

CERAMICA DIGITALE

progettare per la stampa 3D
in materiale ceramico



POLITECNICO
MILANO 1863

Scuola del Design
CdLM Design & Engineering
AA 2015/2016

Relatore

Marinella Levi

Correlatore

Francesco Pacelli

Studente

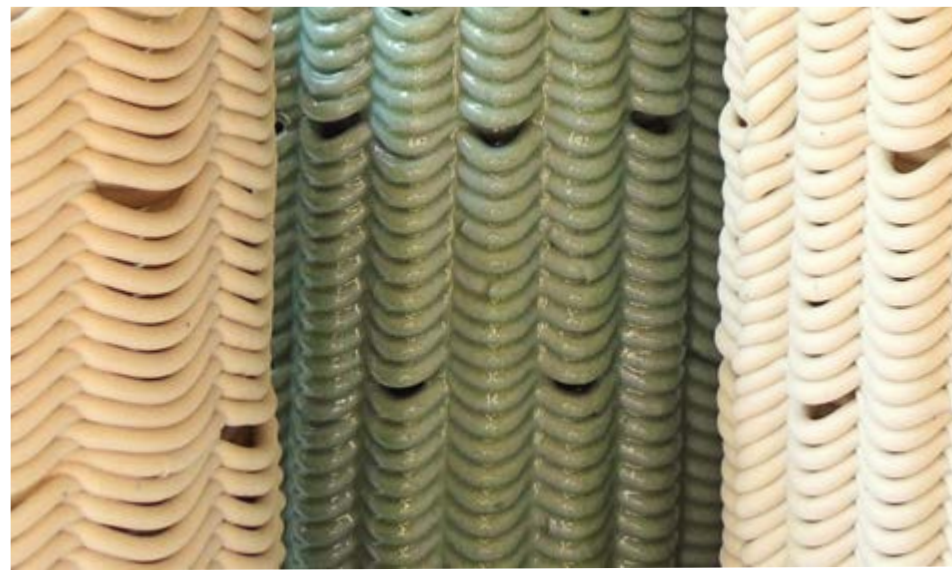
Maria Luisa Miotti

Matricola 798652



Indice

ABSTRACT 10



4.	GLI IMPASTI	59
	materiali	60
	strumentazioni e tecniche	64
	gestione dell'impasto	65
	riciclo	65

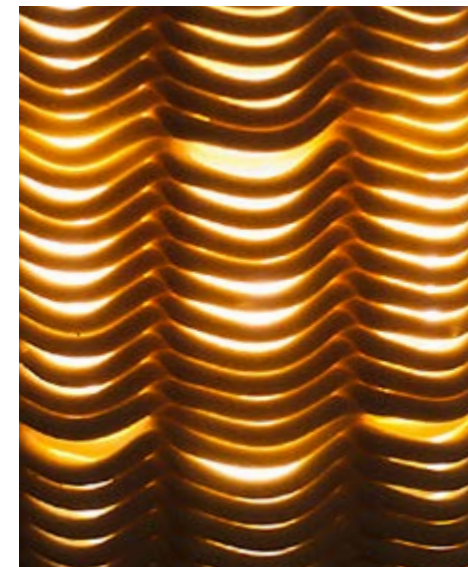


7.	PARAMETRI DI STAMPA	103
	dimensione dell'ugello	105
	altezza del layer	106
	velocità di stampa	106
	flusso	107
	risultati	122

1.	INTRODUZIONE	15
	introduzione alla stampa 3D	16
	open source e progetto RepRap	17
	maker e artigianato digitale	19
	dalla plastica all'argilla	21



3.	I MATERIALI CERAMICI	45
	proprietà	46
	tipologie	47
	lavorazioni	52



6.	MATERIOTECA	81
	perché una materioteca?	82
	argilla rossa	84
	argilla bianca	86
	pirofila	88
	nera raku	90
	terra etrusca	92
	porcellana limoges	94
	porcellana azzurrata	96
	gres enk	98
	confronto	100



2.	STATO DELL'ARTE	25
	esempi nel mondo	26
	estrusori e stampanti +lab	38



5.	IL PROCESSO DI STAMPA	67
	settaggio	68
	preparazione della stampante	70
	avviamento e gestione	72
	essiccamento e cottura	73

8. MODALITÀ DI STAMPA 125

contorno	127
base	127
riempimento	128
risultati	144



12. PROGETTARE PER LA STAMPA 183

vantaggi della stampa 3D	184
regole di progettazione	185
casi studio	200



9. GLI SBALZI 147

sbalzo rettilineo	150
risultati	158
sbalzo cruvo	160
fori e ponti	164



11. CRITICITÀ 175

segni del cambio di layer	176
difetti nei travel	177
intasamento	177
bolle	178
cambi di pressione	179
collasso della stampa	180
formazione di spaccature	181
Influenza del clima	181



13. CONCLUSIONI 219



10. FINITURE 167

lavorazioni post stampa	168
rivestimenti ceramici	170
trattamenti dell'impasto	172

BIBLIOGRAFIA	222
SITOGRAFIA	226
INDICE DELLE IMMAGINI	230



ABSTRACT



La stampa 3D dei materiali ceramici si colloca in un contesto più ampio che è quello dell'additive manufacturing, in un momento di grande fermento, espansione e sperimentazione con diverse tecnologie e materiali. Il processo, che possiamo anche chiamare ldm, ovvero liquid deposition modeling, è un adattamento dei principi della stampa 3D fdm (fused deposition modeling) ad un nuovo ma antico materiale, la ceramica.

La ceramica è un materiale da sempre presente in ogni ambito del quotidiano ed utilizzato tanto nell'artigianato quanto nel design e nell'ingegneria, grazie alla sua varietà e versatilità e per le sue proprietà.

Scopo di questa tesi è cercare di definire, attraverso una sperimentazione pratica, i principi ed i fattori che regolano il processo per individuare le possibilità che offre ma anche i suoi limiti e le criticità.

In un primo momento verranno illustrati il contesto in cui la tecnologia è nata ed i motori che ne hanno permesso lo sviluppo ma anche le proprietà, tipologie e lavorazioni del materiale, fino alla sua preparazione e al processo di stampa, che termina con la cottura che porta al prodotto finito.

La seconda parte consisterà nell'analisi di una sperimentazione pratica, cercando di isolare e comprendere l'effetto dei diversi parametri e modalità utilizzati nella stampa, a seconda della tipologia di materiale e della forma del modello.

Fine ultimo è la definizione di regole di design for manufacturing specifiche per la tecnologia, che permettano una progettazione ad hoc per la stampa in materiale ceramico e ne rendano più facile l'utilizzo e la comprensione da parte di un pubblico sempre maggiore, con l'intento di contribuire al suo sviluppo ed al suo affermarsi.

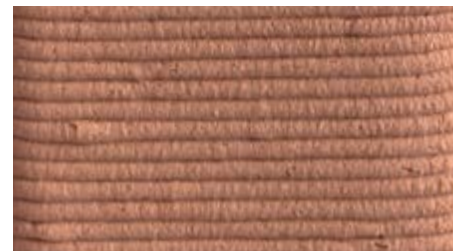
PARTE 1 LA TECNOLOGIA

La stampa in 3D dei materiali ceramici nasce all'interno dell'attuale e rivoluzionario contesto di sperimentazione nell'ambito dell'additive manufacturing. L'avvento delle stampanti Open Source e l'affermarsi del movimento Maker sono stati il motore che ha permesso la nascita e lo sviluppo della stampa della ceramica, fino all'attuale commercializzazione di sistemi dedicati.

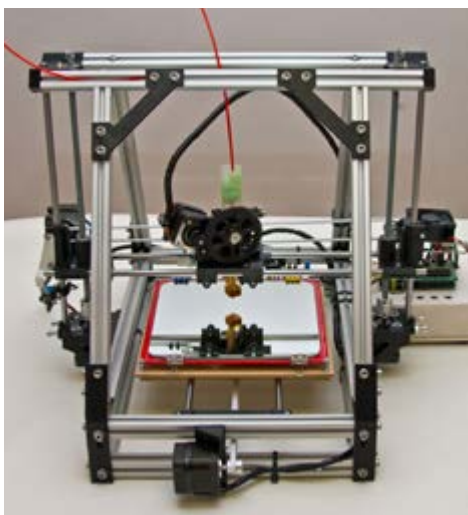
Perchè la ceramica? È un materiale antico, forse tra i primi con cui l'uomo ha iniziato a costruire i propri oggetti, ma anche attuale, usato tanto nell'artigianato quanto nel design e nell'ingegneria. È un materiale versatile, che offre innumerevoli possibilità di lavorazione, finitura e applicazione, grazie alle sue numerose proprietà. È una materia prima a basso costo, presente in abbondanza in natura in diverse tipologie e composizioni. Proprio per questi motivi però è anche un materiale che richiede conoscenza ed esperienza per essere utilizzato al meglio.

