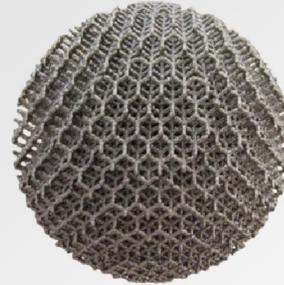


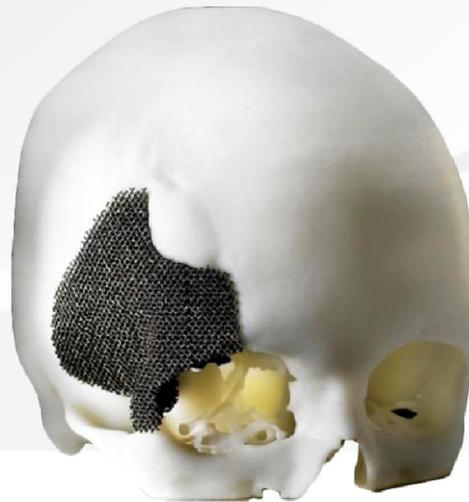
Fabbricazione additiva (FA) di prodotti finali

In alcuni settori la fabbricazione additiva è già una realtà, non solo per prodotti fortemente personalizzati, ma anche per produzioni in piccole serie con riduzione dei tempi e dei costi rispetto ai processi tradizionali.

Negli ultimi anni, la continua ricerca sui materiali per la fabbricazione additiva ha consentito la commercializzazione di nuove polveri metalliche adeguate per la produzione di prodotti definitivi nei settori aerospaziale, dentale e medicale.



Courtesy of EOS GmbH



Courtesy of Morris Technologies Inc.

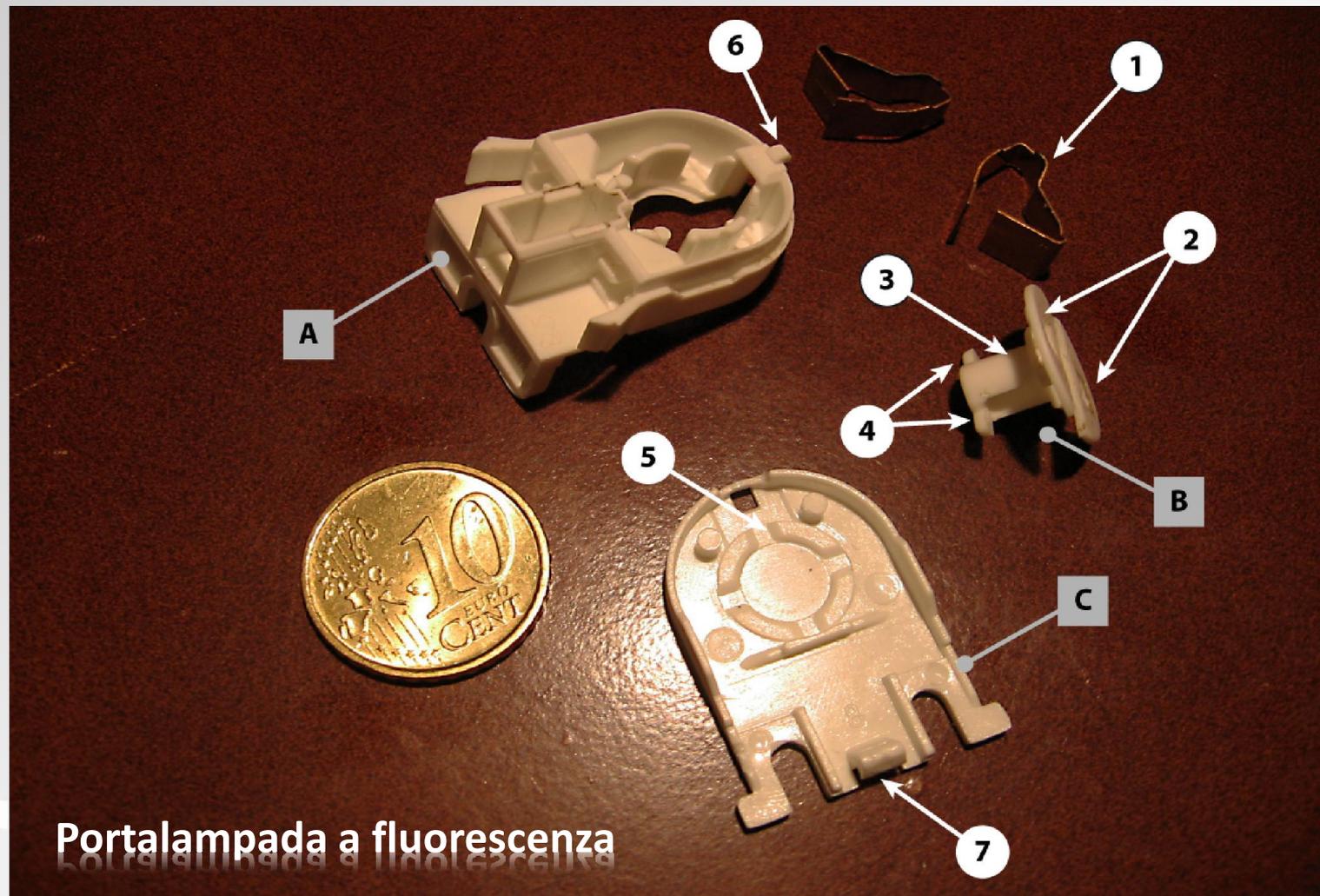
Sommario

- Questo studio è indirizzato a valutare se la **fabbricazione additiva** (AM – *Additive Manufacturing*) può essere un'alternativa economicamente conveniente ai processi produttivi tradizionali.
- A questo scopo vengono **confrontate** diverse tecnologie produttive dal punto di vista economico. La fabbricazione additiva viene considerata come alternativa allo stampaggio a iniezione alla pressofusione o alle lavorazioni per asportazione di truciolo nella produzione di componenti in polimero o metallo ad elevata complessità e con elevate richieste dal punto di vista delle proprietà meccaniche.
- Questo studio metterà in evidenza come la **riprogettazione** del componente consenta di sfruttare pienamente il potenziale delle tecnologie additive in termini di opportunità progettuali ed economicità.
- A tale scopo le linee guida per la riprogettazione e i modelli di costo noti in letteratura saranno applicati a due componenti scelti come caso di studio. Verrà inoltre identificato il **punto di pareggio** nell'utilizzo delle diverse tecnologie in funzione del volume produttivo.

La progettazione per la fabbricazione additiva (DFAM)

- I principi della **progettazione per la fabbricazione additiva** (Design For Additive Manufacturing – DFAM) e le modifiche rispetto ai processi di produzione tradizionali sono già stati delineati da diversi ricercatori (Hague *et al.*, 2003; Becker *et al.*, 2005).
- Gibson *et al.* (2010) hanno definito lo **scopo** del DFAM come “la massimizzazione delle prestazioni de prodotto attraverso una sintesi delle forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive”.
- Per perseguire tali obiettivi i **progettisti** devono considerare che:
 - la FA consente di avere sottosquadri, spessore di parete variabile e canali profondi e di geometria complessa;
 - attraverso la FA è possibile produrre componenti con complessità geometrica illimitata, che ammette forme contorte e svergolate, fori ciechi e filettature/viti con un elevato rapporto resistenza/peso;
 - La FA consente la riduzione del numero di parti: è possibile produrre direttamente un assemblato come unico componente integrando giunti e cerniere.

