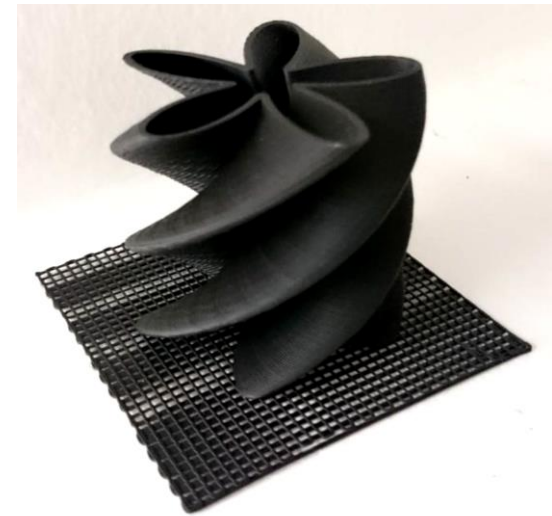


Corso di Strumenti dell'Ingegneria per l'industria 4.0 (01RZWPI)

Programmazione di Stampanti 3D Open-source



Prof. Paolo Minetola

Informazioni sul docente

Prof. Paolo Minetola

Professore Associato

Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione (DIGEP)

Dottore di Ricerca in Sistemi per la Produzione Industriale

Tel. 011- 564.**7210** (Ufficio) e 011- 564.**7254** (Laboratorio)

e-mail: paolo.minetola@polito.it

Tematiche di Ricerca (per eventuali tesi):

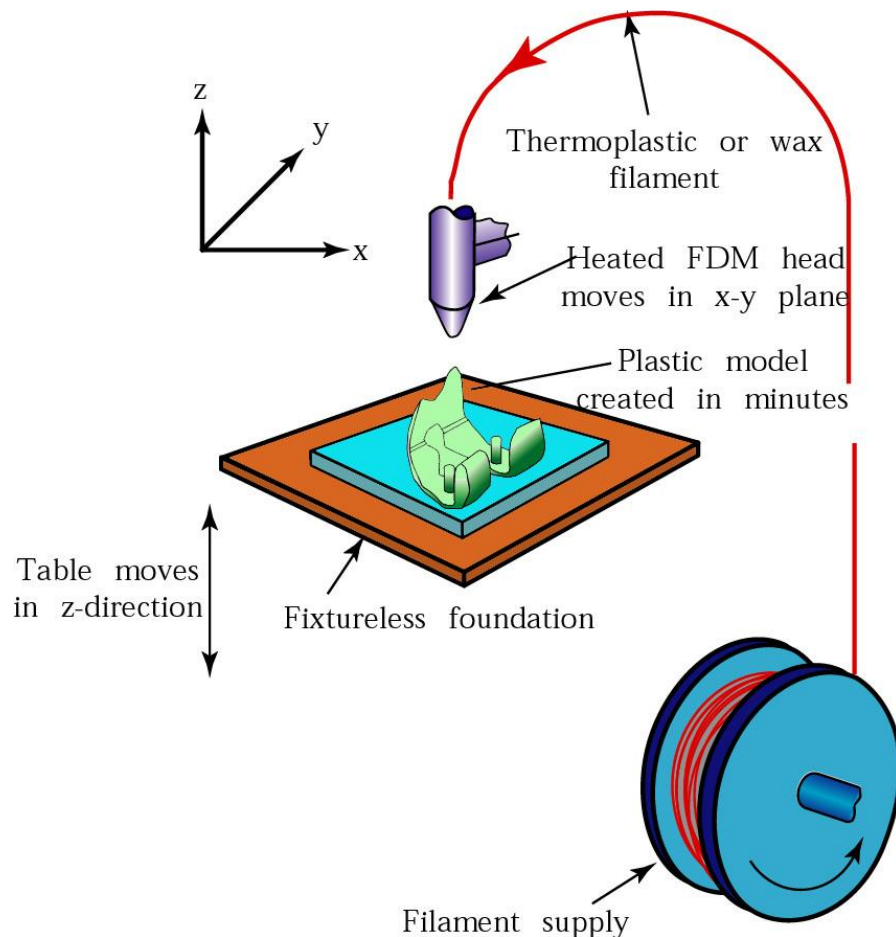
Stampa 3D & Additive Manufacturing

Reverse Engineering e Scansione 3D

Misure e collaudo dimensionale

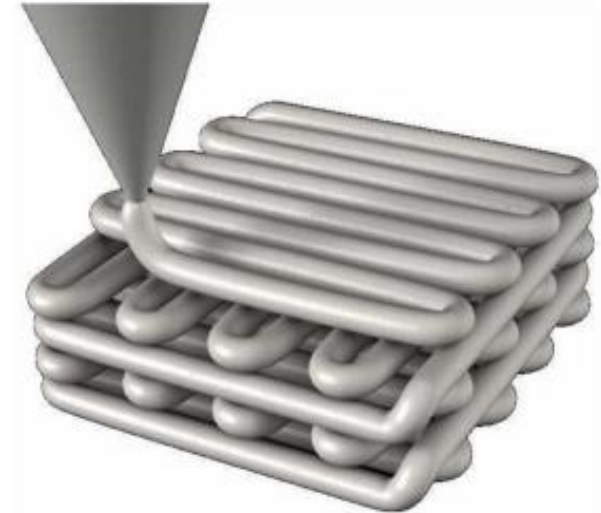
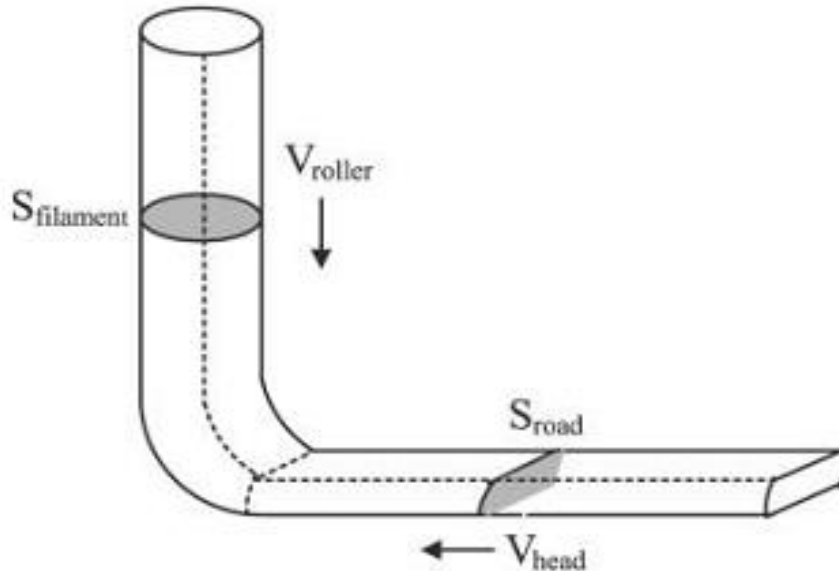


Panoramica sul processo FDM



La tecnologia di Fused Deposition Modelling utilizza un estrusore riscaldato e alimentato con un filamento per depositare un materiale termoplastico sulla piattaforma di costruzione.

