

Analisi dei costi e produttività reale del processo di fusione a letto di polvere metallica con sorgente laser

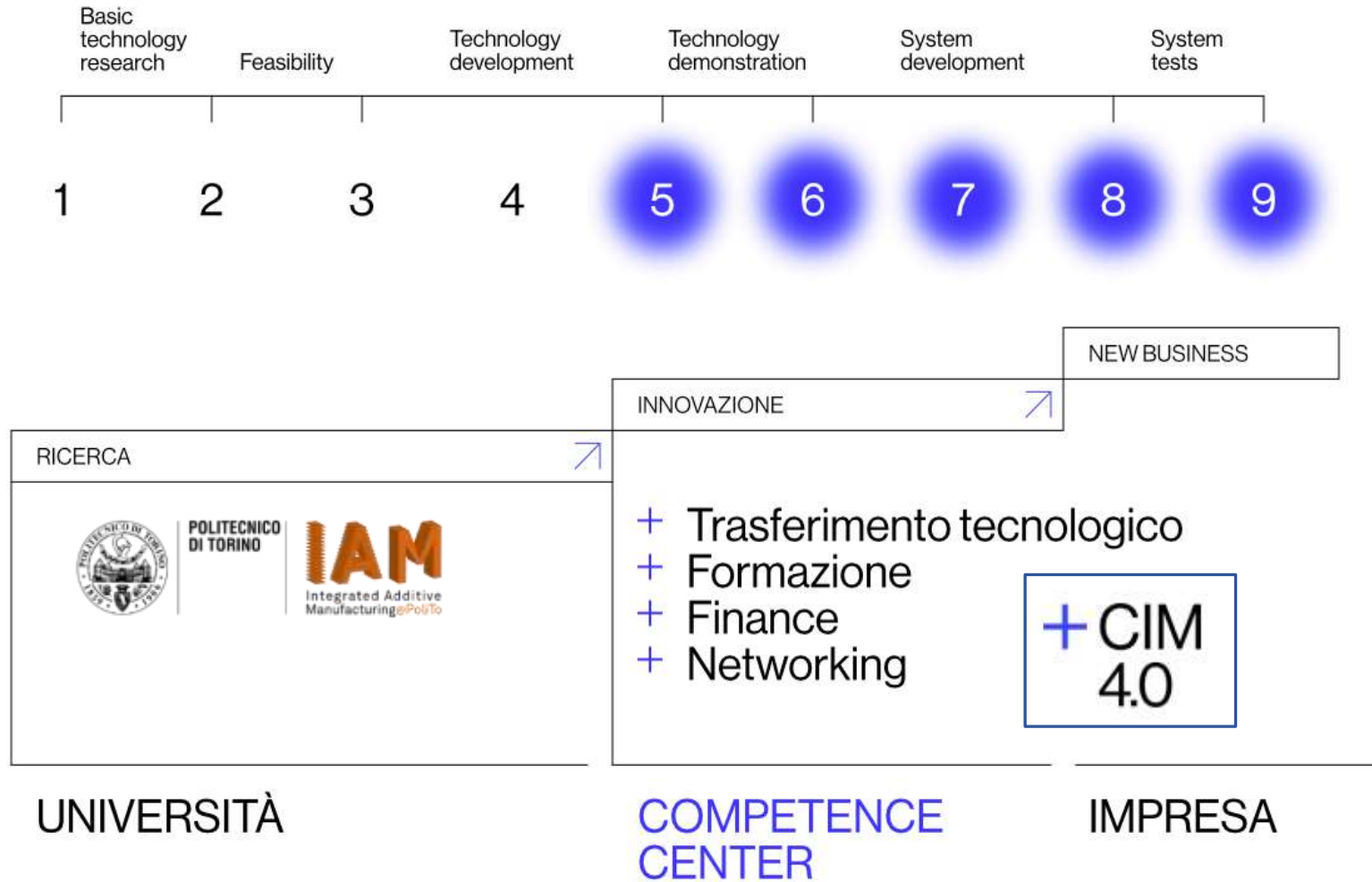
Flaviana Calignano¹, Federico Giuffrida¹, Luca Iuliano^{1,2}, Vincenza Mercurio¹, Enrico Pisino²

1: Politecnico di Torino, Centro di Additive Manufacturing (IAM@PoliTo)

2: Competence Industry Manufacturing 4.0, (CIM 4.0)

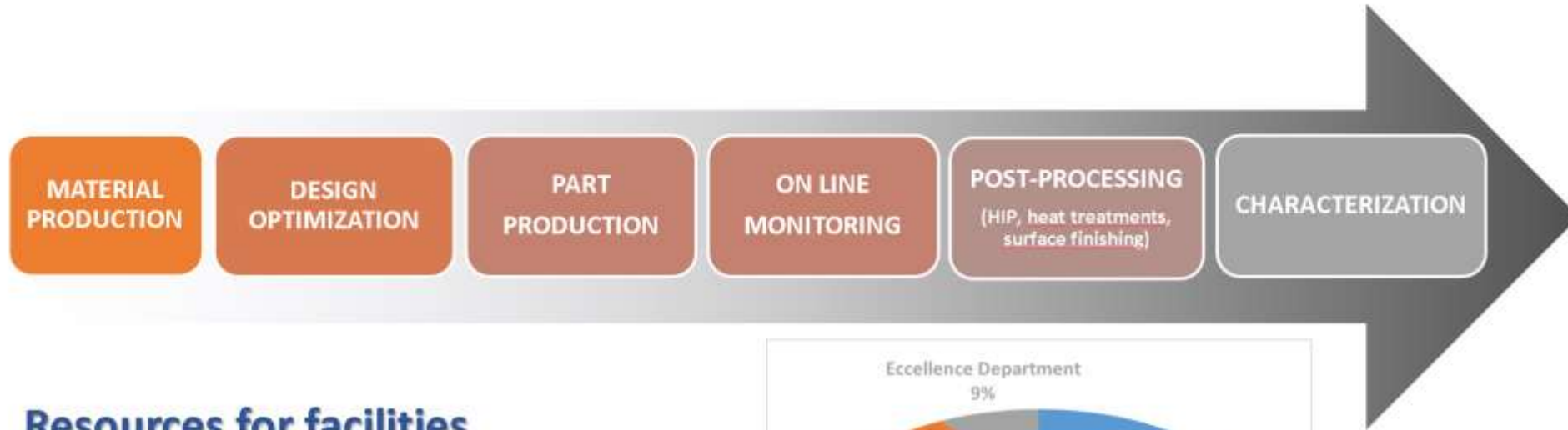
- ✓ Il **Centro IAM@Polito** e il **CIM 4.0** operano in modo integrato e sono punti di riferimento internazionali per la tecnologia di additive manufacturing per la dotazione di attrezzature, l'attività di ricerca e trasferimento tecnologico e l'offerta formativa.
- ✓ L'ampia dotazione hardware **(30 sistemi di cui 22 presso il Centro IAM, 8 presso il CIM 4.0)** e software, consente di sviluppare attività di ricerca e trasferimento tecnologico da TRL 1 a TRL 9 a 360° sull'AM: dalla produzione delle polveri al collaudo dei componenti con la tomografia.
- ✓ L'attività di formazione comprende **l'Orientamento in Fabbricazione Additiva** per la laurea magistrale in Ing. Meccanica, numerosi corsi di III Livello per il **Dottorato di Ricerca**, il **Master di II livello in Additive Manufacturing** e la **CIM Academy** per l'up-skill e il re-skill del personale aziendale.