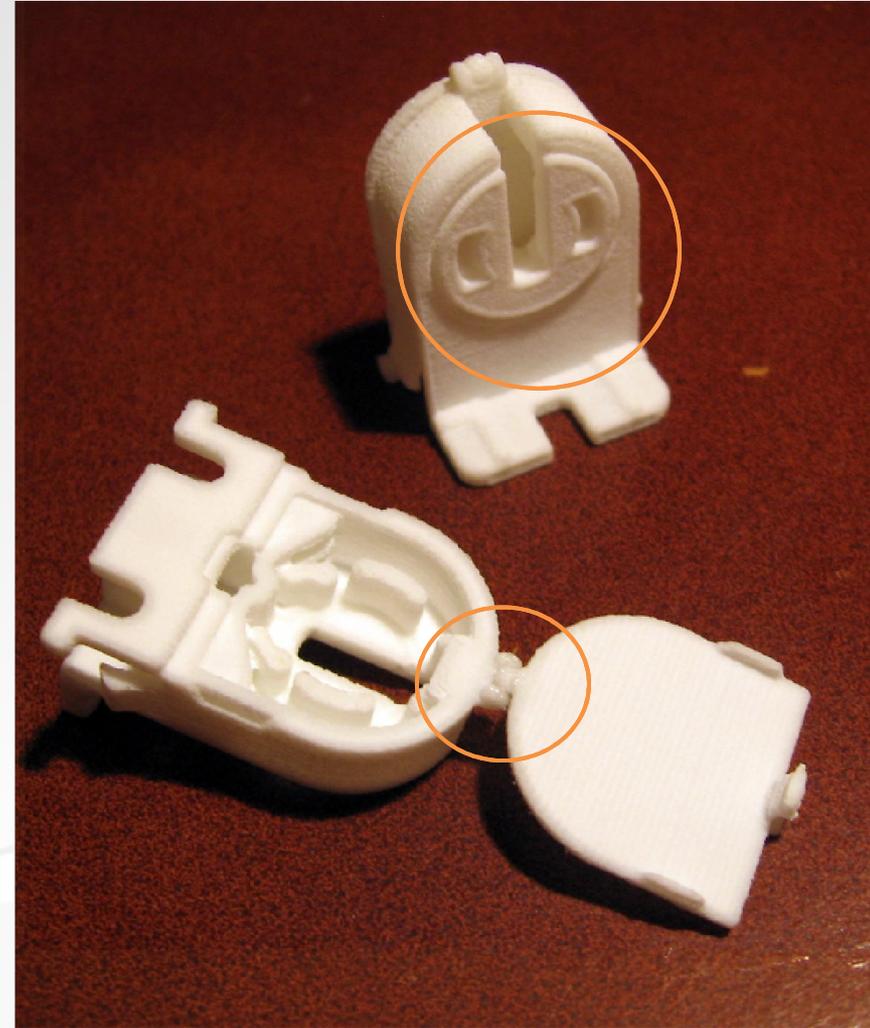
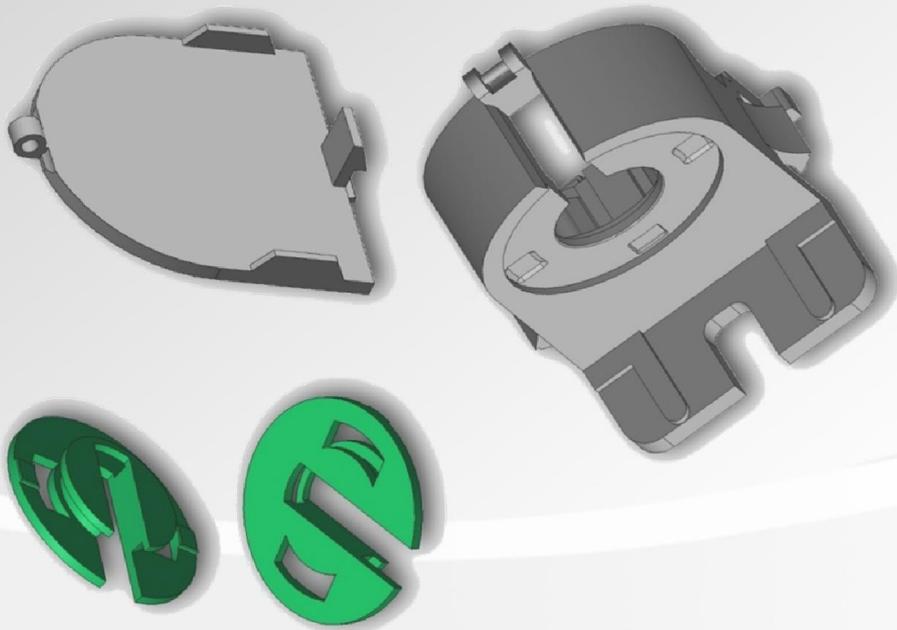
Primo Caso di studio



Portalampana a fluorescenza

Riprogettazione

- Nottolino realizzato in stato assemblato con la conseguente eliminazione dell'elemento flessibile
- Coperchio collegato alla base con cerniera e ridotto alla sola sede dei contatti
- Appoggio per fissaggio invariato



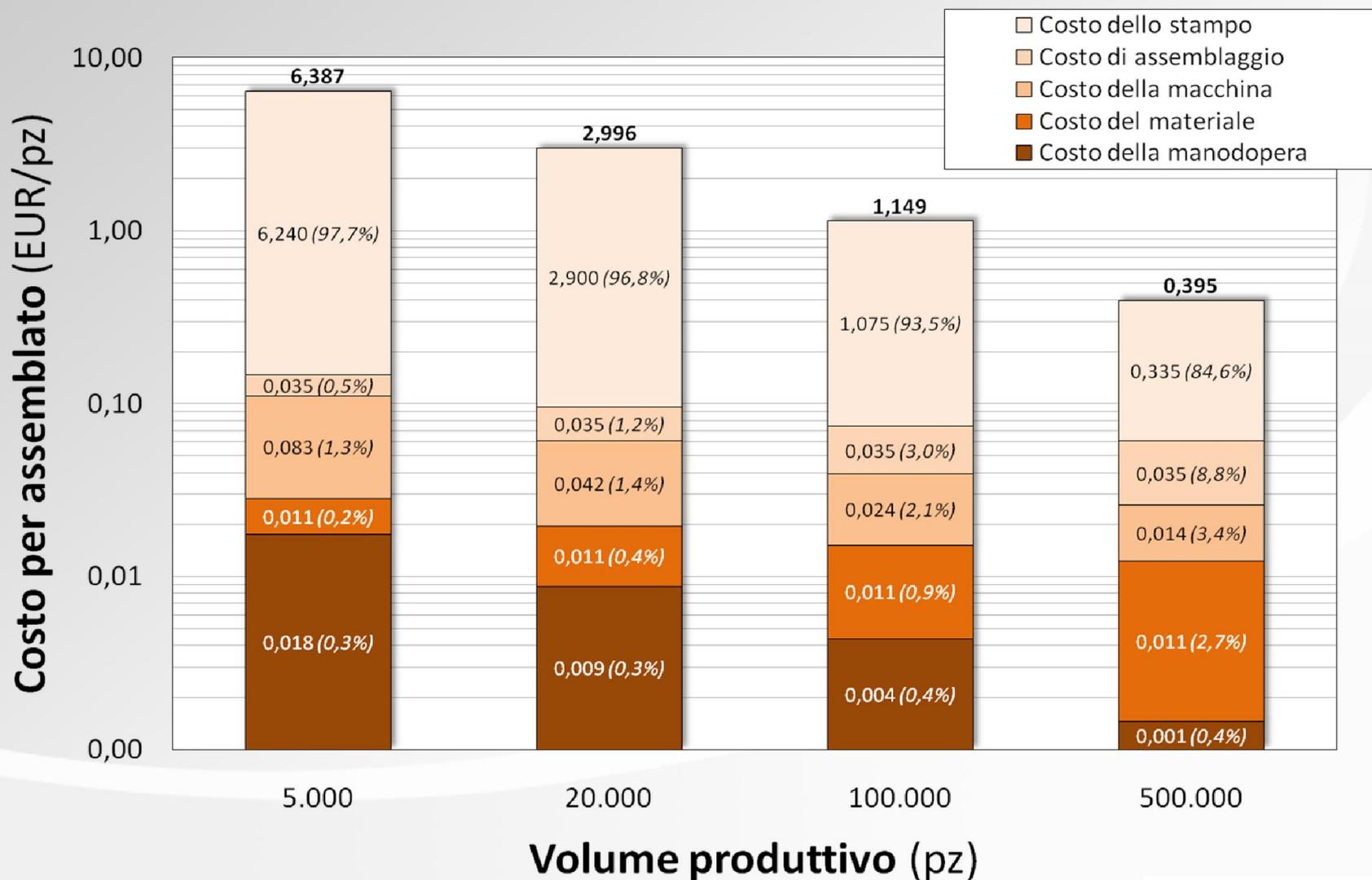
Analisi dei costi – Assunzioni

- L'analisi è condotta considerando un *medio volume produttivo*
- Si ipotizza che *l'intero volume di lavoro della macchina di FA sia utilizzato* per la produzione dei componenti, pertanto il costo di produzione risulta costante.
- Sono stati presi in considerazione in questo studio i soli fattori di costo che si ripercuotono direttamente sul costo del componente:
 - costo del materiale
 - costo del processo (costo macchina, manodopera, post-processing)
 - costo delle attrezzature
- Si è inoltre tenuto conto del *costo di assemblaggio*. In particolare si è considerata un'operazione di assemblaggio manuale che avvenga presso uno stabilimento in Europa Occidentale.
- Non si è tenuto conto dei costi amministrativi, così come dell'energia, dell'occupazione spazi e degli equipaggiamenti ausiliari. Studi precedenti mostrano che tali costi possono incidere per il 10% sul costo del componente.

