

# ADDITIVE MANUFACTURING CARATTERIZZAZIONE E QUALIFICAZIONE

*Prof. Andrea Gatto*

Andrea.gatto@unimore.it

Laboratorio MICROmechanisms in MANufacture

Laboratorio di Costruzione Rapida Avanzata



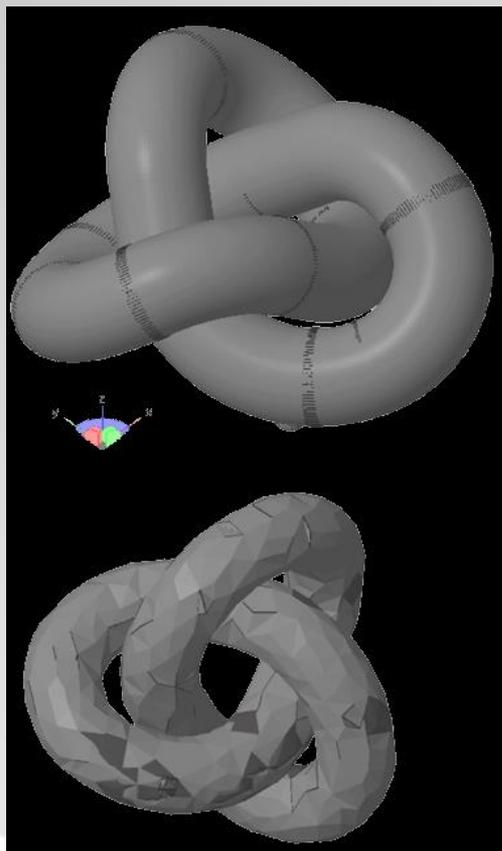
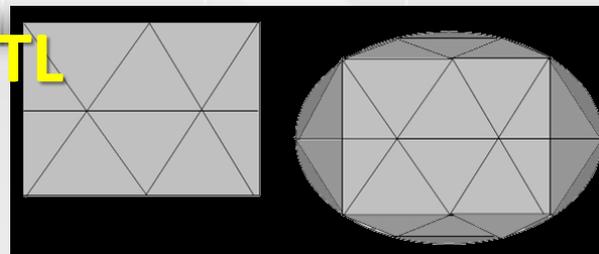
i risultati potenziali sono notevolissimi



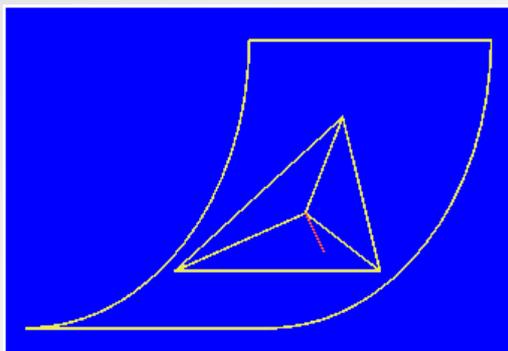
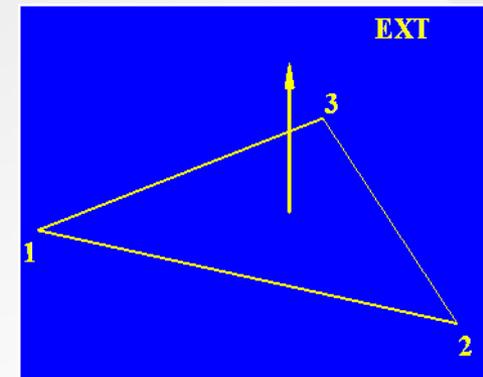
Researchers at Monash University, Melbourne, Australia have partnered with colleagues from Deakin University and the CSIRO to create the world's first 3D printed jet engine.

# Già in fase di progetto si effettuano scelte di approssimazione

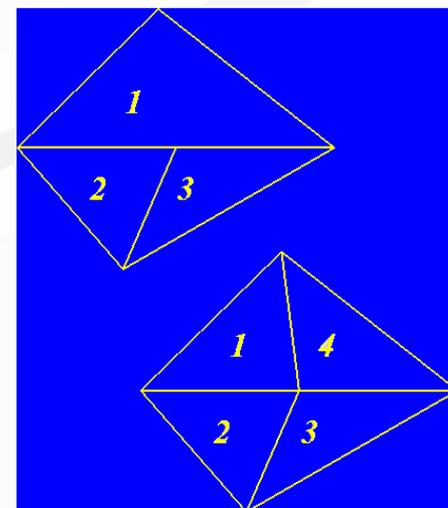
STL



Nel formato STL  
la superficie dell'oggetto  
è approssimata  
da una serie di triangolini



La tolleranza di triangolazione (d)  
definisce il grado  
di approssimazione



Gli errori tipici sono dovuti a:  
1. non rispetto della regola  
vertice-vertice  
2. normali invertite



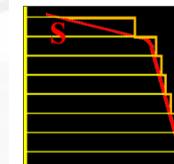
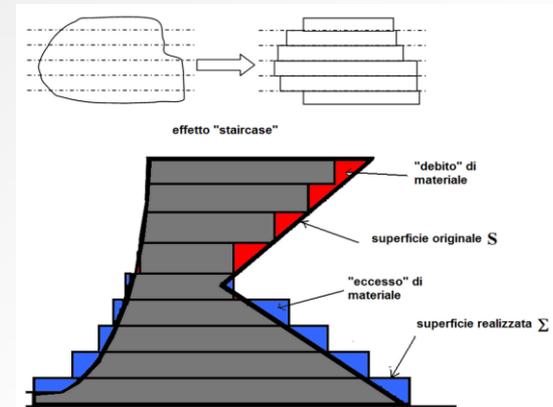
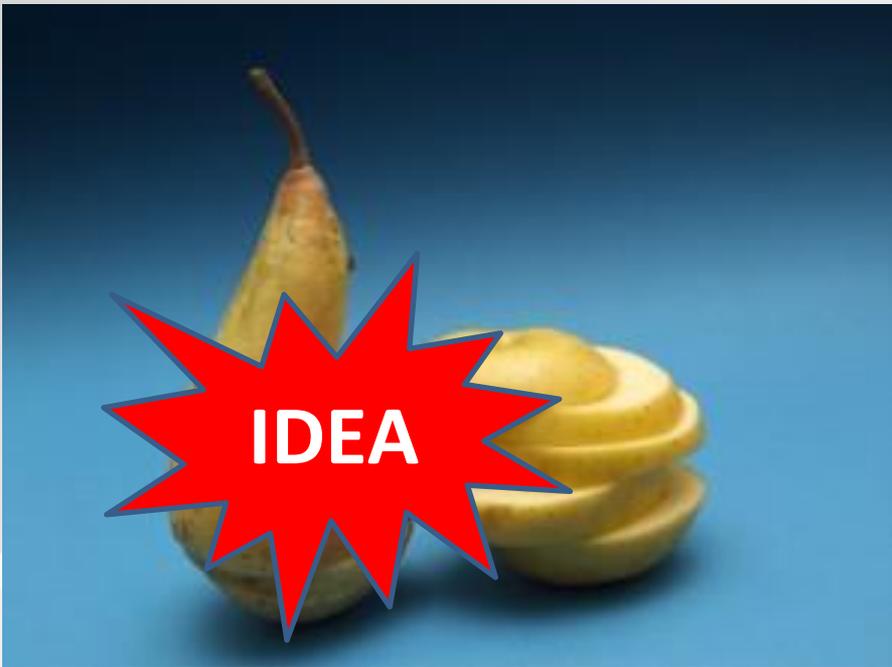
Effetto della diversa  
tolleranza di triangolazione  
della superficie

# STAMPA 3D

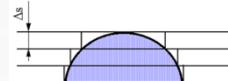
ovvero

## ADDITIVE MANUFACTURING

un qualunque oggetto può essere pensato come  
sovrapposizione di strati, cioè di fette



$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \Sigma = S$$



$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{h}{\Delta S} = \infty$$

**Quale errore (non conformità) si è disposti ad accettare?**

**Quale è il prezzo giusto per la libertà di forma?**

**Riduzione % delle prestazioni meccaniche e della tolleranza**



# Applicazioni

Industriali e di design

- **Modelli concettuali**

- Manufatto creato per valutare lo stile, l'ergonomia, il progetto del manufatto finale, o per marketing (fotografie, fiere, cataloghi, etc).