MODALITA' OPERATIVE



METAL & POLYMER

SUPPLY CHAIN



Resources for facilities
€ 6.500.000,00

Resources for people
€ 600.000



METAL INVESTMENTS



POLYMER

INVESTMENTS

Stereolithography



Direct Light Processing



N° 3
Systems

Polyjet



Photopolymers

Materials
development

Selective Laser Sintering

EOS Formiga



Sinterit Lisa X



Materials

Nylon
Nylon glass filled
Nylon Al filled
Nylon carbon filled

Fused Deposition Modeling



N° 2
3ntr A4



Stratasys
Dimension
Elite



Stratasys
F370



Markforged
Mark Two



CreatBot
PEEK - 300



Materials

ABS M30
ABS ASA
PC-ABS
PLA
HIPS
Nylon Carbon
PA66 GF
PETG
TPU
Nylon
Onyx
Carbon fiber
Fiberglass
Kevlar
PEEK
Carbon PEEK
ULTEM

CERAMIC

INVESTMENTS



Direct Light Processing



Materials

Photopolymer + Ceramic

CHARACTERIZATION

INVESTMENTS



Scan Box



Equator



Computer Tomography



GOM Atos Core



SEM Microscope



Sistema per la
valutazione delle
tensioni residue

Metallo



Print Genius 250, 2 laser
262 x 262 x 350 mm



Print Sharp 150 in kind
φ 150mm, h 160 mm

Laser Letto di Polvere



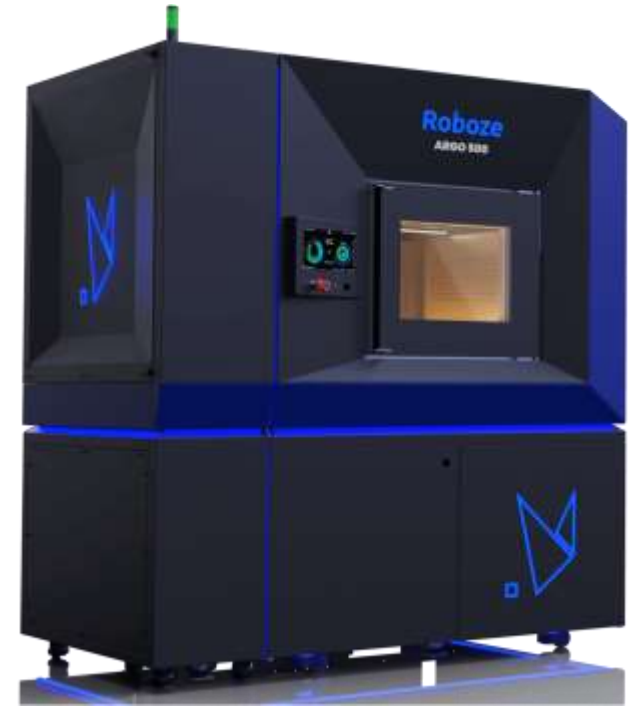
EOSINT M 400, 4 laser
400 x 400 x 400 mm

Laser Deposizione di Polvere



Laserdyne 811, 5 assi
1000 x 800 x 600 mm

Polimero



ARGO 500

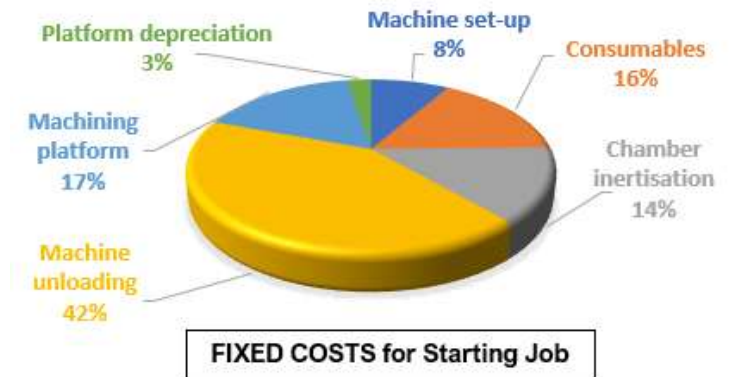
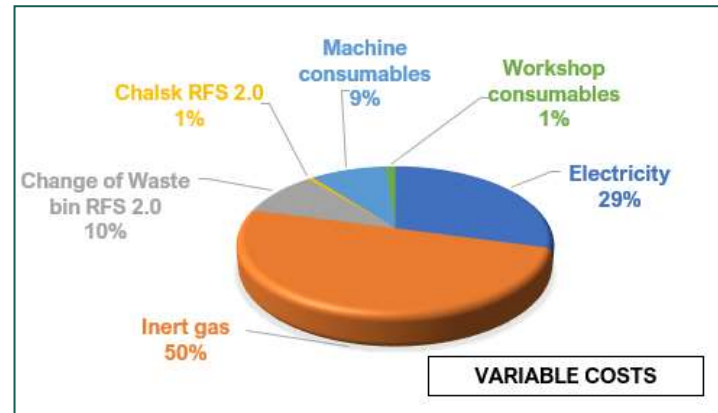
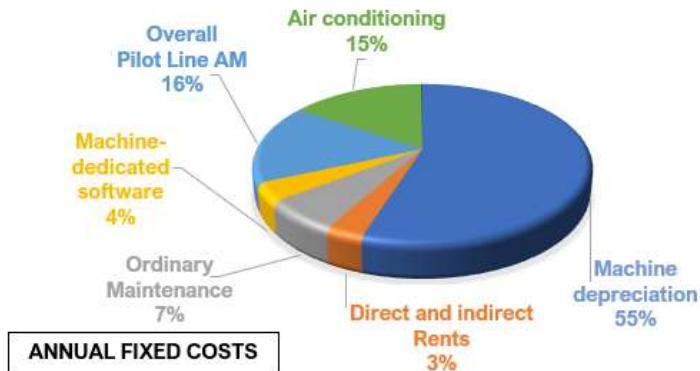
Materials: PEKK, PEKK 2005, Carbon
PEKK, Carbon PA, ULTEM



Centro di costo: EOS M400-4

Materiale: AlSi10Mg alloy

Spessore layer: 30 μ m



Fortemente **dependente** dalla **produttività**
(tempo di costruzione T_{job})

Modellazione dei costi fortemente dipendente dal processo e **diversa** dalla **fabbricazione tradizionale**