Analisi dei tempi e dei costi: Stampaggio a Iniezione

Volume produttivo	(pz)	V	
Costo orario della macchina	(EUR/ora)	CH	
Tempo ciclo	(ore)	T	
Numero di impronte	(-)	N	
Costo della macchina per pezzo	(EUR)	CP	CH × T/N
Costo orario della manodopera	(EUR/ora)	O	
% tempo presenza operatore		P	
Costo della manodopera per pezzo	(EUR)	OP	O × T/N
Costo del materiale al kg	(EUR/kg)	M	
Peso del pezzo	(kg)	W	
Costo del materiale per pezzo	(EUR)	MP	W × M
Costo dello stampo	(EUR)	K	
Costo dello stampo per pezzo	(EUR)	KP	K/V
Costo pezzo	(EUR)	P	CP+OP+MP+KP

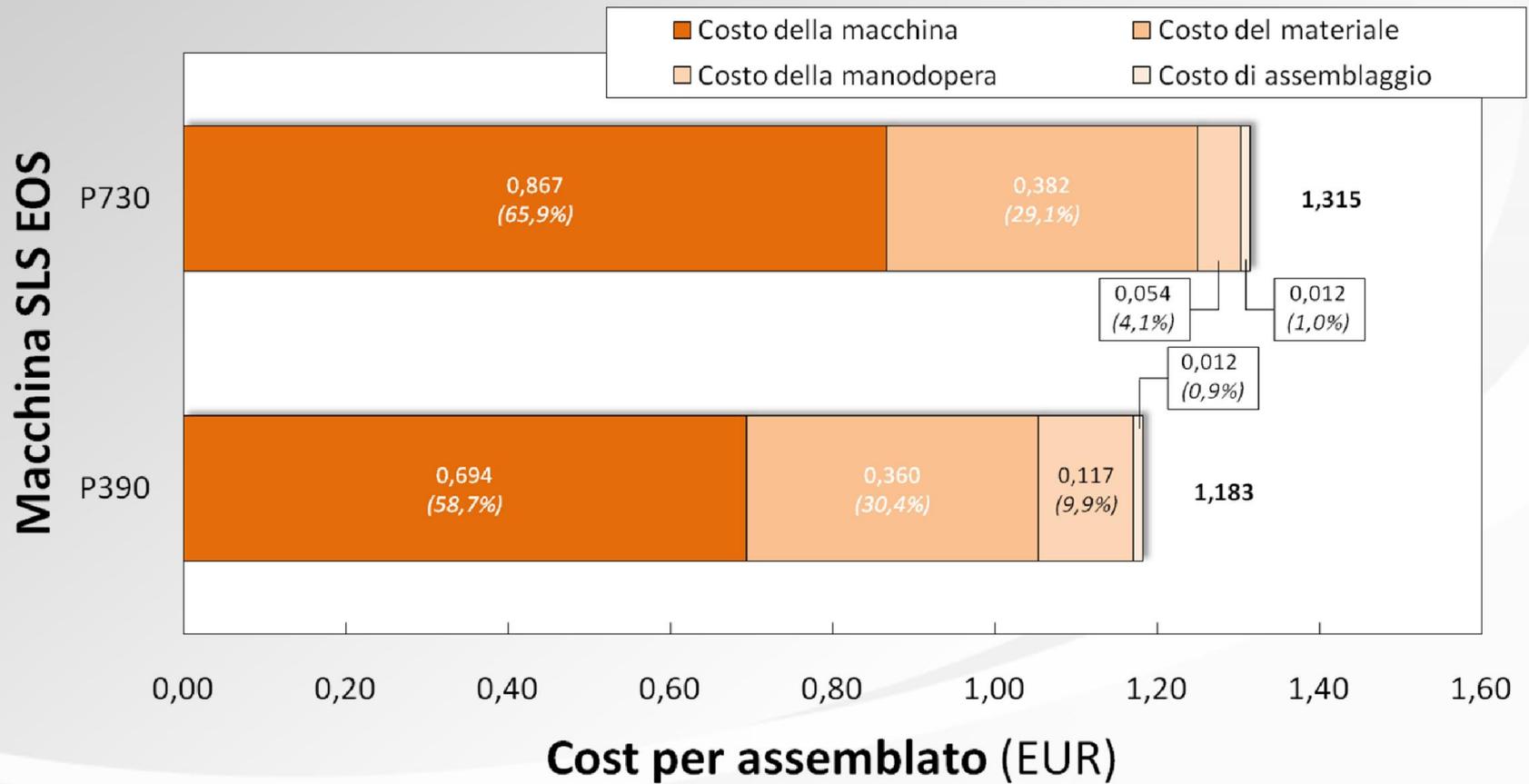
Analisi dei tempi e dei costi: Stampaggio a Iniezione



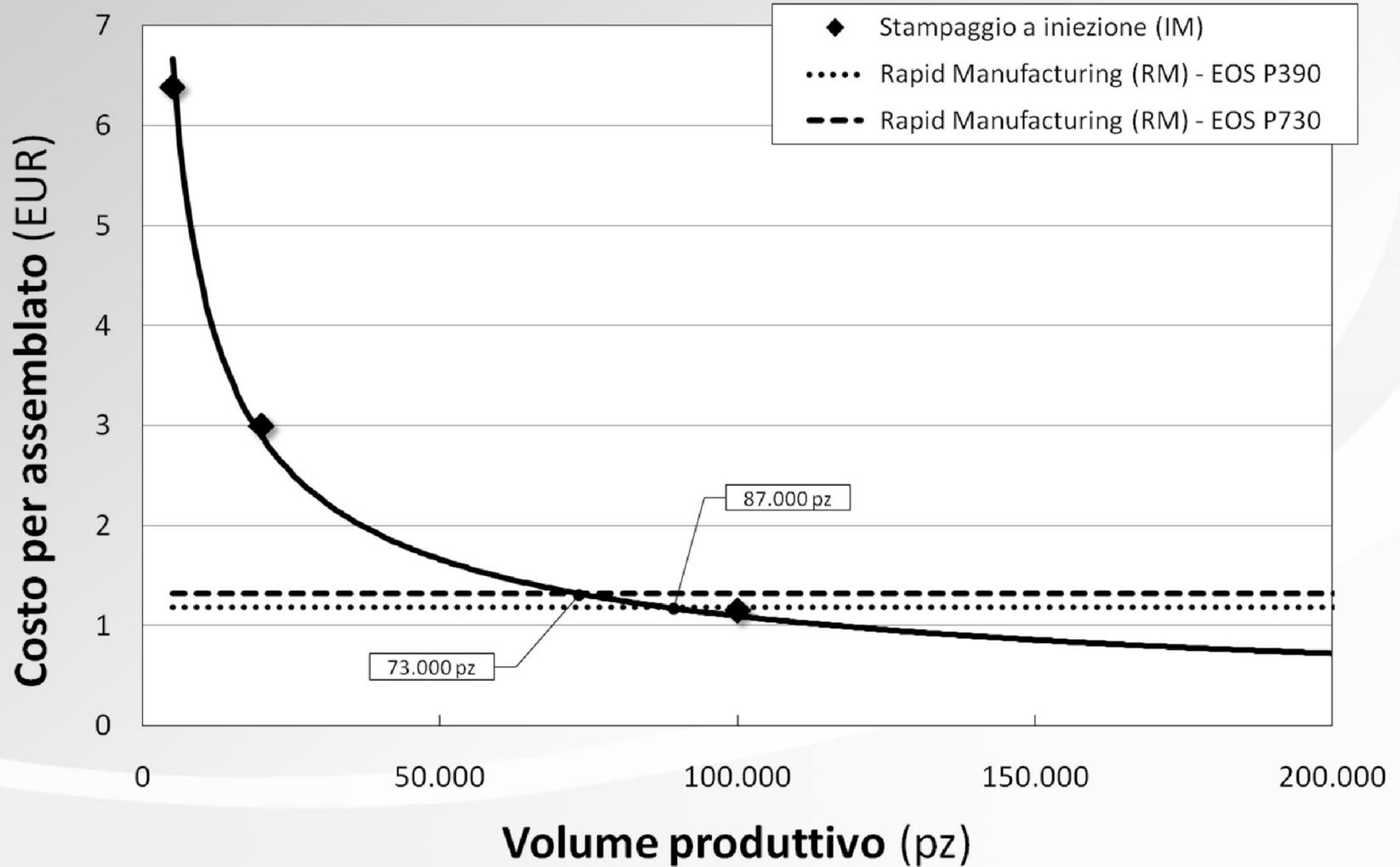
Analisi dei tempi e dei costi – Fabbricazione Additiva

				EOS P390	EOS P730
Vita utile macchina	(anno)		<i>fornitore</i>	5	5
Ammortamento annuo	(EURO/anno)	C	<i>fornitore</i>	100000	190000
Ore annue lavorate	(h/anno)	H	<i>fornitore</i>	5000	5000
Costo orario macchina	(EURO/anno)	CH	C/H	20	38
Tempo costruzione	(h)	T	<i>software macchina EOS</i>		
Costo macchina per job	(EURO)	CB	CH × T		
Numero di pezzi prodotti in un job	(-)	N	<i>software Magics RP</i>		
Costo macchina per pezzo	(EURO)	CP	CH × T/N		
Costo orario della manodopera	(EURO/ora)	O			
Tempo di set-up + post-processing	(ora)	A			
Costo della manodopera per job	(EURO)	OB	O × A		
Costo della manodopera per pezzo	(EURO)	OP	OB/N		
Costo materiale al kg	(EURO/kg)	M	<i>fornitore</i>	54	54
Volume di lavoro	(dm ³)	V	P390=(3.4 × 3.4 × 6.2)dm ³ P730=(7.3 × 3.8 × 5.8)dm ³	~70	~155
Massa di materiale vergine per job	(kg)	U	0.5 × V	~18	~38
Costo del materiale per job	(EURO)	MB	M × U	~950	~2000
Costo materiale per pezzo	(EURO)	MP	MB/N		
Costo pezzo	(EURO)	P	CP+OP+MP		