- **Prototipi funzionali “per validazione”**

- Prototipo adatto alla verifica funzionale del manufatto, per verificarne l'assemblaggio, gli ingombri, gli accoppiamenti, la facilità di montaggio/manutenibilità, etc oppure per test funzionali, es. flussi in ambito aerodinamico.

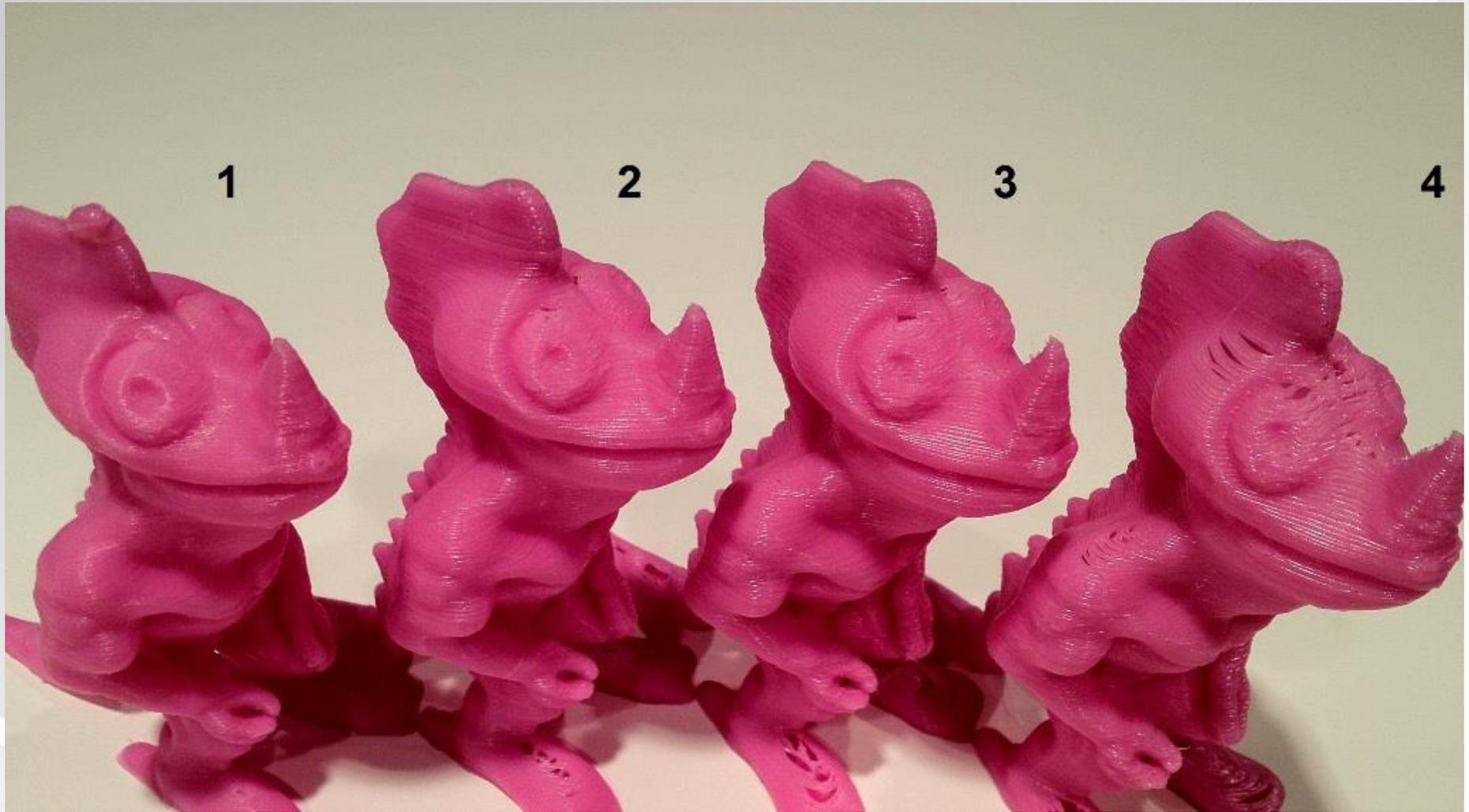
- **Prototipo “tecnologico”**

- Prototipo che presenta proprietà meccaniche identiche ai pezzi finali, realizzato per verifiche di durata, di rispondenza alle normative di sicurezza, etc o come “master” da utilizzare per creare stampi, o come inserti, attrezzature di lavoro, etc

- **Pezzi finali**

- AM come alternativa ai processi tradizionali

# Slicing



# ADDITIVE MANUFACTURING

## Tecnologie, materiali, costi

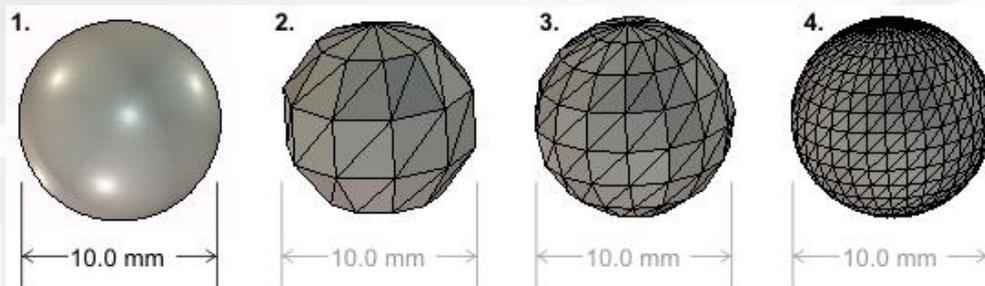
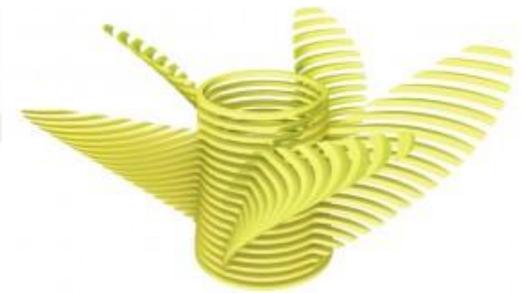
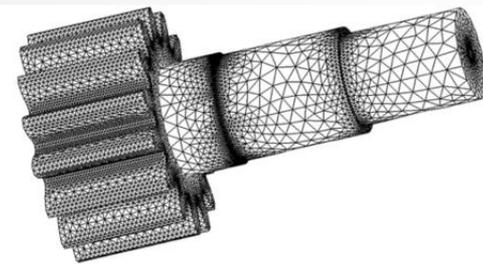
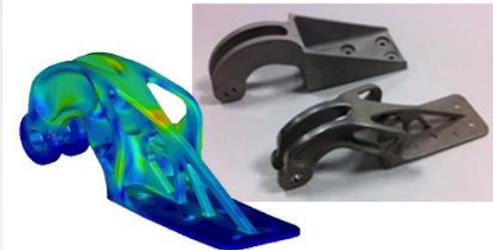


quale è il termine di confronto?

Introduzione: la costruzione a strati

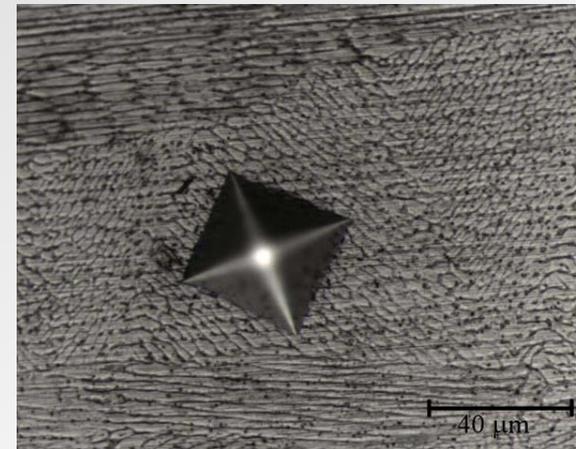
- Dal CAD alla costruzione
- File STL
- Slicing, supporti, orientazione
- Geometrie nuove: complessità, rapporto pieni/vuoti