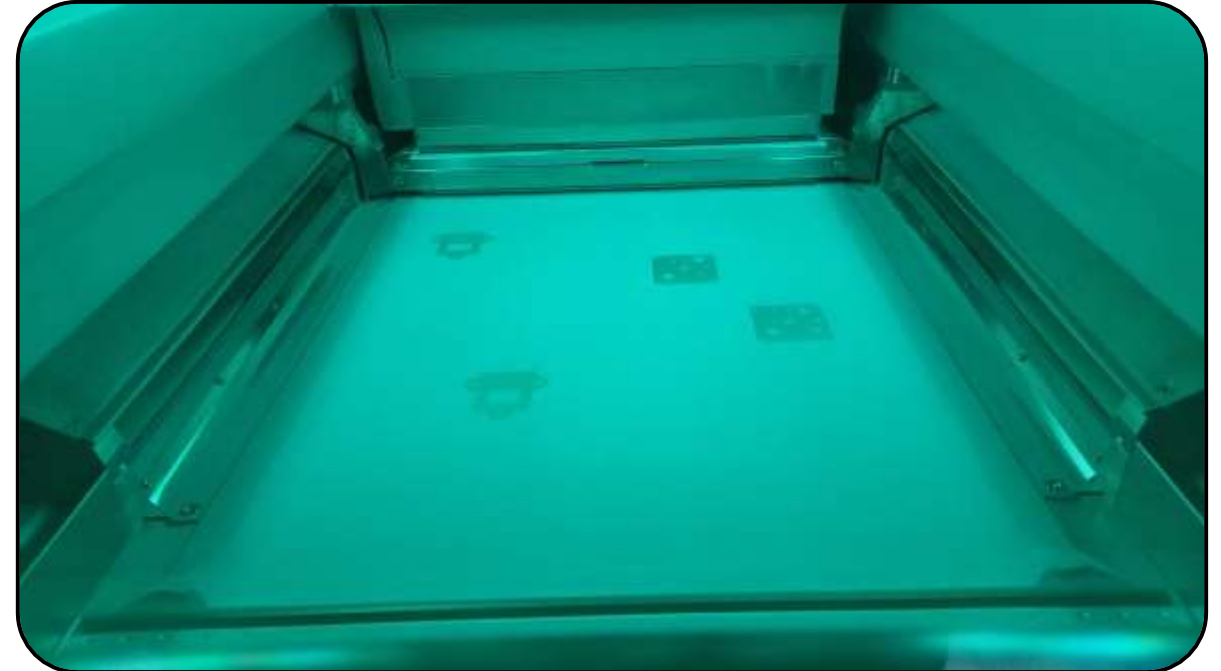
$$T_{job} = \sum_{i=1}^n (T_{Recoating,i} + T_{Esposizione,i}) \quad i = \text{conteggio layer}$$

h_{job} (blue) is associated with $T_{Recoating,i}$ and includes:

- Direzioni di stesura polvere
- Spessore layer

$V_{(parte+supporti)}$ (orange) is associated with $T_{Esposizione,i}$ and includes:

- Orientazione
- Parametri di processo
- Geometria



LASER SPENTO

Tempo di Recoating: definito come il tempo che intercorre tra lo spegnimento e la riaccensione del laser. Durante questo periodo di tempo, si verificano i movimenti degli assi e la stesura della polvere.

LASER ACCESO

Tempo di Esposizione: definito come il tempo in cui il laser è attivo e si verifica la fusione dello strato di polvere.

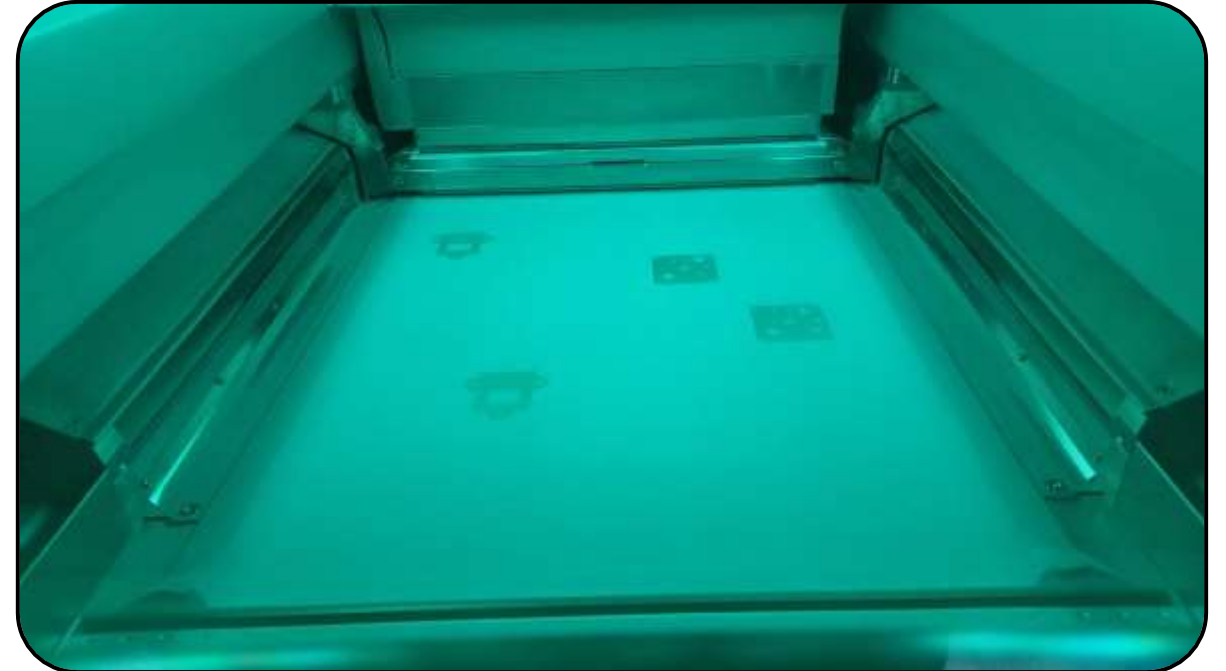
$$T_{job} = \sum_{i=1}^n (T_{Recoating,i} + T_{Esposizione,i}) \quad i = \text{conteggio layer}$$

h_{job} (blue) is associated with $T_{Recoating,i}$ and includes:

- Direzioni di stesura polvere
- Spessore layer

$V_{(parte+supporti)}$ (orange) is associated with $T_{Esposizione,i}$ and includes:

- Orientazione
- Parametri di processo
- Geometria



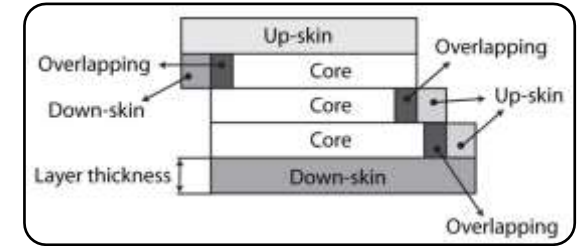
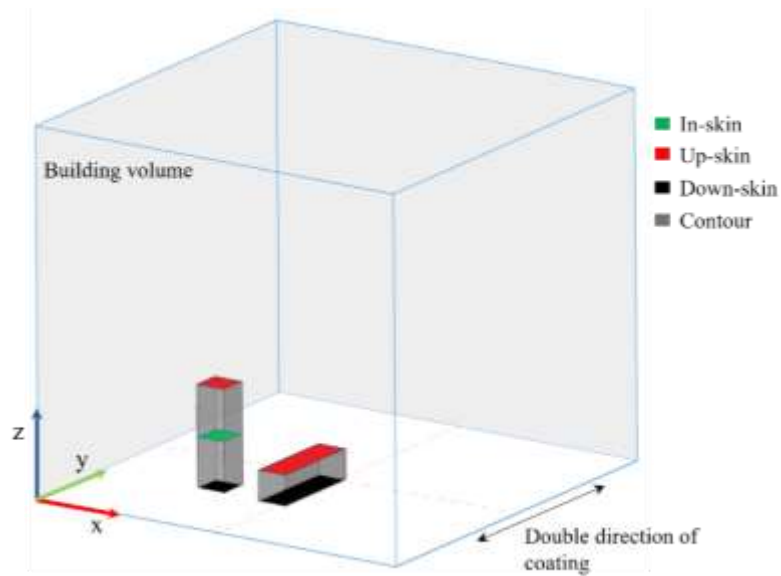
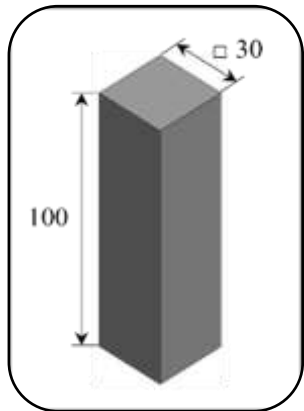
$$Produttività_{teorica} = v * h_d * t$$

v = velocità di scansione
 h_d = distanza di hatching
 t = spessore layer

$$Produttività_{effettiva} = \frac{Volume_i}{Tempo Esposizione_i}$$

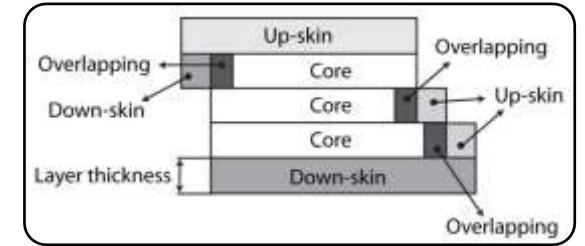
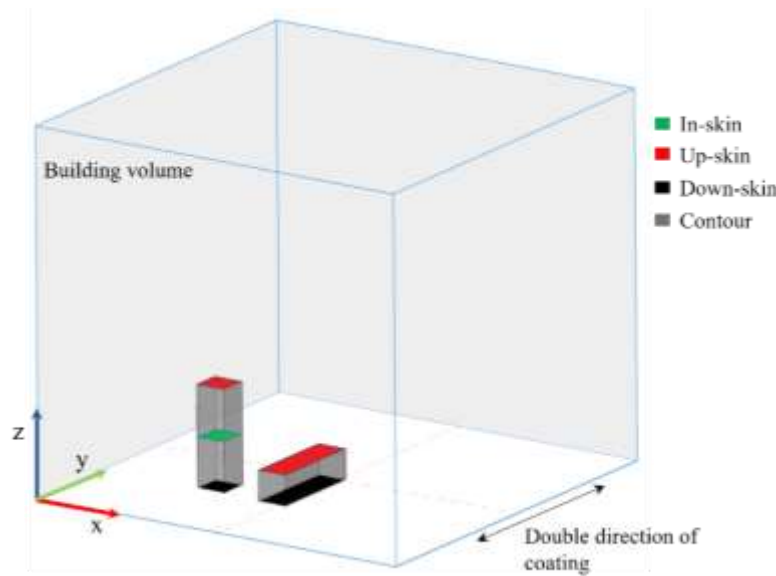
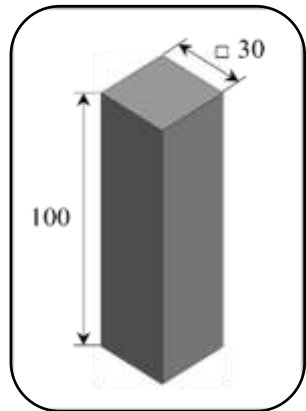
i = parte
 $Tempo Esposizione_i$ (da simulazione software)

Campione di prova



ORIENTAZIONE	Numero LAYER	SINGOLO RECOATING		DOPPIO RECOATING	
		<i>Tempo Esposizione</i>	<i>Tempo Recoating</i>	<i>Tempo Esposizione</i>	<i>Tempo Recoating</i>
		[h]	[h]	[h]	[h]
VERTICALE	3333	4.05	13.75	4.05	6.45
ORIZZONTALE	1000	3.95	4.12	3.95	1.93

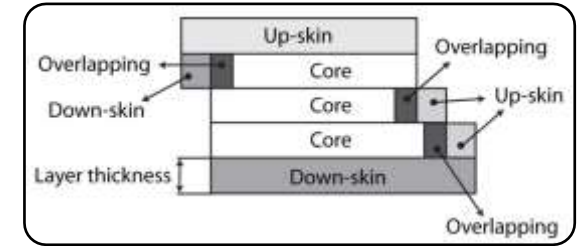
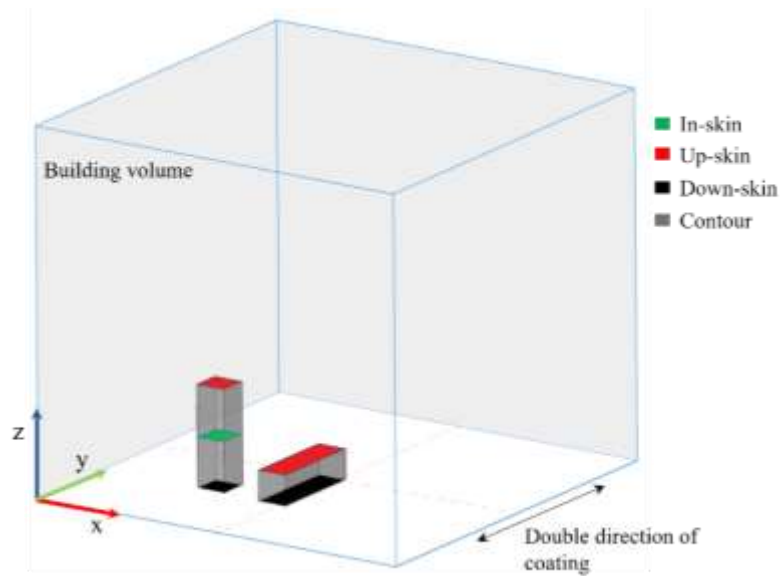
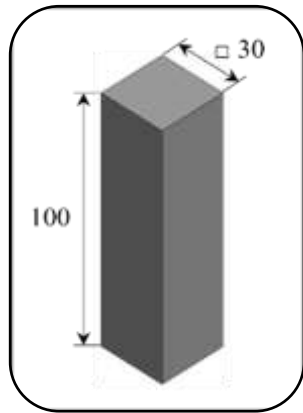
Campione di prova