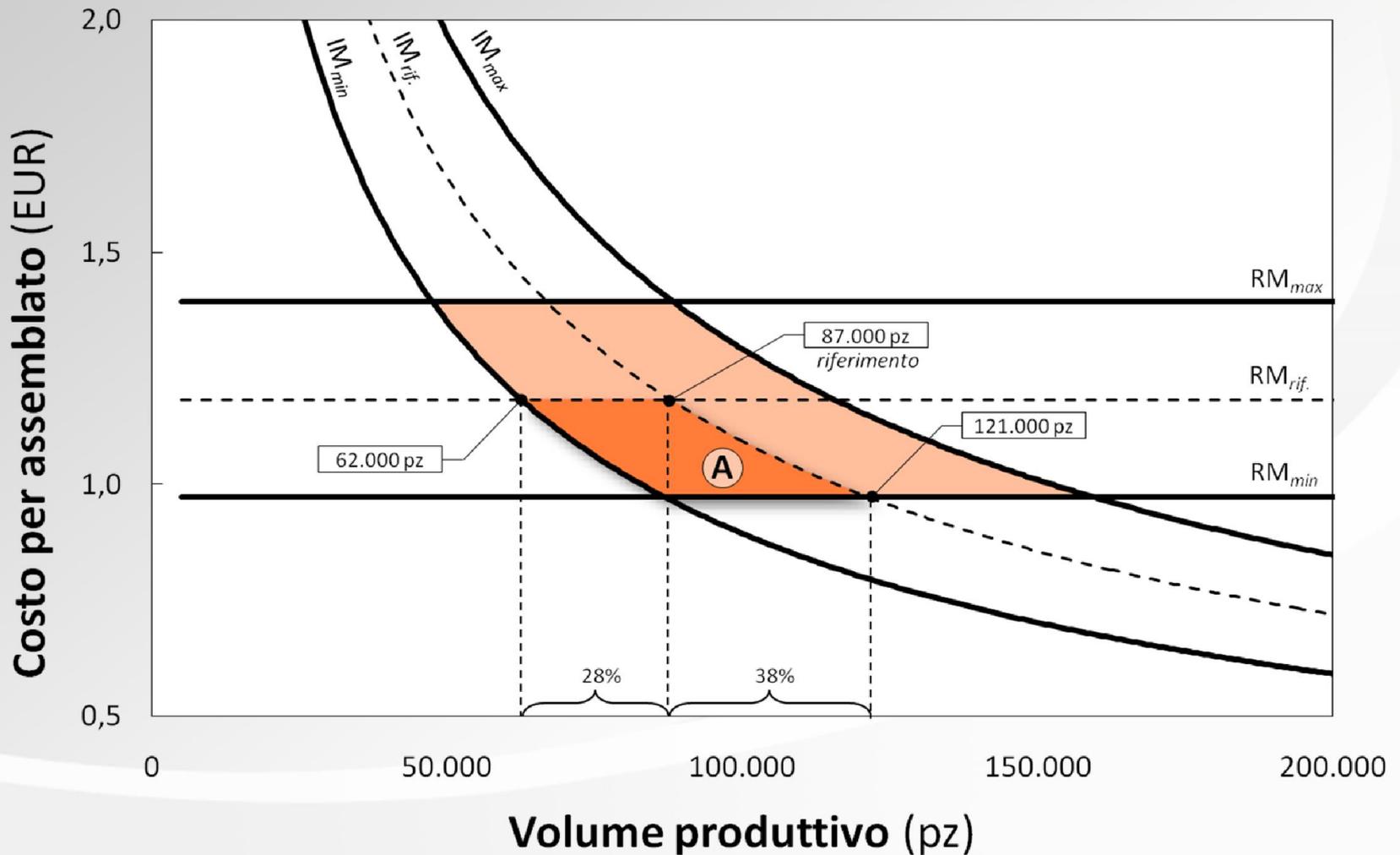
Analisi dei tempi e dei costi – Fabbricazione Additiva



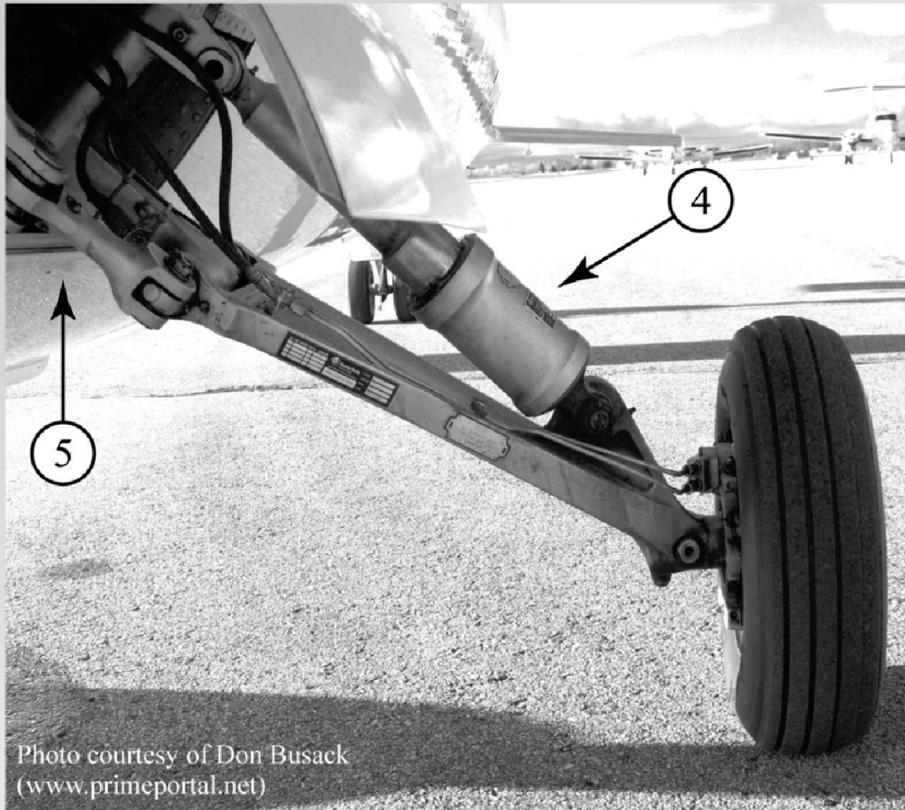
Analisi dei costi – Punto di pareggio



Analisi dei costi – Sensibilità del modello

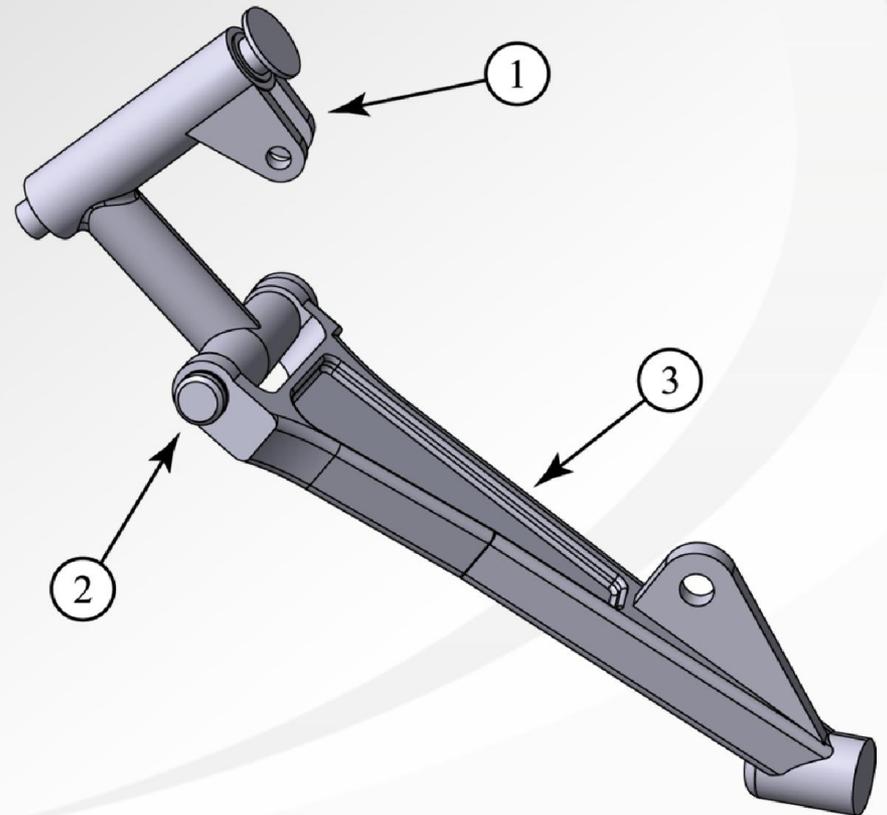


Secondo Caso di studio



Carrello principale di atterraggio del Piaggio P180

Il componente è costituito da supporto principale (1), cerniera (2), braccetto (3), ammortizzatore (4) e attuatore (5).