La prima parte di questa tesi vuole contestualizzare la tecnologia prima di affrontare la stampa più da vicino. Tratterà quindi del contesto in cui questa si è sviluppata, di ciò che ha permesso il suo sviluppo e di alcuni esempi significativi che possono essere considerati come riferimenti per la nascente comunità di "stampatori". Dopo un'introduzione a quello che è il vasto mondo dei materiali ceramici, alle loro proprietà, tipologie e lavorazioni, verranno quindi illustrati i principi di funzionamento della tecnologia, dalla preparazione del materiale al processo di stampa alla cottura, con cui si ottiene un prodotto finito.





1. INTRODUZIONE



introduzione alla stampa 3D

“Stampa 3D” è il termine colloquiale e più popolare usato per indicare il gruppo di tecnologie chiamato additive manufacturing.



Rappresenta la naturale evoluzione della stampa bidimensionale a cui viene però introdotta la terza dimensione: per creare un oggetto solido tridimensionale una stampante 3D, a partire da un modello digitale, deposita e sovrappone strati di materiale di spessore variabile, ognuno contenente una sezione dell'oggetto finale, che strato dopo strato prende forma.

L'additive manufacturing si differenzia dalla maggior parte delle tecnologie di produzione tradizionali in cui l'oggetto viene ricavato a partire da un blocco di materiale iniziale oppure formato in stampi dedicati. Tramite la stampa 3D è possibile ottenere un oggetto in un'unica operazione senza perdita di materia prima, attrezzature e strumenti dedicati (oltre alla stampante stessa), lavorazioni successive. Un'ulteriore vantaggio rispetto alle tecniche tradizionali consiste nella grande libertà formale che questo processo consente, in quanto teoricamente non presenta nessun limite geometrico.

Il processo, inizialmente chiamato di prototipazione rapida ed usato per la creazione di prototipi, viene ora utilizzato anche per la creazione di prodotti finiti nei più diversi e numerosi ambiti quali design, architettura, moda, gioielleria, calzoleria, medico e dentistico, food, automotive, aerospaziale, educazione e molti altri.

Bisogna ricordare però che la stampa 3D, come qualsiasi altra tecnica di produzione digitale, non è adatta ad economie di scala: non è più economico, su una base per unità, produrre un migliaio di pezzi piuttosto che uno solo. Questa caratteristica non deve essere vista come uno svantaggio. La stampa 3D favorisce infatti la personalizzazione senza incidere sui costi di produzione: per differ-

enziare ogni singolo prodotto non è necessario modificare le attrezzature ma solamente il modello 3D. Diventa l'opposto della produzione di massa che implica ripetizione e standardizzazione, avvicinandosi ad una produzione di tipo artigianale.

open source e progetto RepRap

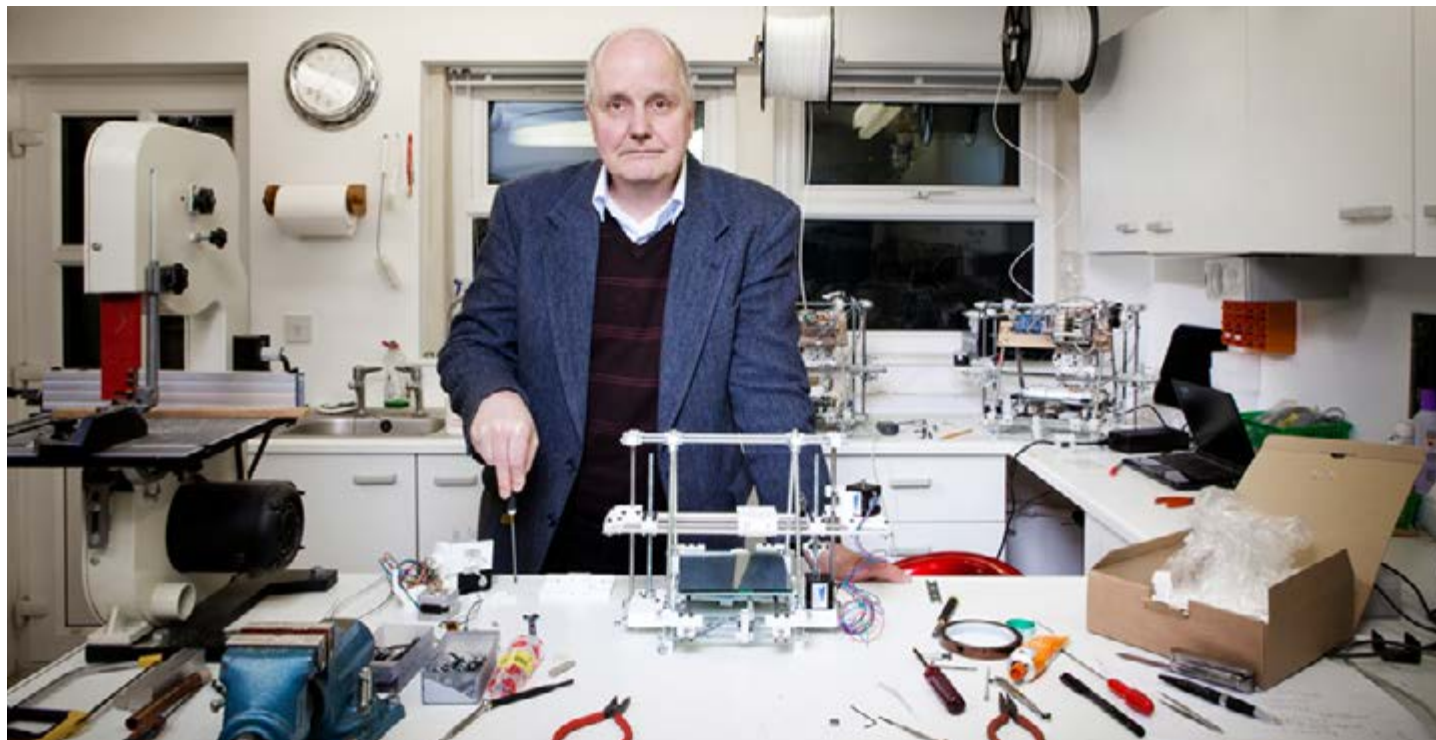
I primi esempi di stampa 3D appaiono negli anni 80 con il nome di tecnologie di prototipazione rapida (Rapid Prototyping-RP). Inizialmente infatti questi processi furono concepiti come nuovi metodi, più economici ed efficaci, per la creazione di prototipi per lo sviluppo di prodotti nelle aziende. Nel 1986 viene depositato il primo brevetto dell'americano Charles Hull per la stereolitografia (SLA) ed inizia la commercializzazione delle prime stampanti 3D, con la fondazione dell'azienda 3D Systems¹. Nel decennio successivo vengono sviluppate la maggior parte delle tecnologie di stampa 3D basate sull'utilizzo di diversi materiali sotto forma di polveri, liquidi o solidi, e si impongono sul mercato i primi colossi aziendali come “3Dsystems”, “Stratasys”, “Cubital” e “Eos”.

Nel 2005 scade il brevetto posseduto da “3DSystems” (Us patent n. 4.863.538) sulla tecnica FDM (Fused Deposition Modeling) e nello stesso anno Adrian Bowyer, insegnante di ingegneria meccanica all'università di Bath nel Regno Unito, inizia un progetto riguardo una macchina in grado di autoreplicarsi. L'intento era quello di sviluppare una stampante 3D open source, piccola, accessibile e semplice, che chiunque potesse costruire, composta da elementi facilmente reperibili in commercio e componenti stampati in 3D, che fosse in grado di produrre ogni tipo di oggetto e “useful-stuff” ma anche di riprodurre un'altra macchina dalle stesse caratteristiche per qualcun'altro.

Nasce così il progetto RepRap² (REplicating RAPid-prototyper) e nel 2006 il prototipo inizia a stampare i pezzi per il suo primo “figlio”. Per promuovere il progetto Bowyer rilasciò assieme costruttivi, specifiche tecniche, software su licenza open source, in modo che chiunque potesse costruirsi la propria RepRap, chiedendo in cambio solamente di non interrompere il ciclo permettendo ad ogni stampante di stampare i componenti per una nuova macchina, in modo da avviare una crescita esponenziale.

.....
1 <http://www.3dsystems.com>

2 <http://reprap.org/wiki/RepRap>



img. 2, Adrian Bowyer

La GNU “General Public License”³ è una licenza open source che garantisce agli utenti finali, che possono essere organizzazioni, imprese o semplici individui, di utilizzare, condividere e persino modificare l’opera, ed è una licenza copyleft secondo cui le opere derivate possono essere distribuite solo sotto gli stessi termini di licenza. In questo modo le informazioni necessarie per implementare la tecnologia sono di dominio pubblico gratuitamente.