ORIENTAZIONE	Numero LAYER	SINGOLO RECOATING		DOPPIO RECOATING	
		<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]	<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]
VERTICALE	3333	4.05	13.75	4.05	6.45
ORIZZONTALE	1000	3.95	4.12	3.95	1.93

Lo stesso pezzo con orientazioni diverse sarà prodotto con tempi di esposizione diversi

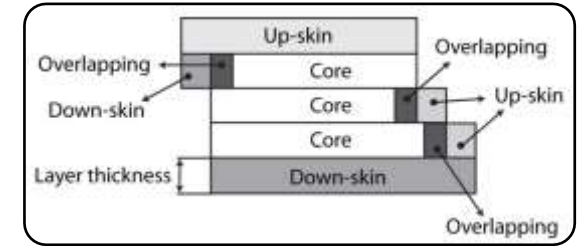
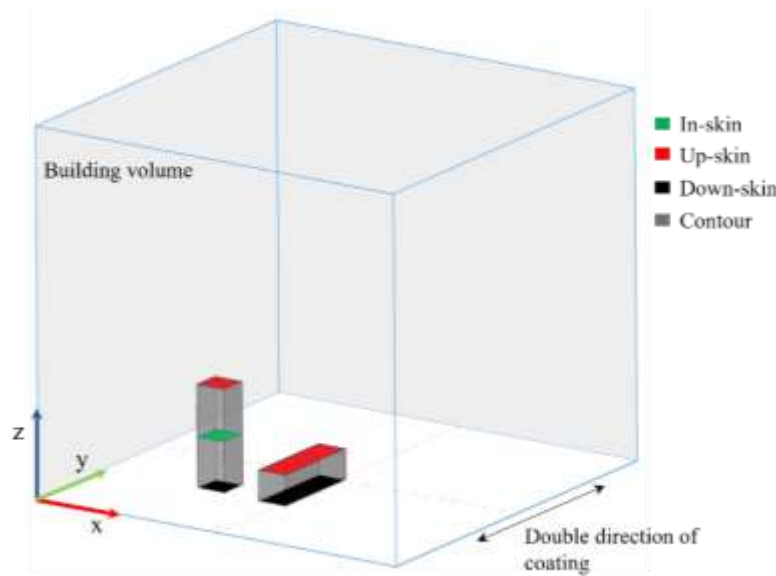
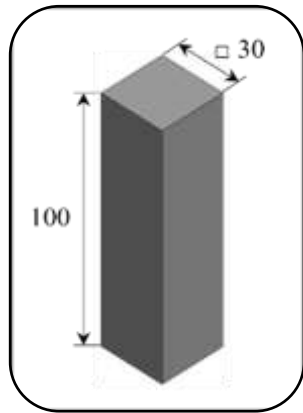
Campione di prova



ORIENTAZIONE	Numero LAYER	SINGOLO RECOATING		DOPPIO RECOATING	
		<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]	<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]
VERTICALE	3333	4.05	13.75	4.05	6.45
ORIZZONTALE	1000	3.95	4.12	3.95	1.93

Il Tempo di Recoating diminuisce di circa tre volte passando dall' orientazione verticale a quella orizzontale

Campione di prova

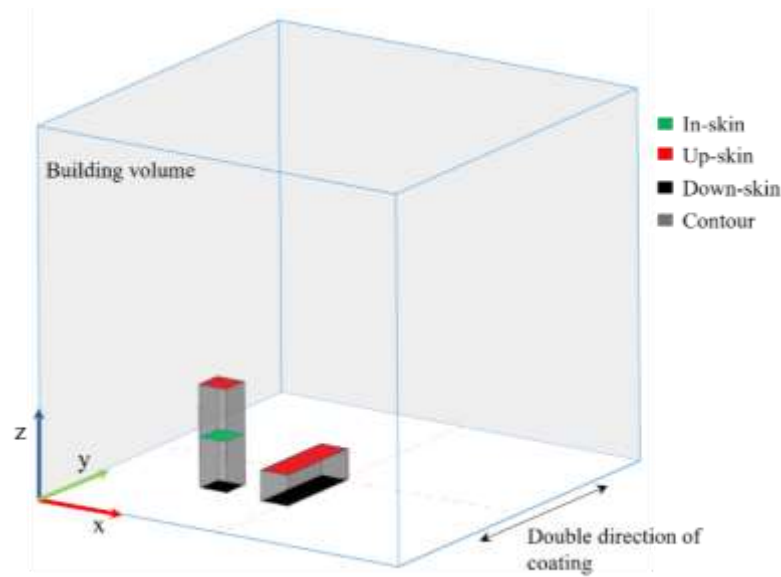
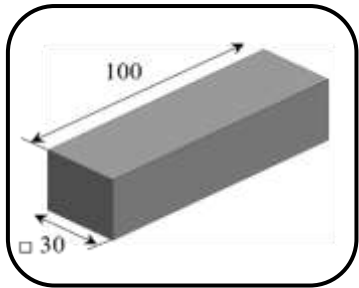


ORIENTAZIONE	Numero LAYER	SINGOLO RECOATING		DOPPIO RECOATING	
		<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]	<i>Tempo Esposizione</i> [h]	<i>Tempo Recoating</i> [h]
VERTICALE	3333	4.05	13.75	4.05	6.45
ORIZZONTALE	1000	3.95	4.12	3.95	1.93

Il tempo di Recoating può essere dimezzato con la doppia direzione di stesura della polvere



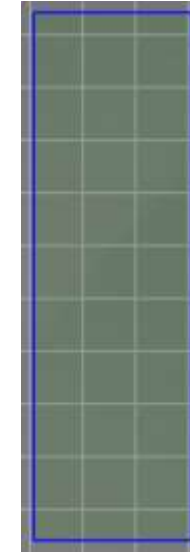
Campione di prova



Stripe



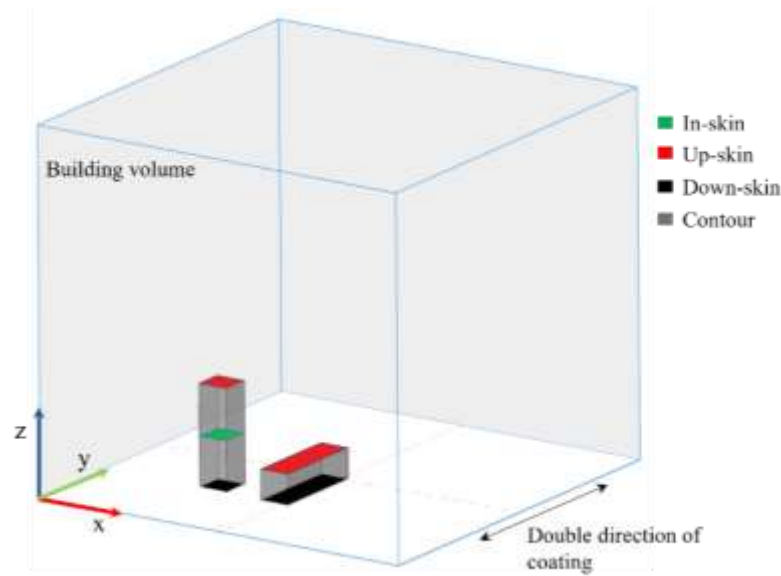
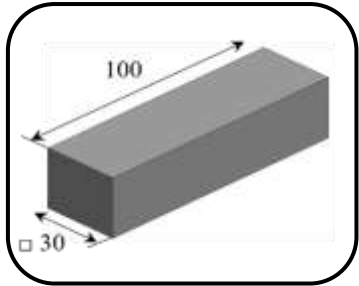
Riempimento semplice



