



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Fundamentals of Additive Manufacturing (aka Digital fabrication)

Prof. Carmelo De Maria

Università di Pisa, carmelo.demaria@unipi.it

Dr. Pierpaolo Fucile

Università Campus Bio-Medico di Roma, p.fucile@unicampus.it





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



A picture says than
1000 words ...
a model tells the
whole story

3D Printed Fingers Let Kids
Be Kids





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



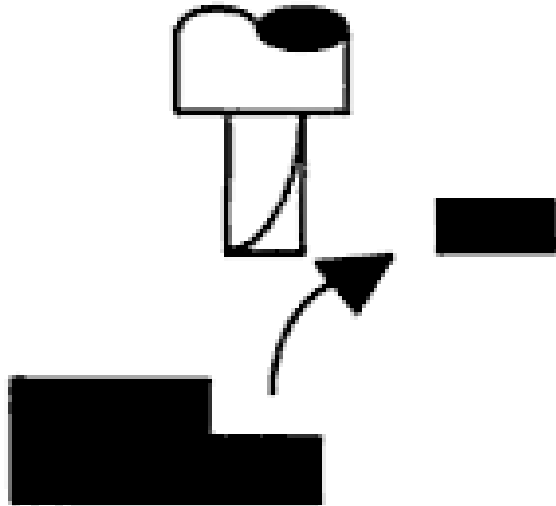
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



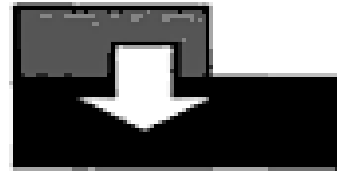
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



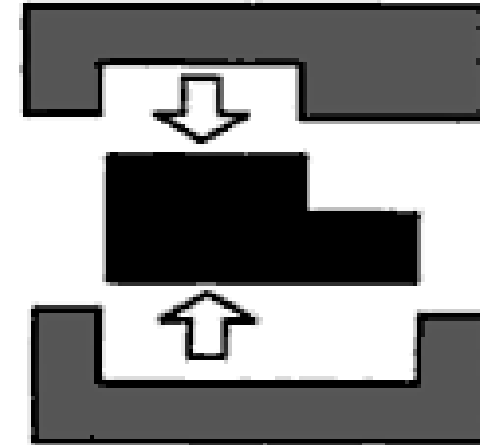
Building 3D objects



Subtractive



Additive



Formative





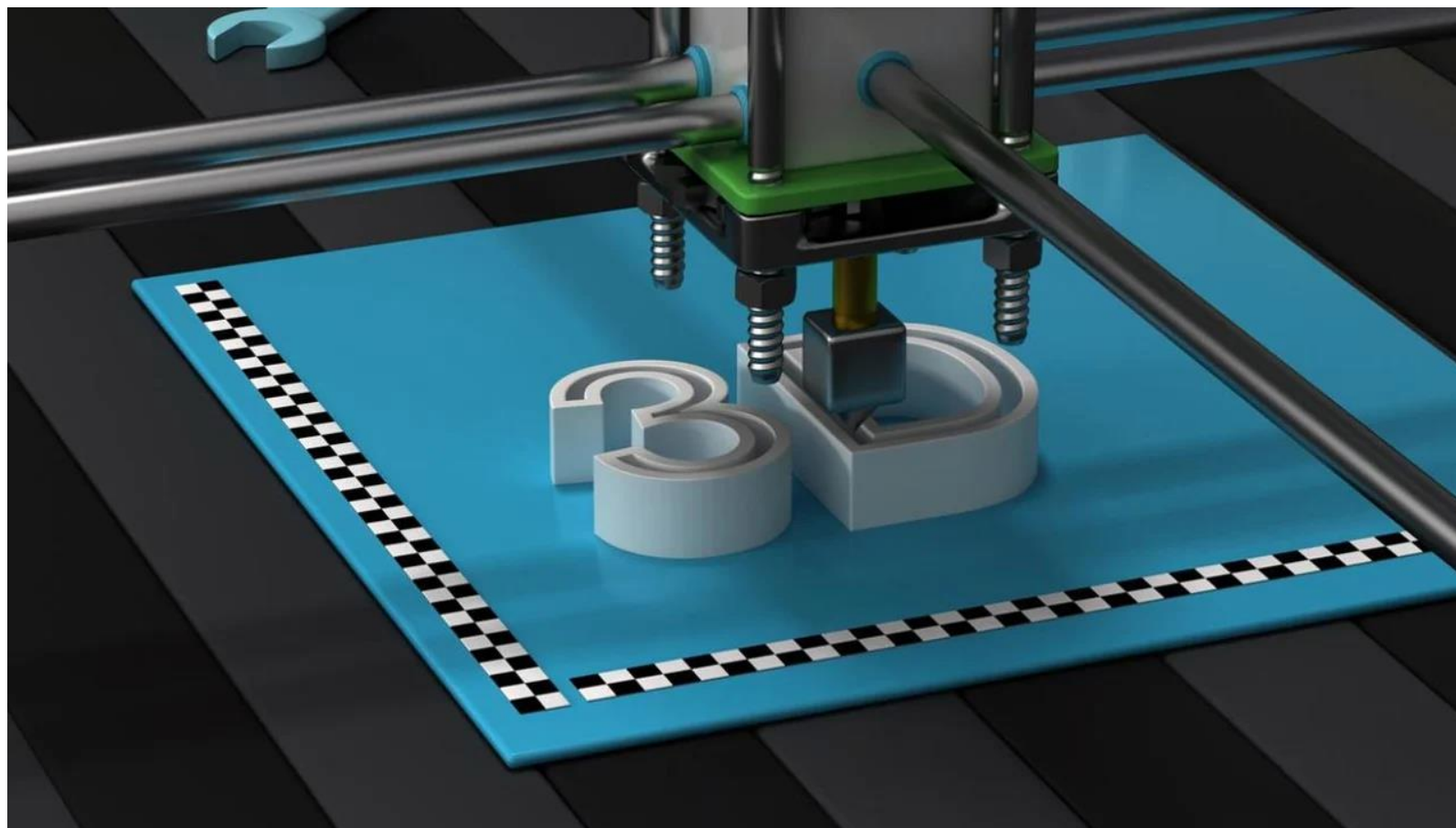
Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

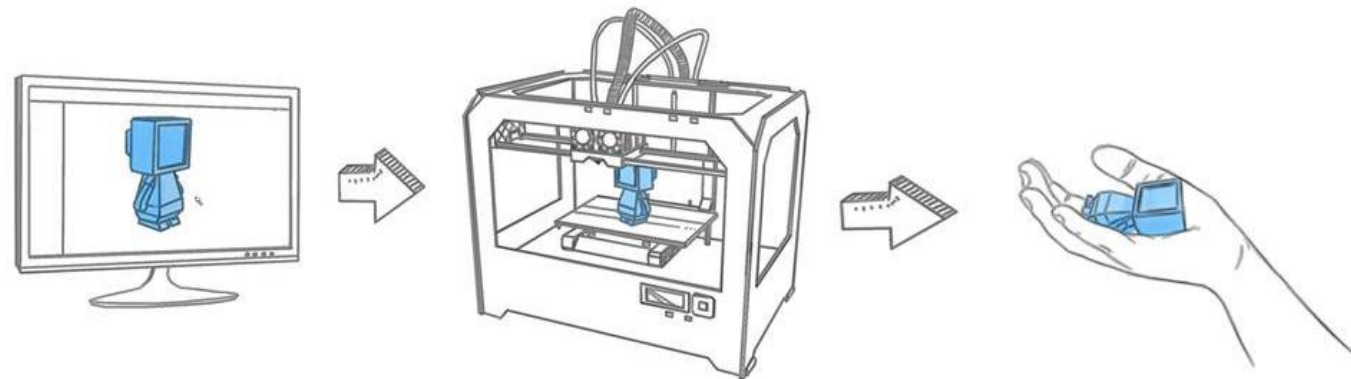


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive Manufacturing

- Additive manufacturing is a process of making a 3D solid object of virtually any shape **from a digital model**.
- It is achieved using an additive process, where successive layers of material are laid down in different shapes.





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



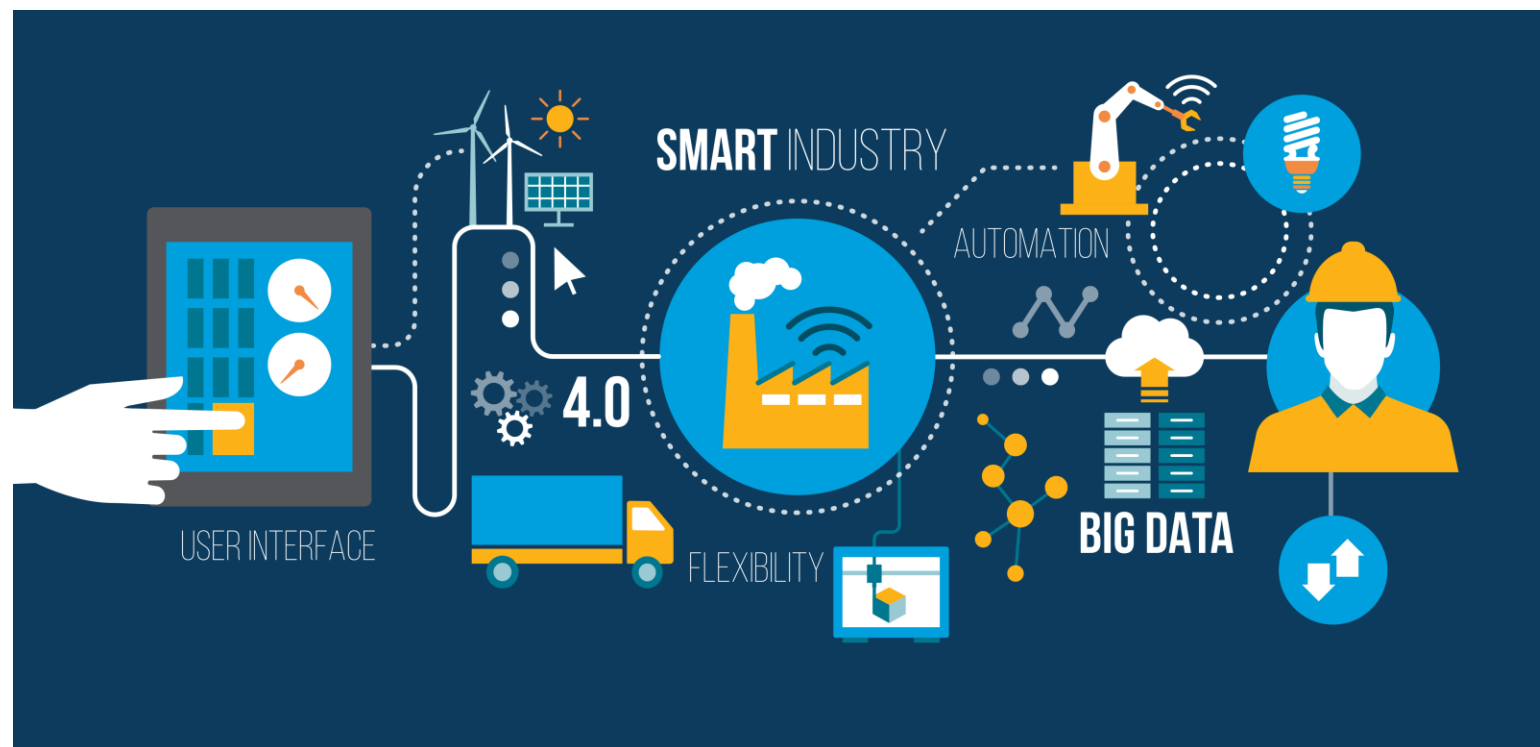
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



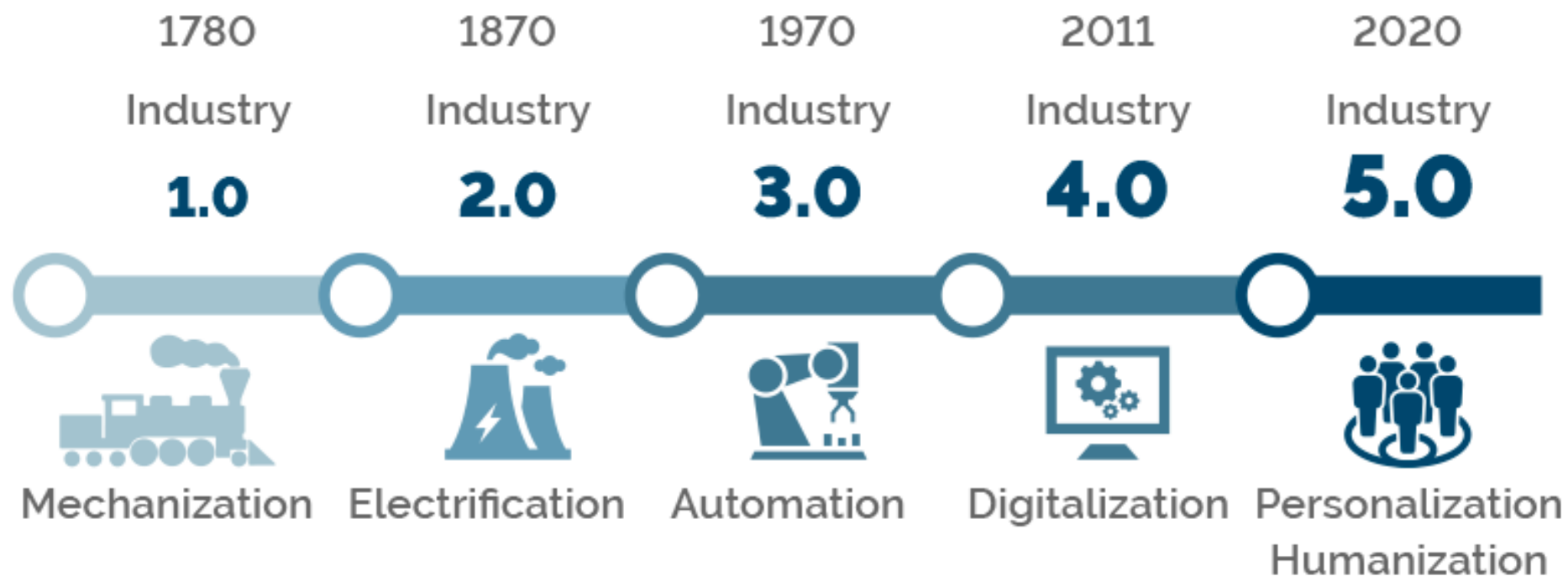
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive manufacturing in the context of Industry 4.0