Grazie alla sua logica di condivisione il progetto divenne subito molto popolare. Da un lato si formò una comunità di “costruttori” in cui ogni utente era libero di apportare modifiche e sostituzioni alla stampante contribuendo al miglioramento e alla crescita del progetto, che ha portato ad una sorta di evoluzione naturale della tecnologia sia a livello meccanico che di hardware e software. Da un altro lato numerose piccole aziende iniziarono a sviluppare e vendere le proprie stampanti o kit basati sulla RepRap, nuovi tipi di macchine che non hanno più la possibilità di stampare parti di se stessa ma che sono comunque in grado stampare parti di una RepRap. Questi progetti derivati vengono chiamati RepStrap⁴, esempi sono i modelli “3Drag”⁵,

3 <http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>
4 <http://reprap.org/wiki/Category:RepStrap>
5 <http://reprap.org/wiki/3drag>

costruita con profilati, e “Ultimaker”⁶, costruita con pannelli in legno.

Le RepRap ed il loro padre Adrian Bowyer sono stati la scintilla che ha innescato l’attuale esplosione delle stampanti 3D a cui stiamo assistendo, portando una tecnologia che prima era costosa, specializzata ed inaccessibile, a contatto con la gente.

maker e artigianato digitale

Un paio di anni prima dell’inizio del progetto RepRap anche Neil Gershenfeld, al Center for Bits and Atoms del Massachusetts Institute of Technology, stava cercando di rendere le tecnologie di produzione digitale accessibili e nel 2001 creò il primo fablab al MIT. Il fablab, fabrication laboratory o fabulous laboratory⁷, era un laboratorio a disposizione di tutti gli studenti fornito di macchinari altamente specializzati per la fabbricazione digitale come stampanti 3d, frese cnc e macchine per il taglio laser, dove questi potevano progettare e creare tutto ciò che volevano. Il corso si chiamava inizialmente “how to make almost everything” e sebbene il target originario fossero gli studenti di ingegneria il fablab attirò architetti, designer, artisti e tanti altri, che iniziarono a lavorare insieme unendo le loro capacità e conoscenze, sviluppando presto nuove idee e progetti.

Ad oggi vi sono più di 300 fablab aderenti alla fabfoundation⁸ senza contare altri laboratori indipendenti in tutto il mondo, nelle grandi città come in località remote e nei paesi in via di sviluppo, ed il numero è in continua crescita. Sono laboratori aperti a tutti e chiunque voglia sviluppare e creare il proprio progetto può utilizzare spazi e macchinari gratis o pagandone le spese, sia sfruttando che contribuendo alla condivisione di idee e conoscenze su cui si basano.

Questa semplicità di accesso alle tecnologie digitali e la condivisione di conoscenze ed informazioni hanno favorito la diffusione di una nuova cultura della fabbricazione.

La cultura dei maker comincia a nascere insieme a questa tendenza e costituisce un movimento culturale che rappresenta un’estensione

.....
6 <https://ultimaker.com/>
7 Gershenfeld N. (2005), Fab. Dal personal computer al personal fabricator, Codice Edizioni.
8 <http://www.fabfoundation.org/>

su base tecnologica del tradizionale mondo del fai da te, o Do It Yourself. Tra i loro interessi vi sono tecnologia, design, arte, sostenibilità e modelli di business alternativi e tra i loro strumenti robotica, elettronica, fresatura, stampa 3D e tecnologie manifatturiere digitali in genere, senza dimenticare le tecniche di lavorazione più tradizionali.

Come afferma in un'intervista Massimo Banzi, cofondatore di Arduino e del primo Fablab italiano "I makers sono la naturale conseguenza di internet, delle piattaforme social e della diffusione di tecniche di produzione rapida. Essi operano all'interno di una comunità digitale composta da migliaia di appassionati e fondata sulla filosofia della condivisione della conoscenza e dell'open source."⁹ Come si può leggere nel loro Manifesto le regole del movimento riassumibili con le parole: Make (fai), Share (condividi), Give (dona), Learn (impara), Tool up (attrezzati), Play (gioca), Partecipate (partecipa), Support (supporta) e Change (cambia).¹⁰

Siamo di fronte a quelli che molti definiscono una terza rivoluzione industriale, con uno scenario di produzione post-industriale alimentato dalla manifattura digitale e dalla comunicazione via internet, più simile ad un contesto artigianale che a quello dei sistemi di produzione di massa introdotti dalla rivoluzione precedente. In una fabbricazione diventata digitale possiamo vedere aspetti di un'economia artigianale pre-industriale uniti ad aspetti più legati a metodi di produzione industriale dall'elevata tecnologia. Questo tipo di approccio permette la produzione di oggetti in piccolo numero, in un network di microaziende vicine agli utenti.¹¹

Nel suo libro 'Abstracting Craft' Malcom Mc Cullough cerca di dare una definizione di artigianato libera dai significati nel tempo e che rispecchi la situazione attuale, in cui trovano spazio anche gli strumenti digitali. "Il lavoro artigianale non è né design né artefatto individuale: è la tradizione della produzione stessa. E' la presenza di diversi oggetti identici nella loro concezione, ed intercambiabili nel loro uso, ma unici nella loro esecuzione. Implica lavorare ad una scala personale, agire localmente in reazione all'anonima, globalizzata produzione industriale."¹²

.....
9 Massimo Banzi (2013)

10 Harch M. (2014), The maker movement manifesto. Rules for innovation in the new world of crafters, hackers and tinkerers, Mc Graw Hill Education

11 C. Warnier, D. Verbruggen, S. Ehmann, R. Klanten (2014), Printing things-Vision and Essentials for 3D Printing, Gestalten

12 M. Mc Cullough (1997), Abstracting Craft-The Practiced Digital Hand, MIT Press

dalla plastica all'argilla

Una prima fase creativa si è sviluppata utilizzando la stampa 3D come mezzo per creare forme tridimensionali mai prodotte prima, sfruttando le potenzialità e la libertà concessa dalla nuova tecnologia. Il motore che ha invece portato ad una seconda fase creativa è stata la crescente accessibilità a queste tecnologie e soprattutto la creazione di stampanti 3D open source, con i seguenti fenomeni già citati del movimento Maker e dell'artigianato digitale. Questo ha portato ad uno spostamento della visione della stampa 3D come semplice strumento ad una visione che la considera più come un mezzo, incoraggiando alla ricerca sul processo e sugli strumenti, alla modifica e all'adattamento della tecnologia per i propri scopi.

Proprio in questo contesto si è sviluppata la stampa 3D in materiale ceramico, modificando delle comuni stampanti 3D FDM open source in cui la normale testa di estrusione per polimeri termoplastici viene sostituita con un'altra appositamente creata in grado di estrarre l'argilla in sottili filamenti.

Il principio di funzionamento rimane lo stesso e l'oggetto prende forma attraverso la deposizione e sovrapposizione controllata di strati di materiale. Molto simile è l'antica tecnica di lavorazione ceramica del colombino, che consiste proprio nella sovrapposizione di cilindri di argilla allo stato plastico per la creazione di oggetti cavi.



img. 3, tecnica del colombino



img. 4, stampa 3D

principio

LDM è l'acronimo di "Liquid Deposition Modeling", modifica di "Fused Deposition Modeling", ovvero la deposizione controllata di un materiale allo stato liquido a temperatura ambiente.

La modellazione a deposizione fusa FDM è la tecnologia di stampa 3D forse più conosciuta che permette la creazione di oggetti depositando il materiale in strati grazie ad una movimentazione a tre assi. Un filamento di polimero termoplastico viene convogliato in un ugello riscaldato grazie ad un estrusore e costruisce strato per strato il modello verso l'alto partendo da un piatto di stampa. Le traiettorie per la creazione dell'oggetto, gestite da un meccanismo di controllo numerico controllato da un software CAM (computer-aided manufacturing), seguono i piani XYZ creati dai movimenti del piatto di stampa e della testina di estrusione.

Le tecniche di stampa di tipo FDM e LDM possiedono gli stessi elementi elettronici e meccanici che gestiscono le dinamiche di movimentazione della testa dell'estrusore. Il materiale di costruzione, in entrambe le tecnologie, viene spinto all'interno di un canale che termina con l'ugello di stampa.

Nella stampa FDM il materiale utilizzato è un polimero di tipo termoplastico sottoforma di filamento che viene spinto per mezzo di un ingranaggio all'interno del blocco estrusore, dove viene indotto al cambiamento di fase, dallo stato solido a quello liquido, per mezzo del calore generato da una resistenza elettrica. Il polimero è reso viscoso fino al punto in cui è in grado di fuoriuscire dall'ugello e, una volta depositato, questo raffredda velocemente ritornando di conseguenza allo stato solido. Nella stampa LDM è invece possibile utilizzare qualsiasi materiale liquido a temperatura ambiente con una viscosità variabile, da soluzioni a base d'acqua fino alla plastilina.