CONDIZIONI	TIPO DI ESPOSIZIONE				MODELLO DI ESPOSIZIONE		Tempo Esposizione [h]	Produttività _{effett} [cm ³ /h]	Produttività _{teor} [cm ³ /h]
	<i>In-skin</i>	<i>Up-skin</i>	<i>Down-skin</i>	<i>Contour</i>	<i>Stripe</i>	<i>Semplice</i>			
I	✓	✓	✓	✓	✓	-	3.95	22.78	
II	✓	-	-	-	✓	-	3.78	23.81	26.68
III	✓	-	-	-	-	✓	3.42	26.32	



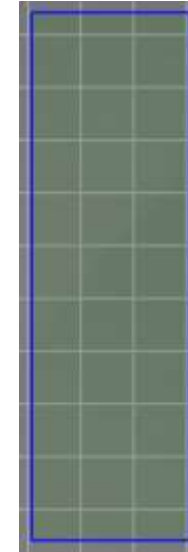
Campione di prova



Stripe



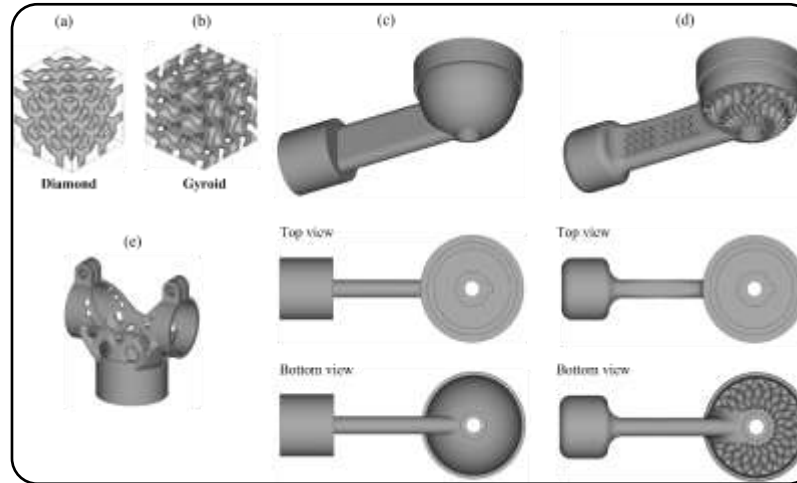
Riempimento semplice



CONDIZIONI	TIPO DI ESPOSIZIONE				MODELLO DI ESPOSIZIONE		Tempo Esposizione [h]	$Produttività_{effett}$ [cm ³ /h]	$Produttività_{teor}$ [cm ³ /h]
	<i>In-skin</i>	<i>Up-skin</i>	<i>Down-skin</i>	<i>Contour</i>	<i>Stripe</i>	<i>Semplice</i>			
I	✓	✓	✓	✓	✓	-	3.95	22.78	
II	✓	-	-	-	✓	-	3.78	23.81	26.68
III	✓	-	-	-	-	✓	3.42	26.32	

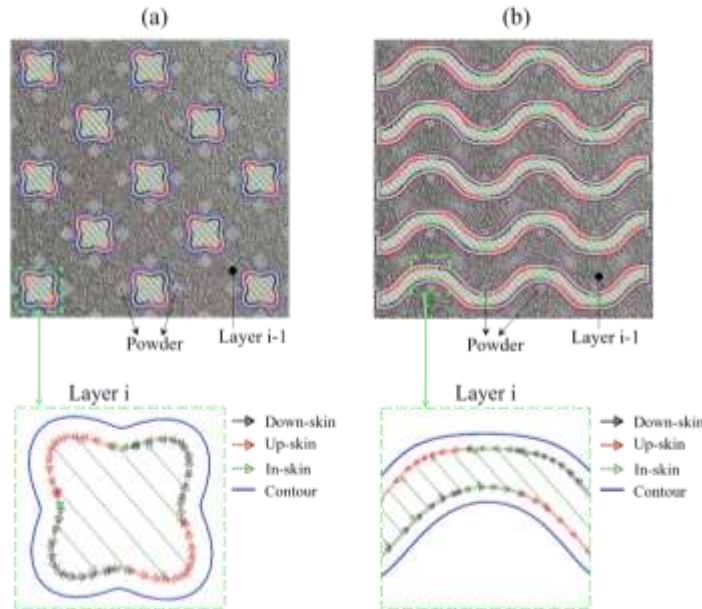
La formula teorica si riferisce solo ai parametri *in-skin*, con riempimento semplice.

Campioni di prova



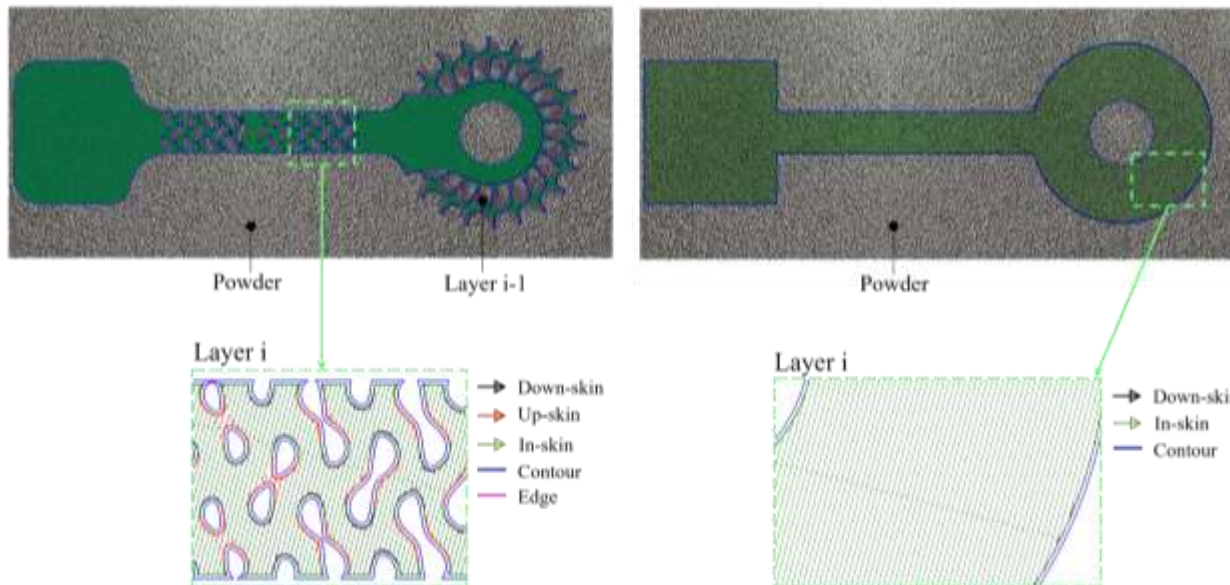
COMPONENTE	Volume [cm ³]	Tempo Recoating [h]	Tempo Esposizione _{teo} [h]	Tempo Esposizione _{effett} [h]	Produttività _{teo} <i>r</i> [cm ³ /h]	Produttività _{effett} [cm ³ /h]	Costo _{teo} [€]	Costo _{effett} [€]
(a) Diamond	0.26	0.63	0.01	0.03	26.68	7.71	29	30
(b) Gyroid	0.49	0.63	0.02	0.07		7.33	29	32
(c) Replicato con AM	46.19	2.37	1.73	2.30		20.08	185	210
(d) Ottimizzato per AM	40.77	2.37	1.53	2.37		17.23	176	213
(e) Adattato per AM	13.90	4.93	0.52	0.98		14.14	245	266