EADS

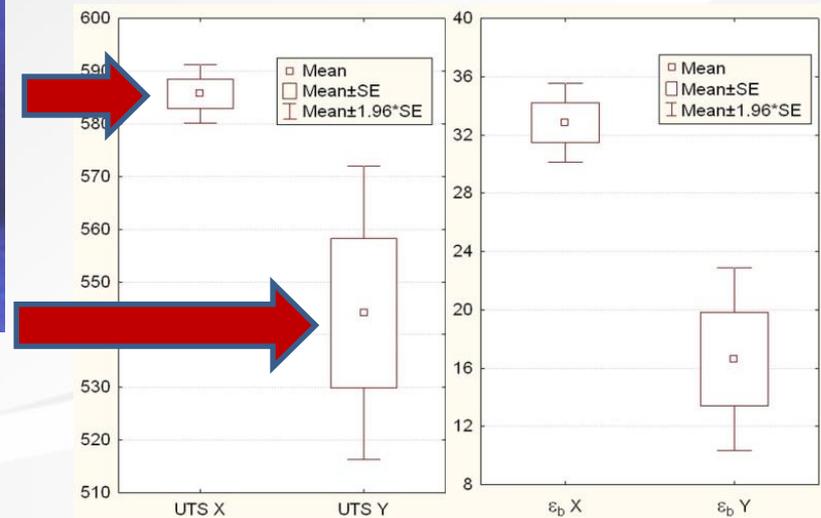


# Laser consolidation di AISI 316L e Inconel 625

in collaborazione con X-AT - Exeter University (UK)



La macchina Accufusion è proprietà di Airbus all'interno del progetto europeo DAMASCUS

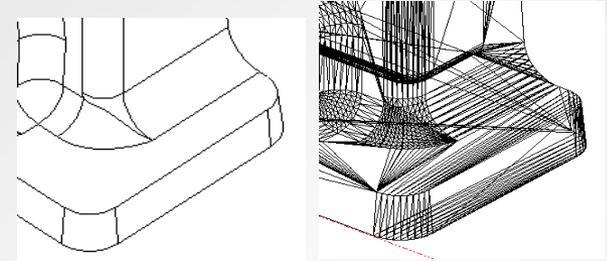


# Dal CAD al pezzo

Sistema CAD

CAD 3D

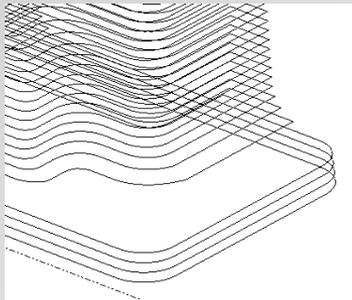
File .STL



Orientamento  
Generazione supporti

Software  
Macchina RP

Esecuzione slicing



Macchina RP

Costruzione sezioni



Rimozione supporti  
Pulizia Finitura  
Post-trattamento

Operazioni  
manuali

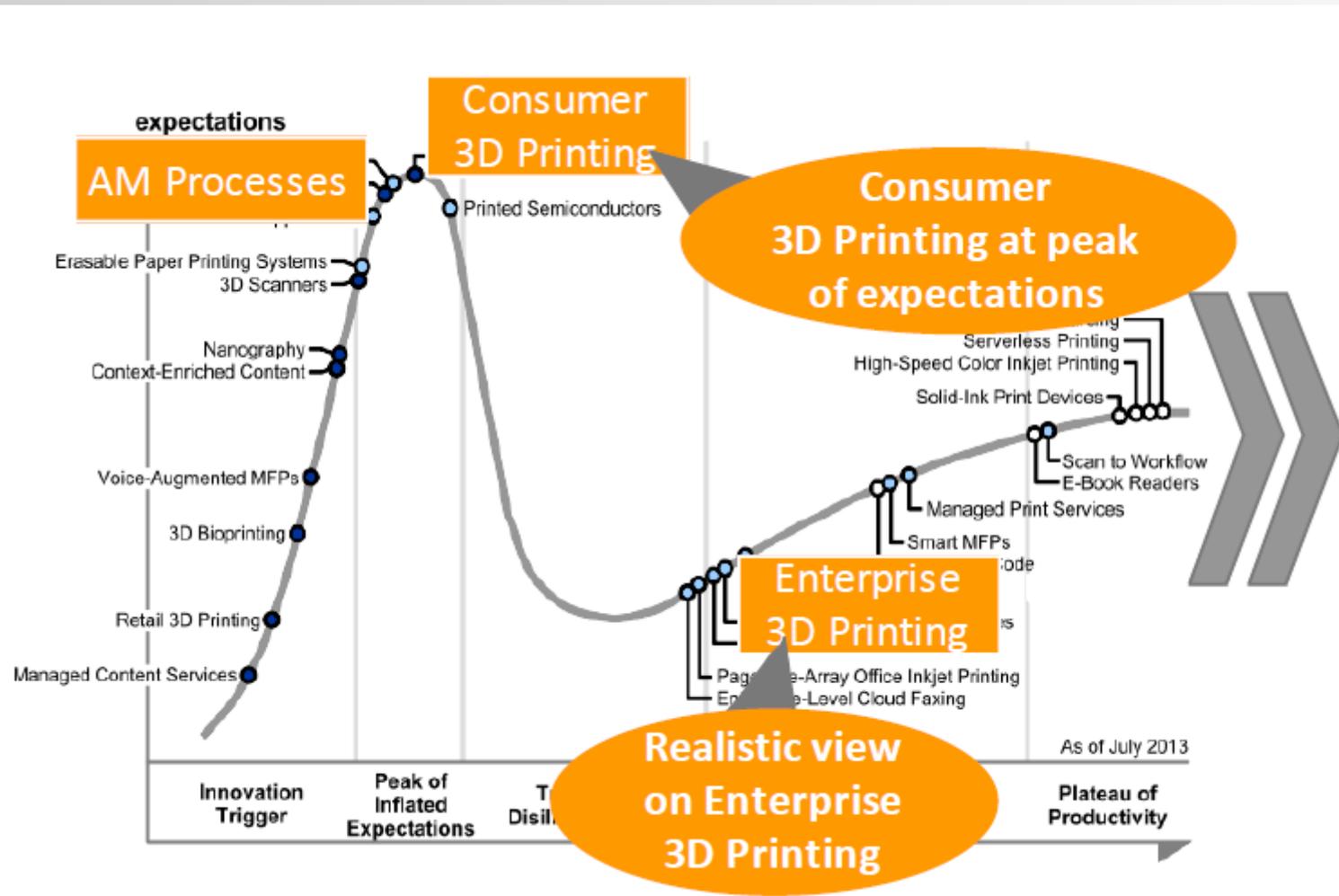
Prototipo



# ADDITIVE MANUFACTURING

- ❑ scelte progettuali e costruttive influenzano le prestazioni finali.
- ❑ il prodotto è comunque anisotropo.
- ❑ Il contesto di utilizzo del prodotto modifica le esigenze manifestate.
- ❑ Il prodotto è comunque un'approssimazione fisica di un'approssimazione virtuale

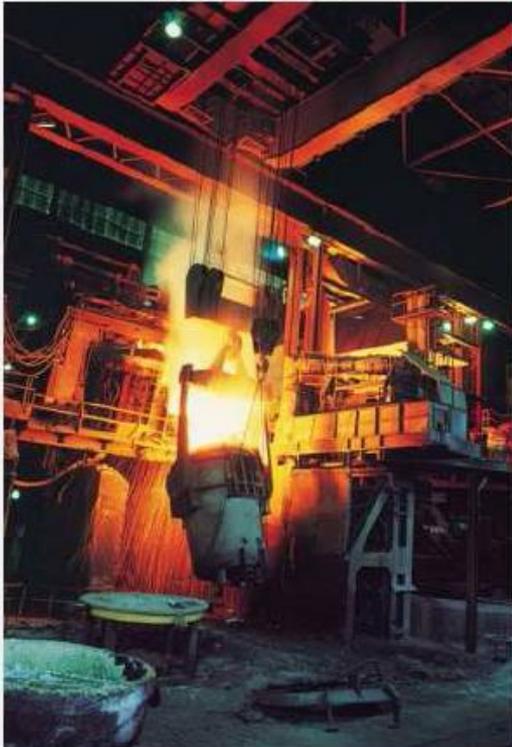
# AM: sviluppo



# AM: sviluppo

## Supply Chain Shift – Direct to Part

From



→ To



# Esempi: GE Aviation

- ❑ ipotizzati 100,000 pezzi da AM entro 2020
- ❑ potenziale riduzione del peso di un motore 454kg
- ❑ più di 300 macchine AM in uso in GE, annunciati investimenti per 50MUSD