Modello in scala 1:5

Ingombri: 70 × 210 × 70 mm

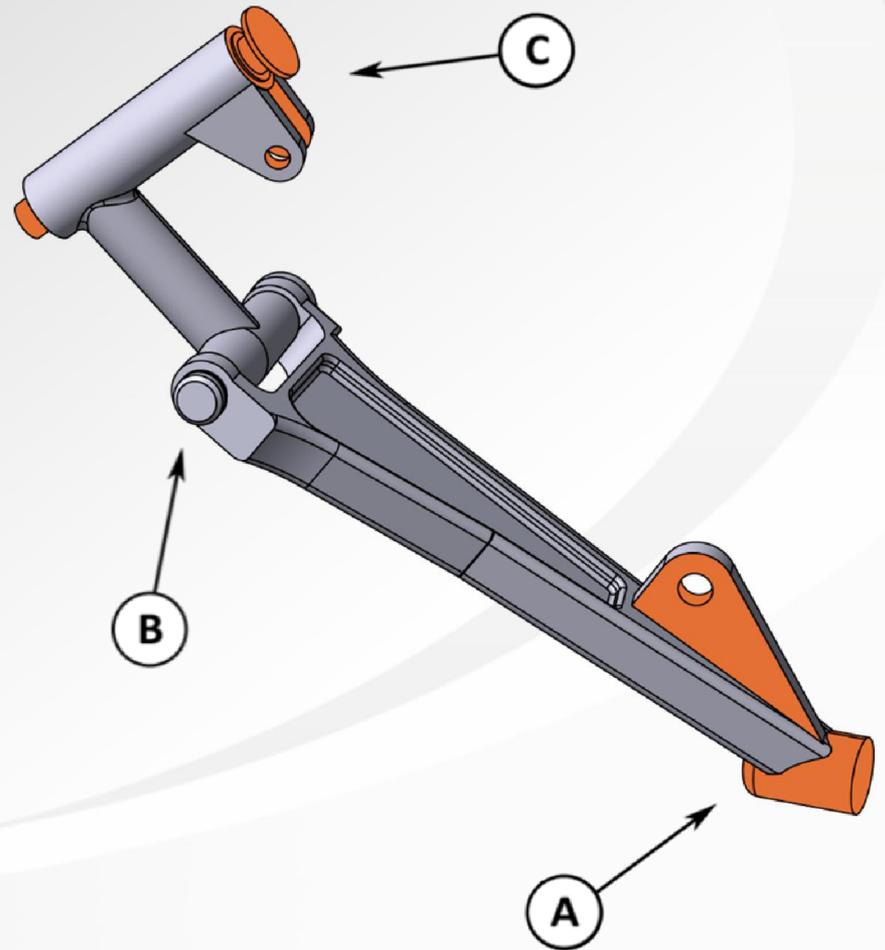
Materiale: AlSi10Mg

Riprogettazione

Un certo numero di **limitazioni** associate alle tecnologie di produzione tradizionali posso essere **rimosse**. Il carrello è stato riprogettato e adattato per la fabbricazione additiva secondo le linee guida del DFAM preservandone la funzionalità.

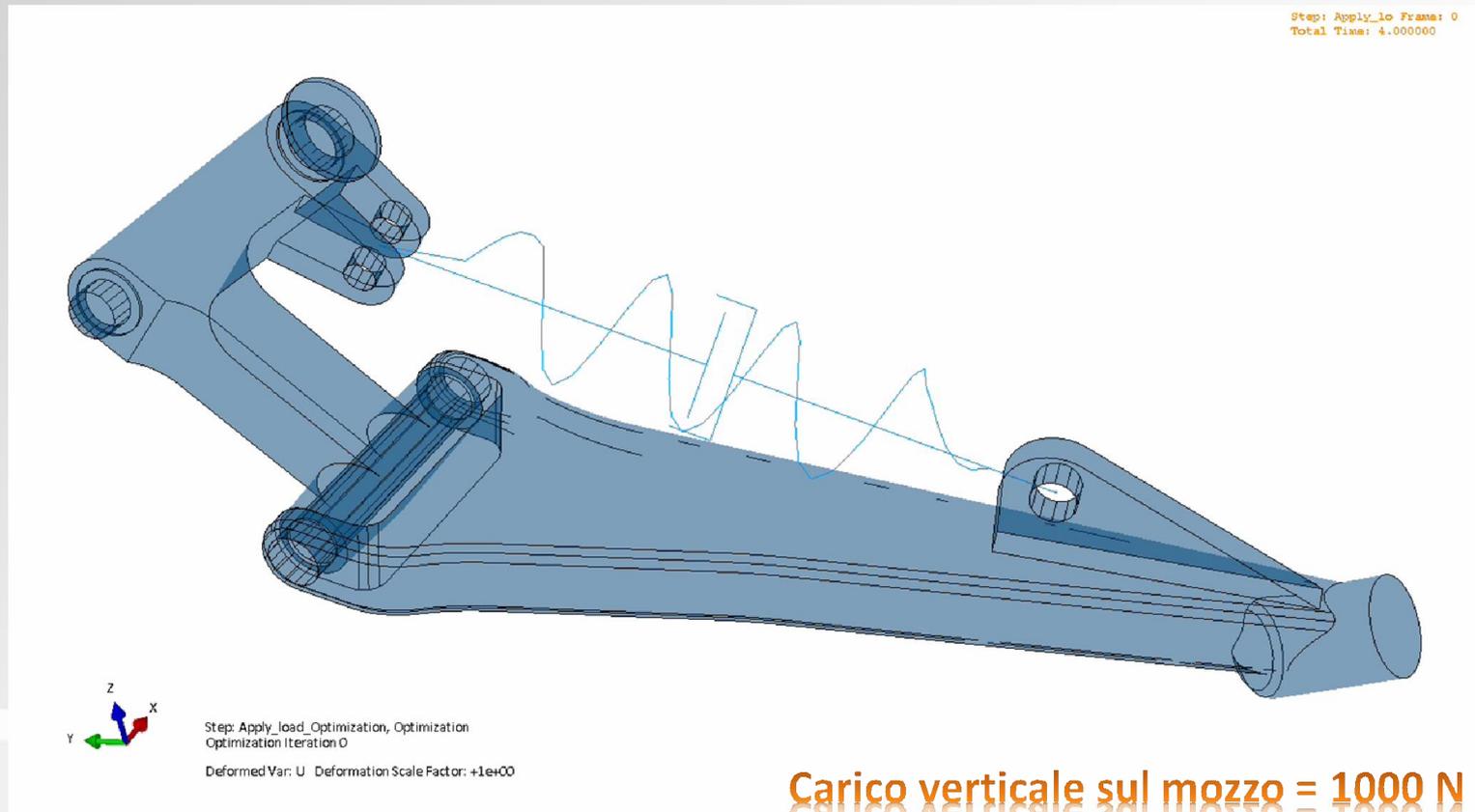
Identificazione di vincoli non modificabili:

- la posizione dei fori;
- le porzioni laterali del carrello che devono accoppiarsi con l'alloggiamento della fusoliera, la porzione terminale del braccetto collegata con il mozzo;
- la posizione e l'orientamento dell'asse della cerniera per non alterarne la corretta cinematica.



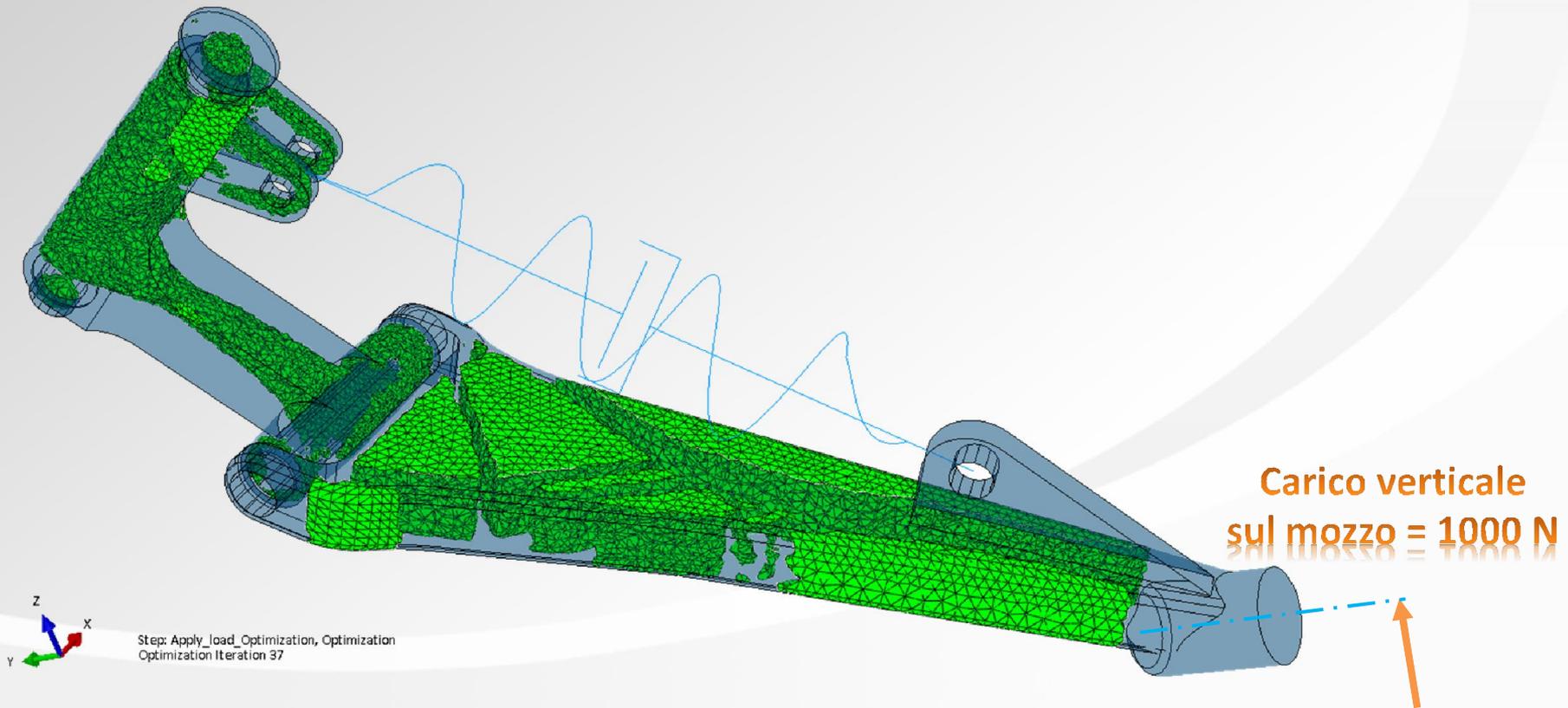
Riprogettazione

La geometria dei componenti è stata **ottimizzata per topologia e forma** utilizzando il modulo Abaqus Topology Optimization Module (ATOM) di Abaqus 6.12-1.