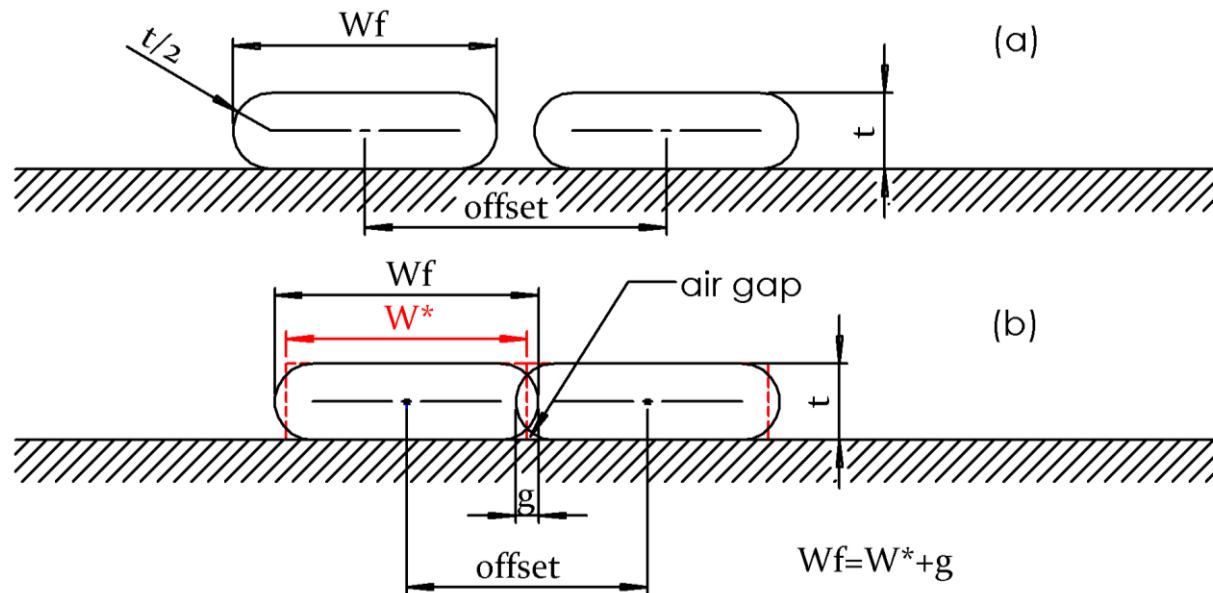
Modellizzazione dell'estrusione di un filamento



Considerando l'equazione di conservazione della massa:

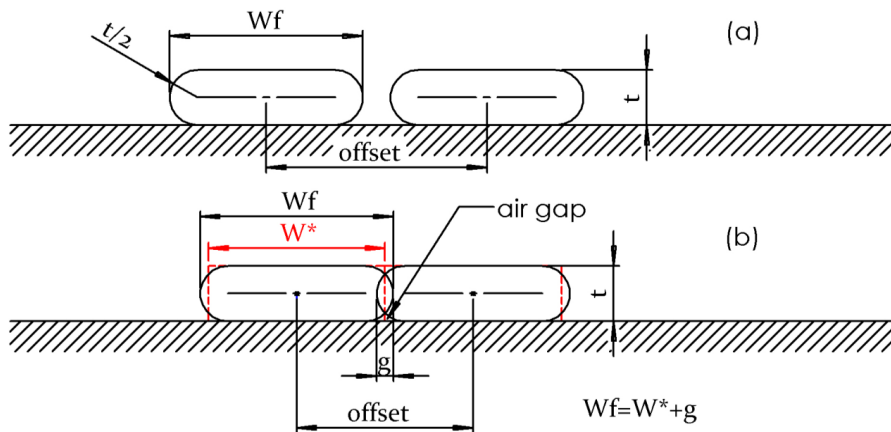
$$v_{roller} \cdot \rho_f \cdot \frac{\pi D^2}{4} = v_{head} \cdot \rho_{road} \cdot S_{road}$$