# Esempi: Boeing



- Riduzione tempi
- Azzeramento magazzino

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**  
**Koreis**

(10) **Pub. No.:** US 2015/0064299 A1

(43) **Pub. Date:** Mar. 5, 2015

(54) **THREE DIMENSIONAL PRINTING OF PARTS**

(71) Applicant: **THE BOEING COMPANY**, Chicago,  
IL (US)

(72) Inventor: **Roche Robert Koreis**, Seattle, WA (US)

(73) Assignee: **THE BOEING COMPANY**, Chicago,  
IL (US)

(21) Appl. No.: **14/019,129**

(22) Filed: **Sep. 5, 2013**

#### Publication Classification

(51) **Int. Cl.**  
**B29C 67/00** (2006.01)

(52) **U.S. Cl.**

CPC ..... **B29C 67/0088** (2013.01)

USPC ..... **425/375; 707/736; 707/722; 707/687;**  
**707/609**

(57) **ABSTRACT**

A method and apparatus is presented. The apparatus comprises a parts library, a database, and a parts management system. The parts library is configured to store a plurality of part definition files. The database is configured to store entries identifying a printing of parts using the plurality of part definition files. The parts management system is configured to receive a request for a part definition file in the parts library, identify the part definition file in the plurality of part definition files in the parts library, receive an indication of a printing of a part using the part definition file, and store an entry identifying the printing of the part using the part definition file in the database.

Richiesta di brevettare metodo e attrezzature per ordinare e produrre pezzi di ricambio aeronautici tramite AM

# Conoscete la materia prima?

In Europa si stimano circa 2000 esplosioni di polveri ogni anno, di queste circa il 20% sono imputabili alle polveri metalliche.

Negli Stati Uniti, tra il 1980 e il 2005, si sono verificati 281 esplosioni indotte da polveri che hanno causato 119 morti e 718 feriti.

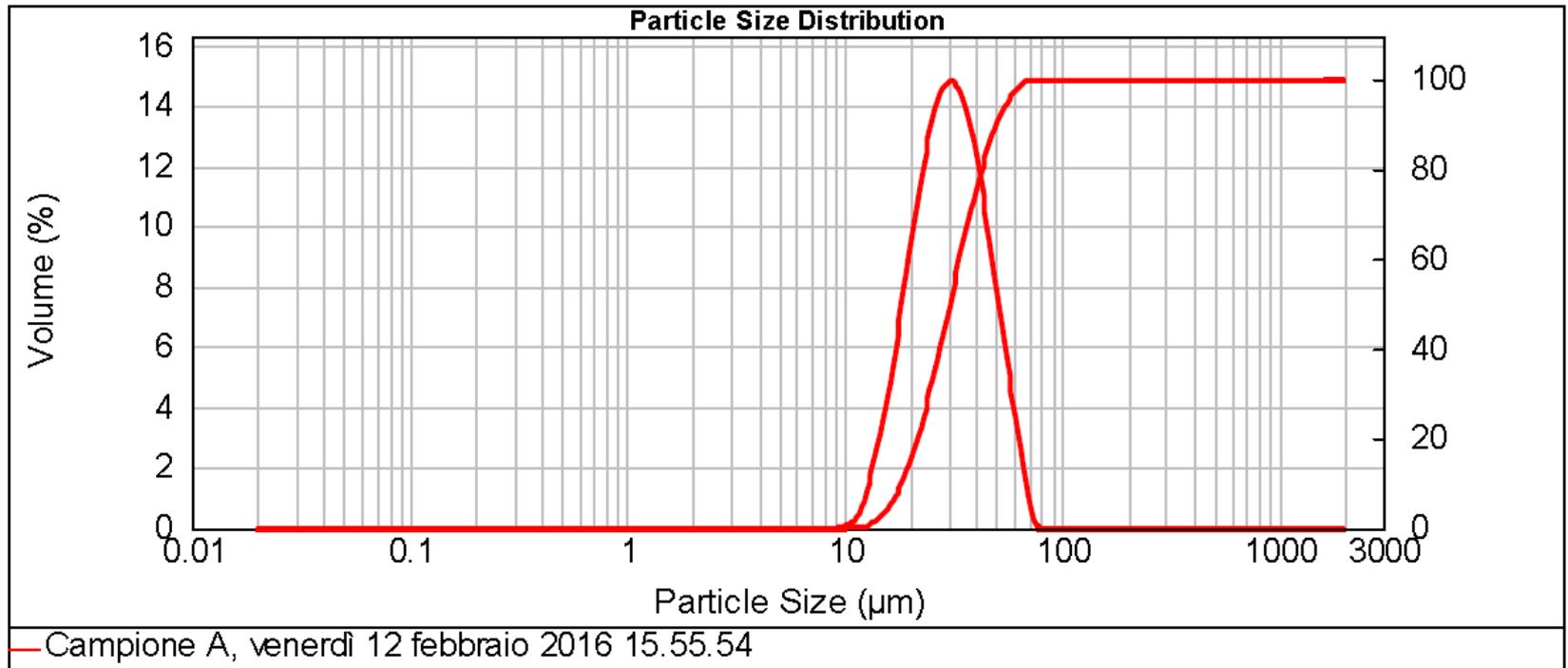
La polvere cambia nel tempo le sue caratteristiche.

- La concentrazione minima di esplosione (*Minimum Explosible Concentration*, MEC), è definita come la più piccola quantità di polvere in sospensione nell'aria, che può esplodere. Per molte polveri oscilla tra i 20 e i 50 g/m<sup>3</sup>.
- L'energia minima di accensione (*Minimum Ignition Energy*, MIE), misura la facilità di accensione di una nube di polvere mediante scariche elettriche ed elettrostatiche, dipende dal tipo di polvere, dalla granulometria e dalla forma. Si considera altamente infiammabile per valori nell'intervallo 3÷10 mJ ed estremamente infiammabile per valori <3mJ. Nel caso di titanio molto sottile (3 μm) sono sufficienti 2 mJ.

- La temperatura minima di accensione (*Minimum Ignition Temperature of dust cloud/layer* MIT) è la temperatura più bassa di una superficie in grado di innescare la polvere dispersa sotto forma di una nube o in strato sottile. Questo valore è importante per definire la temperatura massima di esercizio per le apparecchiature elettriche e meccanica utilizzata in ambienti polverosi. Alcune polveri metalliche, sono in grado di auto-accendersi.