Additive manufacturing in the context of Industry 4.0 and 5.0





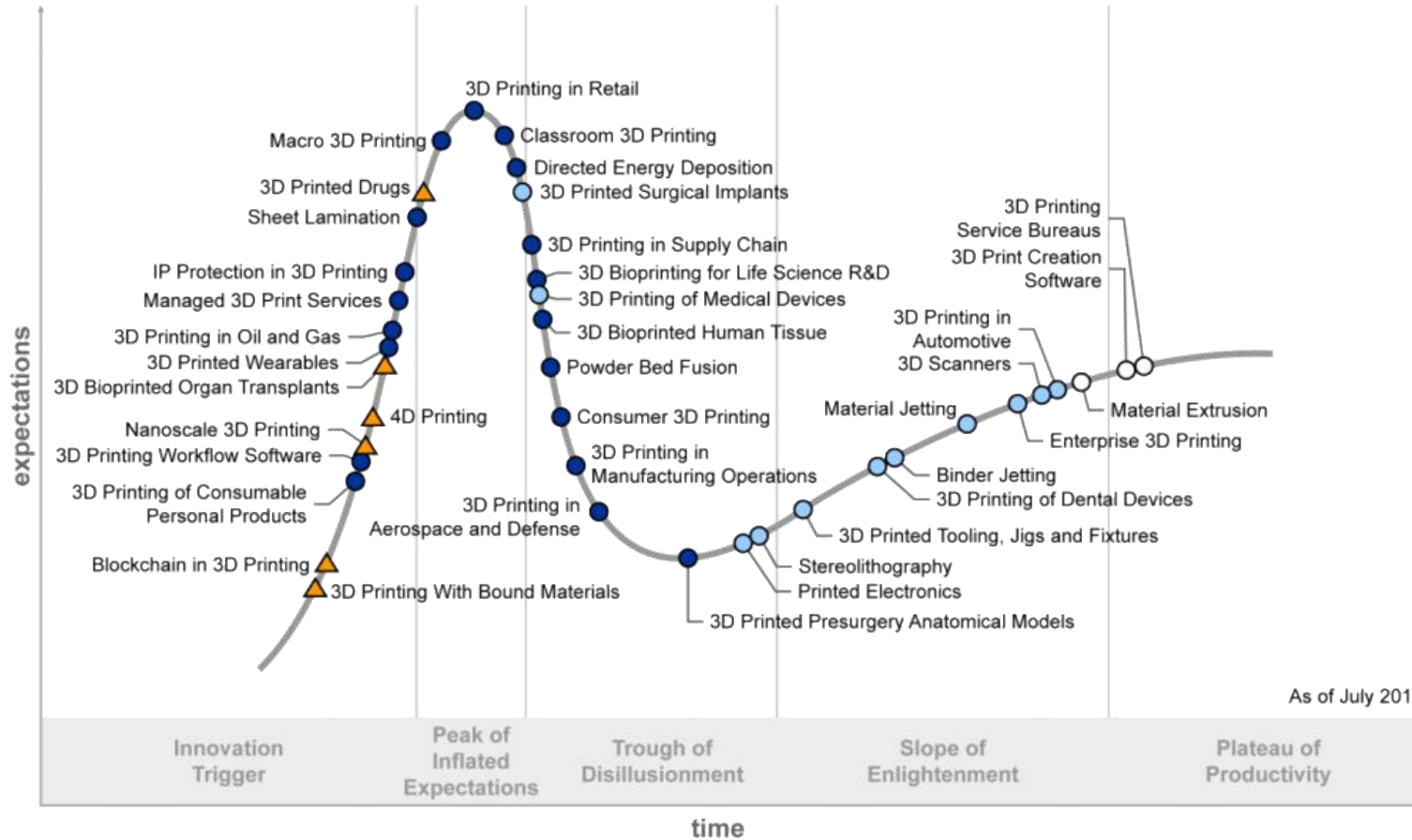
Finanziato dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



Plateau will be reached:

- less than 2 years
- 2 to 5 years
- 5 to 10 years
- ▲ more than 10 years
- ⊗ obsolete before plateau

© 2018 Gartner, Inc.





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive manufacturing using...

- Polymers
 - Thermoplastics
 - Resins
 - Wax
- Slurries and gels
- Metals
- Ceramics
- Biological materials





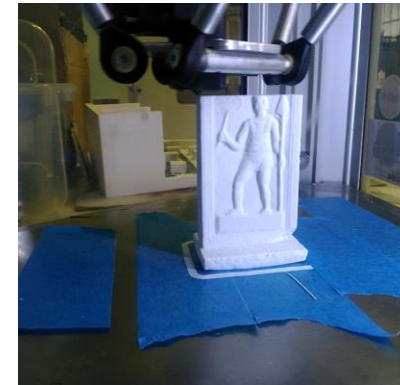
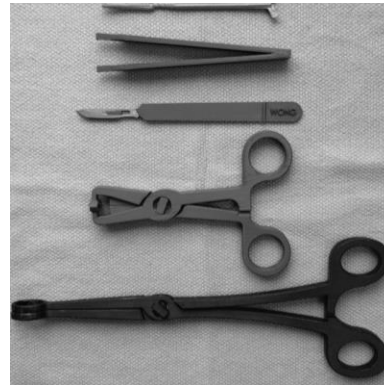
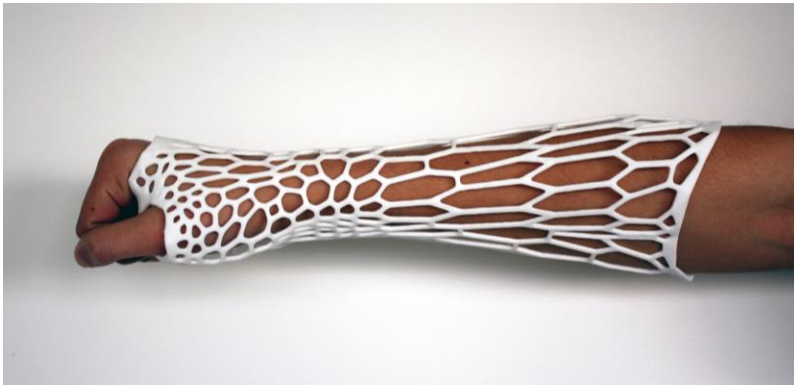
Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





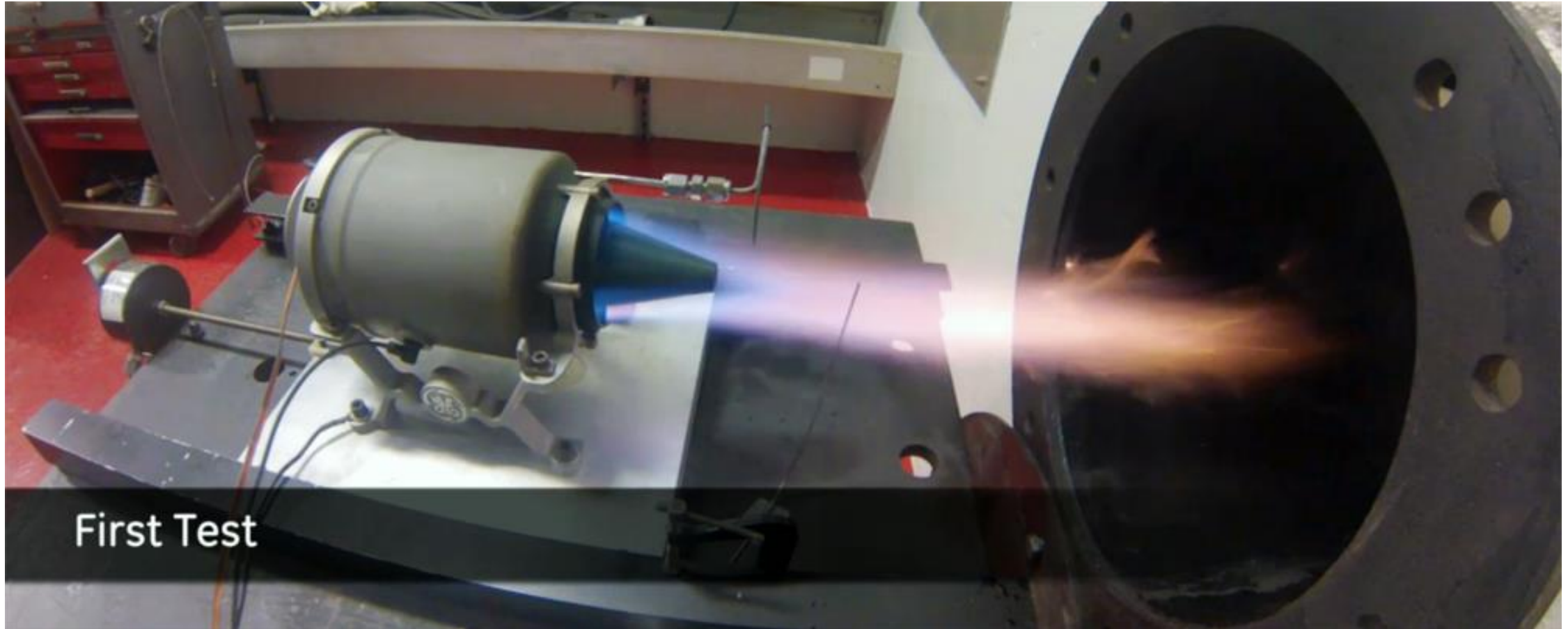
Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



First Test





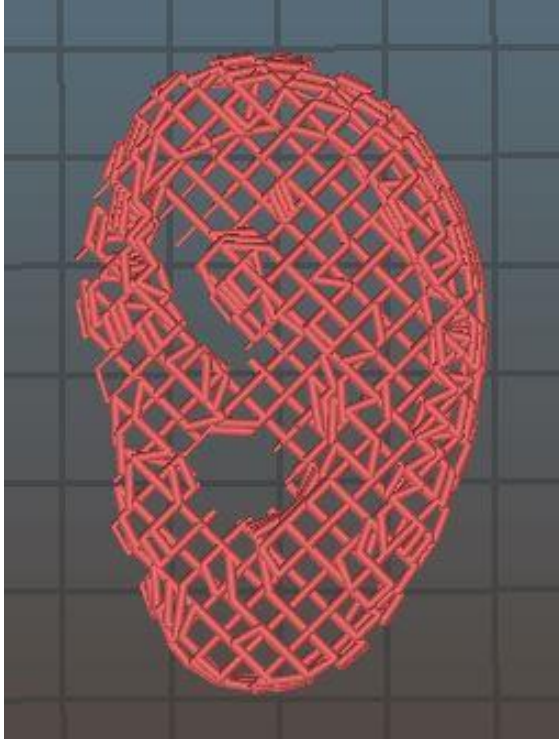
Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





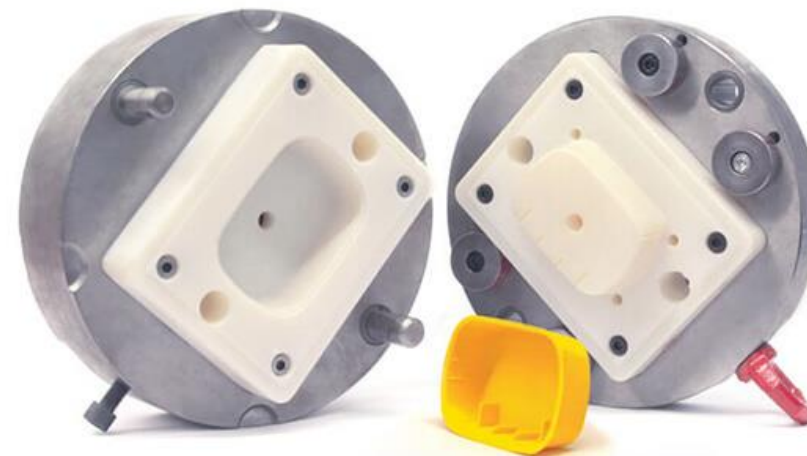
Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