Modellizzazione dell'estrusione di un filamento



$$S_{road} = \frac{\pi t^2}{4} + (W_f - t) \cdot t$$

Modellizzazione dell'estrusione di un filamento

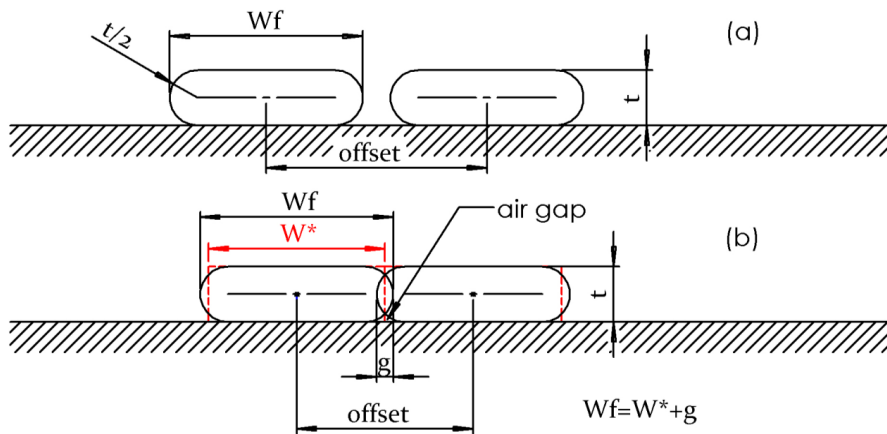


$$S_q = W^* \cdot t$$

$$S_{road} = S_q$$

$$\frac{\pi t^2}{4} + (W_f - t) \cdot t = W^* \cdot t$$

Modellizzazione dell'estrusione di un filamento

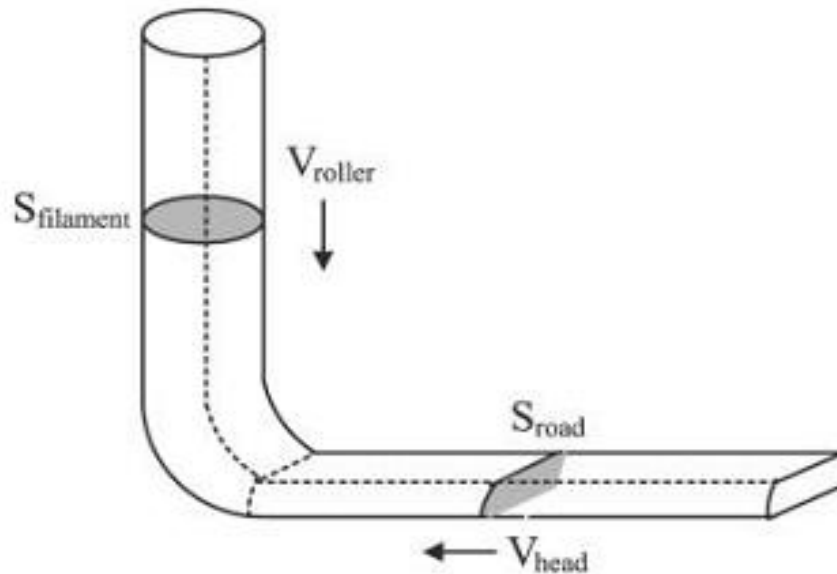


2

$$W^* = W_f + \left(\frac{\pi t}{4} - t \right)_2 = W_f - g$$

$$g = \left(t - \frac{\pi t}{4} \right)$$

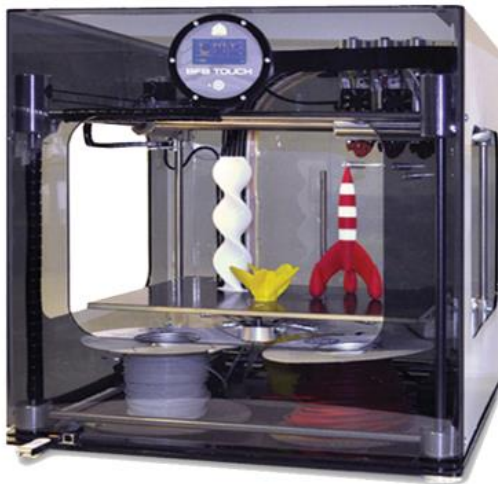
Modellizzazione dell'estrusione di un filamento



Per la fabbricazione di un pezzo con il 100% di densità:

$$v_{roller} = v_{head} \cdot \frac{\rho_{road}}{\rho_f} \cdot \frac{4}{\pi D^2} \cdot \left(\frac{\pi t^2}{4} + W_f t - t^2 \right)$$

Stampate modello 3D Touch™ di Bits from Bytes (BFB)



Costo: circa 4500 €

Caratteristiche

3 estrusori

Diametro ugello: 0.50 mm

Diametro filamento: 3.00 mm

Spessore di strato: 0.125 mm / 0.250 mm

Camera e piattaforma non riscaldate

Codice di programmazione “Open ISO G code”

Materiali “open” non codificati

Testa di estrusione



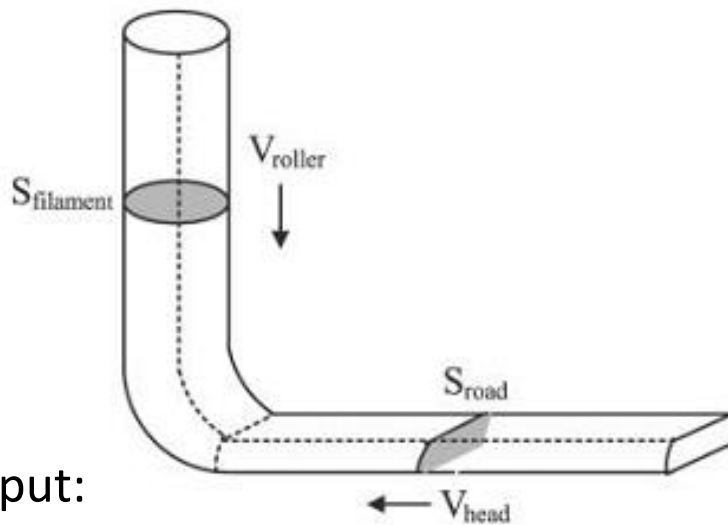
Motori passo-passo
e pulegge



Vite di
alimentazione

Rullini

Equazione sperimentale

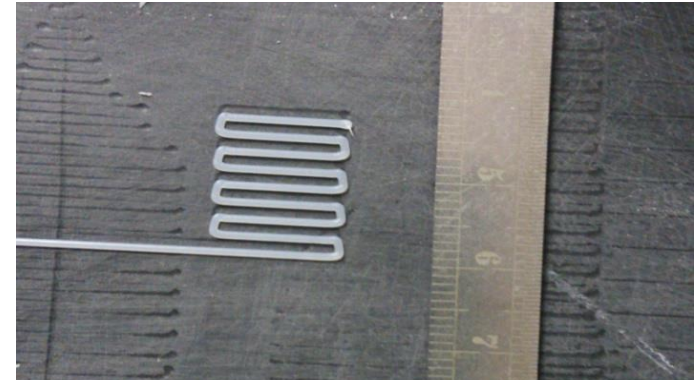


Dati di input:

Diametro filamento = 3.035 mm

V_{screw} → Giri motore S (rpm)

V_{head} → Velocità di traslazione F (mm/min)



Misure sperimentali

Larghezza traccia $\rightarrow w$

Spessore traccia $\rightarrow t$

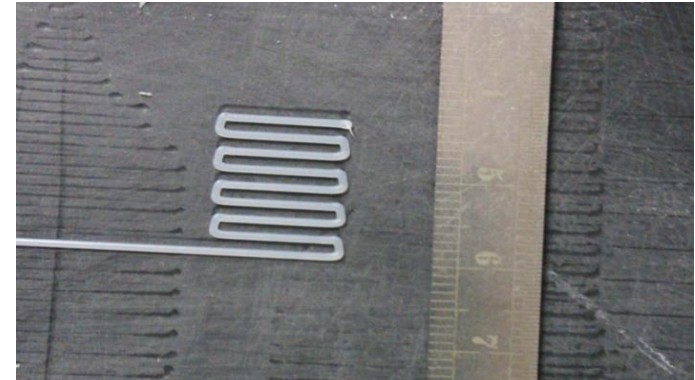
Trovare il coefficient **R**

$$Q_{\text{feeding}} = \mathbf{R} \cdot Q_{\text{deposited}}$$

assumendo

Q_{feeding} con sezione circolare (filamento)

$Q_{\text{deposited}}$ con sezione rettangolare (traccia)

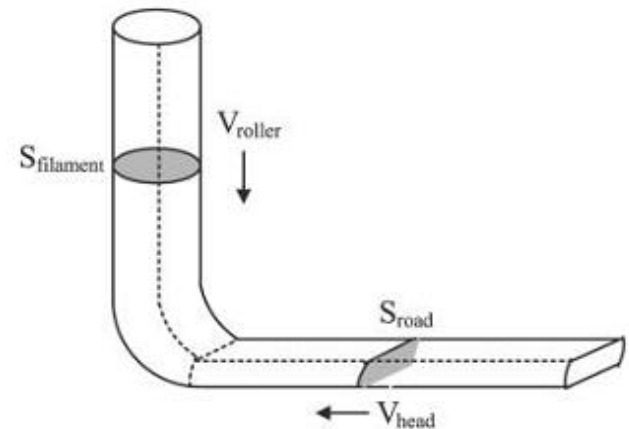


Risultati sperimentali

Numero prova	Temperatura estrusore (°C)	Velocità estrusione V_{screw} (rpm)	Velocità deposizione V_{head} (mm/min)	Larghezza traccia w (mm)	Spessore traccia t (mm)	Valore R
2	260	40	360	1.190	0.711	10.100
8	260	80	360	2.678	0.690	11.020
26	260	80	1080	1.550	0.322	8.961
38	260	40	1800	0.499	0.332	9.939
44	260	80	1800	1.655	0.199	9.892