# Caratterizzazione minima in ingresso

## a) Distribuzione granulometrica mediante granulometro laser secondo ISO 13320

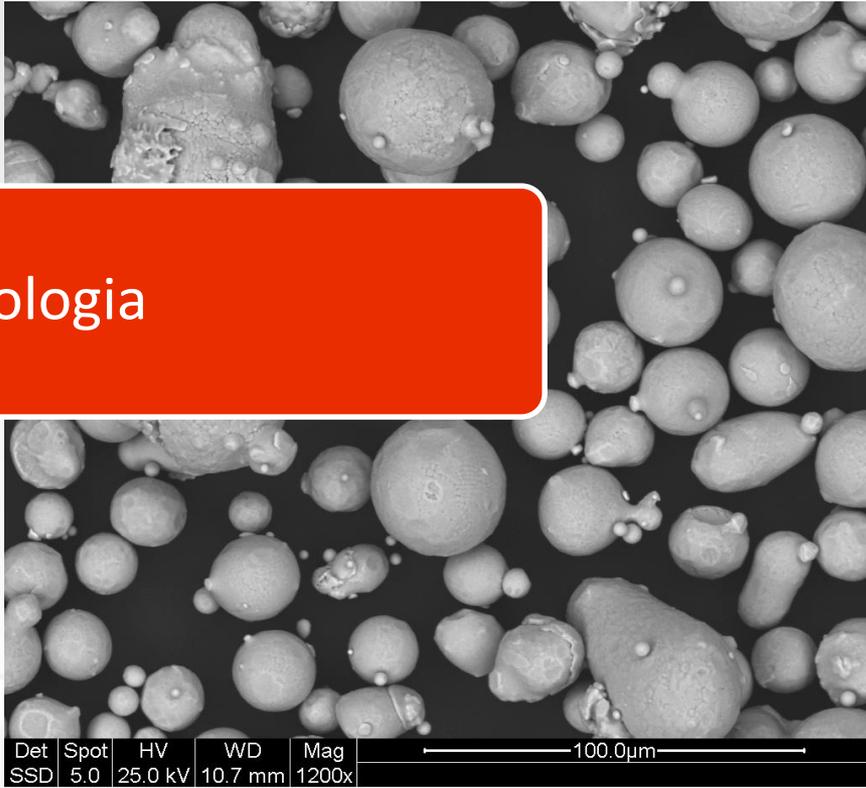
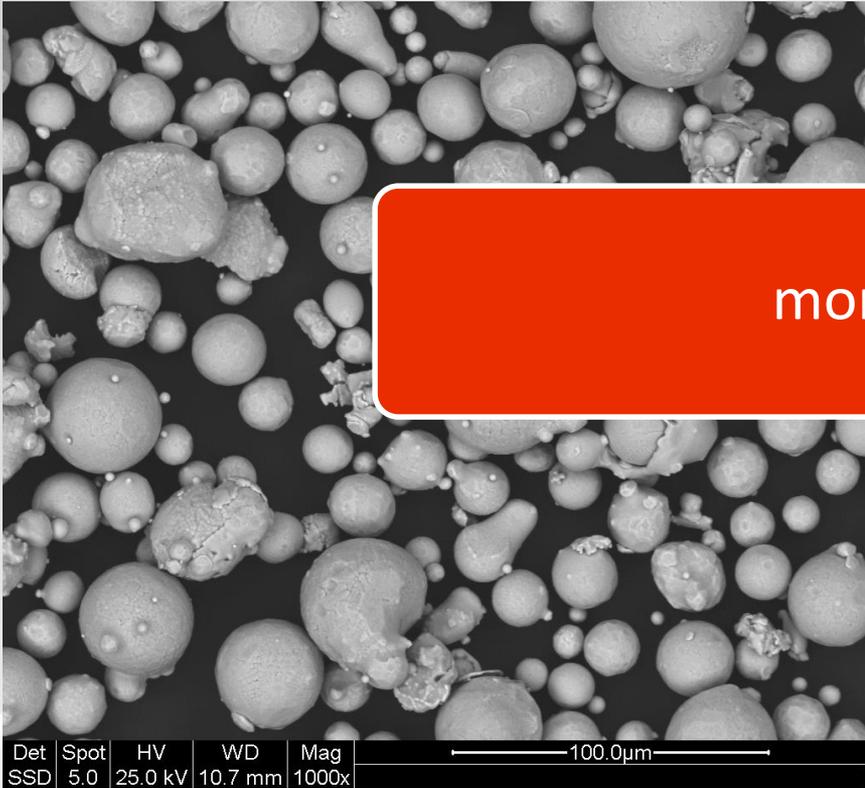


## Prova di Flow Rate secondo ASTM B213

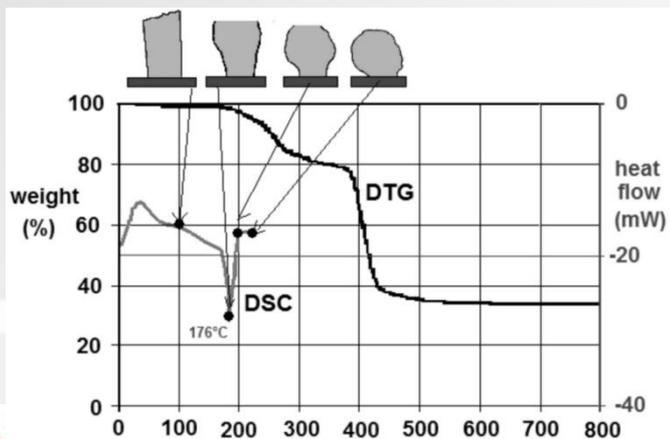
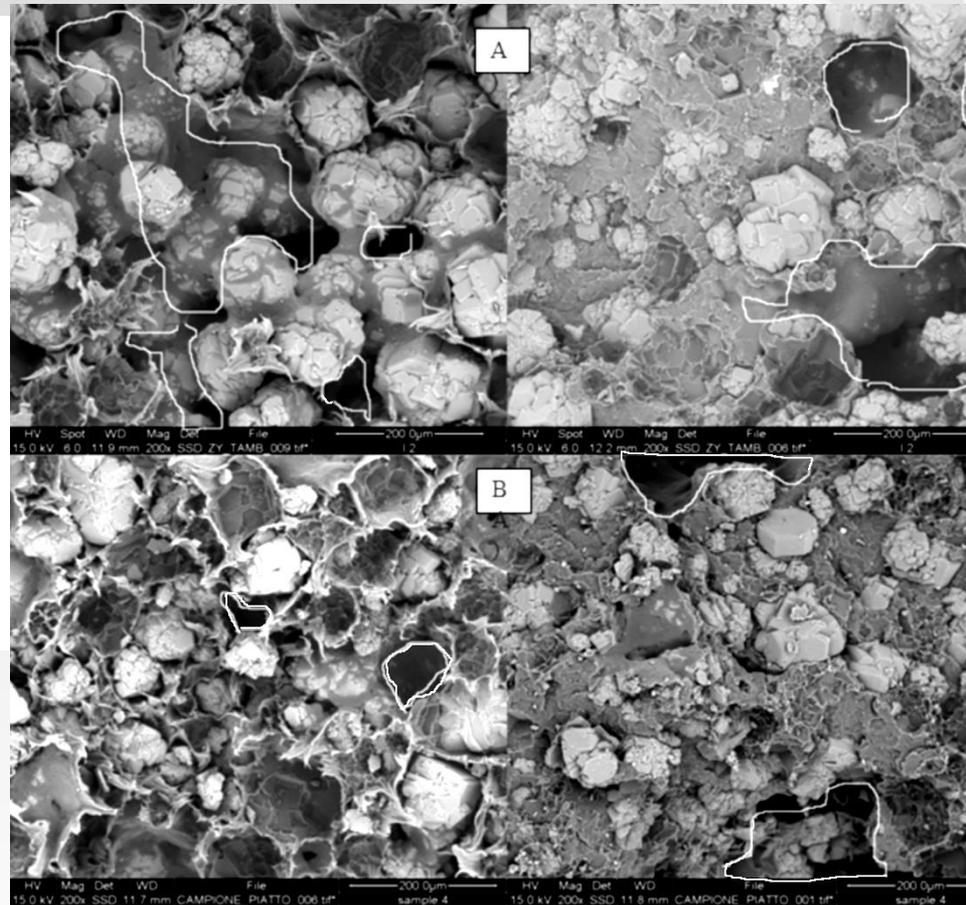
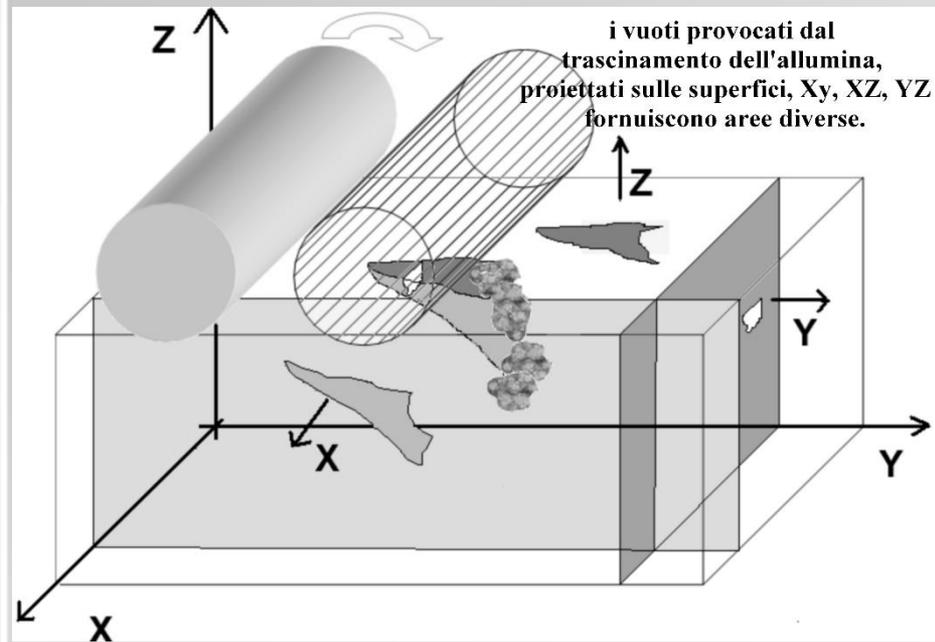
Le prove per la determinazione del tempo di scorrimento sono state eseguite sia con l'apparecchio di Hall (diametro dell'orifizio di 2.54 mm come da norma ASTM B213 o UNI EN ISO 4490), sia con l'apparecchio di Carney (diametro dell'orifizio 5.08 mm come da normativa ASTM B964).