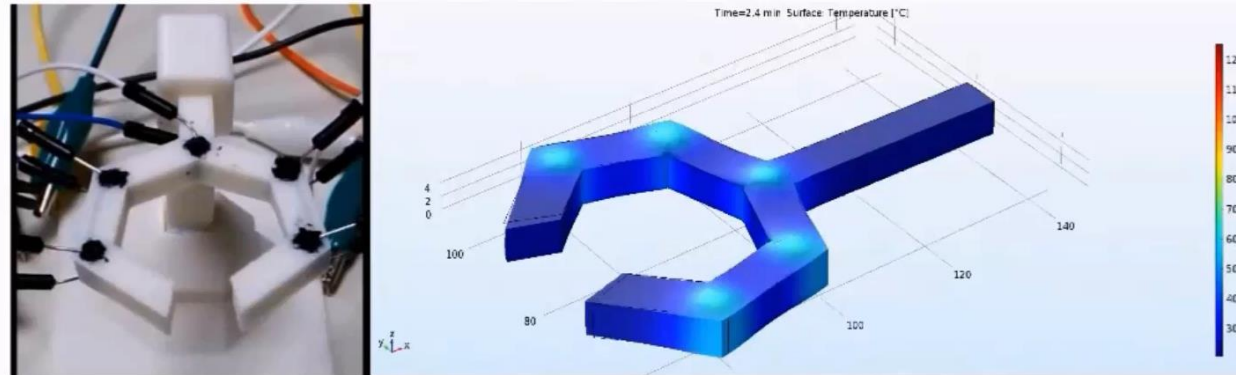
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



4D printing



Smart Materials and Structures

PAPER

Shape-memory actuators manufactured by dual extrusion multimaterial 3d printing of conductive and non-conductive filaments

Simone Micalizzi¹, Andrés Díaz Lantada²  and Carmelo De Maria¹

Published 5 September 2019 • © 2019 IOP Publishing Ltd

[Smart Materials and Structures](#), Volume 28, Number 10





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



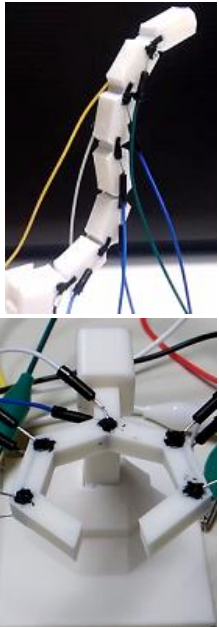
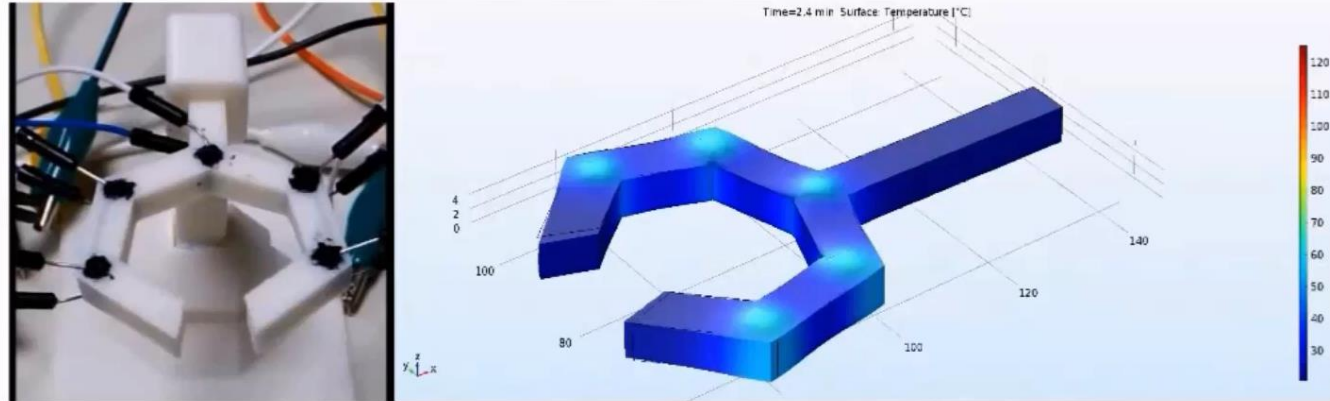
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



4D printing





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

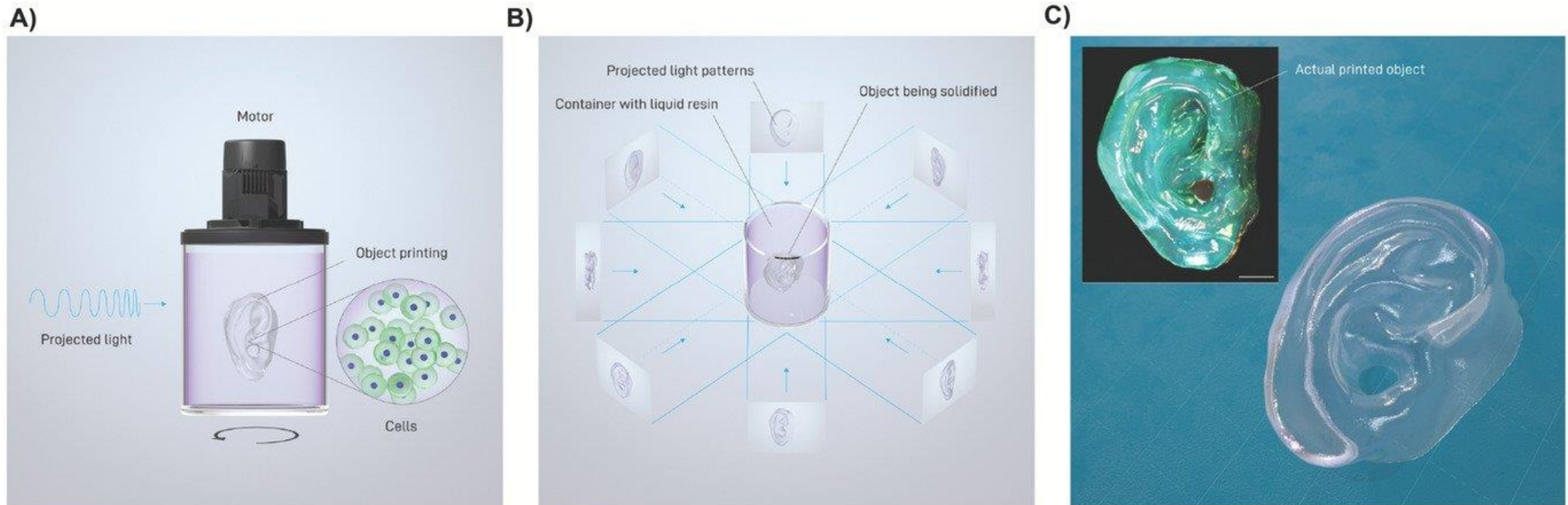


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Volumetric (bio-)printing

https://www.youtube.com/watch?v=Pi_uPq7PpXs



Bernal, P. N., Delrot, P., Loterie, D., Li, Y., Malda, J., Moser, C., & Levato, R. (2019). Volumetric bioprinting of complex living-tissue constructs within seconds. *Advanced materials*, 31(42), 1904209.

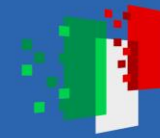




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

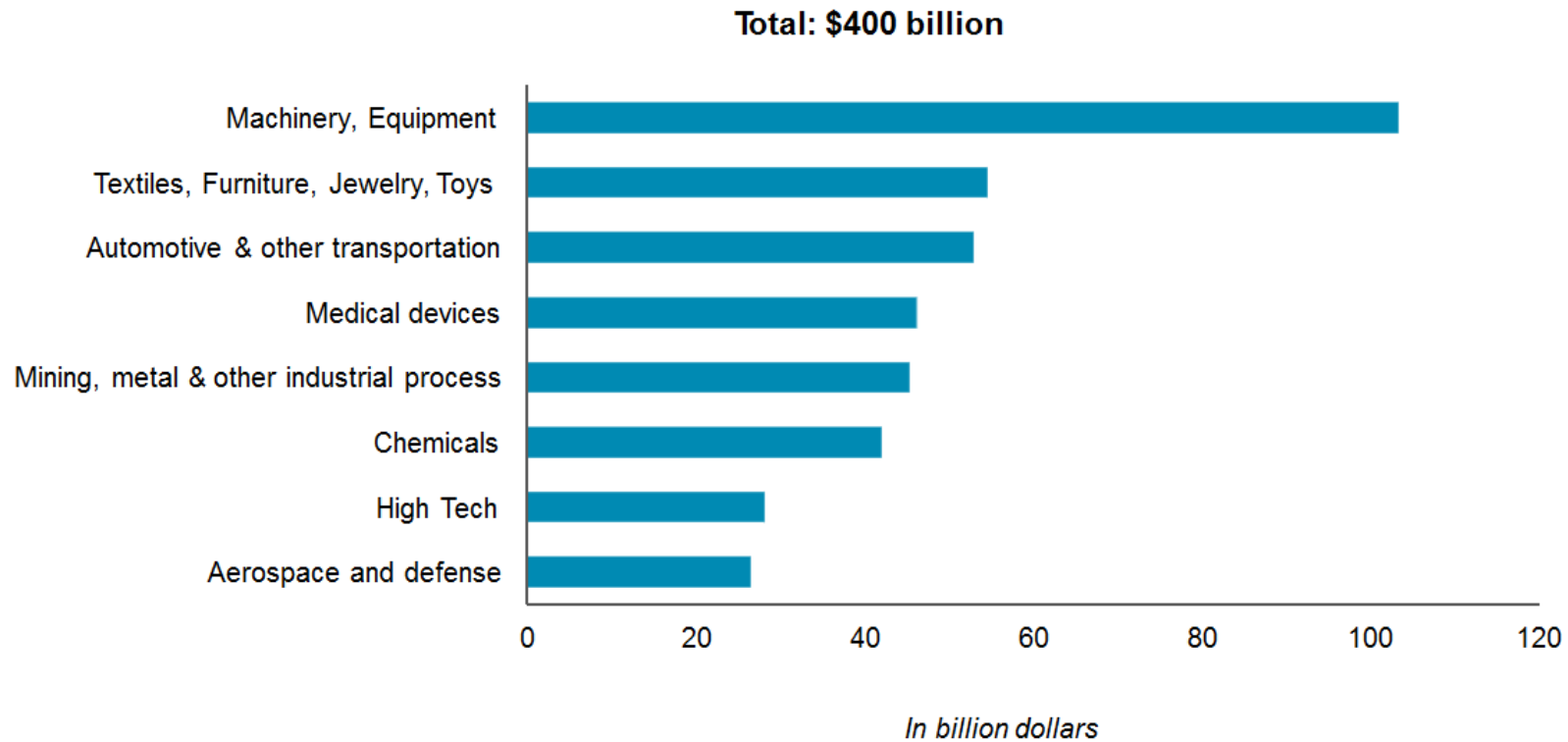


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive manufacturing by Industry Sectors

Manufacturing sub-sectors impacted by 3D printing - 2030
Global – forecast 2030



Source: Oliver Wyman modelization & analysis





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

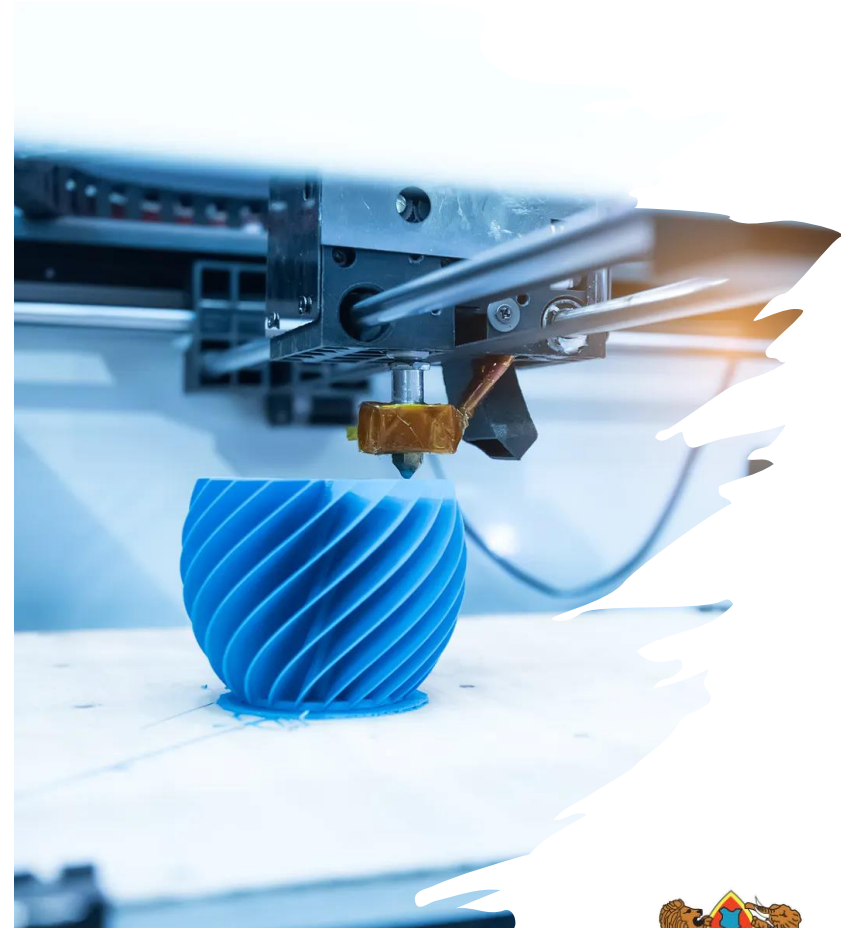


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



So, why additive manufacturing?

- Functional complexity
- Geometric complexity
- Multi-material parts
- Cost-sensitive storage
- Time-to-market
- Frequency of design changes
- Customization
- ...