$$Q_{feeding} = R \cdot Q_{deposited}$$

Valore medio $R = 9.98 \sim 10$



Esempio di G-Code

ABS in Extruder 1 for Raft

PLA in Extruder 2 for Part

G90

M107

M104 S260

M551 P64000 S1000

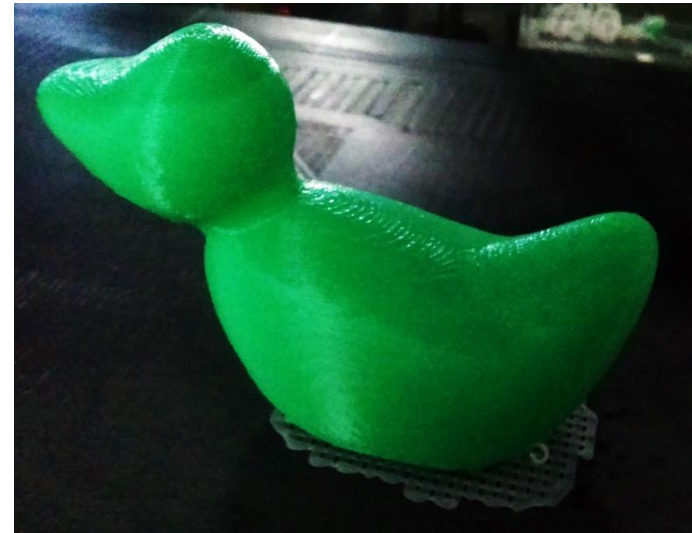
M543

M227 P3200 S3200

M107

G21

M103



Funzioni per la movimentazione (G codes)

Impostazioni generali:

- G20 unità di misura in pollici (inch)
- G21 unità di misura in millimetri (mm)
- G28 Homing ($X = -135\text{mm}$, $Y = 100\text{mm}$, $Z = 0\text{mm}$)
- G90 Riferimento a coordinate assolute

Traiettorie lineari (segmenti punto-punto):

- G0 Spostamento in rapido - assi X, Y e Z
- G1 Spostamento di lavoro - assi X, Y e Z

Funzioni speciali (M Codes)

Estrusore:

- M101 Attiva alimentazione estrusore 1 con rotazione in avanti
- M102 Attiva alimentazione estrusore 1 con rotazione indietro
- M103 Disattiva tutti gli estrusori
- M104 S145.0 Riscalda estrusore 1 alla temperatura di 145 °C
- M108 S400 Attiva alimentazione dell'estrusore 1 a $S/10 = 40\text{rpm}$

Ventole:

- M106 Attiva la ventola di raffreddamento
- M107 Disattiva la ventola di raffreddamento

Funzioni speciali (M Codes)

- M226 Pausa fino a pressione del tasto ESC
- M227 S1000 P800 allo stop (M103) ritrai il filo per S giri e attiva la rotazione all'avvio (M101)

Estrusori 2 e 3:

- M**X**01 Attiva alimentazione estrusore **X** con rotazione avanti
- M**X**04 S145.0 Riscalda estrusore **X** alla temperatura di 145 °C
- M**X**08 S400 Attiva alimentazione dell'estrusore **X** a $S/10 = 40\text{rpm}$

Nota: per disattivare gli estrusori 2 e 3, usare la funzione M103 che agisce su tutti gli estrusori

Funzioni speciali (M Codes)

Spurgo estrusori:

- M542 – Ingresso nella funzione di spurgo
- M543 – Uscita dalla funzione di spurgo
- M55X – Spurgo estrusore X con $P = \text{step motore}$, $S = \text{RPM} * 10$
- M56X – Ritrazione filo estrusore X con $P = \text{step motore}$, $S = \text{RPM} * 10$

Esempio di G-Code (1)

ABS in Extruder 1 for Raft

PLA in Extruder 2 for Part

G90

M107

M104 S260

M551 P64000 S1000

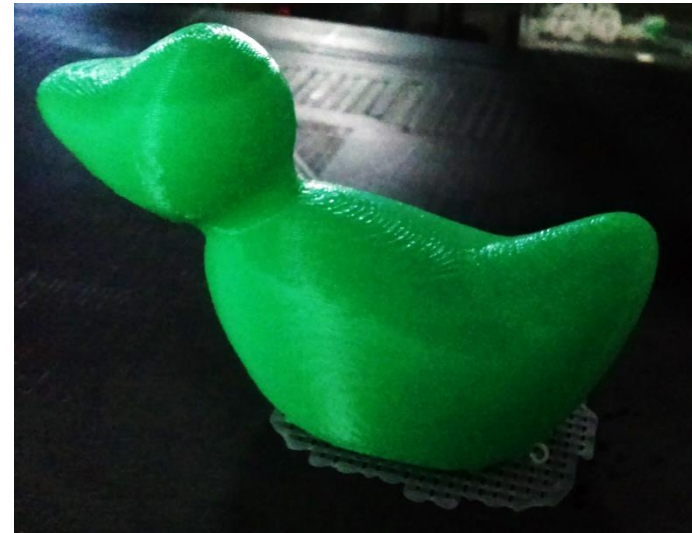
M543

M227 P3200 S3200

M107

G21

M103



Esempio di G-Code (2)

M113 S1.0

M108 S200.0

M108 S200.0

M108 S600.0

G1 X26.0 Y-2.03 Z0.7 F32000.0

M101

101

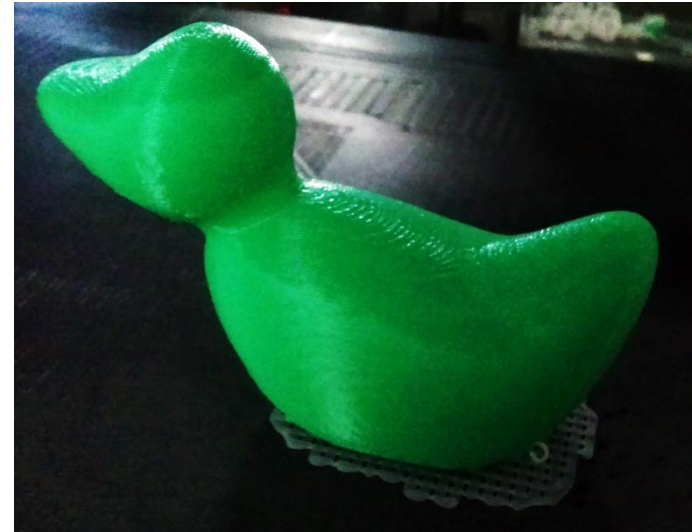
G1 X26.0 Y8.03 Z0.7 F720.0

G1 X28.0 Y12.03 Z0.7 F720.0

G1 X28.0 Y-8.03 Z0.7 F720.0

G1 X30.0 Y-10.03 Z0.7 F720.0

...