COMPONENTE	Volume [cm ³]	Tempo Recoating [h]	Tempo Esposizione _{teor} [h]	Tempo Esposizione _{effett} [h]	Produttività _{teor} <i>r</i> [cm ³ /h]	Produttività _{effett} [cm ³ /h]	Costo _{teor} [€]	Costo _{effett} [€]
(a) <i>Diamond</i>	0.26	0.63	0.01	0.03	26.68	7.71	29	30
(b) <i>Gyroid</i>	0.49	0.63	0.02	0.07		7.33	29	32
(c) <i>Replicato con AM</i>	46.19	2.37	1.73	2.30		20.08	185	210
(d) <i>Ottimizzato per AM</i>	40.77	2.37	1.53	2.37		17.23	176	213
(e) <i>Adattato per AM</i>	13.90	4.93	0.52	0.98		14.14	245	266



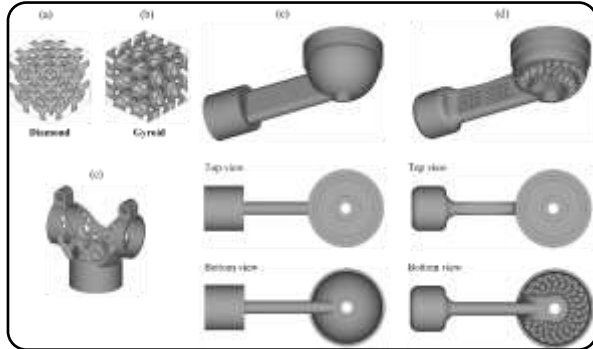
Le strutture *lattice in realtà* aumentano il tempo di esposizione e riducono la produttività.

COMPONENTE	Volume [cm ³]	Tempo Recoating [h]	Tempo Esposizione _{teor} [h]	Tempo Esposizione _{effett} [h]	Produttività _{teor} r [cm ³ /h]	Produttività _{effett} [cm ³ /h]	Costo _{teor} [€]	Costo _{effett} [€]
(a) <i>Diamond</i>	0.26	0.63	0.01	0.03	26.68	7.71	29	30
(b) <i>Gyroid</i>	0.49	0.63	0.02	0.07		7.33	29	32
(c) <i>Replicato con AM</i>	46.19	2.37	1.73	2.30		20.08	185	210
(d) <i>Ottimizzato per AM</i>	40.77	2.37	1.53	2.37		17.23	176	213
(e) <i>Adattato per AM</i>	13.90	4.93	0.52	0.98		14.14	245	266



Le strutture lattice riducono la produttività

Campioni di prova

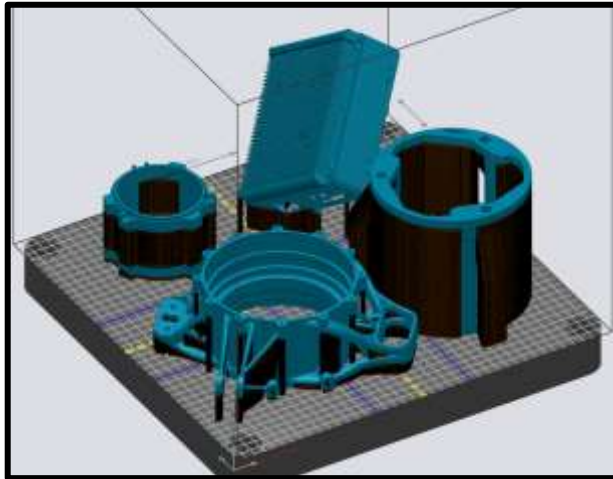


COMPONENTE	Volume [cm ³]	Tempo Recoating [h]	Tempo Esposizione _{teor} [h]	Tempo Esposizione _{effett} [h]	Produttività _{teo} <i>r</i> [cm ³ /h]	Produttività _{effett} [cm ³ /h]	Costo _{teor} [€]	Costo _{effett} [€]
<i>(a) Diamond</i>	0.26	0.63	0.01	0.03		7.71	29	30
<i>(b) Gyroid</i>	0.49	0.63	0.02	0.07		7.33	29	32
<i>(c) Replicato con AM</i>	46.19	2.37	1.73	2.30	26.68	20.08	185	210
<i>(d) Ottimizzato per AM</i>	40.77	2.37	1.53	2.37		17.23	176	213
<i>(e) Adattato per AM</i>	13.90	4.93	0.52	0.98		14.14	245	266

Il **costo di produzione** di un componente, senza i costi di preparazione della macchina e di post-lavorazione, **varia a seconda di come viene calcolata la produttività**.


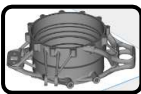


Un modello di costo basato sul volume dei pezzi [€/cm³] non è adatto a questa tecnologia!