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



ASTM/ISO 52900 classification

1. **Material extrusion:** AM process in which material is selectively dispensed through a nozzle or orifice;
2. **Vat photopolymerisation:** AM process in which liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization.
3. **Material jetting:** AM process in which droplets of build material are selectively deposited [Note: Example materials include photopolymer and wax.]
4. **Binder jetting:** AM process in which a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials;
5. **Powder bed fusion:** AM process in which thermal energy selectively fuses regions of a powder bed;
6. **Directed energy deposition:** AM process in which focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited [Note: "Focused thermal energy" means that an energy source (e.g. laser, electron beam, or plasma arc) is focused to melt the materials being deposited]
7. **Sheet lamination:** AM process in which sheets of material are bonded to form a part;



ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



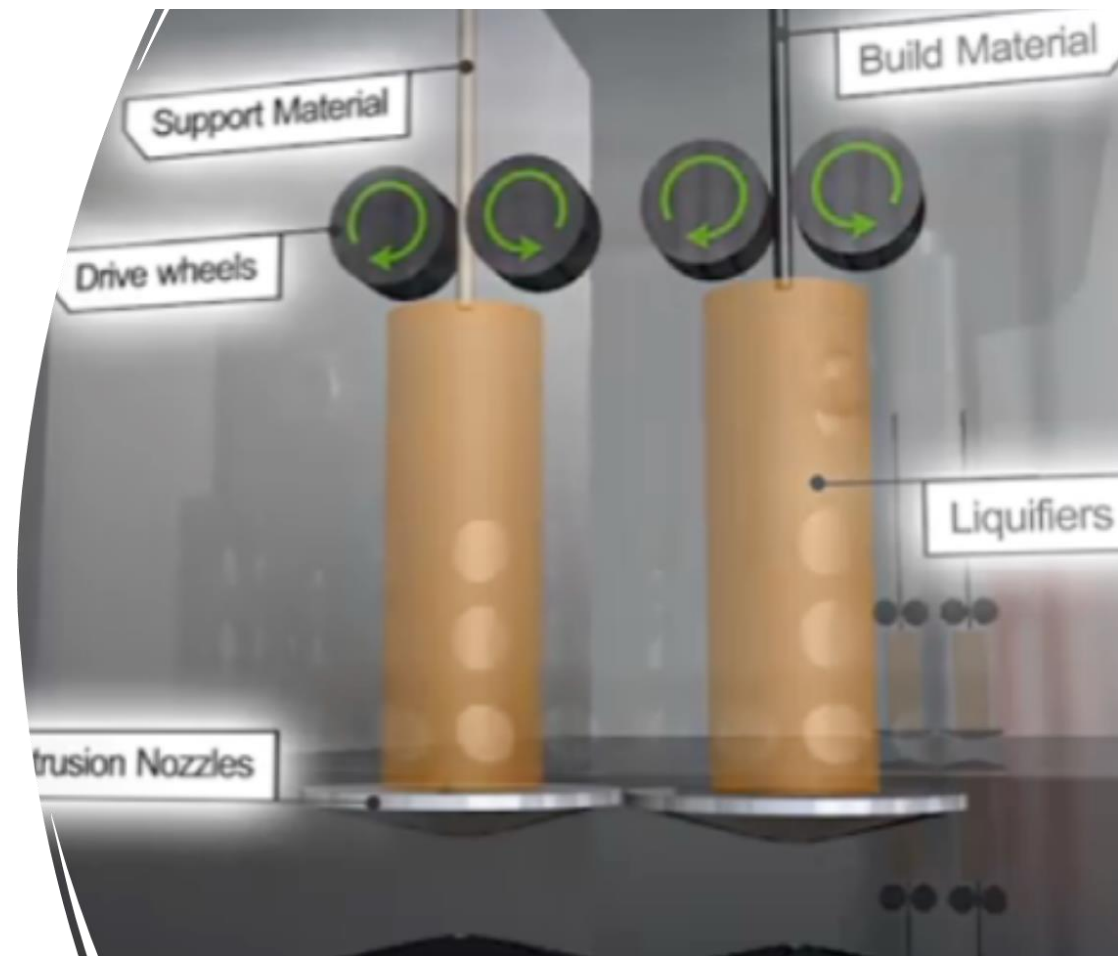
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



1. Material extrusion





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



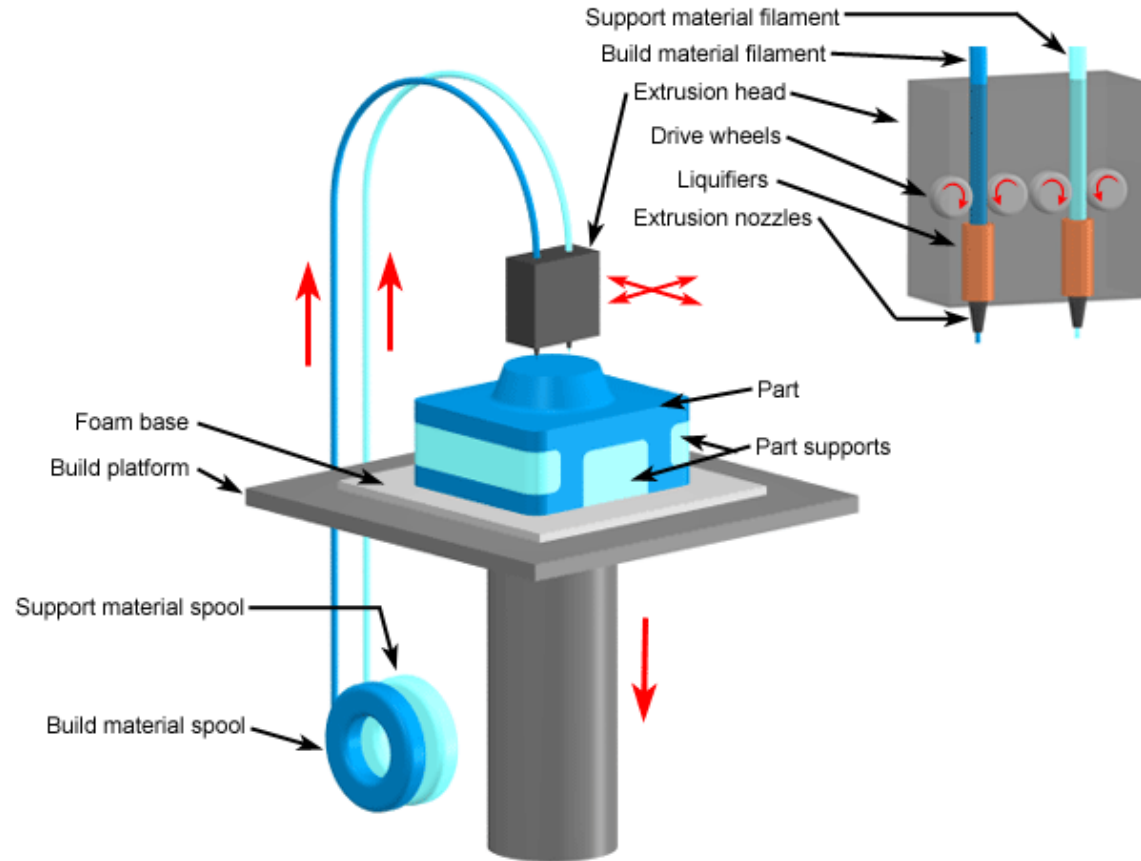
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Fused deposition modelling



Copyright © 2008 CustomPartNet

<https://www.youtube.com/watch?v=WHO6G67GJbM>

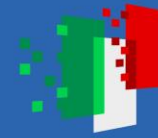




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



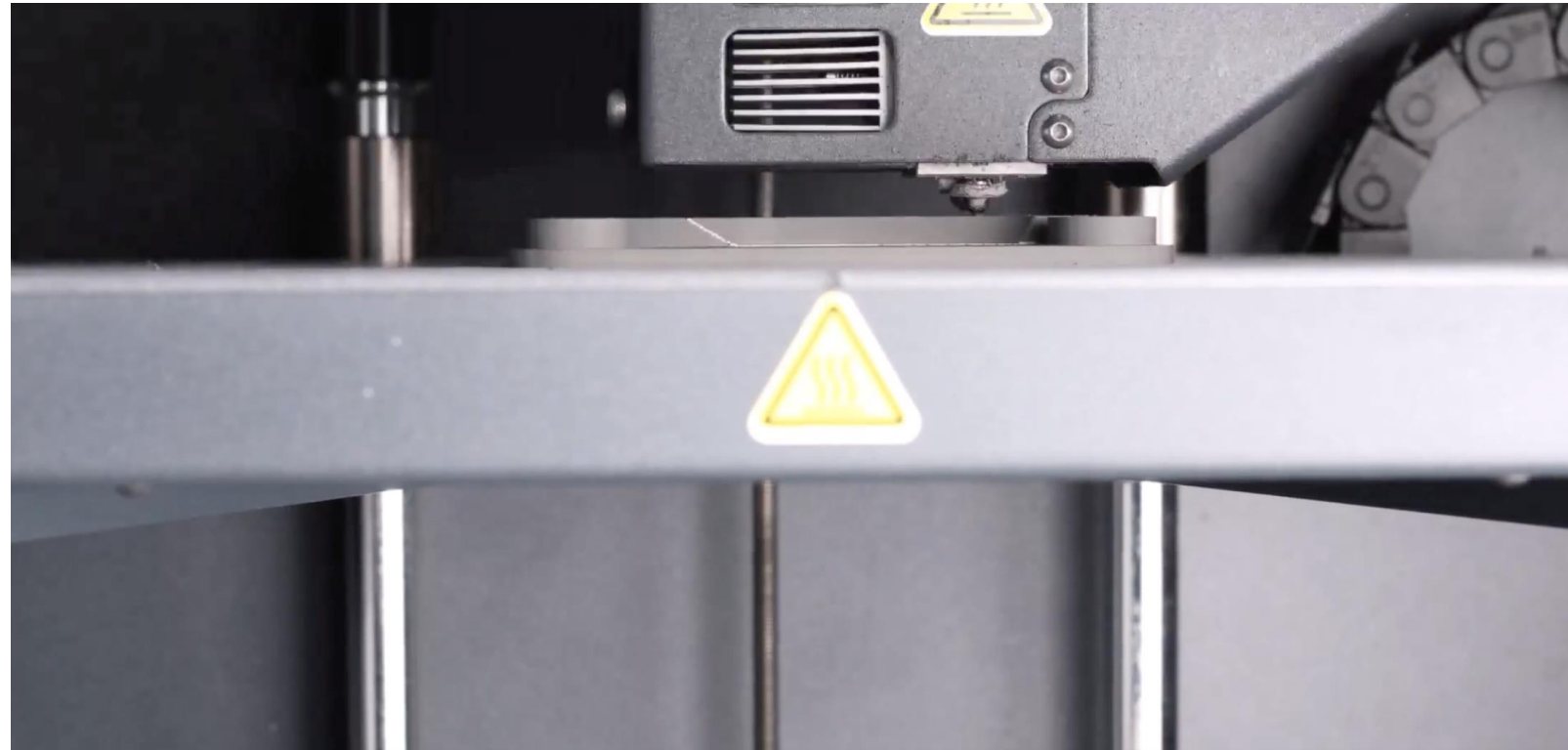
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Atomic diffusion additive manufacturing (ADAM)



<https://www.youtube.com/watch?v=eWS-tNRtXh8>





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



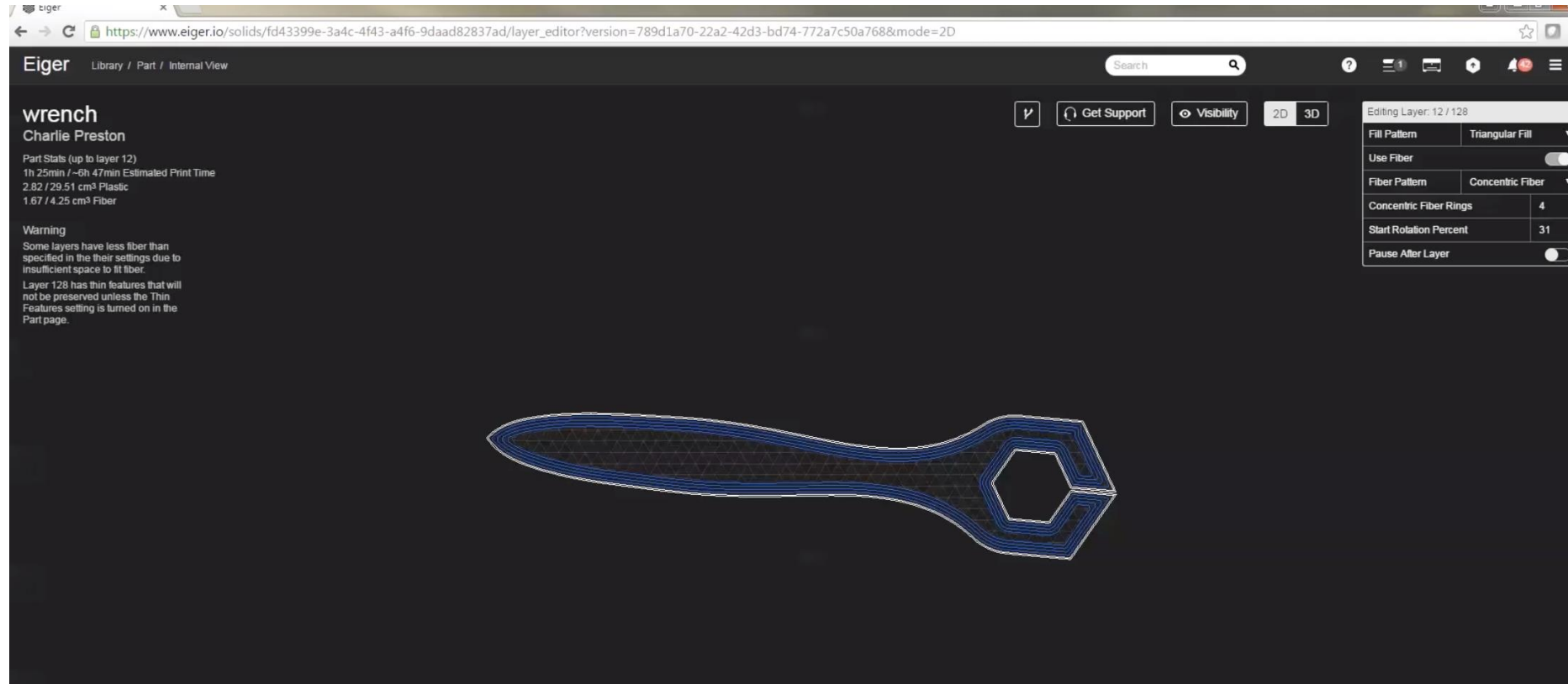
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