Campione A:  $17.4 \pm 0.2$  [g/s] Le polveri scorrono liberamente.

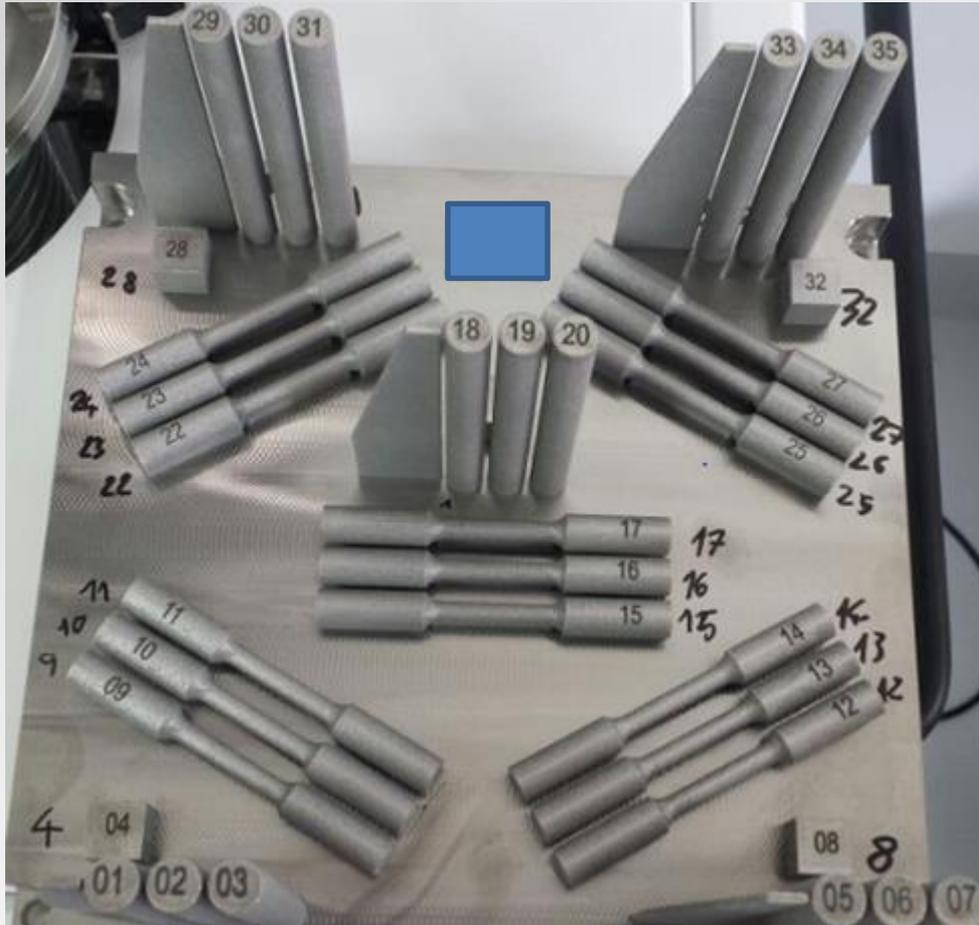
# Controllo della morfologia attraverso osservazione SEM