Esempio di G-Code (3)

...

G1 X46.0 Y-14.03 Z0.7 F720.0

G1 X46.0 Y-3.98 Z0.7 F720.0

G1 X44.0 Y0.03 Z0.7 F720.0

G1 X44.0 Y-14.03 Z0.7 F720.0

M103

G1 X58.0 Y-14.03 Z0.7 F32000.0

M101

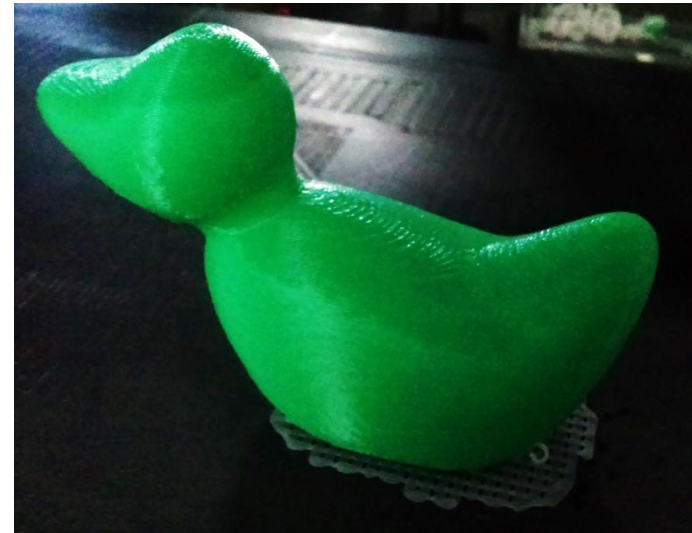
G1 X58.0 Y20.02 Z0.7 F720.0

G1 X60.0 Y20.02 Z0.7 F720.0

G1 X60.0 Y-14.03 Z0.7 F720.0

G1 X62.0 Y-14.03 Z0.7 F720.0

...



Esempio di G-Code (4)

...

```
G1 X70.0 Y14.03 Z0.7 F720.0
```

```
M103
```

```
G1 X72.0 Y6.03 Z0.7 F32000.0
```

```
M101
```

```
G1 X72.0 Y-2.03 Z0.7 F720.0
```

```
M103
```

```
M108 S200.0
```

```
M108 S300.0
```

```
G1 X25.98 Y0.0 Z1.0 F32000.0
```

```
M101
```

```
G1 X44.03 Y0.0 Z1.0 F960.0
```

```
G1 X44.03 Y-2.0 Z1.0 F960.0
```

```
G1 X25.98 Y-2.0 Z1.0 F960.0
```

...



Esempio di G-Code (5)

...

G1 X62.03 Y20.0 Z1.0 F960.0

G1 X39.98 Y20.0 Z1.0 F960.0

M103

M107

M104 S0

M204 S215

M552 P64000 S1000

M106

M108 S400.0

G1 X35.09 Y7.52 Z1.25 F32000.0

M201

G1 X34.82 Y7.24 Z1.25 F960.0

G1 X34.94 Y6.65 Z1.25 F960.0

...



Esempio di G-Code (6)

...

G1 X33.26 Y-2.21 Z1.25 F960.0

G1 X33.67 Y-3.44 Z1.25 F960.0

G1 X34.1 Y-4.36 Z1.25 F960.0

G1 X34.85 Y-5.55 Z1.25 F960.0

M103

M108 S200.0

G1 X34.21 Y-6.1 Z1.5 F32000.0

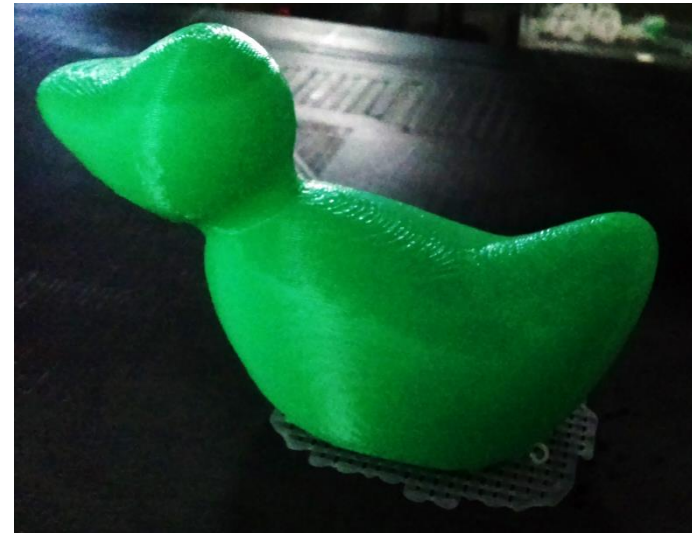
M201

G1 X34.99 Y-7.0 Z1.5 F960.0

G1 X36.37 Y-8.16 Z1.5 F960.0

G1 X38.33 Y-9.37 Z1.5 F960.0

...



Esempio di G-Code (7)

...

G1 X21.1 Y0.35 Z52.25 F960.0

G1 X21.73 Y0.28 Z52.25 F960.0

G1 X22.57 Y0.86 Z52.25 F960.0

G1 X22.75 Y1.29 Z52.25 F960.0

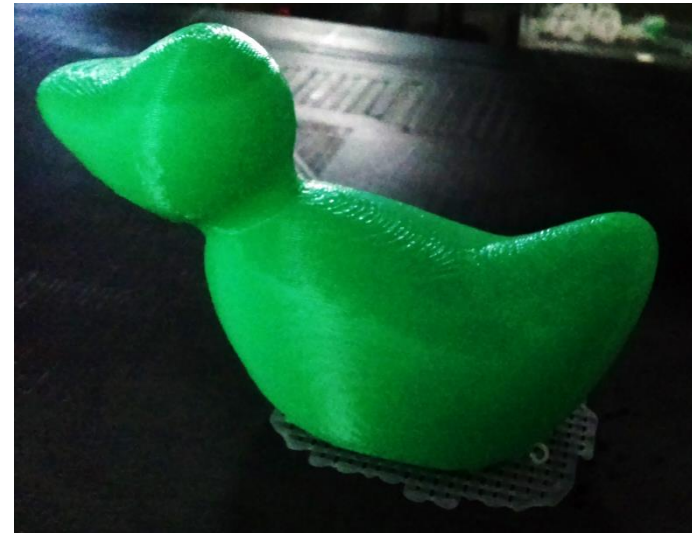
M103

M104 S0

M204 S0

M103

M113 S0.0



Concorso di programmazione

Scrivere il codice per stampare un proprio pezzo:

Area massima di base: 80 mm x 80 mm

Altezza massima: 100 mm

Usate immaginazione e creatività per:

- Sovrapposizione degli strati
(rotazione o altre trasformazioni)
- Il pezzo deve essere auto-sufficiente
(non devono essere previste strutture di supporto)