3D printing composite materials



<https://www.youtube.com/watch?v=9Mk7EpMjQ0Y>





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



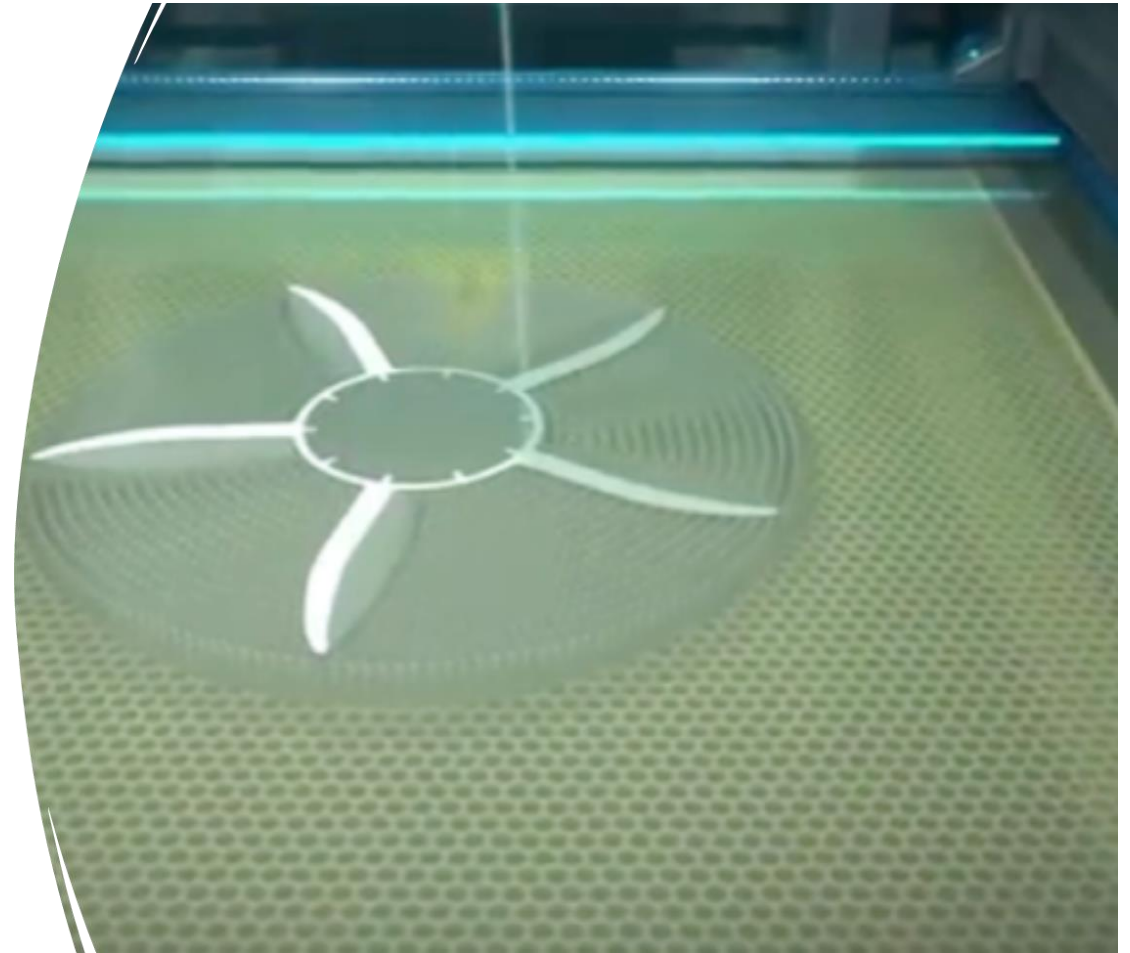
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



2. Vat Photopolymerization



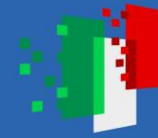
<https://www.youtube.com/watch?v=NM55ct5KwiI>



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

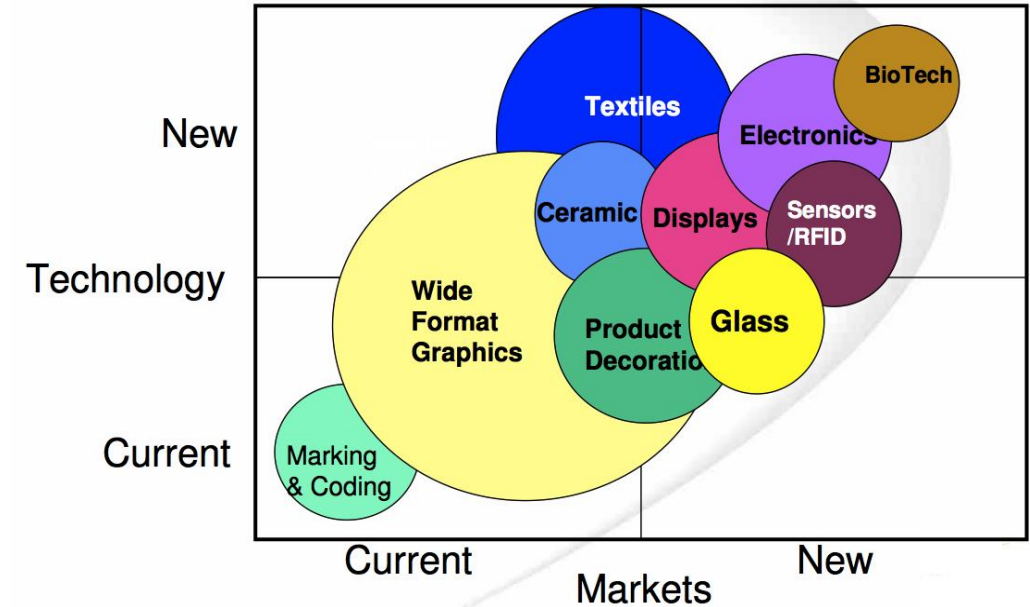


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Inkjet based technologies

- The ink-jet technology is a contact free dot matrix printing procedure.
- Ink is issued from a small aperture directly onto a specific position on a medium





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



3. Material Jetting





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



4. Binder Jetting



<https://www.youtube.com/watch?v=deA-7b3guT4>



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



5. Powder bed fusion





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



6. Directed energy deposition

Laser engineering net shaping (LENS)





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



5D Printing



<https://www.youtube.com/watch?v=g8sT8ESfjrg>



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



7. Sheet lamination



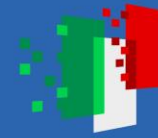
<https://www.youtube.com/watch?v=GjJKuteh4xM>



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



General consideration on Additive manufacturing Technologies



Materials

Materials	Example materials	Process categories						
		Vat photo-polymer-ization	Material jetting	Binder jetting	Powder bed fusion	Material extrusion	Directed energy deposition	Sheet lamination
Thermoset Polymers	Epoxies and acrylates	X	X			a		
Thermo-plastic polymers	Polyamide, ABS, PPSF		X	X	X	X		X
Wood	paper							X
Metals	Steel, Titanium alloys, Cobalt chromium			X	X	b	X	X
Industrial ceramic materials	Alumina, Zirconia, Silicone nitride	X		X	X			X
Structural ceramic materials	Cement, Foundry sand			X	X	X		

Note: Combinations of the above material classes, e.g. a composite, are possible

a = Photosensitive resins bioprinting
b = ADAM (Atomic diffusion additive manufacturing) process, aka SDS (shape – debind – sintering)





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



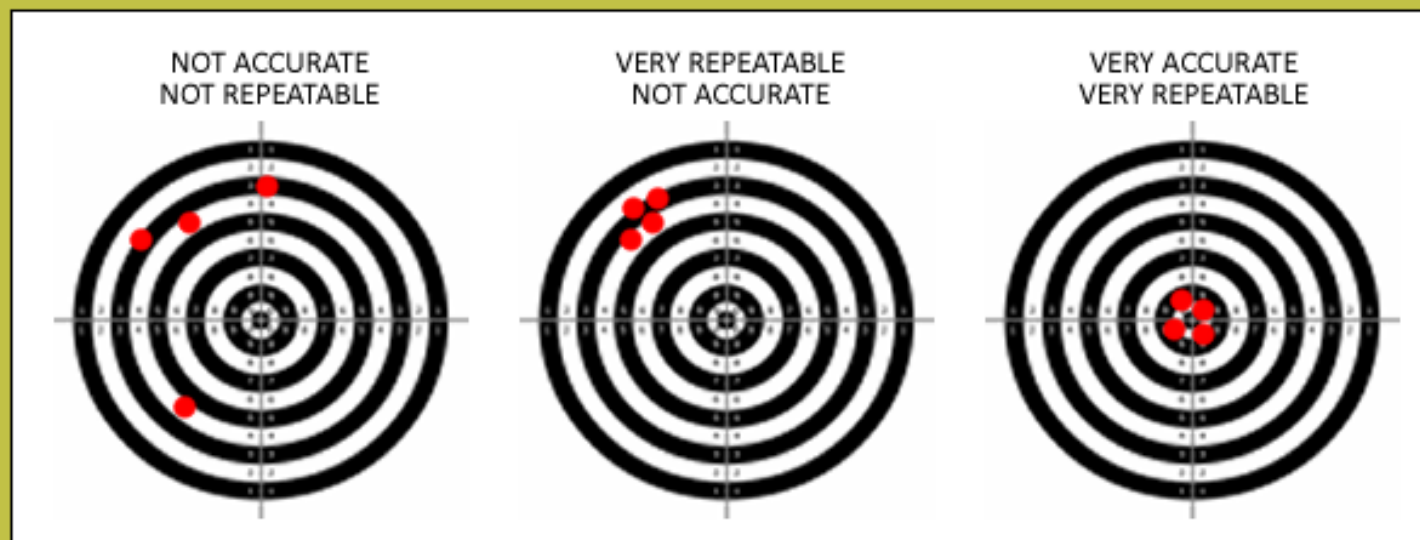
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Accuracy-repeatability-resolution



ACCURACY

Degree of conformity of a measurement to a standard or known value

REPEATABILITY

The closeness of agreement among a number of consecutive measurements

RESOLUTION

The smallest degree of movement that a scale can detect





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

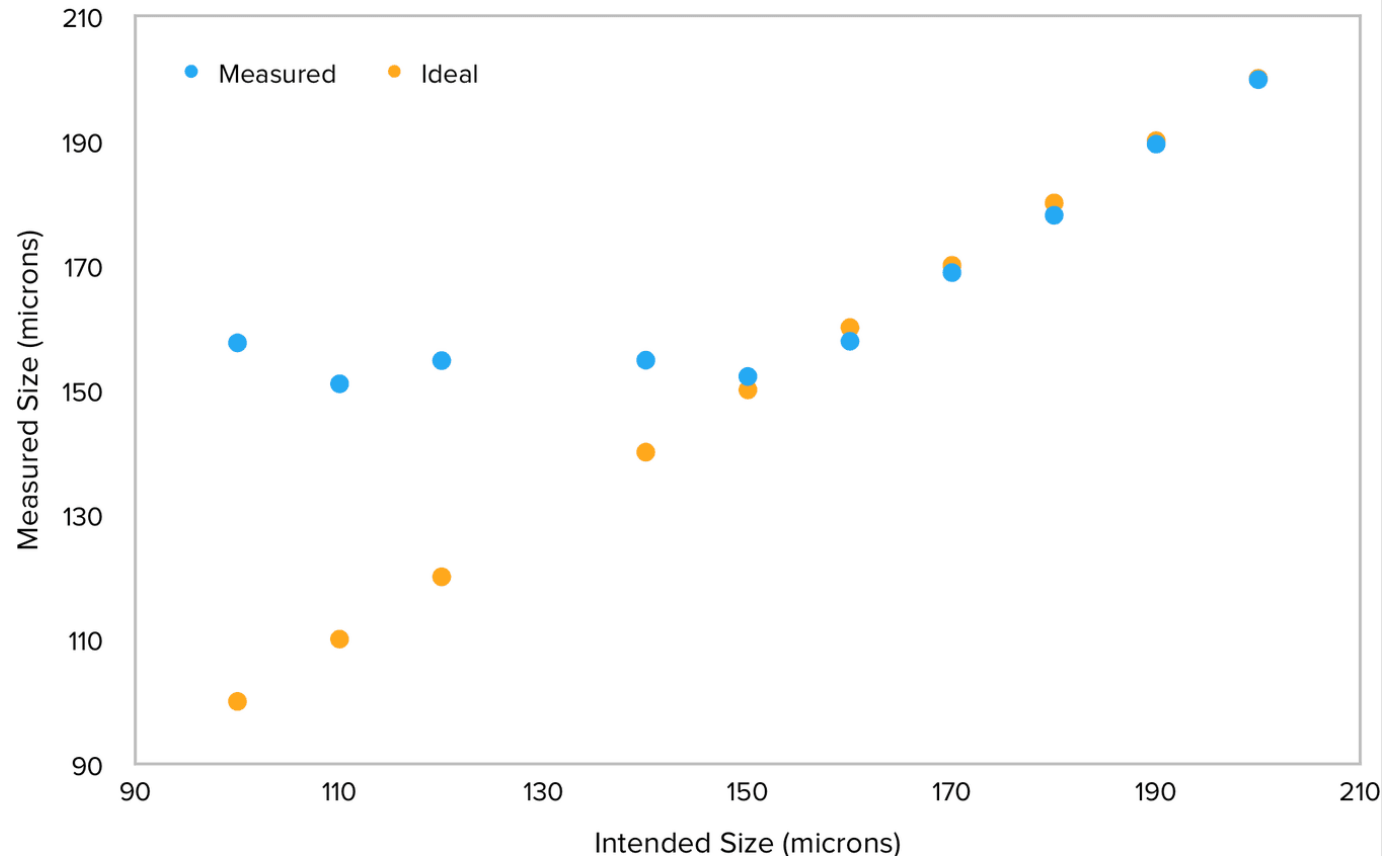


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Accuracy

Intended Size vs. Measured Size



Depends on technology, machine, considered features, materials, part positioning...