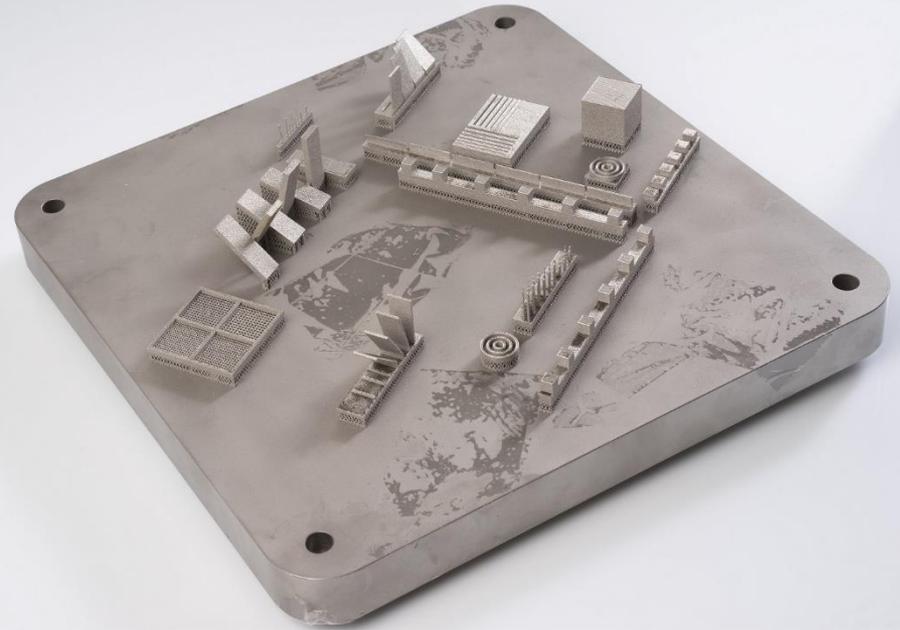


**Dove si introduce l'anisotropia?**

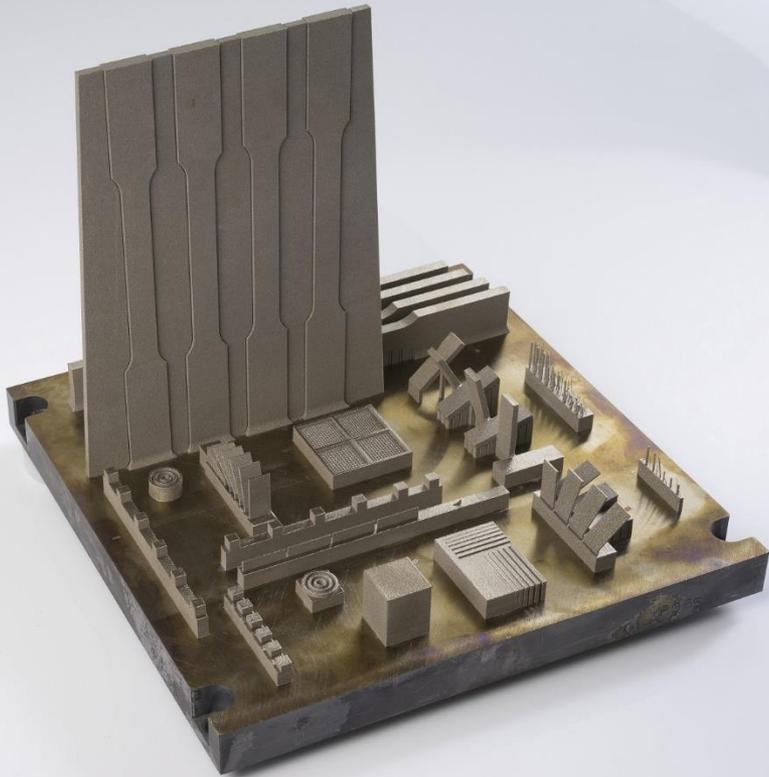


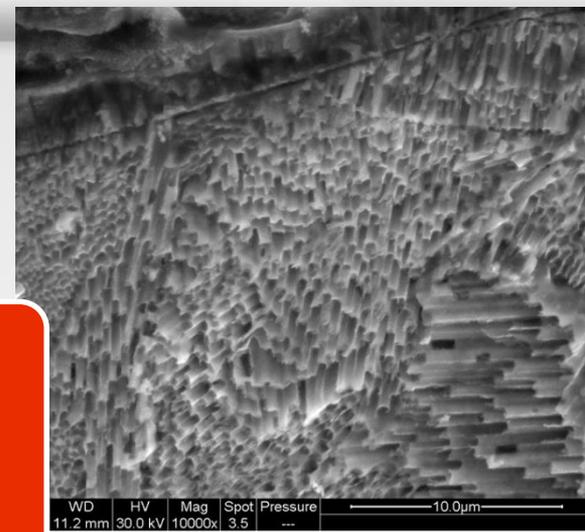
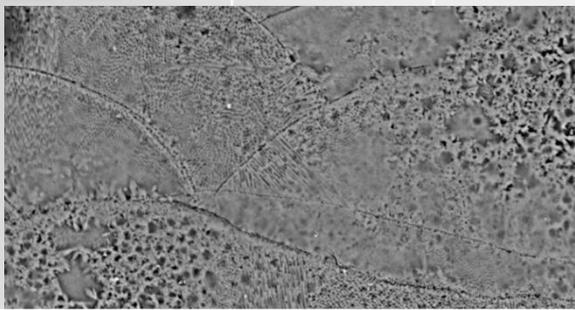
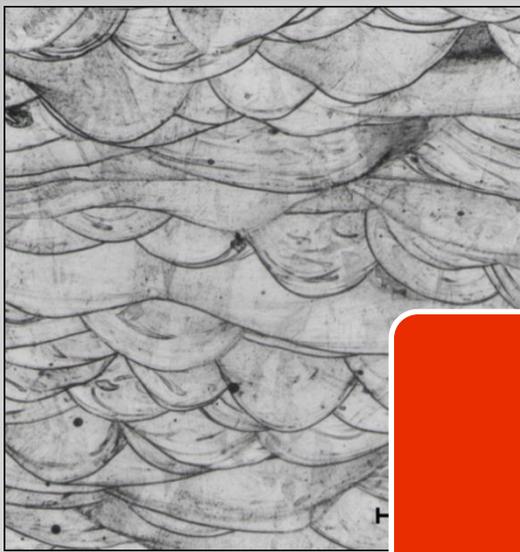
# Caratterizzazione prestazione macchina – polvere ante lavorazione



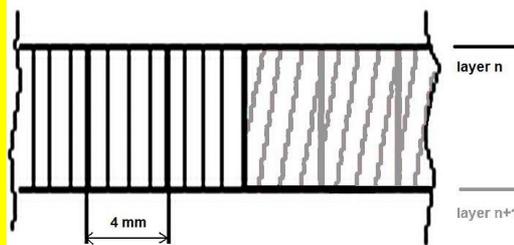


**Flessibilità produttiva  
macchina**





## microstruttura



### Parameters

Laser power	200W
Laser spot diameter	0.200 mm
Scan speed	up to 7.0 m/s
Building speed	2-20 mm <sup>3</sup> /s
Layer thickness	0.020 mm
Protective atmosphere	max 1.5% oxygen

Tecnologie	descrittori
VAT Photopolymerisation	liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization
Material Jetting	droplets of build material are selectively deposited
Binder Jetting	liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials
Material Extrusion	material is selectively dispensed through a nozzle or orifice
Powder Bed Fusion	which thermal energy selectively fuses regions of a powder bed( <i>Direct Metal Laser-Sintering (DMLS); Selective Laser Melting (SLM); Selective laser sintering (SLS); Electron Beam Melting (EBM)</i> )
Sheet Lamination	sheets of material are bonded to form an object
Directed Energy Deposition	thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited

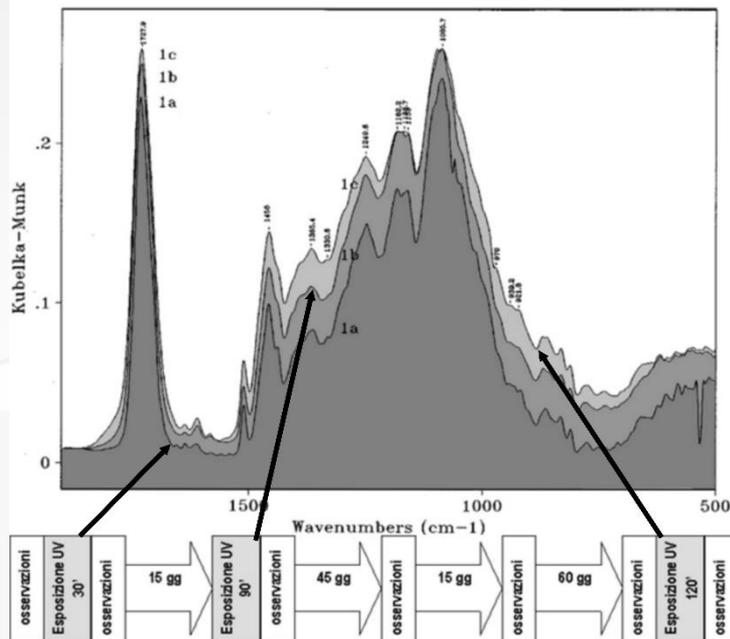
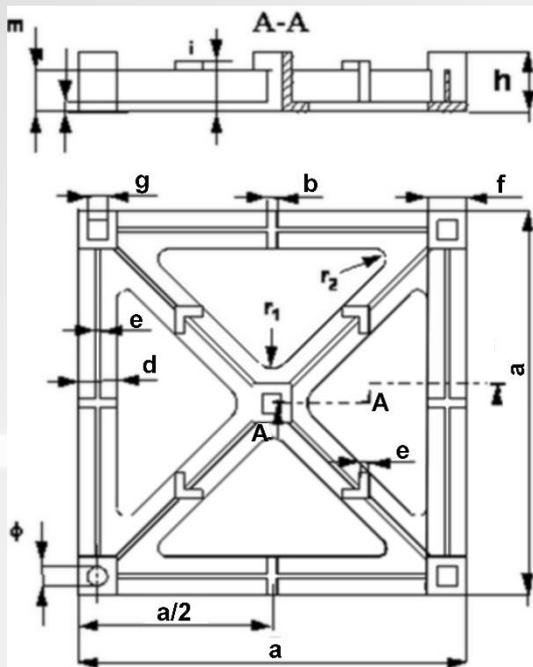
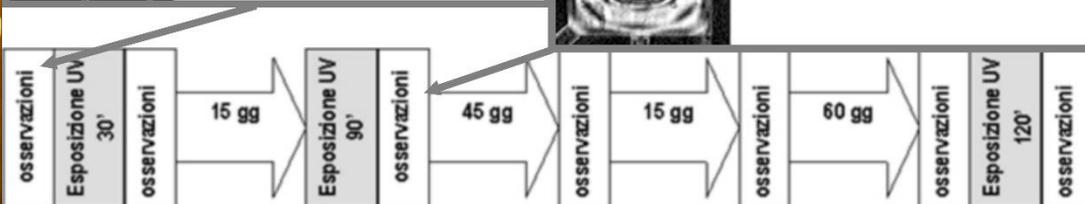
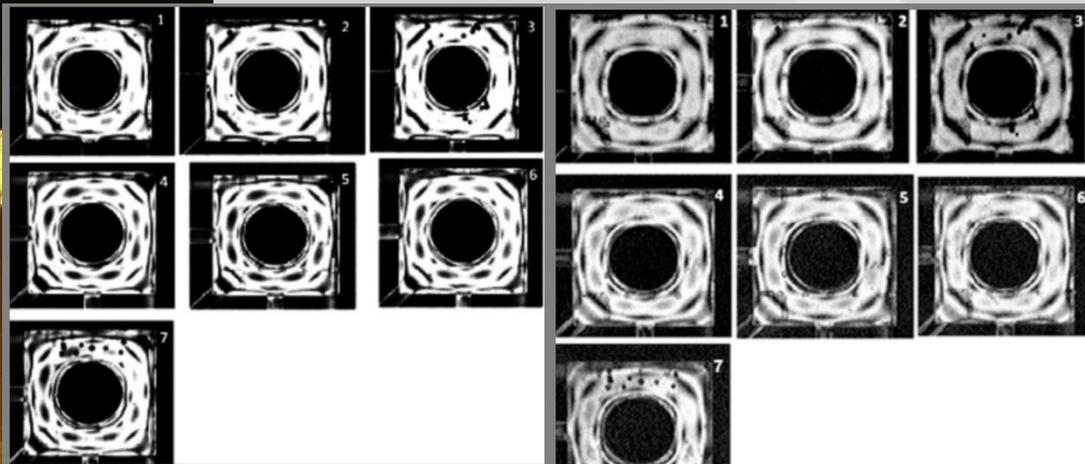
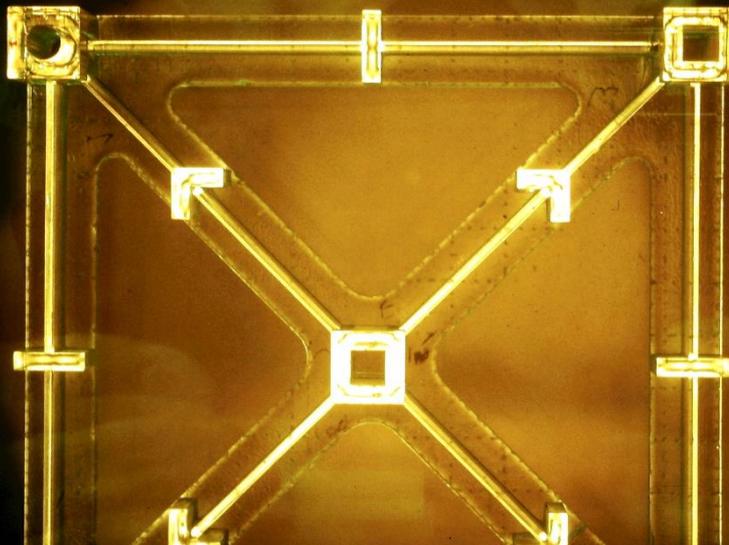
tecnologia	Anno di origine	brevetto	azienda	Camera di lavoro mm <sup>3</sup> (x/y/z)	potenza [W]	Sorgente energetica	Diametro spot [μm]	atmosfera	Spessore Strato [μm]		
SLS	1985	Univ. of Texas Austin (USA)	3D Systems direct metal	100x100x80	50	Fiber laser			10-50		
				140x140x100	300				10-50		
				250x250x300	500				10-50		
				500x500x50	2x500 (1000)				10-100		
			Farsoon, China	235x235x3050	30, 60	CO <sub>2</sub> laser			Ar/N <sub>2</sub>	20-100	
				350x350x430	30/60/100				60-300		
				275x275x320	500			20-100			
DMLS	1995	EOS Munich (Germany)	EOS GmbH (Germany)	∅80x95	100	Fiber laser		N <sub>2</sub>			
				250x250x325	250						
				250x150x325	100						
				400x400x400	90						
SLM	1995	Fraunhofer Institute ILT Aachen, Germany	SLM solution GmhB (Germany)	125x125x125	100	Fiber Laser	60 - 90	Ar/N <sub>2</sub>	20 - 75		
				280x280x280	100		80 - 120/700		20 - 75/100		
				300x300x300	100		60/70 - 90		20 - 75		
			Concept Laser GmbH	fiber laser	100x100x100	400	50-500	Ar/N <sub>2</sub>	20-200		
					100x100x100	1000	100-500		30-200		
							100x100x100	1000			
							150		50	Ar, Ar/N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	10
				∅240x250	200/400/1000		70/135/400	Ar, N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>	20 - 100		
				250X250X365	200/400	Fiber-Laser	70	Ar/N <sub>2</sub>	20-200		
EBM	1997	Arcam AB (Sweden)	Arcam AB (Sweden)	200x200x180	3000	Electron beam	100	1x10 <sup>-3</sup> mbar He	100		
				∅350x380	3000		180	4x10 <sup>-3</sup> mbar He	10-50		
				200X200X380	50-3000		200-1000	<1x10 <sup>-4</sup>	13		