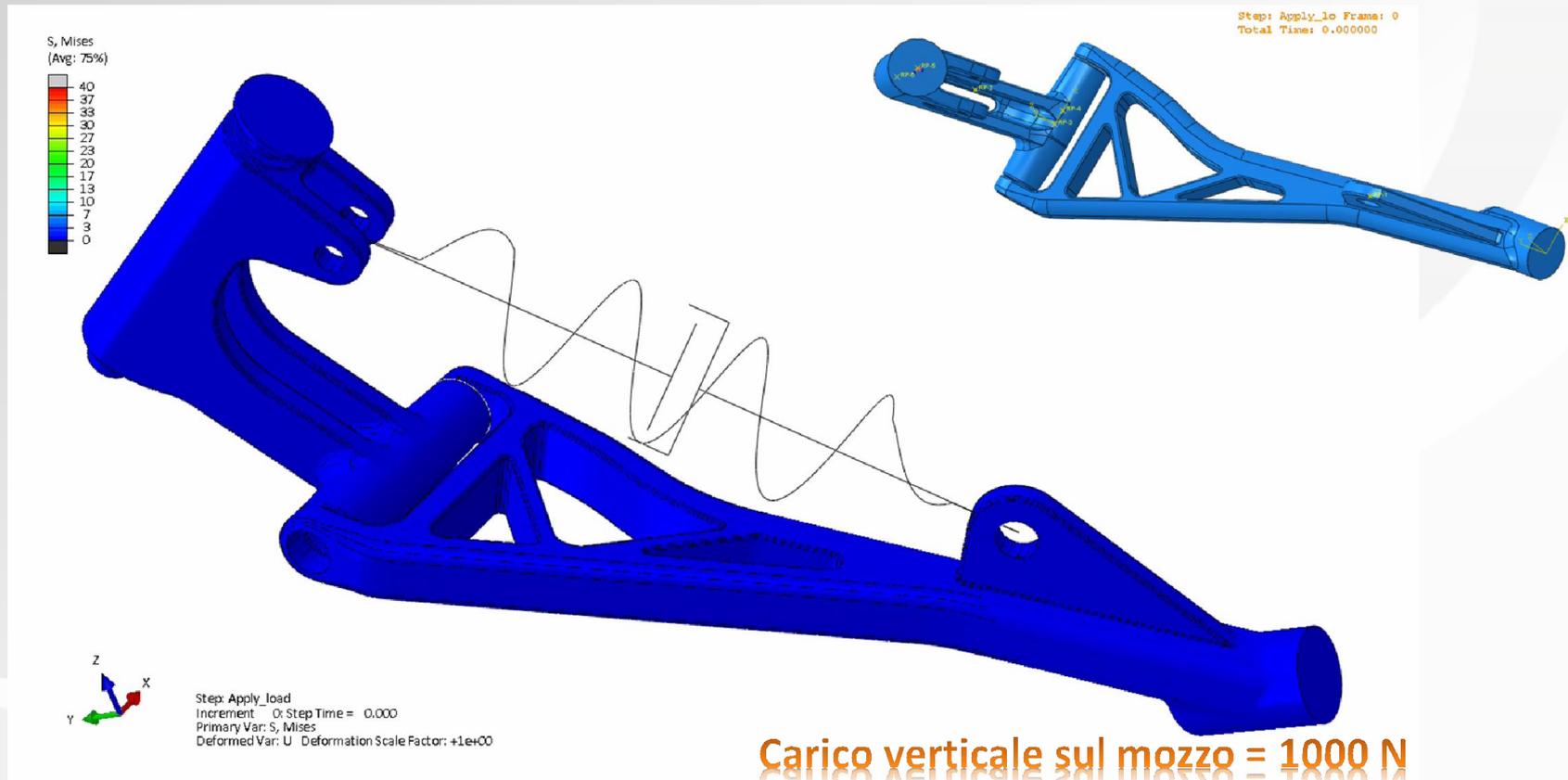
Riprogettazione

La geometria dei componenti è stata **ottimizzata per topologia e forma** utilizzando il modulo Abaqus Topology Optimization Module (ATOM) di Abaqus 6.12-1.



Riprogettazione

Il componente riprogettato è stato verificato staticamente mediante Abaqus. I risultati numerici confermano che le tensioni sono uniformemente distribuite.



Analisi dei costi – Ipotesi e limitazioni

Si suppone che l'intera piattaforma di costruzione del sinterizzatore sia usata per produrre copie dello stesso pezzo, perciò il costo di produzione è una costante.

Se si considera la **variazione dei costi** relativa ad una specifica tecnologia, devono essere presi in considerazione solo quei fattori che influenzano direttamente il costo del pezzo. In particolare

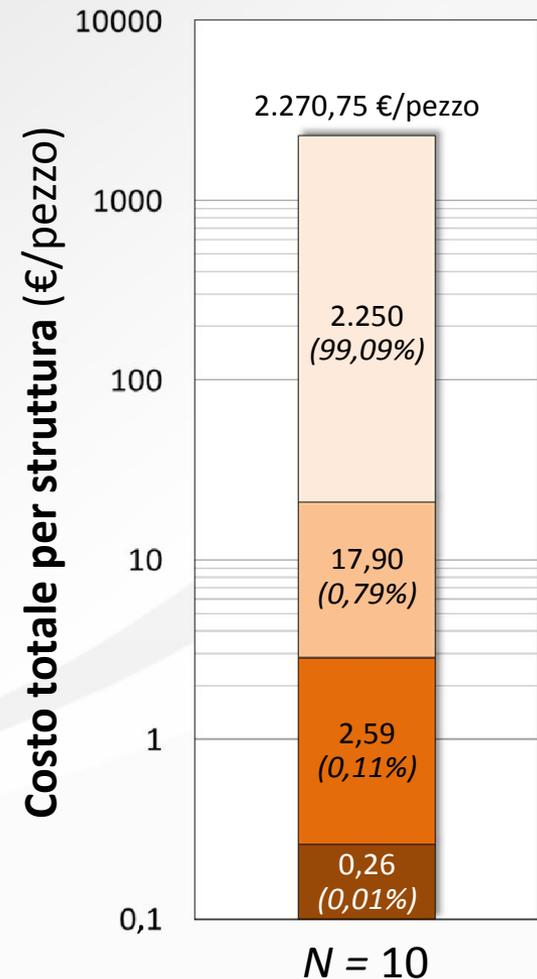
Fattori	Pressofusione	Fresatura	FA - SLM
Grezzo di partenza	lingotto	spezzone	polvere
Attrezzature specifiche	stampi	bloccaggi/utensili	<i>nessuna</i>
Fabbricazione			
• riprogettazione	<i>nessuna</i>	limitata	completa
• macchina	pressa	CNC 5-assi	sistema di FA
• preparazione	fusione della lega	Programmazione CAM	creazione del job
• post-trattamento	smaterozzatura lavorazioni meccaniche finitura	pulizia	trattamento termico rimozione delle parti rimozione dei supporti finitura
Lead time	settimane	giorni	ore

Le spese generali non vengono prese in considerazione.

Poiché il costo del lavoro è fortemente influenzato dalla localizzazione dell'impianto produttivo, in questo studio si ipotizza che la produzione avvenga nell'Europa dell'ovest.