<https://formlabs.com/blog/3d-printer-resolution-meaning/>

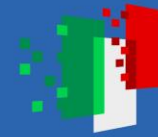




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Accuracy

	Layer thickness (mm)	Accuracy (mm)
Stereolithography	0.025 - 0.3	0.01 - 0.2
Layered Object Manufacturing	0.1 - 1	0.1 - 0.2
Fused Deposition Modelling	≈0.05	0.130 - 0.260
Selective laser sintering	≈0.08	0.03 - 0.4





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

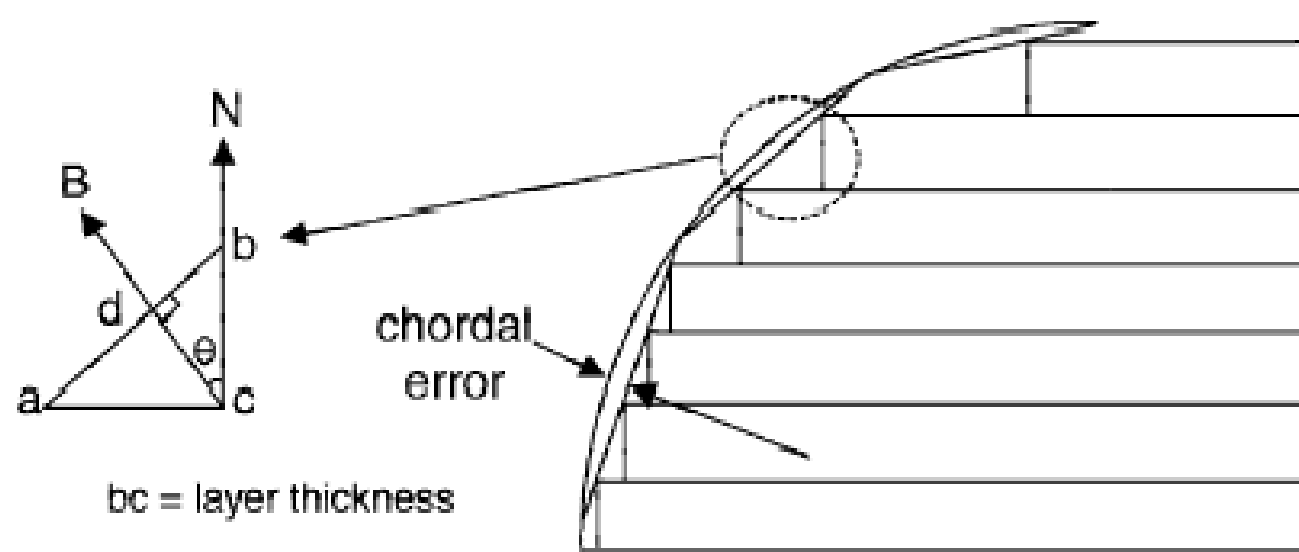


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Accuracy

Stair stepping





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Surface finish



0.35 mm Layer Height with
Vapor Bath Treatment

0.1 mm Layer Height

0.35 mm Layer Height





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

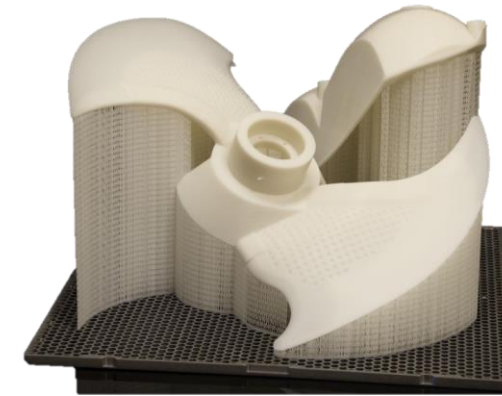


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

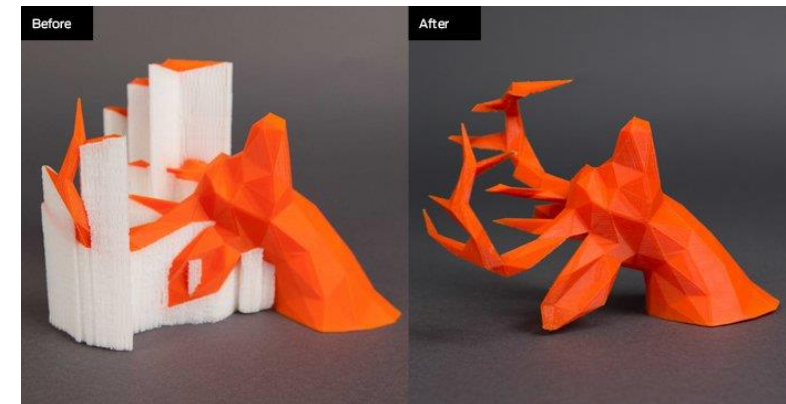


Costs

- System costs
 - from \$30,000 to \$800,000
 - training, housing and maintenance (a laser for a stereolithography system costs more than \$20,000)
- Material
 - High cost
 - Available choices are limited.
- Costs and time due to secondary operations
 - Post Curing (Stereolithography)
 - Infiltration, for fragile parts (3DP, SLS)
 - Final machining of metal parts
 - Removing of the support structures



Not Soluble support structure (SLA)



Soluble support structure (white material, FDM)





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

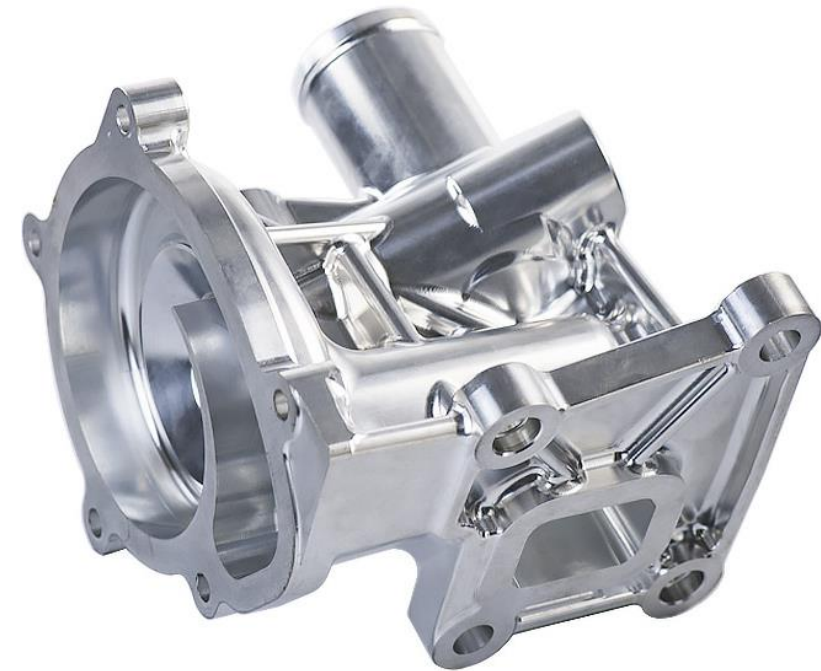


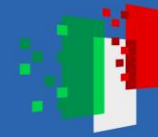
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive vs subtractive

- AM can not become complete replacement for the SM (Milling, Turning, EDM etc.)
- AM technologies are instead complementary for:
 - complex or intricate geometric forms,
 - simultaneous fabrication of multiple parts into a single assembly,
 - multiple materials or composite materials in the same part.
- Thus, AM is the enabling technology for controlled material composition as well as for geometric control.





Cost - Vendors

Photopolymer

3D System (formerly DTM)	US	http://www.3dsystems.com
EOS	Germany	http://www.eos.info/en
CMET	Japan	http://www.cmet.co.jp/eng/
Envisiontec Perfactory	Germany	http://www.ensonitec.de

Selective laser sintering

3D Systems	US	http://www.3dsystems.com
EOS	Germany	http://www.eos.info/en

Deposition

Stratasys	FDM	US	http://www.stratasys.com
SolidScape (now it is a Stratasys company)	Inkjet	US and the Netherlands	http://www.solid-scape.com
3D Systems (formerly DTM)	Thermojet™	US	http://www.3dsystems.com
Soligen	casting cores/patterns	US	http://www.soligen.com





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

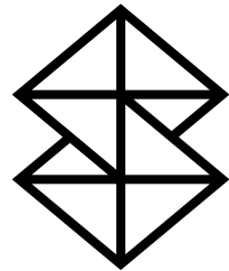


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Asking for a quote

- <https://www.stratasysdirect.com/>



stratasys[®]

- <https://www.3dhubs.com/>



3D HUBS





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



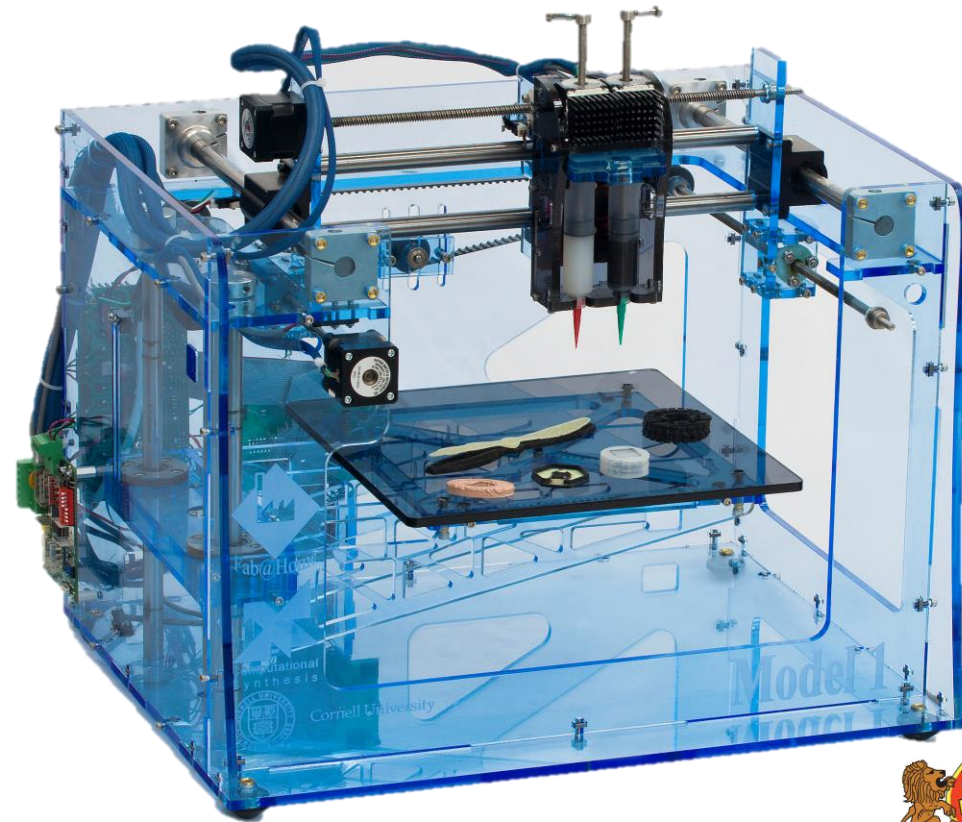
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Open-source 3D printers

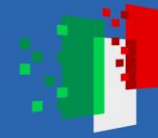




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Environmental and health issues





