

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica**

**REALIZZAZIONE DI CAMPIONI IN ALLUMINIO 6061
OTTENUTI CON PROCESSI DI STAMPAGGIO FDM,
DEBINDING E SINTERIZZAZIONE**

Facci Alberto (2014474)

Padova, 12/07/2024

Relatore: Ferro Paolo
Correlatori: Gianpaolo Savio
Hamada Elsayed



OBIETTIVI

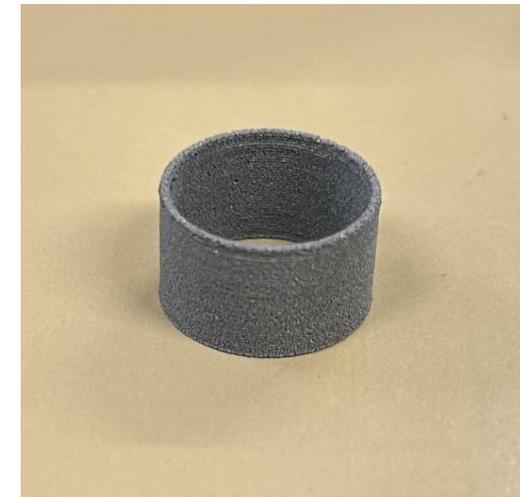
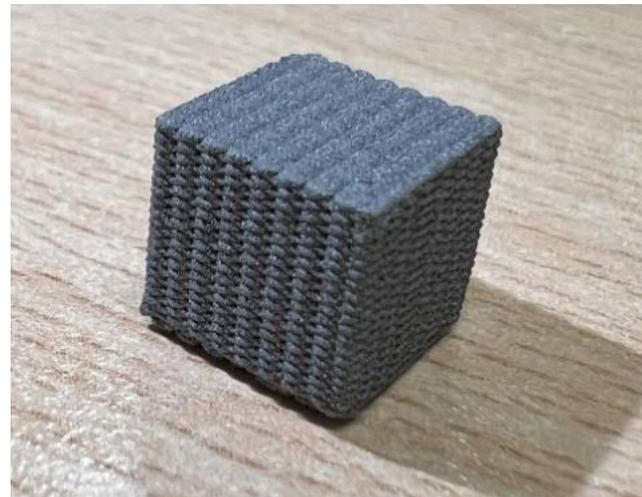
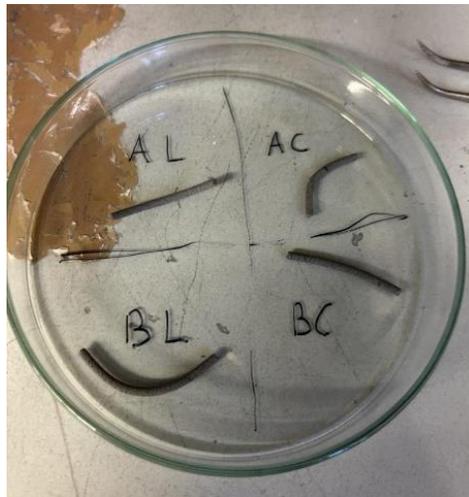
- Realizzazione di campioni in lega di Alluminio 6061 utilizzando correttamente il processo di stampa FDM.
- Debinding chimico al fine di rimuovere una certa percentuale di polimero in massa.
- Trattamento termico per eseguire il debinding termico e la sinterizzazione dei campioni.

STATO DELL'ARTE

- FDM: Fused Deposition Modeling, estrusione del filamento riscaldandolo e depositandolo su layers successivi
- Filamento in Alluminio 6061: filamento contenente lega di alluminio e PLA che fa da legante
- Debinding chimico e termico: processi atti all'eliminazione del polimero
- Sinterizzazione: processo diffusivo con inizio a $\approx 635^{\circ}\text{C}$ atto ad ottenere un pezzo solido meccanicamente accettabile

I campioni utilizzati hanno geometrie diverse grazie alle quali si è potuto studiarne il diverso comportamento nei vari test.