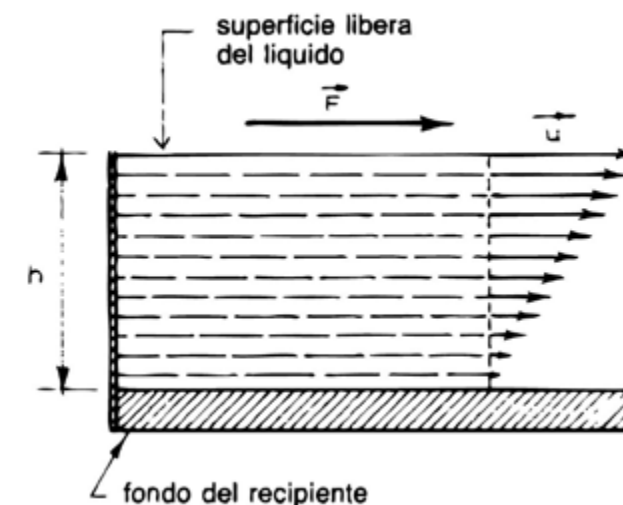
La viscosità rappresenta la resistenza al moto di un fluido, che da un punto di vista più quantitativo può essere definita come misura della capacità di scorrimento di un fluido sotto l'azione di forze di taglio. Maggiore è la viscosità, a parità di forza applicata, minore è il gradiente di scorrimento che si sviluppa nel fluido. Viceversa, a parità di gradiente, un fluido di viscosità maggiore richiede una forza di scorrimento maggiore.

Nella tecnica LDM si utilizza un materiale a viscosità medio-alta che viene caricato nel contenitore dell'apparato di estrusione. Questo è

costretto a fuoriuscire dall'ugello per mezzo di una pressione, i fluidi infatti sono soggetti alla legge di Pascal e subiscono soltanto questo tipo di sollecitazione. Il principio di Pascal o legge di Pascal è una legge della fisica dei fluidi che stabilisce che quando avviene un aumento nella pressione in un punto di un fluido confinato tale aumento viene trasmesso anche ad ogni punto del contenitore: "La pressione esercitata in un punto qualsiasi di un fluido si trasmette in ogni altro punto del fluido con la stessa intensità, indipendentemente dalla direzione".¹³

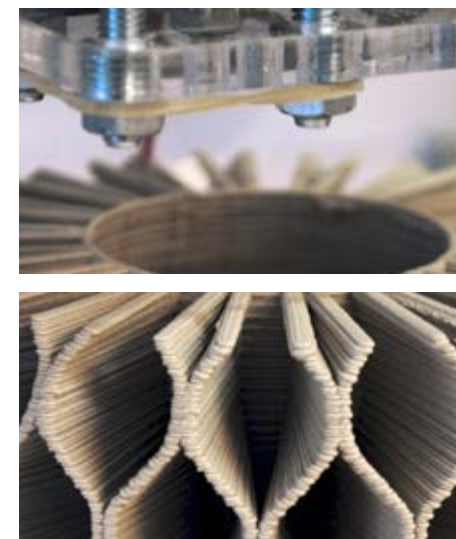
Il meccanismo di estrusione può sfruttare diversi principi per generare la pressione necessaria alla fuoriuscita del materiale, dalla sola pressione atmosferica fino a quella indotta per mezzo di sistemi pneumatici (aria compressa o meccanici). Una volta depositato il materiale questo deve necessariamente solidificare nel tempo utile al fine di supportare lo strato successivo oppure deve avere una viscosità tale da garantire la resistenza meccanica degli strati seguenti.

Un materiale ceramico, dal momento che non ha una solidificazione immediata, può essere quindi stampato solo ad una viscosità abbastanza elevata che impedisca al pezzo di collassare per il proprio peso. La viscosità ideale sarebbe la stessa utilizzata dai ceramisti per modellare diversi oggetti con tecniche artigianali. In questo caso l'argilla ha infatti una buona plasticità che le consente di essere modellata facilmente nella forma desiderata senza poi deformarsi.

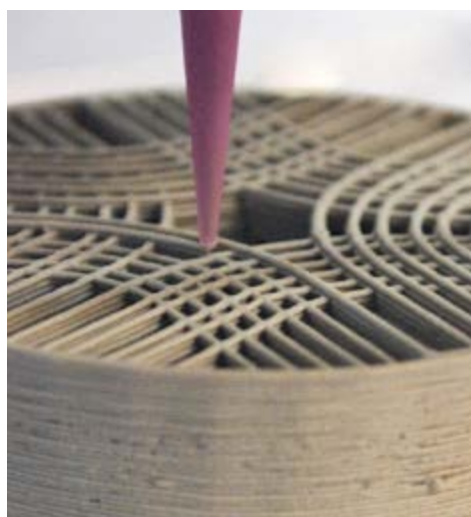


img. 5, Scorrimento viscoso

13 Gabriele Natale (2013), 3D Composites Extrusion Project-verso la stampa 3D di materiali compositi, tesi di laurea, Politecnico di Milano



2. STATO DELL'ARTE



Sempre più numerosi sono i laboratori, le aziende, gli studi ed i privati che stanno sperimentando la stampa 3D ldm dei materiali ceramici, con innumerevoli approcci, scopi e stili diversi. Alcuni sono più orientati al design, altri all'arte, altri all'architettura, altri ancora all'ingegneria. Alcuni sono più orientati all'applicazione, altri al software e all'hardware. Alcuni sono rimasti nel mondo open source altri sono entrati nel commerciale.

Diversi sono anche i forum e le community online in cui sempre più utenti possono condividere esperienze e scambiarsi consigli. Su re-prap.org c'è una parte riguardante la stampa della ceramica con le istruzioni per poter costruire diversi tipi di estrusore e stampanti, sviluppati da diversi utenti, consigli su come preparare il materiale ed un forum dedicato.

Altra community interessante è "make your own ceramic 3D printer" su Google+, che ad oggi conta ben 893 membri.² Scopo della community è di offrire una "bill of material" di strumenti e materiali con rivenditori presenti in tutto il mondo e accessibili a tutti, di assistere ognuno nella costruzione della propria stampante con consigli su materiali, sicurezza, design. Viene poi richiesto di condividere il proprio lavoro con gli altri in modo da democratizzare la tecnologia, e mostrare le possibilità che offre.

esempi nel mondo

Nel seguente capitolo verranno riportati alcuni esempi di studi o aziende nell'ambito della stampa 3D ldm in materiale ceramico. Sono stati selezionati pochi casi ma di particolare rilevanza sia per gli strumenti sviluppati che per l'approccio utilizzato.

Abbiamo i pionieri della stampa della ceramica, lo studio Unfold e l'artista Jonathan Keep, il designer Olivier Van Herpt per le interessanti ricerche sulle possibilità tecnologiche e il suo sistema di estrusione ad alta pressione, l'azienda italiana Wasp che con l'intento di stampare le case ha sviluppato e iniziato a commercializzare un sistema di estrusione adattabile a diverse stampanti, e lo studio VormVrij che ha progettato non solo un estrusore ma un'intera stampante appositamente costruita per la ceramica.

1 http://reprap.org/wiki/Ceramic_Extrusion;
http://reprap.org/wiki/Ceramic_delta

2 <https://plus.google.com/u/0/communities/109375785524125994679>



img. 6, Stampa 3D di ceramica nel mondo, "Make your own ceramic 3D printer", google plus community.



img. 7, Stampa 3D di ceramica in Europa, "Make your own ceramic 3D printer", google plus community.

Unfold

Unfold è uno studio composto dai designer Claire Warnier e Dries Verbruggen, entrambi laureati alla Design Academy di Eindhoven, con sede ad Antwerp, in Belgio.

La mission dello studio consiste nella ricerca del ruolo del designer in un'epoca dove il design e la manifattura sono sempre più digitalizzati, un contesto in cui aspetti appartenenti ad un'economia artigianale, a sistemi di produzione tecnologici e alla comunicazione digitale si uniscono. C'è una nuova tipologia di design, un artigianato semi-industriale, e sebbene la definizione di artigianato si riferisce al lavoro a mano, in questo contesto riflette un rinnovato interesse nella costruzione di conoscenza attraverso la ripetizione e la pratica di un mestiere specializzato con l'ausilio di strumenti.

Pionieri nella stampa 3D in ceramica, dal 2009 costruiscono e sviluppano stampanti basate su progetti RepRap open source ed estrusori per la stampa dell'argilla e la porcellana, anche grazie alla collaborazione della comunità RepRap, come affermano sul loro sito.¹

Con la stampa 3D in materiale ceramico Unfold non vuole solo esprimere il potenziale del materiale e della nuova tecnologia ma proiettare una tecnologia appartenente alla storia e al passato nel futuro. Tutti gli sviluppi del processo sono documentati sotto licenza Creative Commons.