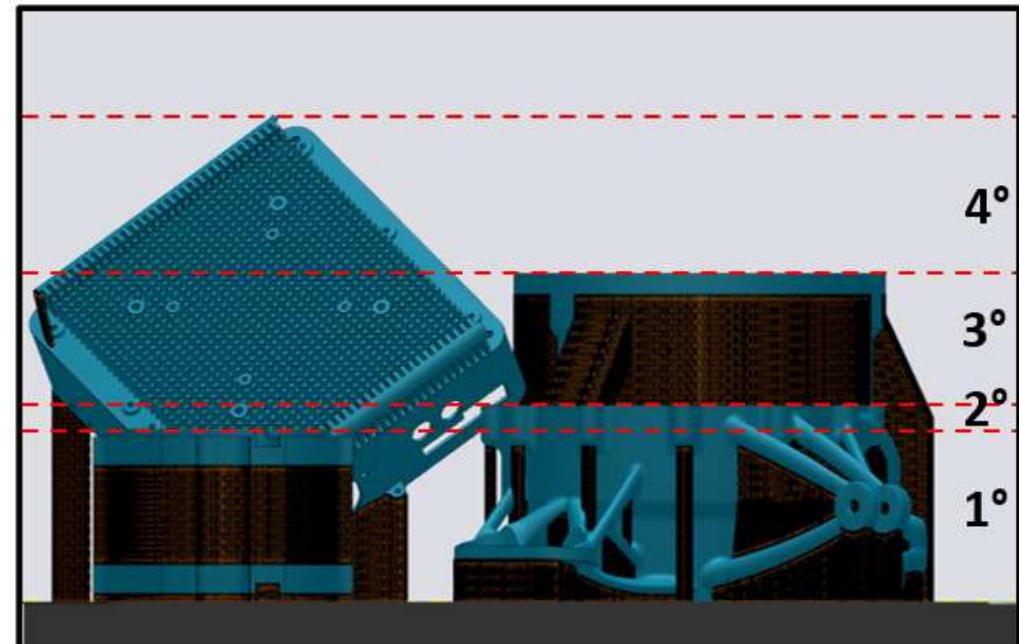
Componenti



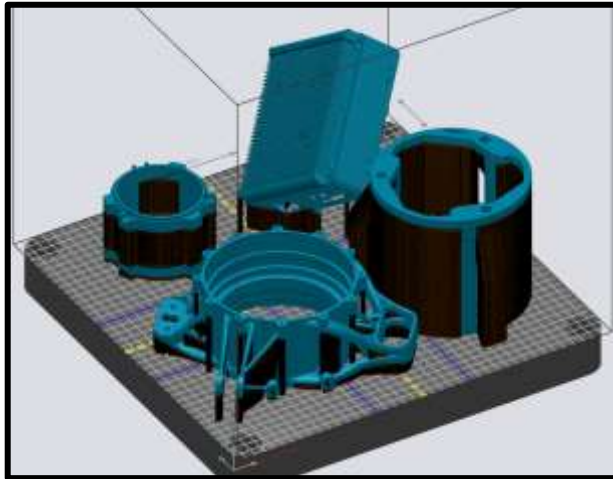
RECOATING

$$\text{Tempo Recoating}_{Job} * \text{Costo orario} = \text{Costo Recoating}_{Job} [€]$$

				
1° livello - (4 componenti)	✓	✓	✓	✓
2° livello - (3 componenti)		✓	✓	✓
3° livello - (2 componenti)			✓	✓
4° livello - (1 componente)				✓



Componenti



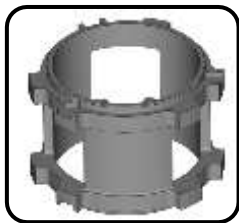
ESPOSIZIONE

$$\text{Tempo Esposizione}_{job} * \text{Costo orario} = \text{Costo Esposizione}_{job} [\text{€}]$$

Simulazione Software \longrightarrow *Tempo Esposizione_i* $i = \text{componente}$

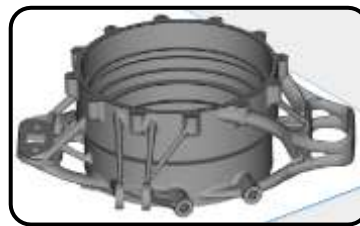
$$\text{Produttività}_{effettiva} = \frac{\text{Volume}_i}{\text{Tempo Esposizione}_i} = \left[\frac{\text{cm}^3}{h} \right]$$

1



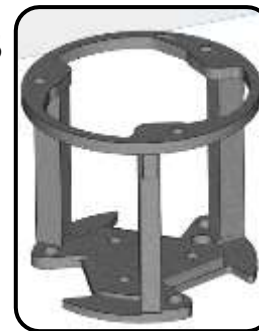
$$\text{Produttività}_{eff} = 18,7 \frac{\text{cm}^3}{h}$$

2



$$\text{Produttività}_{eff} = 18,5 \frac{\text{cm}^3}{h}$$

3



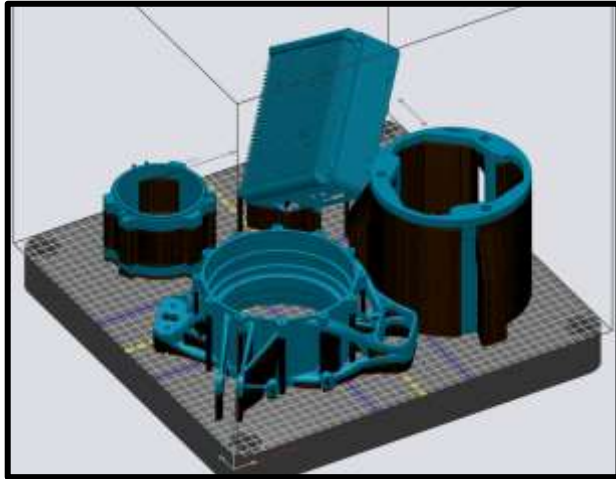
$$\text{Produttività}_{eff} = 21,2 \frac{\text{cm}^3}{h}$$

4



$$\text{Produttività}_{eff} = 10,5 \frac{\text{cm}^3}{h}$$

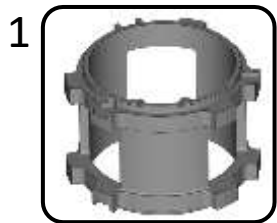
Componenti



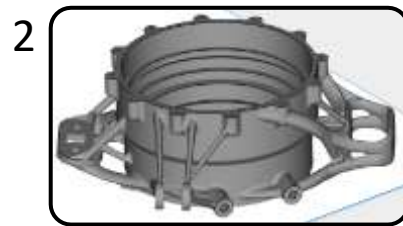
$$\text{Costo Recoating}_i + \text{Costo Esposizione}_i = \text{Costo Componente}_i \text{ [€]}$$

Componente	Assegnazione dei Costi		
	Modello proposto	Modello basato su Volume	Modello basato su Altezza
1	9 %	10 %	15 %
2	25 %	38 %	17 %
3	31 %	33 %	28 %
4	35 %	19 %	40 %

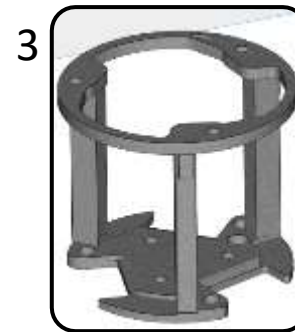
Costo job = 100%



$$\text{Produttività}_{eff} = 18,7 \frac{\text{cm}^3}{h}$$



$$\text{Produttività}_{eff} = 18,5 \frac{\text{cm}^3}{h}$$



$$\text{Produttività}_{eff} = 21,2 \frac{\text{cm}^3}{h}$$



$$\text{Produttività}_{eff} = 10,5 \frac{\text{cm}^3}{h}$$



- Le **strutture lattice**, che negli ultimi anni sono state viste come la soluzione migliore per alleggerire un componente e allo stesso tempo ridurre i tempi di costruzione per via della minore quantità di materiale, in realtà aumentano i tempi di esposizione e quindi **diminuiscono la produttività**.
- *Produttività_{effettiva}* è strettamente legata alla **strategia di scansione**, alla **geometria** e all'**orientazione** dei componenti. Pertanto, la produttività effettiva è diversa per ogni componente. L'utilizzo di [€/cm³] porta a un calcolo dei costi non corretto.
- Per una valutazione corretta e realistica dei costi è necessario personale specializzato nel processo di manifattura additiva.