- **Filamenti**: campioni snelli di lunghezza circa 10/12 mm
- **Cubi**: campioni 10x10x10 mm
- **Cilindri**: campioni aventi un solo perimetro di spessore 0,81 mm, altezza di 10 mm, diametro di 15 mm

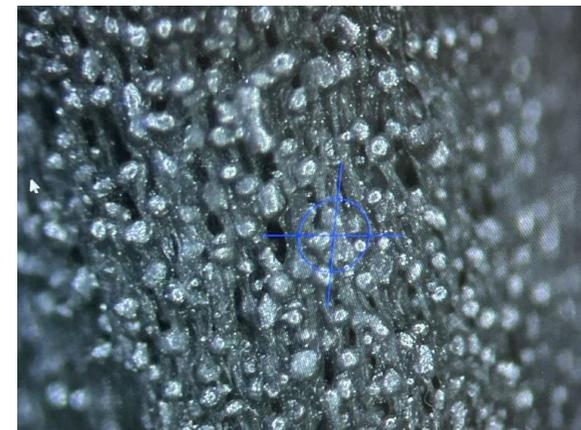


Analisi preliminari

Analisi dimensionale:

Sezione	Diametro [mm]
1	1,70
2	1,73
3	1,77
4	1,77
5	1,77
MEDIA	1,748
DEVIAZIONE STANDARD	0,426

Analisi allo stereoscopio:





TEST SUI FILAMENTI



DEBINDING CHIMICO

Si è utilizzato il solvente: Acetato di Etile



8 ore di permanenza a 60°C

PROVINO	% DI MASSA RIMOSSA
A lungo	18,00
A corto	22,63
B lungo	20,11
B corto	22,42
% MEDIA RIMOSSA	20,79

16 ore di permanenza a 60°C

PROVINO	% DI MASSA RIMOSSA
A lungo	16,67
A corto	17,38
B lungo	18,94
B corto	19,56
% Media rimossa	18,14

8 ore di permanenza con agitazione del solvente

PROVINO	% DI MASSA RIMOSSA
lungo	6,09
corto	4,64
% Media rimossa	5,36

<https://academics.dii.unipd.it/phd>



Risultati ottenuti con debinding chimico sui filamenti

- 8 ore di permanenza a 60°C: buona percentuale di polimero rimosso ($\approx 21\%$)
- 16 ore di permanenza a 60°C: percentuale di polimero rimosso leggermente inferiore rispetto al test precedente ($\approx 18\%$)
- 8 ore di permanenza con agitazione del solvente: test fallimentare in quanto si ha una piccolissima percentuale di rimozione di massa ($\approx 5\%$), probabilmente causata dal mancato rinnovamento del solvente

In tutti i casi il filamento risulta: molto fragile al tatto e molle



Maneggiare con cura per evitare cricche o rotture

STAMPA DI CAMPIONI CUBICI

PROPOSTE:

1:

Temperatura di estrusione [°C]	Velocità di stampa [mm/s]	Velocità di stampa primo layer [mm/s]	Spessore layer [mm]	Temperatura piatto [°C]	Diametro estrusore [mm]	Flow rate [%]	Angolo di riempimento [°]
190	20	10	0.25	60	0.6	120	0-90



A partire da sinistra:

190°C a 20 mm/s

190°C a 10 mm/s

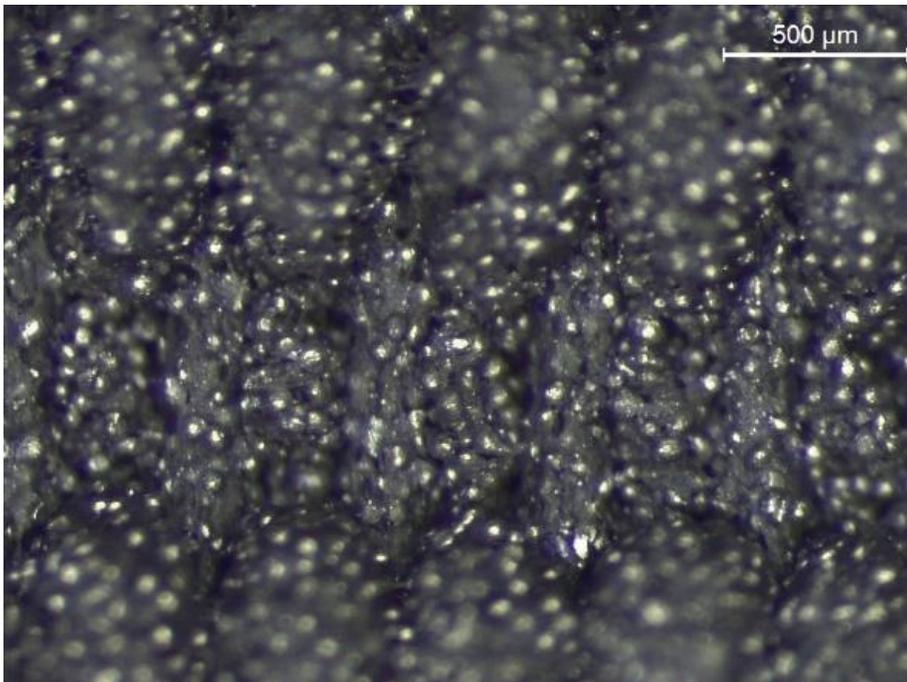
195°C a 10 mm/s

2:

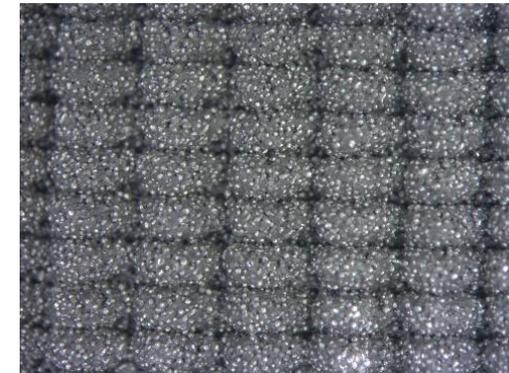
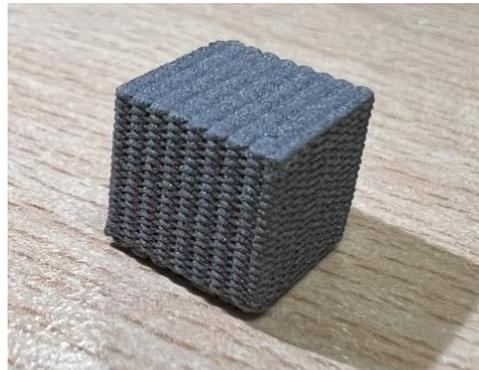
Temperatura di estrusione [°C]	Velocità di stampa [mm/s]	Velocità di stampa primo layer [mm/s]	Spessore layer [mm]	Temperatura piatto [°C]	Diametro estrusore [mm]	Flow rate [%]	Angolo di riempimento [°]
210	20	10	0.25	60	0.6	120	0-90