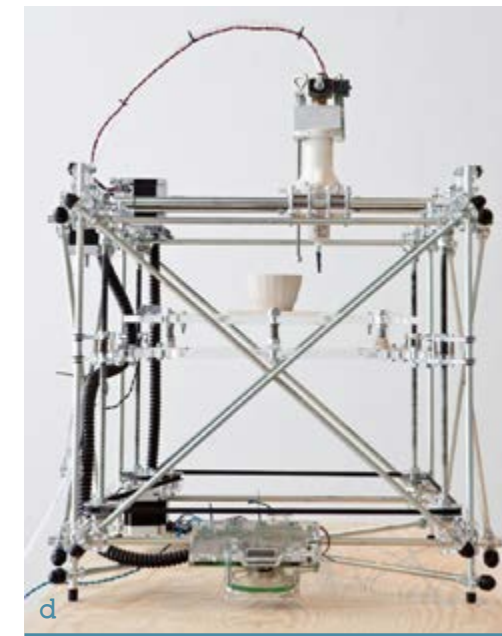
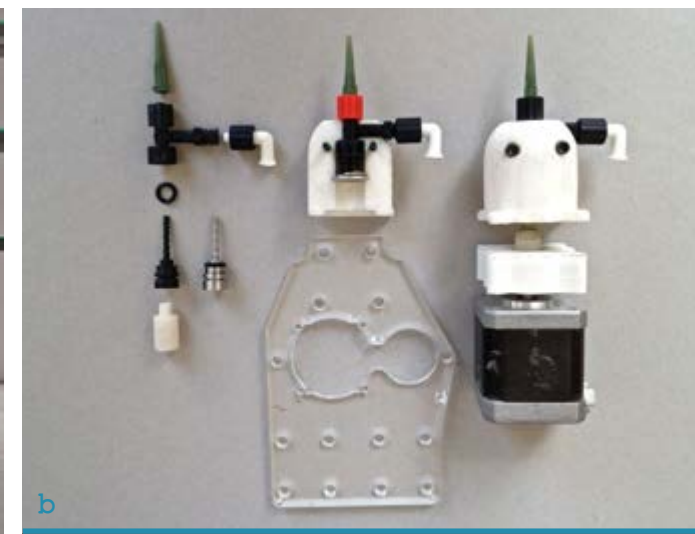
Assieme a Tim Knapen lo studio ha sviluppato anche un software che permette un controllo dettagliato della stampa, dando alla tecnologia autonomia ed un proprio linguaggio. Dalla stessa collaborazione deriva il progetto "l'Artisan Electronique"², una sorta di tornio digitale che permette di modellare con le mani un modello wireframe di un vaso che poi verrà stampato in 3D.

"Così è come vediamo il design nel futuro: quando la produzione personale sarà onnipresente il designer dovrà lasciare parte del controllo sul progetto finale. La personalizzazione dovrà essere più divertente della semplice scelta del colore per le nuove scarpe."³

1 <http://unfold.be/pages/ceramic-3d-printing>

2 <http://unfold.be/pages/l-artisan-electronique>

3 Dries Verbruggen (2014)



img. 8:

a, tornio elettronico.

b, estrusore.

c, depuratore per acqua in ceramica.

d, stampante basata sul modello reprop.

e, f, g, esempi di oggetti in ceramica.

h, vetro soffiato in matrice ceramica.



Jonathan Keep

• Studio:
JK Pottery

• Artista:
Jonathan Keep

• Sede:
Suffolk, UK

• Stampanti:
Open source Delta

• Sito web:
<http://www.keep-art.co.uk/>

Jonathan Keep è un artista e ceramista inglese che iniziò a stampare in 3D la ceramica con la stampante sviluppata da Unfold, per poi costruire la propria stampante.

Prima ancora di scoprire questa tecnologia Keep creava forme manualmente utilizzando una siringa per modellare l'argilla a strati⁴ e, con un approccio più da artista che da designer, inizia ad utilizzare la stampa come metodo per aumentare la complessità del suo lavoro di artigiano, creando forme praticamente impossibili da riprodurre a mano.

Le sue opere vengono create digitalmente tramite un codice informatico (tra cui Java e Processing) e si ispirano a modelli e forme del mondo naturale e alle forze elementari della terra, di cui l'artista ricerca il "codice" nascosto. Utilizzando un codice informatico l'artista aggiunge un nuovo livello a quello delle strutture e dei modelli matematici naturali che sono alla base di ogni forma. In questo modo crea famiglie di oggetti, tutti accumulati da un codice genetico digitale.

La serie Iceberg ad esempio si ispira alla bellezza delle forme casuali presenti in natura ma, come in natura, è regolata da una struttura logica e codificata. L'algoritmo usato per creare le forme è programmato per contenere una percentuale di casualità, un valore di "disturbo", che cerca di riprodurre il processo di erosione degli iceberg.⁵

Allo stesso modo altre opere dell'artista si ispirano ad alberi, semi, alla crescita o alle onde sonore.

La stampante sviluppata da Keep si basa sul sistema delta, ed è costruita con componenti che possono essere facilmente lavorati e componenti già esistenti, quindi senza il bisogno di utilizzare un'altra stampante. L'estrusore ad esempio viene costruito adattando componenti usati nell'industria degli adesivi, ed utilizza un serbatoio a siringa.⁶

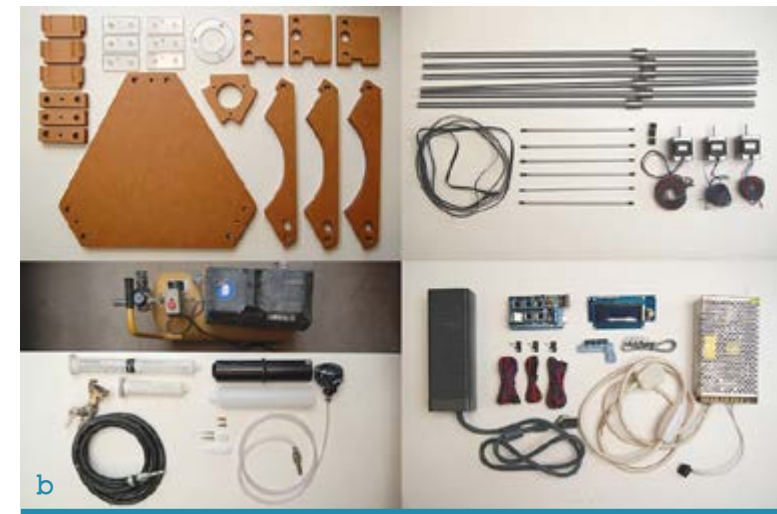
4 http://www.keep-art.co.uk/recent_syringe.htm

5 http://www.keep-art.co.uk/digital_icebergs.html

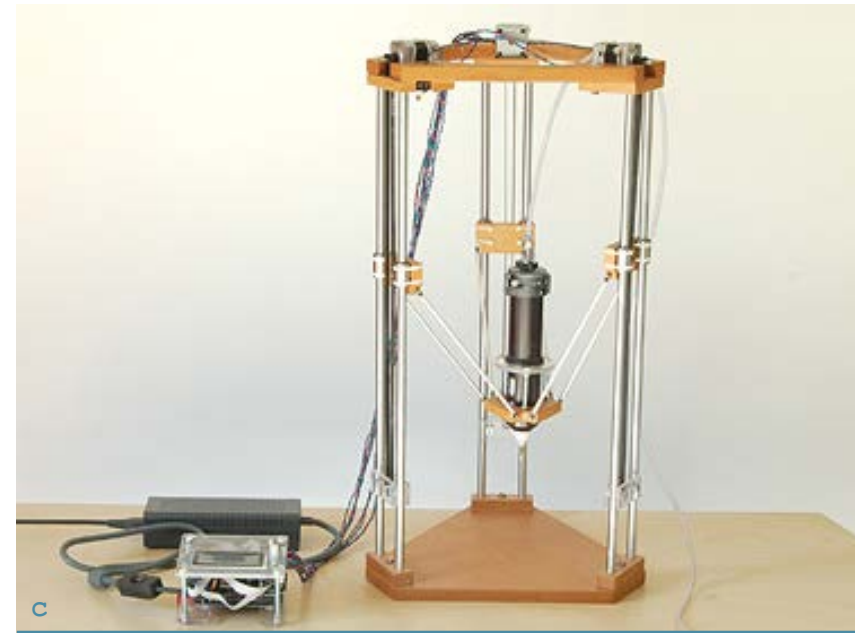
6 http://www.keep-art.co.uk/Self_build.html



a



b



c

img. 9:
a, serie "Iceberg"
b, componenti della stampante.
c, stampante
d, serie "Seeds"
e, serie "Random Growth"
f, stampante in corso di stampa



d



e



Olivier Van Herpt

• Designers:
Olivier Van Herpt

• Sede:
Eindhoven, Olanda

• Stampanti:
modello Delta personale

• Sito web:
<http://oliviervanherpt.com/>

Anche l'olandese Olivier Van Herpt, a partire da un progetto di ricerca universitario della Design Academy di Eindhoven, ha sviluppato una propria stampante ed iniziato ad esplorare le potenzialità ma anche i limiti della stampa 3D in ceramica.