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



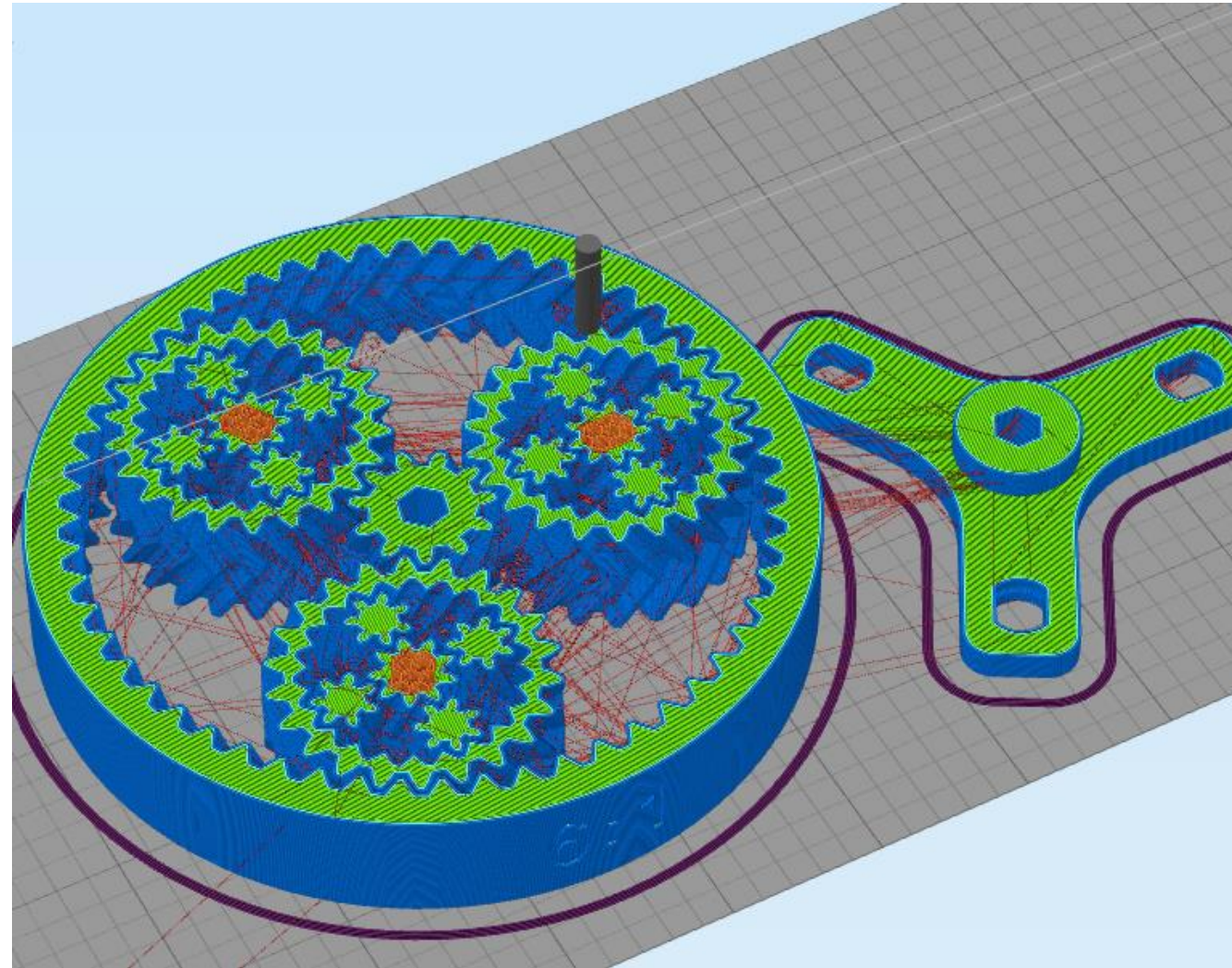
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive manufacturing process flow





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

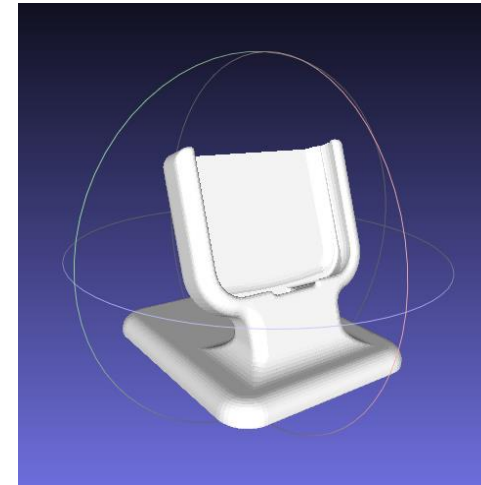


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Additive Manufacturing process

1. 3D Modeling
2. Generation of the mesh
3. Printing parameters setting →
“Slicing”
4. Fabrication
5. Postprocessing





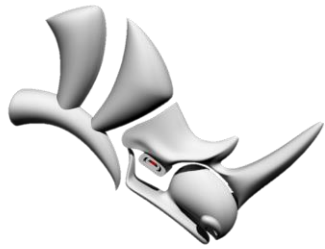
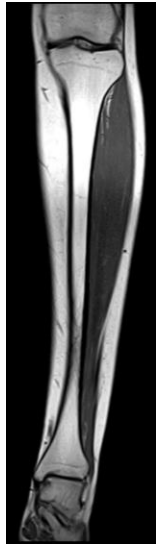
Finanziato dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero dell'Università e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



N

DS



cura.





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

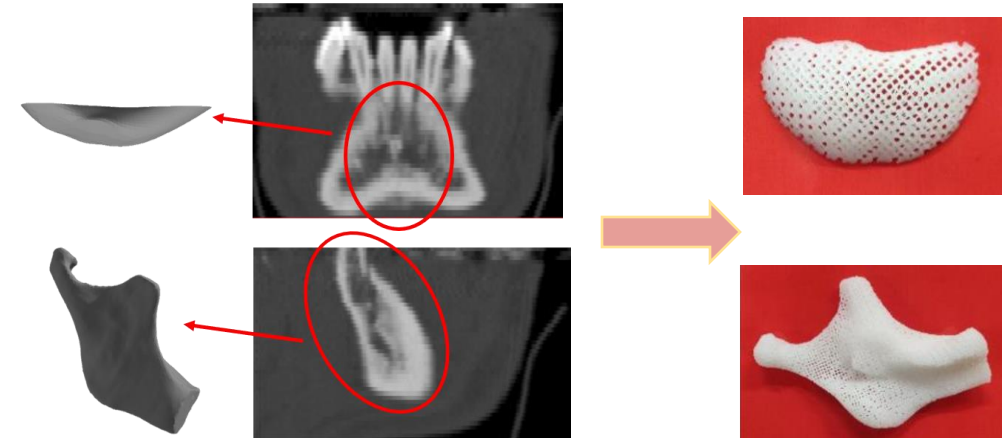


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

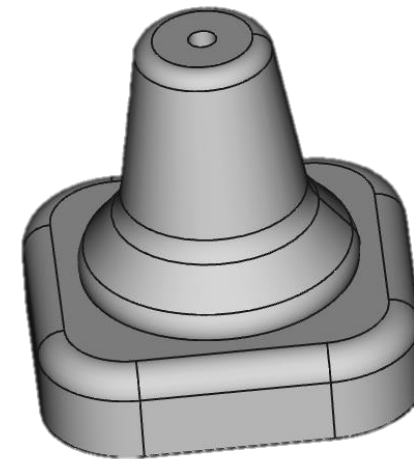


1. 3D Modeling

- CAD (Computer-Aided Design)
- Custom-made design
- Generated from medical scans
- Downloaded from online repositories
- Reverse Engineered from real objects



Fucile et al (2020), ACTA IMEKO 9





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

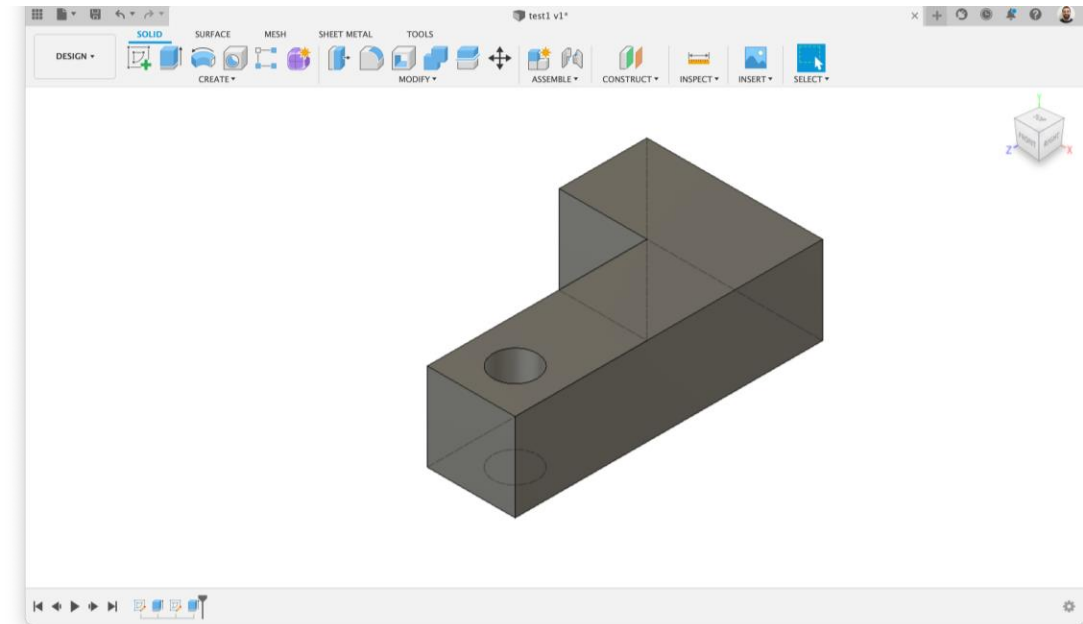


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



1. 3D Modeling

- **CAD software**
- Many of them are licensed, overcomplicated or very technical
- Free and easy alternatives are:
 - FreeCAD
 - TinkerCAD
 - Autodesk Fusion 370 (typically compatible with many institutional email)





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



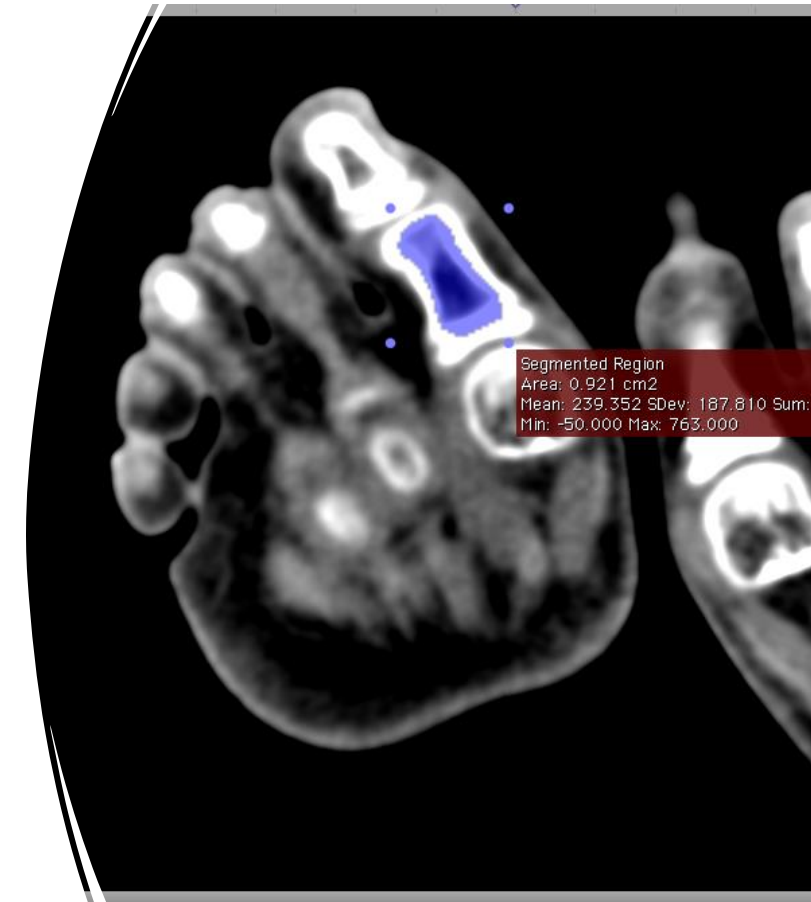
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



1. 3D Modeling

Designs from medical images - segmentation

- Segmentation subdivides an image into its constituent regions or objects.
- The level of subdivision depends on the problem being solved
- If the starting point is a 3D volumetric set, the identified region can be a printable object





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



1. 3D Modeling

Designs from medical images - segmentation

Software for image segmentation

- OsiriX (www.osirix-viewer.com)
- 3DSlicer (www.slicer.org)
- ImageJ (rsb.info.nih.gov/ij)
- MIPAV (mipav.cit.nih.gov)
- itk-SNAP (www.itksnap.org)





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



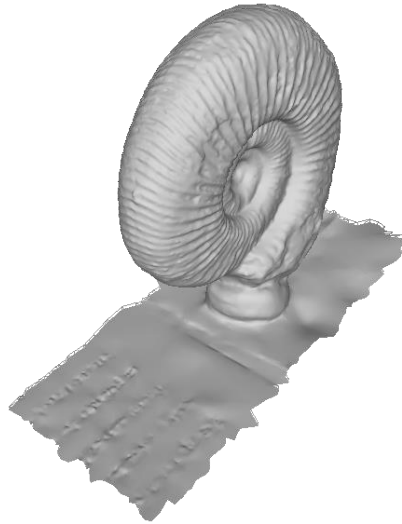
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



