I componenti meccanici a geometria semplice vengono, infatti, realizzati con una tecnica detta "colata in sabbia", che risulta essere molto più veloce ed economica manufacturing rispetto alla manifattura additiva.

Si è ricavato il grafico in Fig. 9 che mette in evidenza che se si pensasse di realizzare un bussolotto forgiato delle stesse dimensioni (e quindi della stessa massa) della rib mediante manufacturing tecniche additive non si avrebbero punti di breakpoint tra le due tecnologie in quanto, il costo di produzione della "colata in sabbia" per qualsiasi volume di produzione, sarebbe sempre inferiore. La curva del costo unitario della colata in sabbia è stata rigorosamente ricavata in letteratura.

L'analisi economica di questo studio di tesi ha voluto dimostrare che nei mercati di massa, dove si producono beni standardizzati e pressochè uguali, e che rispondono a richieste omogenee da parte dei consumatori, per avere il contenimento dei costi e dei tempi si ricorre alla produzione su larga scala, facendo ricorso a macchinari industriali che realizzano migliaia di prodotti ogni giorno. Le stampanti 3D non sono in grado di competere con i metodi tradizionali per la produzione industriale di grandi quantità di beni. Lo sviluppo di questa tecnologia non è ancora così avanzato da consentire la realizzazione di prodotti su larga scala con tempistiche e costi accettabili.

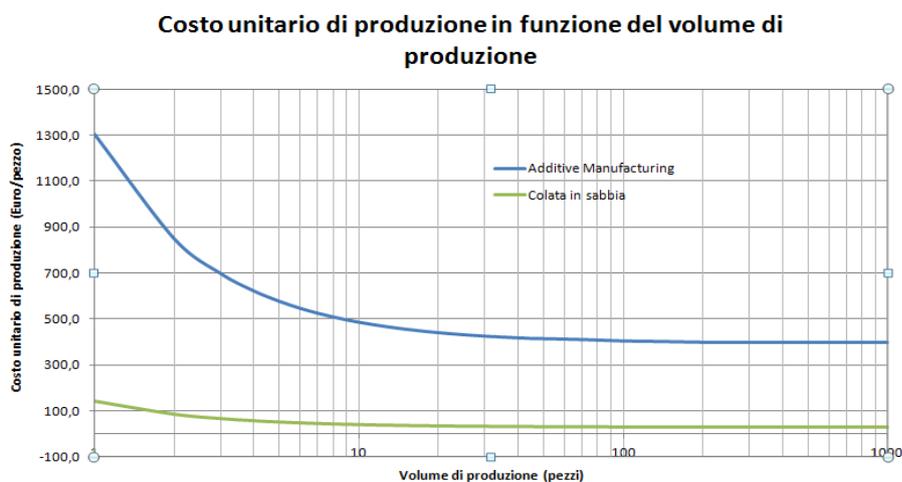


Figura 7 - Costo unitario di produzione tra la tecnologia DMLS e la colata in sabbia

Il tempo per stampare un oggetto in 3D dipende molto dal tipo di tecnica utilizzata e dalle dimensioni dell'oggetto stesso. È semplice capire che, anche se si possedesse un numero molto elevato di stampanti 3D, queste non avrebbero in ogni caso le potenzialità per competere con macchinari industriali tradizionali: i tempi e i costi sono ancora eccessivi.

Tuttavia, non si esclude il fatto che in un futuro prossimo la stampa 3D possa arrivare a competere con i metodi tradizionali nella produzione su larga scala. In che modo? Una prima soluzione sta cercando nel numero di sorgenti laser che sinterizzano la polvere metallica. La tecnologia DMLS presente in MBDA è caratterizzata dall'aver una sola fonte laser (con conseguenti tempi e costi elevati per produzioni su larga scala); tuttavia sono già disponibili, sebbene a prezzi ancora relativamente elevati, stampanti che alloggiavano 4 sorgenti laser in grado di lavorare contemporaneamente, riducendo sensibilmente sia il costo unitario ed i tempi di realizzazione dei componenti meccanici.

La stampa 3D può essere più competitiva dei metodi tradizionali nei seguenti settori:

1. *short-run production*;
2. *rapid prototyping*;
3. *custom made production*.

Con i mezzi tradizionali, finora, non si è trovata nessuna soluzione capace di ridurre i costi relativi alla produzione di oggetti la cui costruzione ricade in uno dei suddetti campi. Si tratta di un circolo virtuoso, proprio come viene rappresentato in Fig. 10: la soluzione è la stampa tridimensionale.