Utilizzando diversi materiali, colori e combinazioni l'intento iniziale del designer era infatti quello di esplorare anche l'imperfezione, l'errore, la casualità del processo, contro l'aumento della ripetibilità e della precisione che solitamente si ricercano nello sviluppo di una tecnologia ma che la rendono "kil". "Kil" è una parola olandese che significa freddo, clinico, senza sentimento, un'assenza di umanità in un certo senso.⁷

"Con l'introduzione di elementi casuali ho voluto reintrodurre l'errore, un tocco umano, stocasticità. Ho sentito che il processo aveva bisogno di serendipità, di gioia attraverso un fallimento intenzionale. Volevo ripetibilità e precisione ma sentivo anche bisogno di errori."⁸

Una seconda fase del progetto cerca invece di sviluppare un processo che sia realmente utilizzabile per la creazione di oggetti d'uso, anche di media e grande scala. Punto chiave in questa fase è la riprogettazione dell'estrusore, che viene adattato e irrobustito per consentire la stampa con gli impasti plastici di argilla in commercio senza bisogno dell'aggiunta di acqua. Questo permette di stampare a viscosità elevate, creando oggetti sviluppati in altezza e con grandi sbalzi senza problemi di collasso.

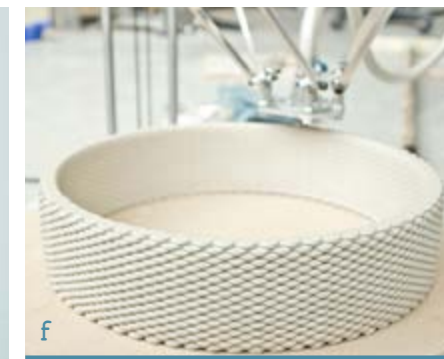
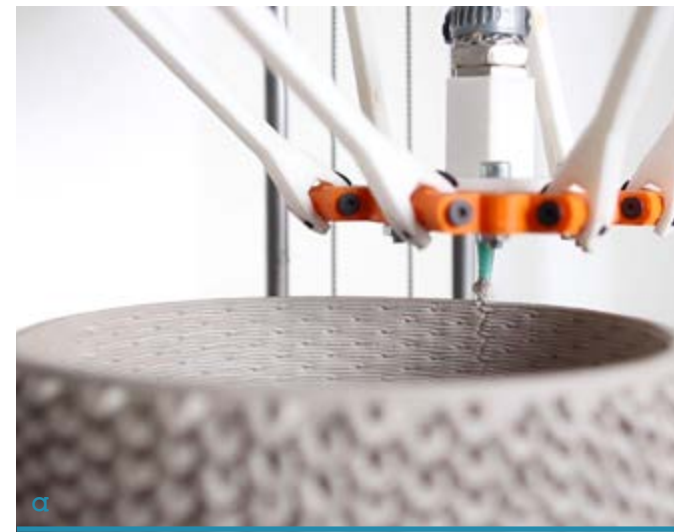
Altro punto chiave nella ricerca del designer riguarda le texture ottenibili con la stampa 3D, caratterizzata dalla visibilità dei layer. Alterando i parametri della macchina ed i livelli di dettaglio è possibile variare la texture conferendo ai pezzi diversi aspetti e finiture, impossibili da riprodurre a mano o con tecnologie tradizionali.

"La stampa 3D ha il potere di ricreare gli oggetti unici e personalizzati che facevano gli artigiani. Ma questa volta è una macchina a creare il prodotto finale. Ogni vaso dimostra le potenzialità di una tecnologia all'avanguardia, mentre ci ricorda i giorni di un tempo."⁹

7 <http://oliviervanherpt.com/3d-printing-ceramics/>

8 Olivier Van Herpt (2011)

9 Olivier Van Herpt (2013)



img. 10:

a, f, estrusore in corso di stampa.

b, c, d, prove di stampa.

e, stampante basata sul modello delta.

g, texture di un oggetto stampato.

h, esempi di oggetti stampati in ceramica.



Wasp

- Studio:
Wasp
- Sede:
Massalombarda, Italia
- Stampanti:
Delta/Powerwasp + LDM Wasp Extruder
- Sito web:
<http://www.wasproject.it/w/>
- Blog:
<http://www.wasproject.it/w/blog/>

Esempio diverso dai precedenti è quello dell'azienda italiana Wasp (world's advanced saving program), che in soli due anni si è imposta nel mercato delle stampanti 3D desktop con l'intento di "divulgare le tecnologie più avanzate e renderle raggiungibili a tutti, pari conoscenza e pari opportunità per liberare la creatività e rilanciare l'economia dal basso".¹⁰

La loro visione consiste in una piccola e veloce stampante 3D che materializzi oggetti nei più diversi materiali, in plastica bio, in argilla, silicone, materiali biocompatibili, o che fredi il legno, i metalli, il carbonio... che possa realmente creare oggetti funzionali nella propria abitazione.

Ma come si può leggere sul loro sito lo scopo non è solo quello di stampare oggetti ed il sogno è quello di poter stampare una casa.

"Da un piccolo sogno si possono evolvere le tecnologie esistenti e svilupparne di nuove per realizzarlo. Il nostro obiettivo è quello di dare vita ad un nuovo concetto di casa: sana, bella e a misura di uomo, con un costo che tende a 0. Ispirandoci alla tecnica della vespa vascaia, nostro simbolo, stiamo costruendo una stampante 3D per realizzare case in argilla. Il materiale è reperibile ovunque nel mondo, poco costoso e facilmente lavorabile. Baraccopoli e bidonville verranno sostituite da case d'argilla con libertà di forma ad un prezzo irrisorio. Una casa che si rinnova, si adatta al territorio, non inquina e che non lascia ruderi. Una casa che si reintegra in Natura una volta dimessa, che persiste nella memoria."¹¹

Proprio con questo scopo è iniziata la sperimentazione di Wasp con l'argilla, il cemento ed altri materiali ceramici, che ha portato allo sviluppo e alla successiva commercializzazione di un sistema di estrusione ldm adattabile alle loro stampanti 3D fdm, Delta PowerWasp.

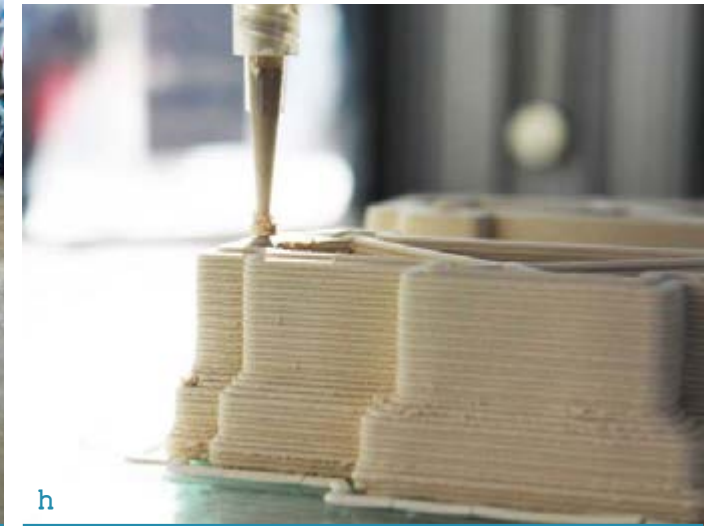
¹⁰ <http://www.wasproject.it/w/manifesto/>

¹¹ <http://www.wasproject.it/w/manifesto/>



img. 11:

- a, h, etrusore in corso di stampa.
- b, struttura stampata in terra cruda.
- c, modelli abitativi.
- d, stampante Delta Wasp.
- e, f, esempi di oggetti in ceramica.
- g, big Delta in corso di stampa.



VormVrij

Un altro esempio di azienda che ha sviluppato e poi commercializzato la propria stampante per i materiali ceramici è VormVrij, compagnia olandese composta dai designer Marlieke Wijnakker and Yao van den Heerik, entrambi laureati alla Design Academy di Eindhoven.

In questo caso non si tratta di un sistema di estrusione adattato ad una stampante 3D fdm ma una vera e propria stampante appositamente creata per la stampa con i materiali ceramici, con un regolatore del flusso di materiale e doppio estrusore per stampare con due colori o materiali differenti.

L'interesse di VormVrij non guarda solo al presente, alla tecnologia: l'argilla infatti richiama il passato ma porta anche al futuro, in quanto un oggetto in ceramica può durare millenni. Unendo un materiale di ieri con la tecnologia di oggi l'intento è quello di dare una nuova forma e vita all'era della ceramica. Lo compagnia si occupa quindi anche della progettazione, stampa e vendita di oggetti in ceramica come bottiglie, tazze, vasi che rispecchino le potenzialità ed i valori della nuova tecnologia.

Un ulteriore ambito su cui si focalizza è quello della scultura, ricreando uno scenario tipico in cui lo scultore scolpisce il busto del cliente seduto di fronte a lui, che in questo caso viene scannerizzato e poi stampato.