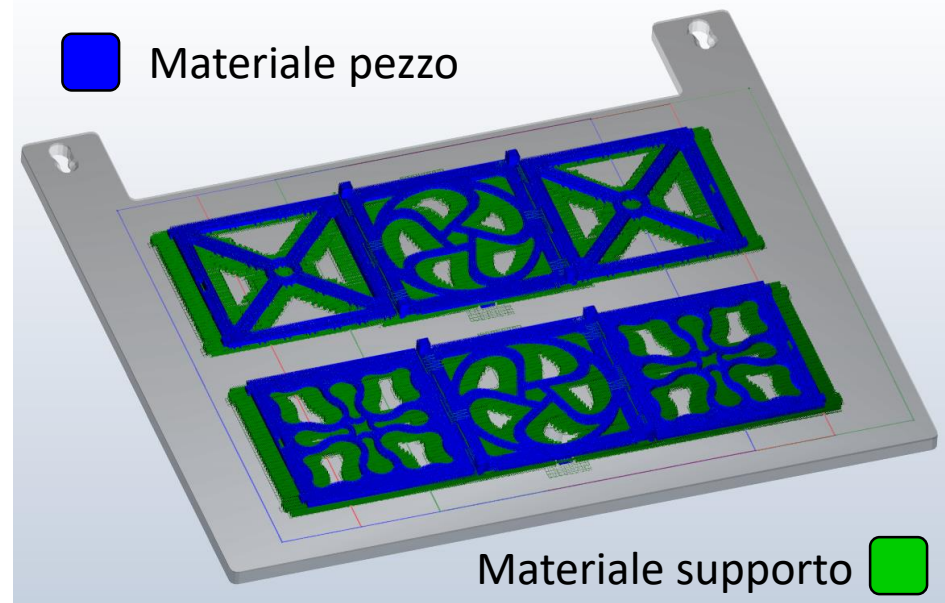
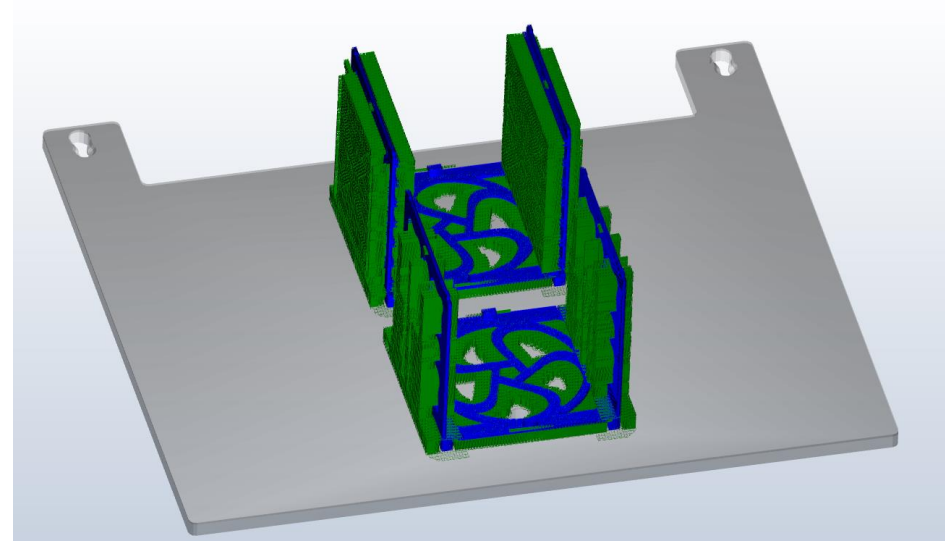
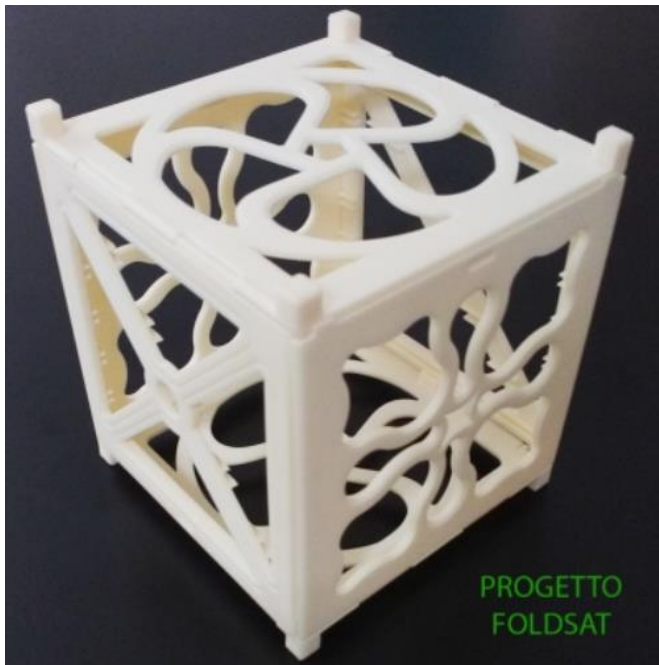


Le strutture di supporto

Progetto FOLDSAT

Vincitore 1° premio “CubeSat Challenge”

<http://goo.gl/juPLmH>



Suggerimenti

Definire la geometria con baricentro/centro nell'origine degli assi

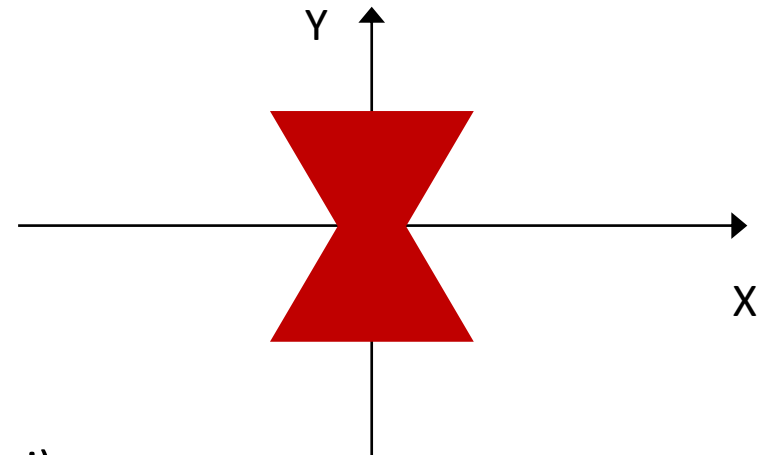
Utilizzare equazioni per ruotare o scalare rispetto all'origine

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

Rotazione fra strati di 0.5°

Scala di ??? (verificare sovrapposizione strati)



Utilizzare foglio di lavoro Excel con celle separate per i calcoli e sfruttare la funzione **CONCAT** per concatenare valori e caratteri nella riga di codice

Verifica del codice (debugging)