STAMPA DI CAMPIONI CUBICI

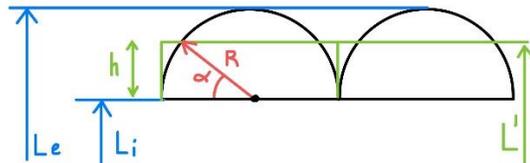
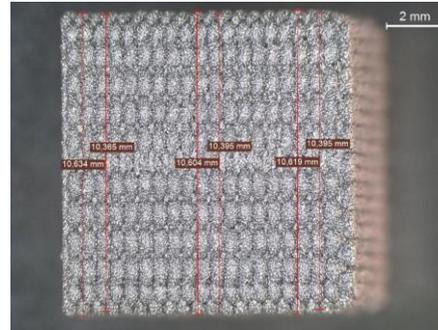
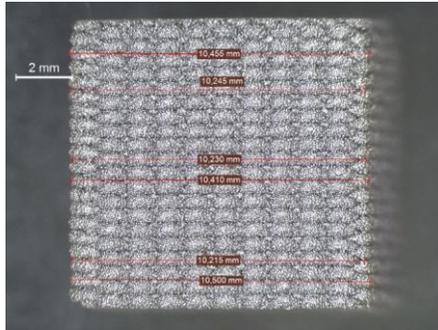
Si procede con la stampa dei campioni utilizzando la proposta 2:



Struttura poco porosa e compatta, entrambe caratteristiche ricercate assieme alla densità.



DENSITA' GEOMETRICA DEI CUBETTI



$$h = R \cdot \sin(\alpha)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

$$L' = L_i + h$$



$$\text{Densità} = \frac{\text{massa}}{\text{Volume}} = 1,509 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$



$$\text{Volume} = L'_1 \cdot L'_2 \cdot L'_3$$

La densità geometrica ottenuta, risulta all'interno del range dichiarato dal produttore del filamento $1.5 \div 1.54$, è dunque da considerarsi buona in quanto non ci sono stati effetti che ne hanno peggiorato la struttura in fase di stampa.



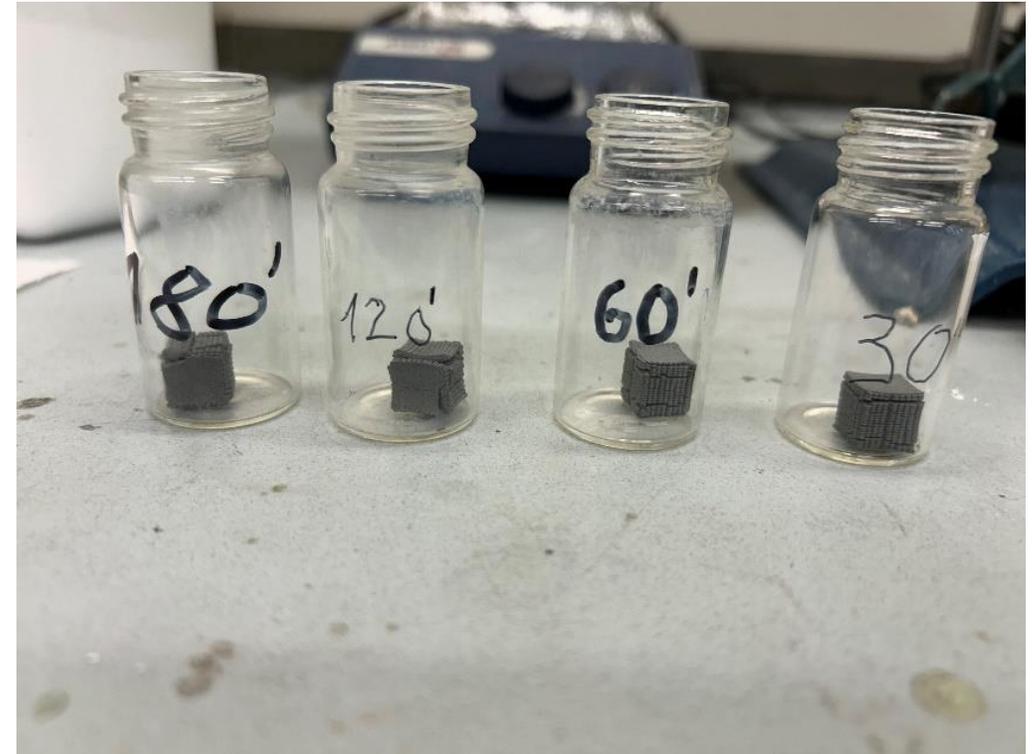
DEBINDING CHIMICO

N° campioni	Tempo di debinding chimico in Acetato di etile a 60°C [min]
1	30
1	60
1	120
1	180
6	NO DEBINDING CHIMICO

Si conclude che non è possibile eseguire il debinding chimico su questo tipo di campioni a causa della loro geometria e della elevata quantità di materiale che li compongono.