“Ora, immaginate di visitare uno scultore 3D. Parlate dei vostri desideri davanti a una tazza di caffè, e subito prima di andare, lui scatta un paio di foto ad alta risoluzione e una veloce scansione del vostro busto”.¹² La scultura viene quindi stampata e poi rifinita a mano, unendo tecnologia digitale e artigianato.

Nonostante non sia un progetto open source il framework di base della stampante consente la modifica di alcune parti e l'azienda ha creato una comunità di utenti con lo scopo di condividere le esperienze, sviluppare nuove idee e aiutarsi a vicenda.¹³

12 <http://3dprint.com/43732/the-vormvrij-clay-3d-printer/>

13 <https://plus.google.com/communities/116145651172948712093>



img. 12:

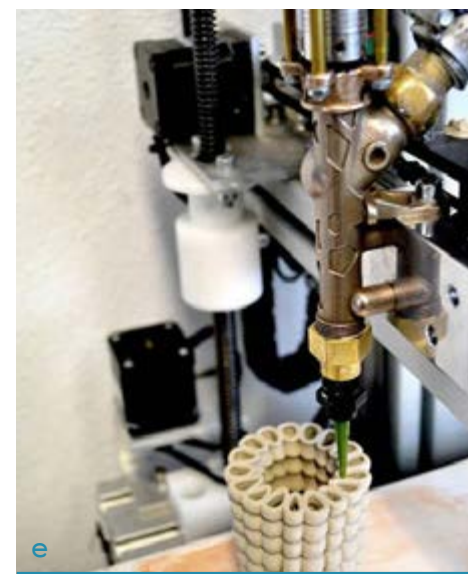
a, b, g, esempi di oggetti in ceramica.

c, studio VormVrij.

d, stampante per ceramica Lutum.

e, estrusore in corso di stampa.

f, serbatoi per la stampante.



estrusori e stampanti +lab

Questa tesi si sviluppa grazie alla collaborazione di +LAB.

Il +LAB nasce nel 2013 dall'inventiva della Prof. Marinella Levi nel Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta" (CMIC) del Politecnico di Milano ed è un laboratorio di ricerca e sviluppo che si occupa prevalentemente di stampa 3D basata su tecnologie Open Source.

Dall'inizio della sua attività il laboratorio accoglie ingegneri, designer, ricercatori e makers proponendo un approccio multidisciplinare alla stampa 3D dove ricerca, progettazione e didattica si fondono insieme per creare innovazione in ambito dei materiali e della tecnologia stessa.

Uno dei focus essenziali della ricerca riguarda i materiali, focalizzandosi sulla caratterizzazione e sullo sviluppo di nuovi materiali relativi alla stampa 3D, grazie anche alla collaborazione con gli altri laboratori e figure. Al +LAB si studiano anche nuovi settori dal potenziale interesse applicativo, con particolare attenzione alle implicazioni sociali e ambientali.

"Il nostro intento è quello di diffondere la cultura della stampa 3D a livello accademico e sociale, intervenendo su quegli ambiti in cui questa tecnologia può veramente rappresentare un modo rivoluzionario di pensare e realizzare gli oggetti che utilizziamo tutti i giorni."¹⁴

+LAB nasce come iniziativa del Dipartimento e le figure professionali che operano all'interno del laboratorio sono ricercatori, borsisti e tassisti del Politecnico di Milano, ma si apre agli sviluppi di partnership e cofinanziamento sia con altre realtà accademiche sia con il mondo dell'industria.

Per vocazione il laboratorio è propenso all'innovazione e al cambiamento, e per questo mette a disposizione le sue variegate competenze per seguire i veloci sviluppi tecnologici e le accelerazioni di conoscenza in atto nel settore della stampa 3D.

Infine partecipa alle numerose manifestazioni che ospitano il mondo della digital fabrication per far conoscere la propria attività a maker,

.....
14 <http://www.piulab.it/>

utenti e professionisti del settore, promuovendosi come ente di divulgazione e supporto.

All'interno del laboratorio ed in un contesto di ricerca sui materiali sono state sviluppate diverse tipologie di estrusori per i materiali liquidi e la stampa ldm, utilizzabili quindi anche ma non solo con i materiali ceramici.



img. 13, progetti realizzati al +LAB

estrusore a siringa

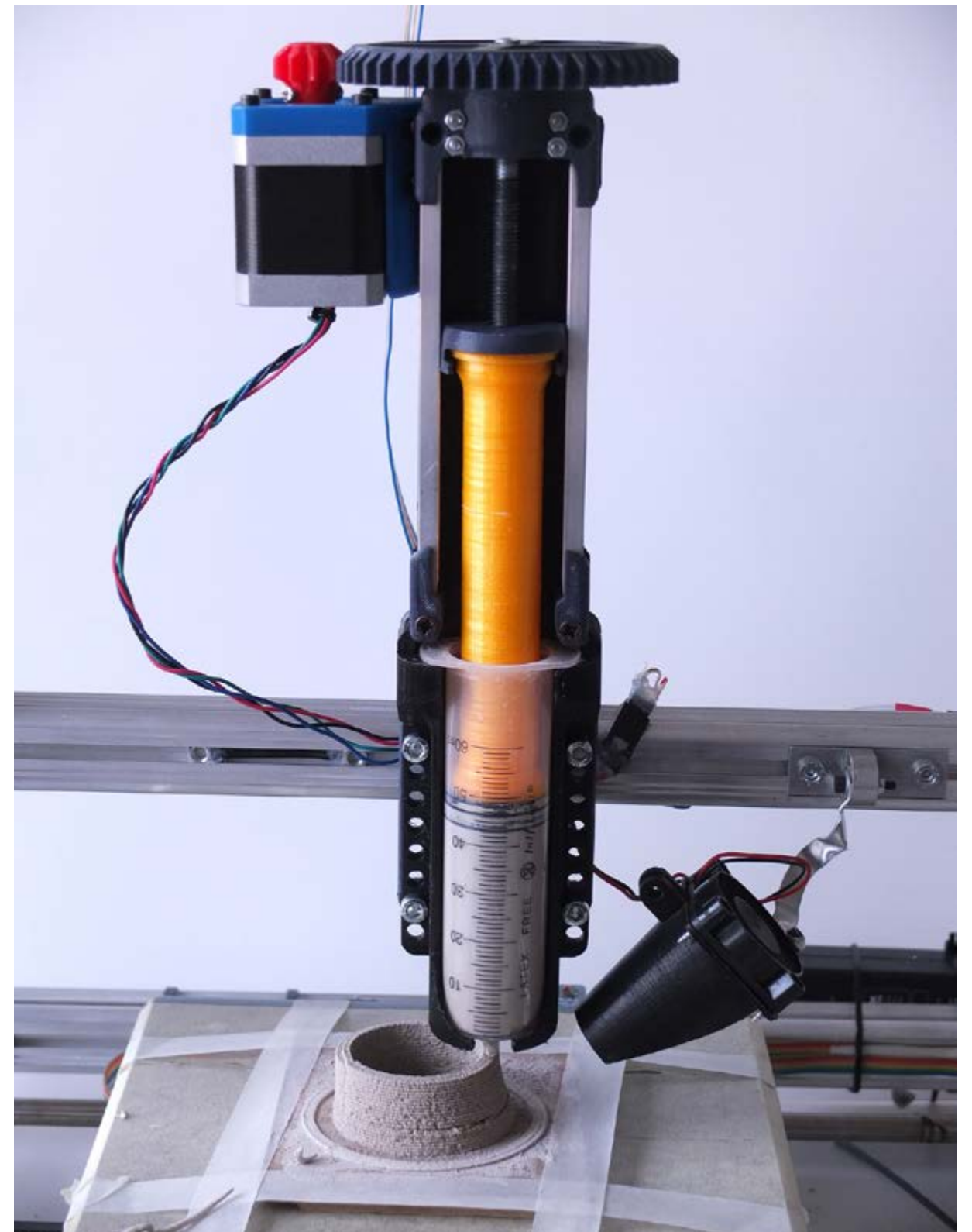
Il primo estrusore sfrutta un sistema a cartucce, in cui per mezzo di una coppia di ingranaggi è possibile trasferire la rotazione di un motore sullo stantuffo di una siringa al fine di comprimerlo in maniera controllata e depositare il liquido. Tutti i componenti dell'estrusore, eccetto la siringa, pochi elementi metallici ed il motore, sono stati progettati ed ottimizzati per essere stampati in 3D.

L'estrusore a siringa è montato su di una stampante 3D fdm modello 3Drag, macchina di tipo "moving bed" con piatto di stampa mobile sugli assi X e Y e testa di stampa mobile in Z, con area di stampa di 200 x 200 x 200 mm. Questa stampante ben si adatta all' "hackeraggio" grazie alla sua facilità di regolazione e montaggio dell'estrusore, in quanto tutti gli elementi meccanici ed elettronici sono a vista ed il telaio è composto principalmente da profilati. Per montare l'estrusore basta semplicemente ancorarlo per mezzo di una staffa sulla traversa dell'asse Z e può facilmente essere sostituito con l'estrusore classico. Abbiamo però alcuni difetti in termini di precisione, dovuti al piatto di stampa difficilmente regolabile e alle vibrazioni soprattutto a velocità sostenute.