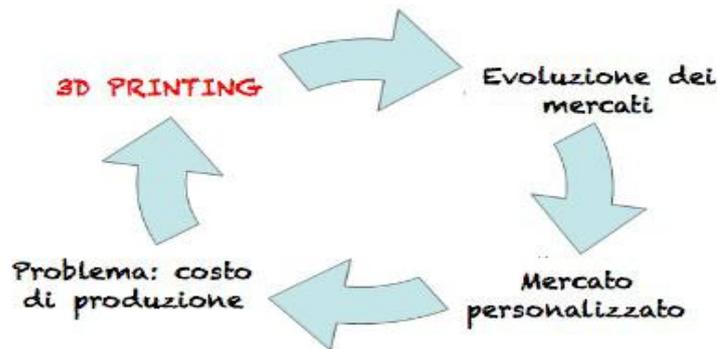


Figura 10 - Circolo virtuoso: L'evoluzione dei mercati porta all'affermazione dei mercati personalizzati

La stampante 3D non necessita di stampi costosi come nel caso della produzione in serie con tecniche convenzionali: ciò consente ai progettisti di realizzare qualunque tipo di oggetto, con qualunque forma, entro i limiti di dimensione e capacità delle stampanti 3D, a costi contenuti. Con il proprio file CAD e qualche clic sul computer è possibile dare via al processo di costruzione di un oggetto economico e personalizzato e, qualora il risultato non fosse abbastanza soddisfacente, sarebbe sufficiente modificare il progetto e iniziare una nuova stampa.

L'industria aerospaziale risulta essere uno dei mercati chiave per la crescita della manifattura additiva. Questo settore richiede la produzione di parti realizzate in maniera quasi perfetta e che possiedano ben determinate proprietà meccaniche. Gli adattamenti specifici e personalizzati e la produzione di serie limitate di prodotti sono aspetti positivi garantiti dalla produzione additiva che, con i metodi tradizionali, comporterebbero un iter molto più complesso e costoso. Questi sono solo alcuni dei motivi per cui le aziende leader del settore, come MBDA, hanno integrato la manifattura additiva nella programmazione delle strategie di produzioni future.

Uno dei fattori maggiormente innovativi legati all'impiego dell'ALM in quest'ambito è la possibilità di ridurre drasticamente il peso delle parti prodotte.

Nella comunità dell'industria aerospaziale si utilizza spesso un indicatore di peso rappresentato dalla “percentuale Buy-to-Fly”, ovvero il rapporto, espresso in percentuale, tra il peso delle materie prime utilizzate per produrre la parte e il peso finale della parte stessa. Nella manifattura convenzionale, tale indicatore è pari a $15 \div 20$, ma con il processo *DMLS* il Buy-to-Fly può arrivare fino a circa 1, dal momento che la polvere non fusa può essere riutilizzata nei cicli successivi. Con l'ottimizzazione del peso delle componenti si hanno anche minori costi delle materie prime e degli strumenti di produzione; inoltre, si riduce notevolmente l'impatto sull'ambiente, con minor consumo di carburante da parte dei velivoli e minori emissioni di anidride carbonica.

Per concludere, questo lavoro di tesi ha individuato **tre criteri fondamentali** che devono essere presi in considerazione (**dal punto di vista energetico, ambientale ed economico**) nel confrontare i metodi sottrattivi convenzionali con l'ALM: **complessità geometrica, personalizzazione e volume di produzione**. Mentre con i processi tradizionali la complessità geometrica risulta essere una limitazione, per la produzione additiva diventa un punto di forza, poiché, depositando e consolidando il materiale layer-by-layer, si riescono ad ottenere forme e strutture difficilmente riproducibili, o addirittura irrealizzabili, con altre tecnologie. L'Additive Manufacturing diventa inoltre estremamente appetibile quando è richiesta un'elevata **personalizzazione del prodotto** perché essa non comporta un aumento dei costi di produzione, come può avvenire con le tecnologie tradizionali. Nonostante i numerosi aspetti positivi che lo contraddistinguono, l'ALM non è ancora competitivo per quanto riguarda i **volumi di produzione**: nel caso di elevate quantità, esso non riesce ancora a conseguire le economie di scala che caratterizzano i processi convenzionali.

La tesi ha avvalorato l'**elevata flessibilità produttiva** che caratterizza l'ALM rispetto ai processi tradizionali in quanto non necessita di strumenti, come ad esempio stampi, i cui costi devono essere ammortizzati all'interno di quello del prodotto. Sfortunatamente, la produzione additiva non è ancora competitiva quando sono in gioco elevati volumi di produzione e la geometria dei prodotti è semplice poiché i **maggiori tempi macchina** e l'**impossibilità di economie di scala** tendono ad aumentare fortemente il prezzo finale del pezzo.