1. 3D Modeling Photogrammetry





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

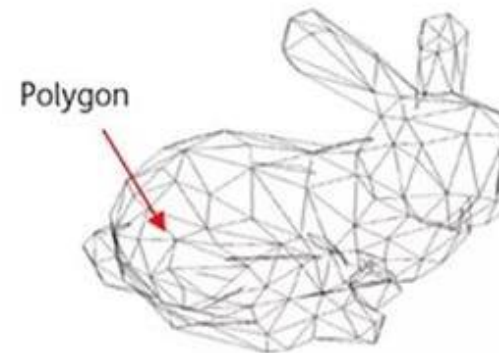


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

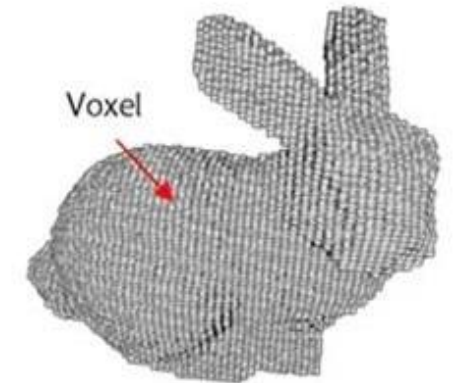


2. Generation of the mesh

- A mesh is the geometrical approximation of a 3D object
- Typical approximation shapes are triangles and rectangles
- The smaller the geometrical features, the denser the mesh, the heavier the file
- Exchange formats for exporting 3D model
 - Polygon-based representation (STL, AMF, 3MF, OBJ, PLY)

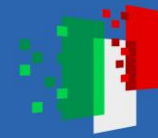


(a) Polygon-based representation



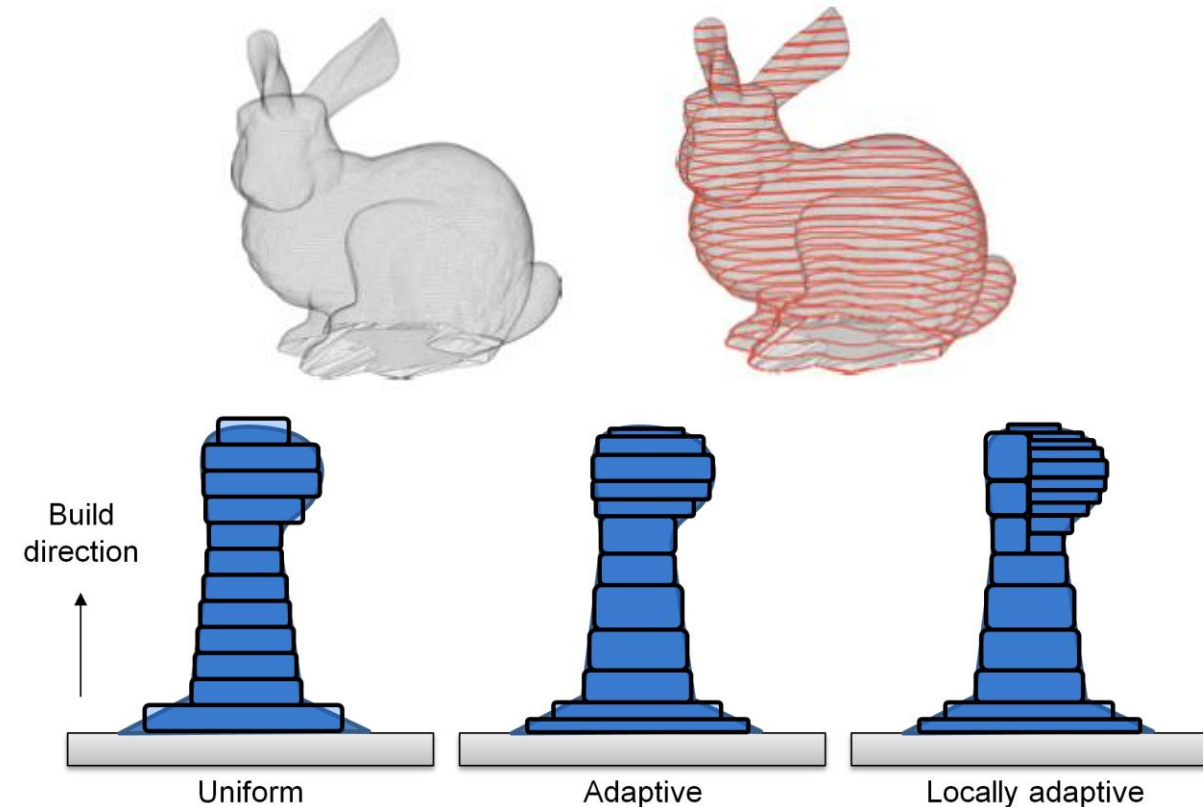
(b) Voxel-based representation





3. Slicing

- Each 3D model is divided into virtual layers
- Process and model parameters are set
- Different parameters result in different resolution/quality

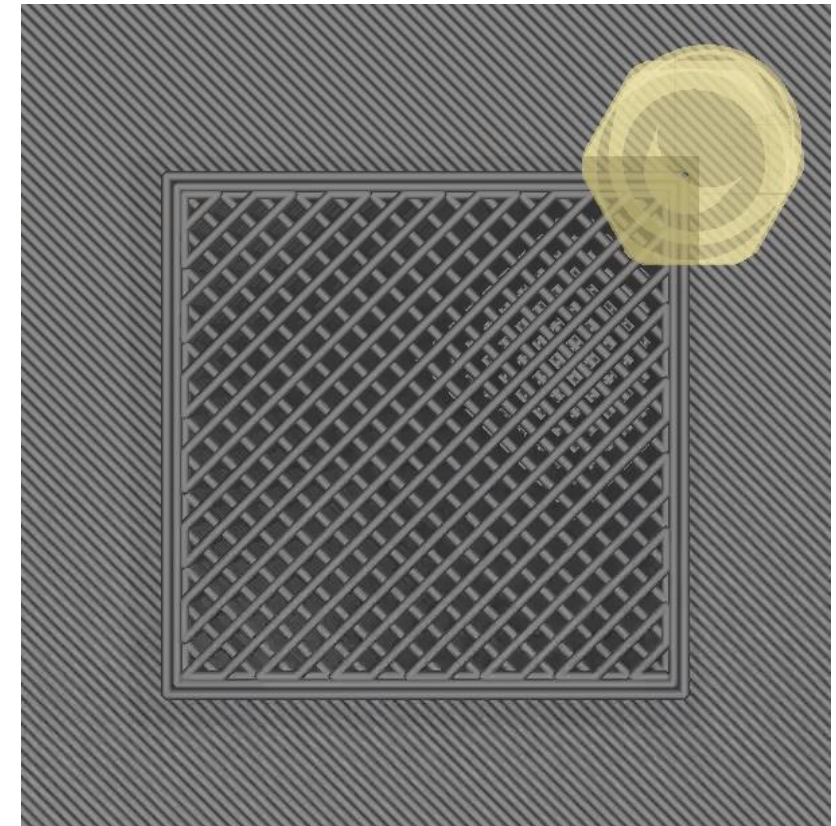




3. Slicing

Slicing parameters

- Layer thickness: the height in mm of each virtual layer
- Walls: how many external perimeters are printed as shell
- Top/layer bottoms
- Infill [%]: the ratio of material vs hollow space per layer
- Printing speed [mm/min]

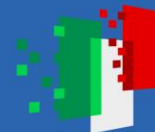




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



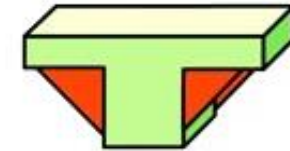
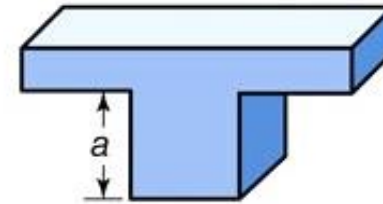
Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



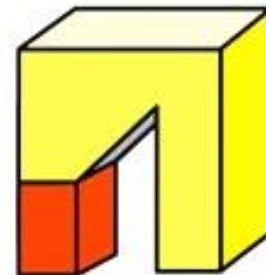
3. Slicing

Support generation

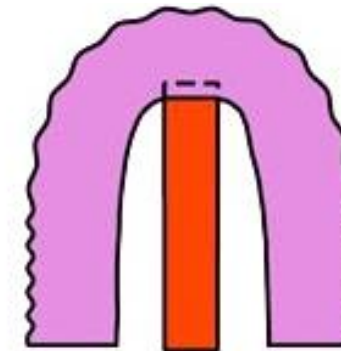
- Support generation may depend on
 - objects orientation,
 - on the specific additive manufacturing technology



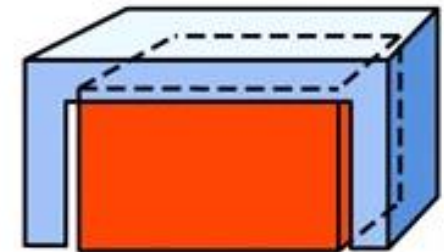
Gussets



Island



Ceiling within an arch



Ceiling





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



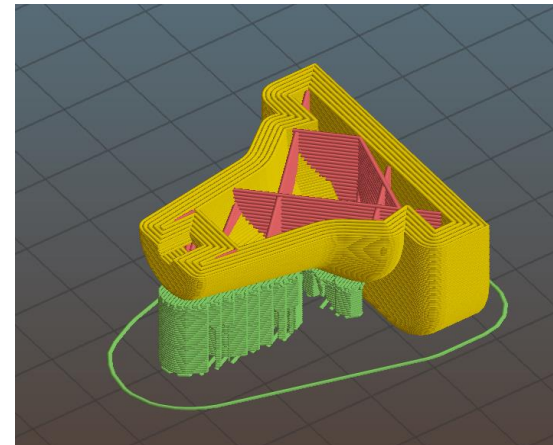
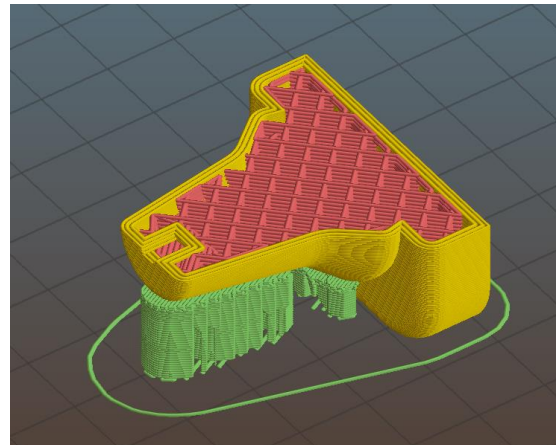
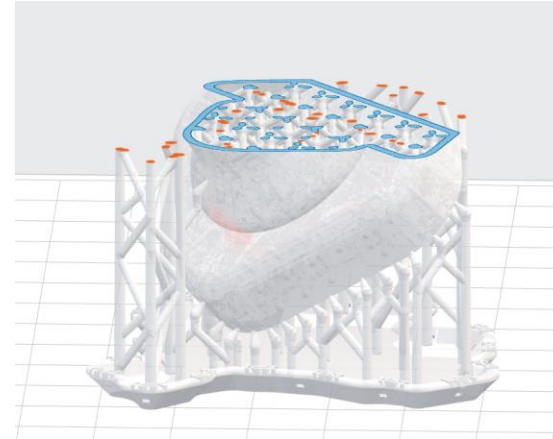
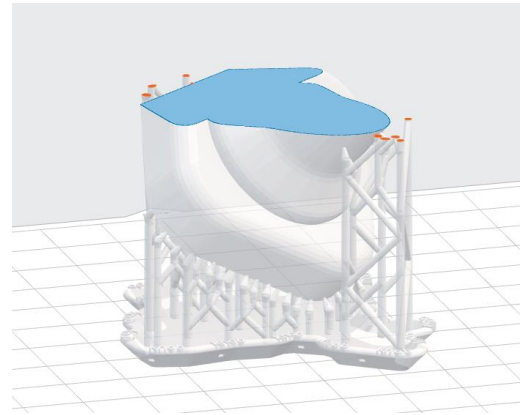
Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



4. Fabrication





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

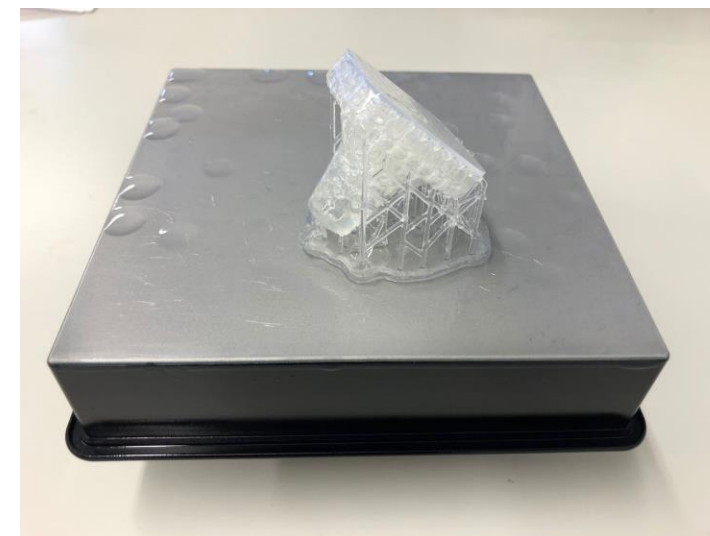


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Post processing

Cleanup and post curing





Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Post processing

Surface Finishing

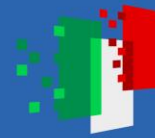




Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca



Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA



Thank you for your attention

Prof. Carmelo De Maria

carmelo.demaria@unipi.it

Dr. Pierpaolo Fucile

p.fucile@unicampus.it

February 10th 2026