L'assorbimento del solvente porta ad un aumento del volume il quale, dopo asciugatura in forno, si ritira crepandosi e portando a rottura il campione





TEST SUI CUBI



TRATTAMENTI TERMICI

RICETTA 1:

Debinding termico

Step	Temperatura [°C]	Tempo [ore]
1	280	5
2	330	4
3	450	6

*velocità di incremento della temperatura di 1°C/min

*tipo di atmosfera: azoto con portata di 1.13 m³/h

Sinterizzazione

Temperatura [°C]	650
Durata di mantenimento [ore]	4
Tipo di atmosfera	Azoto
Portata di gas [m ³ /h]	1.13

* velocità di incremento della temperatura di 3°C/min

RICETTA 2:

Debinding termico

Step	Temperatura [°C]	Tempo [ore]
1	280	5
2	330	4
3	450	6

*velocità di incremento della temperatura di 1°C/min

*tipo di atmosfera: azoto con portata di 1.13 m³/h

Sinterizzazione

Temperatura [°C]	650
Durata di mantenimento [ore]	6
Tipo di atmosfera	Azoto
Portata di gas [m ³ /h]	1.13

* velocità di incremento della temperatura di 3°C/min

Differenziate per la permanenza a 650°C



RISULTATI OTTENUTI POST TRATTAMENTI TERMICI

Ricetta	Campione	Riduzione di massa totale [%]
1	A	30.56
	B	30.33
2	A	29.79
	B	30.38

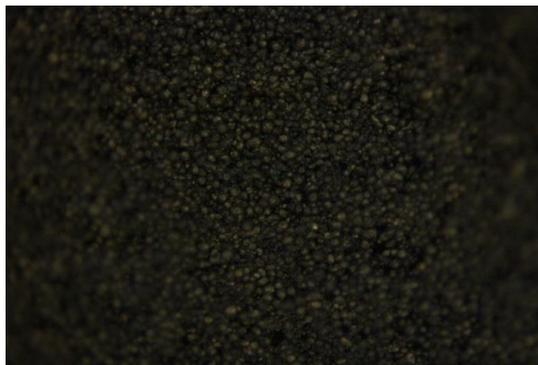
Ricetta 1:

- Alcuni colli di bottiglia (sinterizzazione parziale)
- Carbonio residuo prodotto dal PLA fuso rimanente
- Fragile al tatto



Ricetta 2:

- Numerosi colli di bottiglia e granuli deformati (parziale diffusione)
- Superficie compatta e luminosa
- Meno fragile al tatto



Cuore del provino
(compatto)

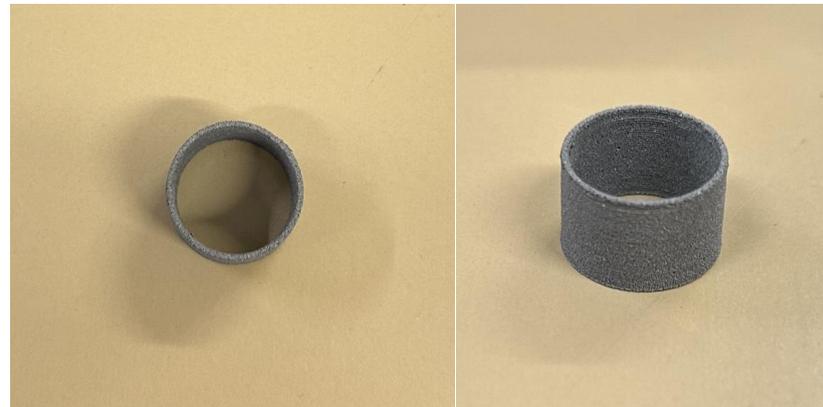


PARAMETRI DI STAMPA DEI CAMPIONI CILINDRICI

Campioni cilindrici cavi aventi diametro $D=15$ mm, altezza $h=10$ mm e costituiti da un solo perimetro di spessore $s=0,81$ mm; aventi i seguenti parametri di stampa:

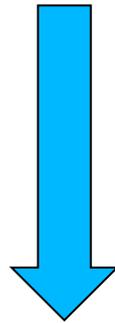
Temperatura di estrusione [°C]	Velocità di stampa [mm/s]	Velocità di stampa primo layer [mm/s]	Spessore layer [mm]	Temperatura piatto [°C]	Diametro estrusore [mm]	Flow rate [%]
210	20	10	0.25	60	0.6	100

Geometria che dovrebbe permettere buoni risultati post debinding chimico data la struttura a parete sottile la quale come visto nei primi test su filamenti ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti.



DEBINDING CHIMICO

Bagno in Acetato di Etile per 8 ore a 60°C



Provino	Massa finale [g]	PLA rimosso in massa [%]
A	0,3958	18,68
B	0,3922	19,97
C	0,3918	17,19
D	0,3921	17,4
MEDIA		18,31

- PLA rimosso nell'ordine di quello rimosso con i campioni filiformi
- Campioni intatti senza cricche o deformazioni
- Superficie «luminosa» sinonimo di una minor quantità di PLA





TEST SUI CILINDRI



TRATTAMENTI TERMICI

RICETTA 1:

Debinding termico

Step	Temperatura [°C]	Tempo [ore]
1	280	5
2	330	4
3	450	6

*velocità di incremento della temperatura di 1°C/min

*tipo di atmosfera: azoto con portata di 1.13 m³/h

Sinterizzazione

Temperatura [°C]	650
Durata di mantenimento [ore]	4
Tipo di atmosfera	Azoto
Portata di gas [m ³ /h]	1.13

* velocità di incremento della temperatura di 3°C/min

RICETTA 2:

Debinding termico

Step	Temperatura [°C]	Tempo [ore]
1	280	5
2	330	4
3	450	6

*velocità di incremento della temperatura di 1°C/min

*tipo di atmosfera: azoto con portata di 1.13 m³/h

Sinterizzazione

Temperatura [°C]	650
Durata di mantenimento [ore]	6
Tipo di atmosfera	Azoto
Portata di gas [m ³ /h]	1.13

* velocità di incremento della temperatura di 3°C/min

Differenziate per la permanenza a 650°C



RISULTATI OTTENUTI POST TRATTAMENTI TERMICI

Ricetta	Campione	Riduzione di massa totale [%]
1	A	31,65
	B	30,35
2	C	31,03
	D	30,96

- Ricetta 1:**
- Colli di bottiglia (sinterizzazione parziale)
 - Carbonio residuo prodotto dal PLA fuso rimanente
 - Estremamente fragile al tatto
 - Leggermente collassato



- Ricetta 2:**
- Colli di bottiglia e granuli deformati (parziale diffusione)
 - Più luminoso e metallico
 - Meno fragile al tatto
 - Leggermente collassato





CONCLUSIONI E COMMENTI



RISULTATI OTTENUTI:

- Debinding chimico possibile solo per campioni sottili (cilindrici)
- Trattamento termico di debinding avvenuto con successo
- Trattamento termico di sinterizzazione avvenuto parzialmente

POSSIBILI MIGLIORAMENTI:

- Filamento
- Parametri di stampa
- Infiltrazione di Mg e Sn
- Utilizzare campioni sottili
- Eliminazione del Carbonio residuo