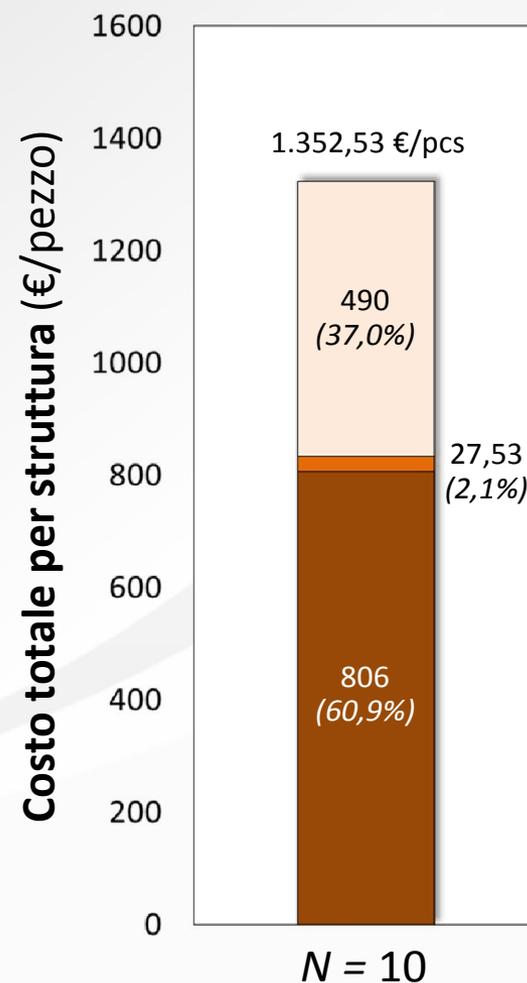
Analisi dei costi – Pressofusione (HPDC)

Dimensione del lotto	(pezzi)	<i>N</i>
Costo del materiale al kg	(€/kg)	16,00
Peso del pezzo	(kg)	0,162
Costo del materiale	(€)	2,59
Costo dei componenti standard	(€)	2.500
Costo delle figure e dei carrelli	(€)	16.000
Costi ausiliari	(€)	3.900
Costo dell'attrezzatura	(€)	22.500/<i>N</i>
Costo orario della pressa	(€/h)	260,00
Costo orario dell'operatore	(€/h)	35,00
Percentuale del tempo operatore	(%)	10
Tempo ciclo	(h)	0,001
Costo della lavorazione (HPDC)	(€)	0,26
Costo del trattamento termico	(€)	1,42
Costo di finitura	(€)	13,98
Costo orario dell'operatore	(€/h)	25,00
Tempo dell'operatore	(h)	0,100
Costo di post-trattamento	(€)	17,90
<i>COSTO TOTALE PER STRUTTURA</i>	(€)	20,75 + 22.500/<i>N</i>



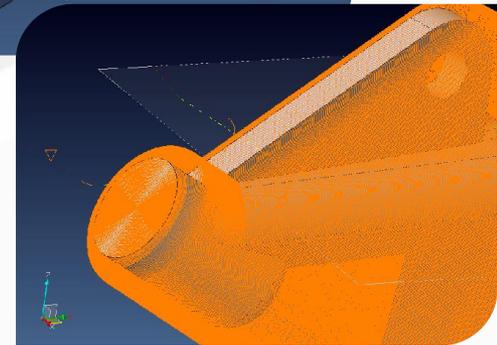
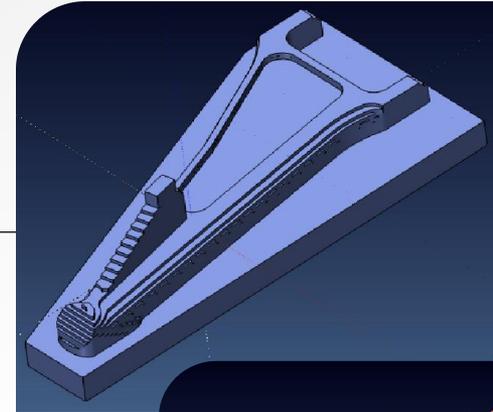
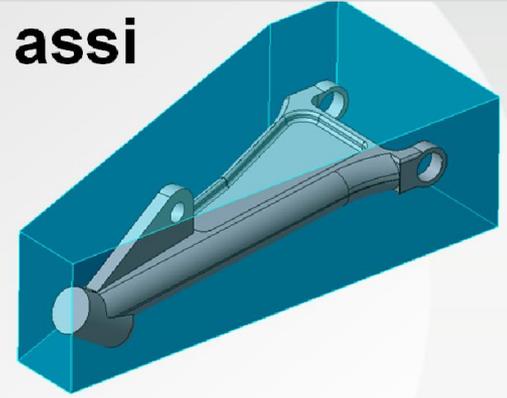
Analisi dei costi – Fresatura a 5 assi

Dimensione del lotto	(pezzi)	<i>N</i>
Costo del materiale al kg	(€/kg)	16,00
Peso del grezzo	(kg)	1,72
Costo del materiale	(€)	27,53
Costo della fresa Ø10 mm	(€/pezzo)	55,00
Costo della fresa Ø 6 mm	(€/pezzo)	40,00
Numero di frese Ø 10 mm	(pezzi)	6
Numero di frese Ø 6 mm	(pezzi)	4
Costo dell'attrezzatura	(€)	490,00
Costo per la programmazione CAM	(€)	200,00/ <i>N</i>
Costo orario della macchina	(€/h)	60,00
Tempo di attrezzaggio	(h)	1/ <i>N</i>
Tempo di taglio	(h)	10
Tempo improduttivo	(h)	3
Costo della lavorazione (fresatura)	(€)	780,00 + 260/<i>N</i>
<i>COSTO TOTALE PER STRUTTURA</i>	(€)	<i>1.297,53 + 260/<i>N</i></i>



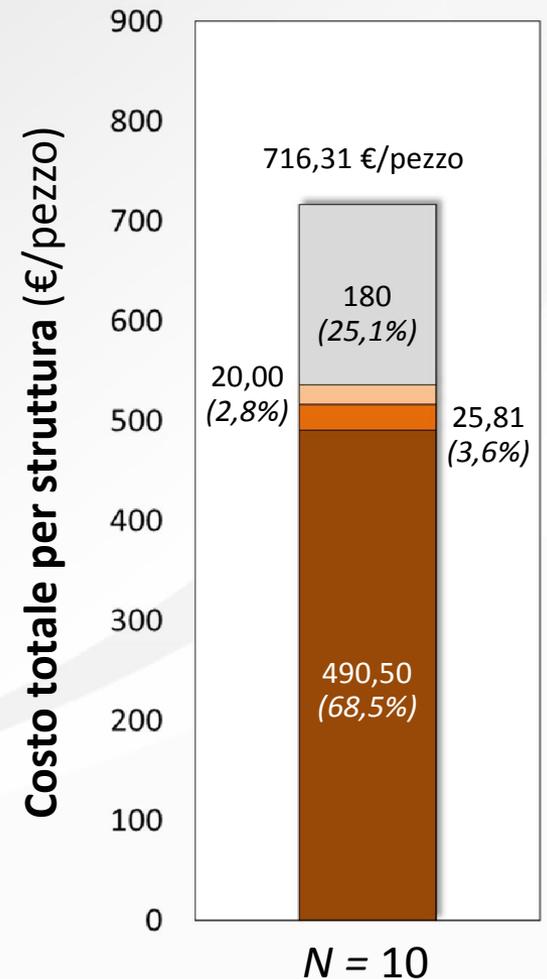
Analisi dei costi – Fresatura a 5 assi

Dimensione del lotto	(pezzi)	N
Costo del materiale al kg	(€/kg)	16,00
Peso del grezzo	(kg)	1,72
Costo del materiale	(€)	27,53
Costo della fresa Ø10 mm	(€/pezzo)	55,00
Costo della fresa Ø 6 mm	(€/pezzo)	40,00
Numero di frese Ø 10 mm	(pezzi)	6
Numero di frese Ø 6 mm	(pezzi)	4
Costo dell'attrezzatura	(€)	490,00
Costo per la programmazione CAM	(€)	200,00/N
Costo orario della macchina	(€/h)	60,00
Tempo di attrezzaggio	(h)	1/N
Tempo di taglio	(h)	10
Tempo improduttivo	(h)	3
Costo della lavorazione (fresatura)	(€)	780,00 + 260/N
COSTO TOTALE PER STRUTTURA	(€)	1.297,53 + 260/N