classificazione

		EOS	SLM	Renishaw	3Dsystems	Arcam
AISI10Mg	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	210	227	206		
	R <sub>m</sub> [MPa]	390	397	417		
	A %	6	6	6		
AISI12	R <sub>p0.2</sub> [MPa]		211			
	R <sub>m</sub> [MPa]		409			
	A %		5.1			
AISI7Mg	R <sub>p0.2</sub> [MPa]		147			
	R <sub>m</sub> [MPa]		294			
	A %		3.1			
CoCrMo ASTM F75	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	800	835			560
	R <sub>m</sub> [MPa]	1200	1050			960
	A %	24	-			10
MARAGING STEEL 1.2709	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	1000				
	R <sub>m</sub> [MPa]	1100				
	A %	10				
Ti64ELI ASTM F136	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	1130				930
	R <sub>m</sub> [MPa]	1250				970
	A %	9				16
Ti6Al4V	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	1000				950
	R <sub>m</sub> [MPa]	1100				1020
	A %	10				14
TiAl6Nb7	R <sub>p0.2</sub> [MPa]					
	R <sub>m</sub> [MPa]					
	A %					
Ti grade 2	R <sub>p0.2</sub> [MPa]					540
	R <sub>m</sub> [MPa]					570
	A %					21
STAINLESS STEEL 1.4404	R <sub>p0.2</sub> [MPa]			492		
	R <sub>m</sub> [MPa]			588		
	A %			54		
STAINLESS STEEL 1.4540	R <sub>p0.2</sub> [MPa]					
	R <sub>m</sub> [MPa]					
	A %					
Hastelloy X	R <sub>p0.2</sub> [MPa]		595			
	R <sub>m</sub> [MPa]		772			
	A %		20			
Inconel 625	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	615	707	588		
	R <sub>m</sub> [MPa]	900	961	907		
	A %	42	33	33		
Inconel 718	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	634	689	594		
	R <sub>m</sub> [MPa]	980	995	887		
	A %	31	29	20		
Inconel 939	R <sub>p0.2</sub> [MPa]		735			
	R <sub>m</sub> [MPa]		1009			
	A %		30			
Gold		no specs				
γ-TiAl		no specs				no specs

classificazione

## Il fattore tempo



**Indagine sulle cause delle anomalie = know how aziendale**

# Caratterizzazione a fatica di acciaio maraging prodotto attraverso AM

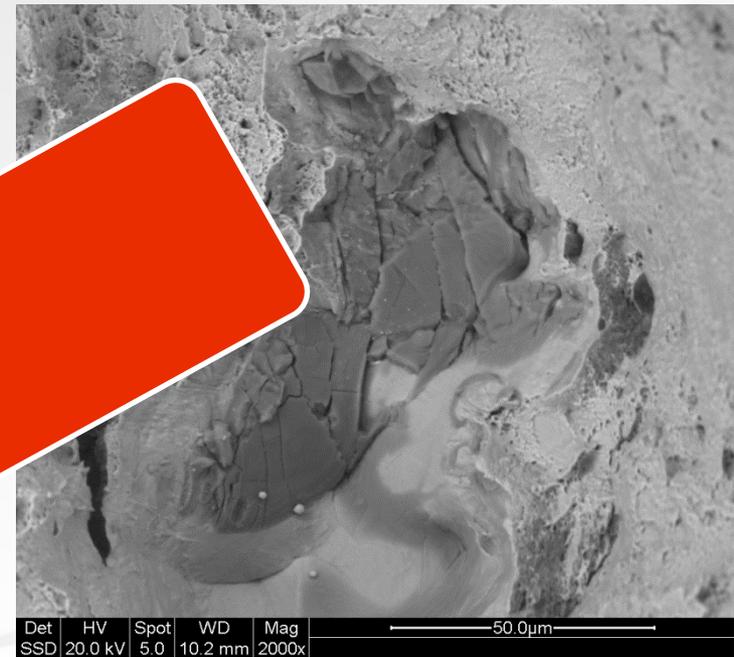
## STATIC TENSILE BEHAVIOUR

	FORGING	AM
Tensile strength (adimensional)	1	0.98
Yield strength (adimensional)	1	1.1

## AXIAL FATIGUE LIFE – CYCLES TO FAILURE (const. amplitude)

$\sigma_{max}$	FORGING	AM
0.3 Y	1	0.98
0.2 Y	1	1.1
0.14 Y	Inf	$10^5$

vita a fatica



# Thank you for your attention!



**Prof. Andrea Gatto**  
**Dipartimento di Ingegneria «ENZO FERRARI».**  
**Università di Modena e Reggio Emilia**  
**Via Vivarelli, 10 Modena**  
**e-mail [gatto.andrea@unimore.it](mailto:gatto.andrea@unimore.it)**  
**tel. 0592056155**