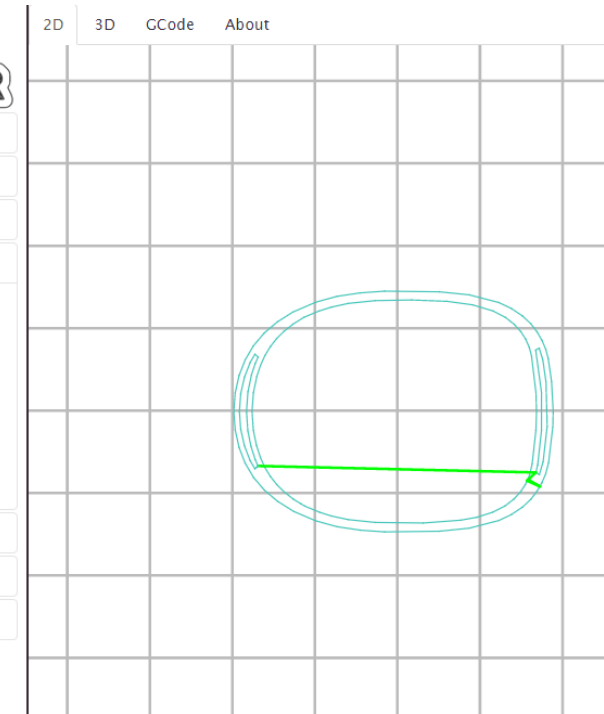
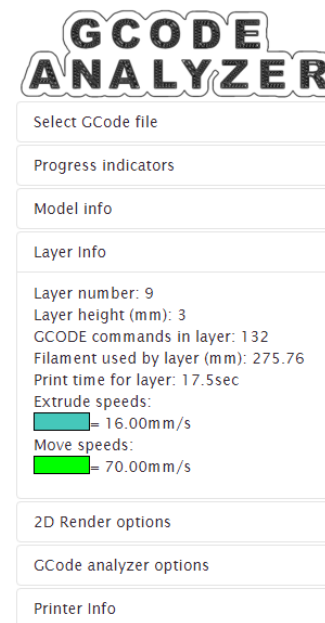
Visualizzatore on-line
del percorso di stampa:

<http://gcode.ws/>

Drag and drop file ASCII (testo)
con estensione .gcode direttamente
nel browser

Visualizzazione strati 2D

Usando tasti  e  da tastiera



Verifica del codice (debugging)

<http://gcode.ws/>

Rappresentazione traiettoria 3D

Limitazioni:

- Funziona con singolo estrusore
- Non sono ammesse modifiche al codice in tempo reale
- Non viene visualizzata un'animazione del processo di stampa

GCODE ANALYZER

Select GCode file

Progress indicators

Model info

Model size is: 80.63x45.63x51.55mm
Total filament used: 53287.56mm
Total filament weight used:
133.27grams
Estimated print time: 0:57:12
Estimated layer height: 0.25mm
Layer count: 207printed, 207visited
Time cost: 0.95
Filament cost: 6.66

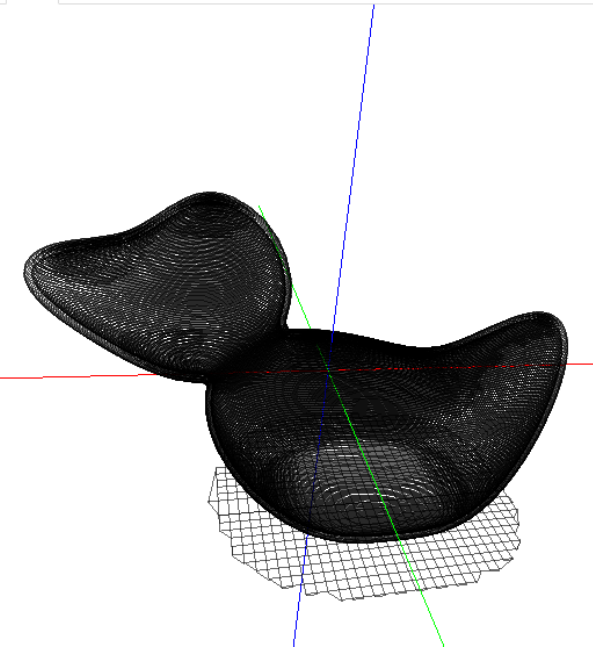
Layer Info

2D Render options

GCode analyzer options

Printer Info

2D 3D GCode About



Verifica del codice (debugging)

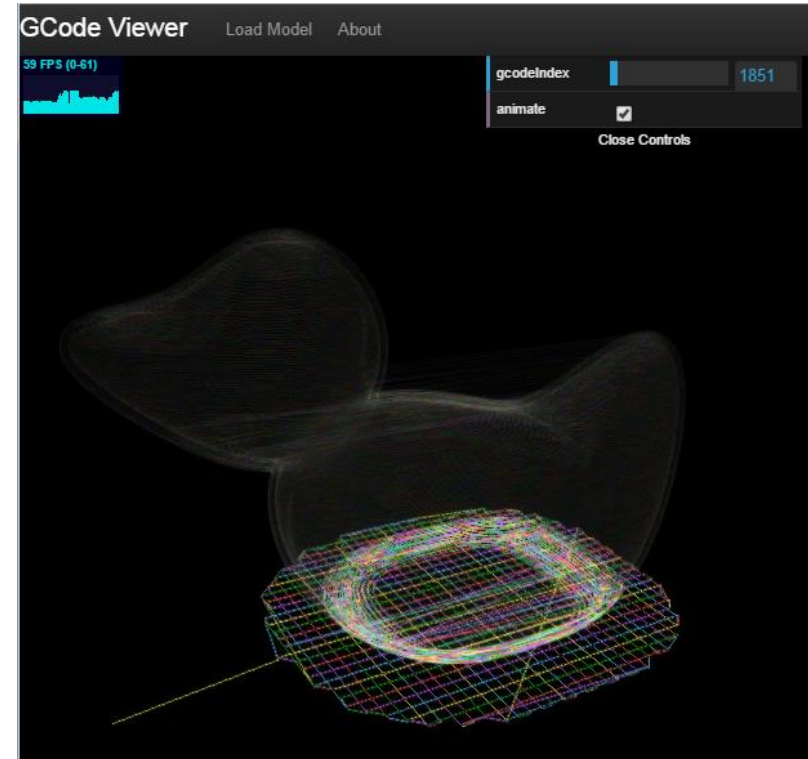
Alternativa con animazione:

<http://jherrm.com/gcode-viewer/>

Drag and drop file ASCII (testo)
con estensione .gcode direttamente
nel browser

Limitazioni:

- Funziona con singolo estrusore
- Non sono ammesse modifiche al codice in tempo reale
- Sono consentite solo pausa e ripresa dell'animazione, no riavvio



Indicazioni per la scrittura del codice

Copiare intestazione dal file di esempio:

G90

M106

M104 S250

M551 P64000 S1000

M543

M227 P3200 S3200

M106

G21

M103

M113 S1.0

M108 S200.0

M108 S600.0



Indicazioni per la scrittura del codice

Estensione supporto di 15 mm oltre ingombro pezzo

Realizzazione di due strati di supporto:

G1 X20.25 Y1.65 Z0.7 F4200.0

M101

G1 X21.94 Y10.16 Z0.7 F720.0

G1 X21.94 Y-5.1 Z0.7 F720.0

M103

G1 X23.63 Y15.22 Z0.7 F4200.0

M101

G1 X23.63 Y-10.16 Z0.7 F720.0

G1 X25.31 Y-11.85 Z0.7 F720.0

G1 X25.31 Y16.91 Z0.7 F720.0

GCODE ANALYZER

Select GCode file

Progress indicators

Model info

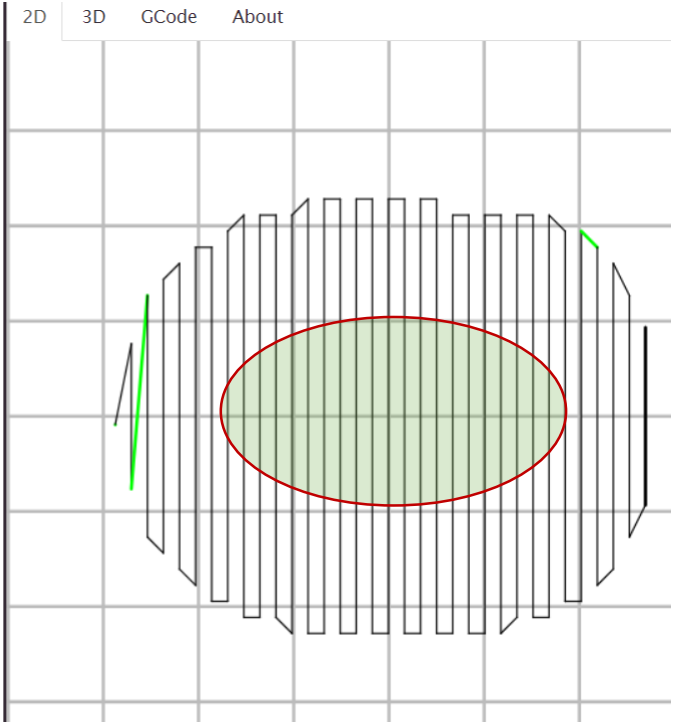
Model size is: 80.63x45.63x51.55mm
Total filament used: 53287.56mm
Total filament weight used:
133.27grams
Estimated print time: 0:57:12
Estimated layer height: 0.25mm
Layer count: 207printed, 207visited
Time cost: 0.95
Filament cost: 6.66

Layer Info

2D Render options

GCode analyzer options

Printer Info



Due strati di supporto

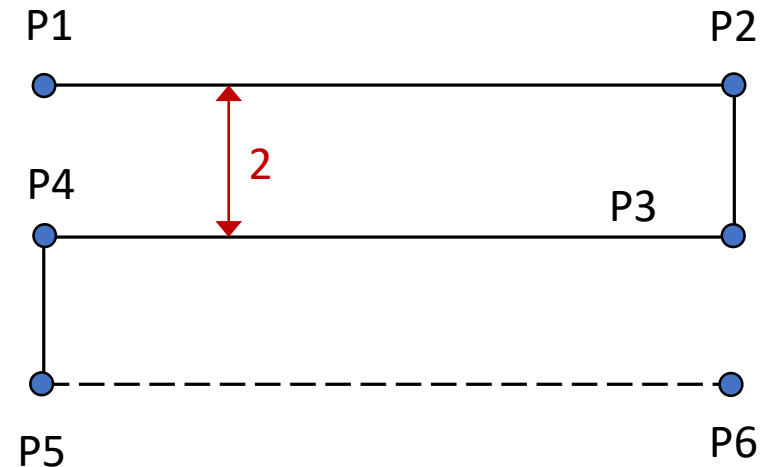
Primo strato più spesso e rado:

Spessore 0.7 mm (Z0.7)

S600 = 60 rpm

F720 velocità testa di estrusione

Distanza tra passate = 2mm



Secondo strato più sottile e fitto:

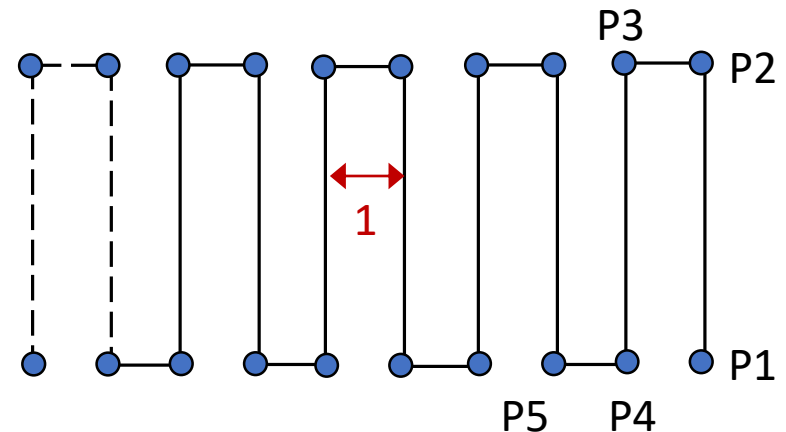
Incroccio a 90° rispetto al primo

Spessore 0.3 mm (Z1.0)

S300 = 30 rpm

F960 velocità testa di estrusione

Distanza tra passate = 1mm



Scadenze per il concorso

Lavoro singolo o di Gruppo (max 3 persone)

Fase 1:

Consegna del file .gcode **entro lunedì 21 maggio** (incluso)

Caricamento nella **sezione “Elaborati”**

Fase 2:

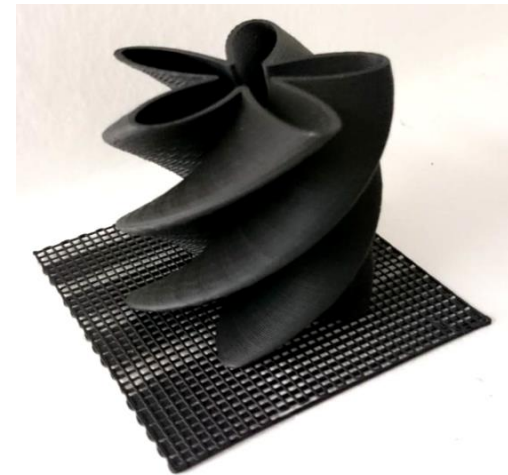
Caricamento on-line delle immagini delle geometrie

Link per esprimere la propria preferenza **entro domenica 3 giugno**

Fase 3:

Stampa dei 5 pezzi che avranno ottenuto maggiori voti

Consegna dei pezzi stampati a fine corso con convocazione via mail dei vincitori e visita presso i locali del Centro IAM@PoliTO



Integrated Additive Manufacturing Centre (IAM@PoliTO)

<http://iam.polito.it>