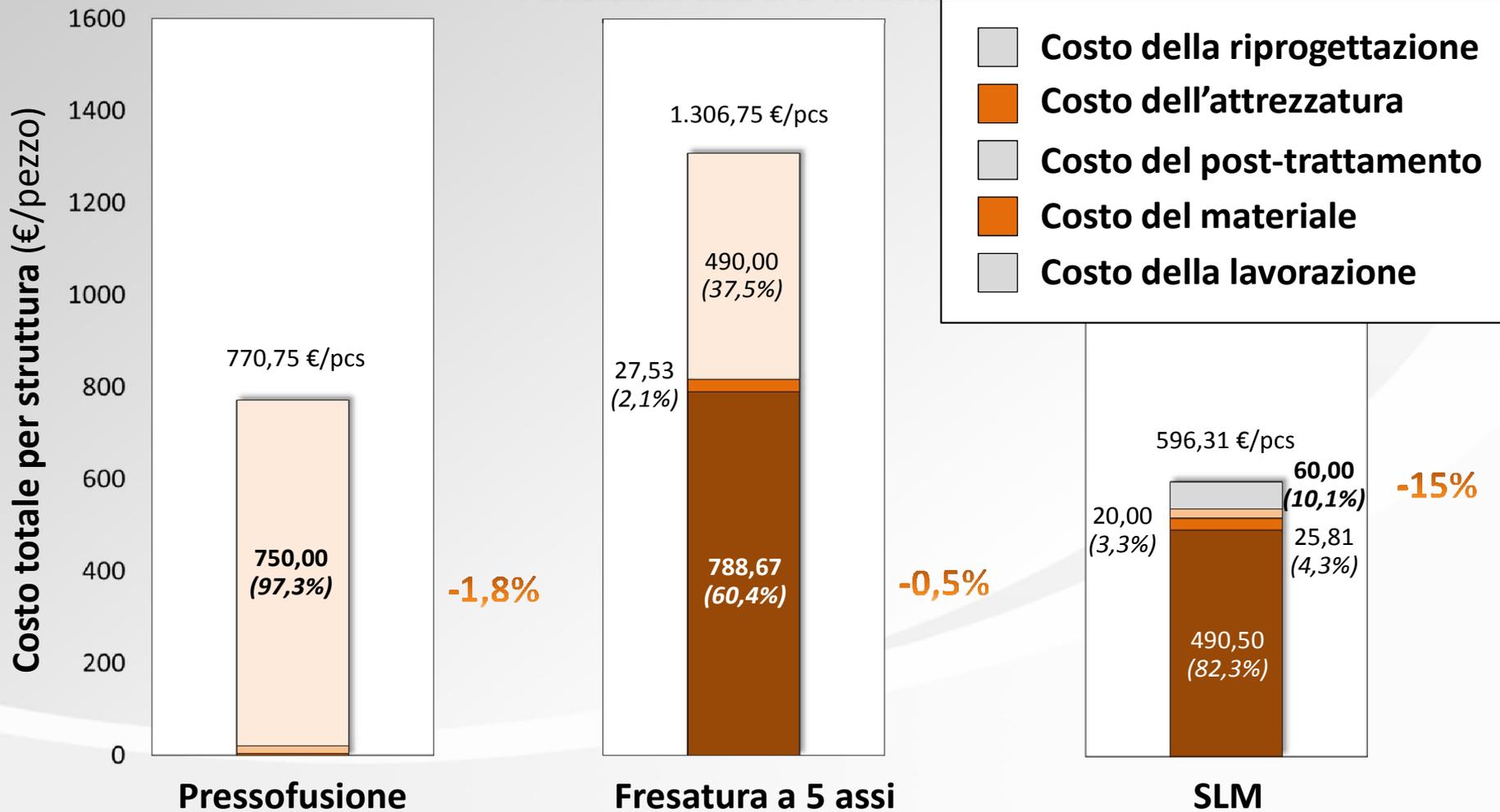
Analisi dei costi – Fabbricazione additiva laser (SLM)

	Dimensione del lotto	(pezzi)	<i>N</i>
□	Costo della riprogettazione	(€)	1.800,00/<i>N</i>
	Costo del materiale al kg	(€/kg)	145,00
	Peso della parte (supporti compresi)	(kg)	0,178
■	Costo del materiale	(€)	25,81
	Costo orario della macchina	(€/h)	35,00
	Tempo di costruzione	(h)	54
	Costo di produzione del <i>job</i>	(€/job)	1.890,00
	Costo orario dell'operatore	(€/h)	25,00
	Tempo di preparazione	(h/job)	1,2
	Numero di pezzi per <i>job</i>	(pezzi/job)	4
■	Costo della lavorazione (FA)	(€)	490,50
	Costo orario dell'operatore	(€/h)	20,00
	Tempo di post-trattamento	(h/job)	3
	Costo del trattamento termico	(€/job)	20,00
■	Costo del post-trattamento	(€)	20,00
	COSTO TOTALE PER STRUTTURA	(€)	536,31 + 1.800/<i>N</i>

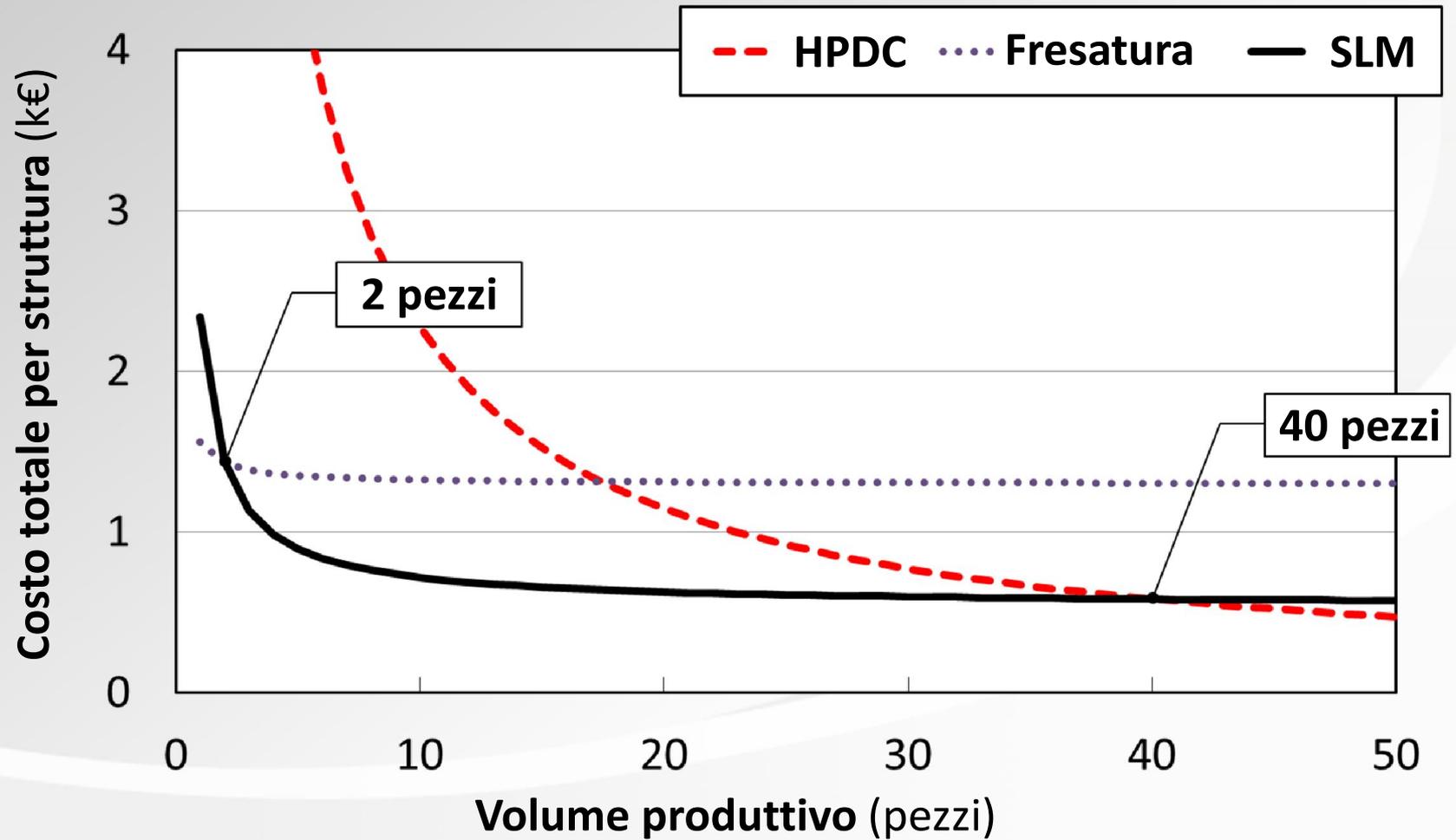


Analisi dei costi – Lotto di 30 pezzi

Confronto con N = 10 pezzi



Analisi di break-even



Conclusioni

- La fabbricazione additiva riduce **i tempi e i costi** di sviluppo prodotto dalla fase di progettazione a quella di produzione, perché non occorrono investimenti per la produzione delle attrezzature.
- Tuttavia il vantaggio va oltre il solo risparmio per le attrezzature grazie alla libertà delle forme e alla possibilità di **iniziare la produzione immediatamente** dopo la progettazione.
- I risultati di questo studio dimostrano che la fabbricazione additiva è competitiva anche per **piccole e medie** produzioni di prodotti in materiale metallico e polimerico.
- L'analisi dei costi evidenzia come l'incidenza principale sul costo del pezzo nella fabbricazione additiva sia imputabile alla macchina; gli altri termini contribuiscono in percentuali ridotte.

Conclusioni

- Non appena le tecnologie additive si diffonderanno ulteriormente e diventeranno processi produttivi comuni, sarà logico supporre una **diminuzione del costo dei macchinari** e di conseguenza, nel prossimo futuro, il punto di pareggio si sposterà verso volumi produttivi maggiori di quelli indicati in questo studio.
- La convenienza nell'adozione della fabbricazione additiva è evidente se la **libertà delle forme** viene capitalizzata attraverso un'opportuna **riprogettazione**, in maniera tale da sfruttare a pieno le potenzialità della tecnologia additiva.
- La sinergia con l'analisi CAE consente di riprogettare un componente **ottimizzando il rapporto resistenza/peso** con l'ottica di diminuire il peso e la quantità di materiale utilizzato, rispettando nel contempo i requisiti funzionali.
- Le prossime attività di ricerca includeranno analisi energetiche in modo da far rientrare all'interno del confronto con le tecnologie tradizionali anche i **costi energetici**.