I vantaggi di questa tipologia di estrusore sono il basso costo di produzione, la semplicità del meccanismo, la velocità di montaggio/smontaggio, la possibilità di utilizzare aghi di diverse dimensioni per modulare l'estrusione e siringhe di diverso tipo a seconda delle necessità. Garantisce inoltre la salvaguardia del sistema di estrusione poiché il contatto con il materiale è limitato alla siringa e all'ugello.

Grande limite di questo sistema è dovuto però alle dimensioni della siringa, che consentono di stampare solo per la quantità di materiale che contengono. L'utilizzo dell'estrusore a siringa è quindi limitato alla stampa di oggetti di piccole dimensioni.

Alcune stampe più grandi sono state prodotte utilizzando un plug-in di pausa nel G.code, che permette di stoppare momentaneamente la macchina, sostituire la siringa esausta e riprendere la stampa dallo stesso punto. Tuttavia il manufatto finale presenta dei difetti superficiali nel punto in cui viene programmata la pausa.



img. 14, estrusore a siringa

estrusore a vite

Il secondo estrusore sfrutta invece il principio della vite senza fine, che permette di esercitare una pressione indipendentemente dalla viscosità e dalla natura reologica del materiale.

In questo caso l'estrusore è composto da una vite alloggiata in un cilindro dove avviene il passaggio del materiale, da un motore, comandato da un inverter che aziona la vite facendola ruotare in modo da far avanzare il materiale, e dalla testa di estrusione dove il materiale transita verso l'uscita nella forma desiderata. La camera di estrusione, l'ugello ed il supporto del motore sono stati progettati ed ottimizzati per essere stampati in 3D (anche le guarnizioni sono state stampate in 3D con un materiale flessibile, il tpu), mentre l'apporto di materiale è garantito da un sistema a pistone collegato all'estrusore tramite sistema Bowden e capace di caricarlo sfruttando la pressione fornita da un compressore ad aria.

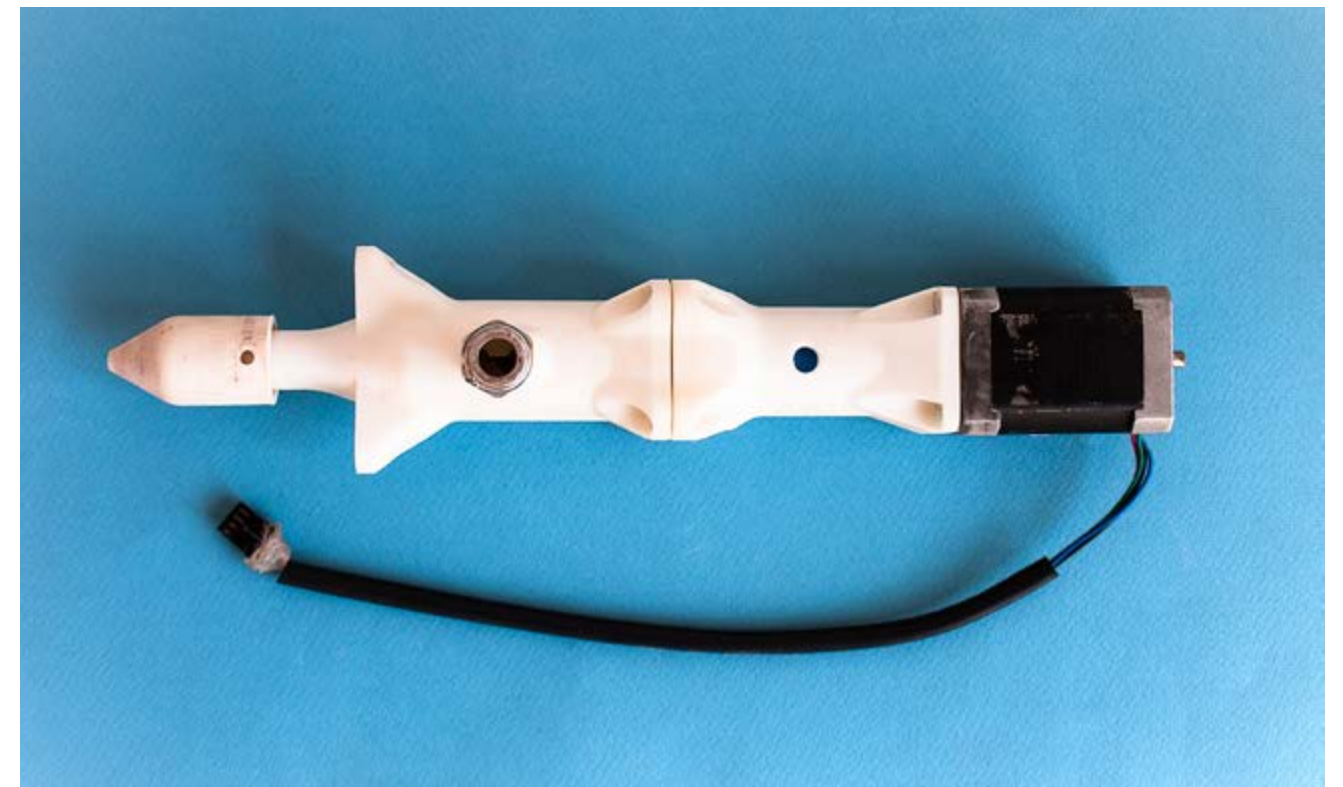
Il serbatoio pressurizzato usato è quello utilizzato dall'azienda Wasp e l'estrusore è stato sviluppato per essere montato sulla stampante Delta PowerWasp¹⁵. Il sistema delta si adatta meglio alla stampa con i materiali ceramici, non abbiamo vibrazioni dovute al piatto di stampa mobile ed è quindi possibile stampare a velocità maggiori.

Questa modalità di estrusione sistema permette di ottenere un flusso senza pulsazioni e ha possibilità di invertire la direzione di dosaggio impedendo il gocciolamento (retraction).

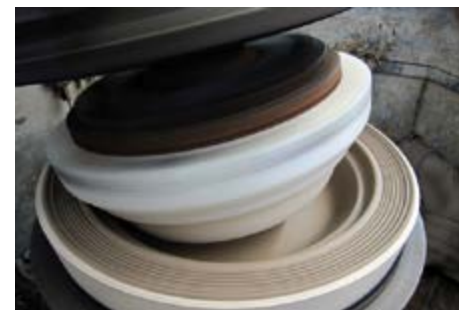
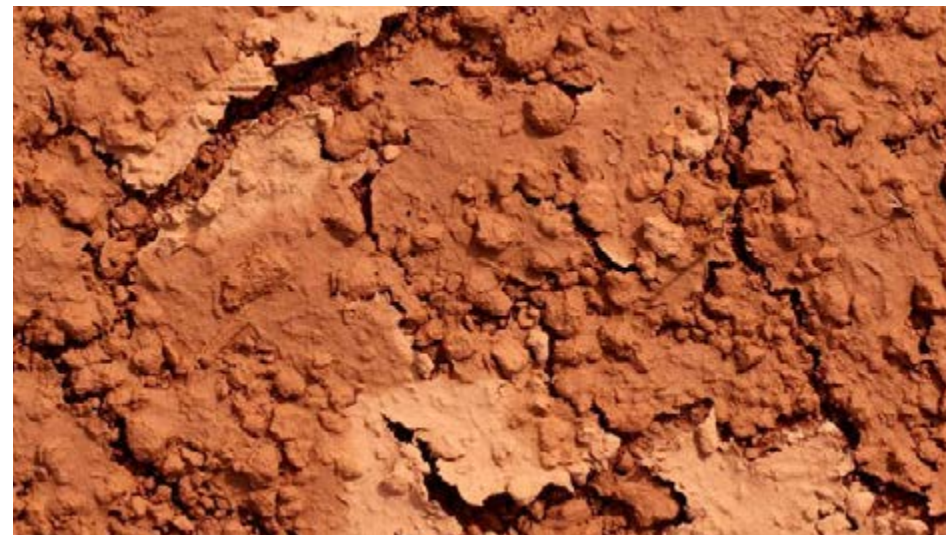
Anche in questo caso non è possibile effettuare estrusioni a ciclo continuo ma la capacità di carica del serbatoio è molto maggiore e permette stampe anche di grandi dimensioni. Il montaggio/smontaggio e la carica del materiale sono più lenti, ma vista la capacità maggiore del serbatoio sono anche meno frequenti.

Questo metodo di deposizione è in grado di gestire viscosità variabili in funzione della pressione esercitabile dal compressore di cui si dispone, più il materiale è viscoso maggiore è la pressione necessaria. La pressione necessaria alla microdeposizione non è però facilmente controllabile e necessita di un po' di esperienza.

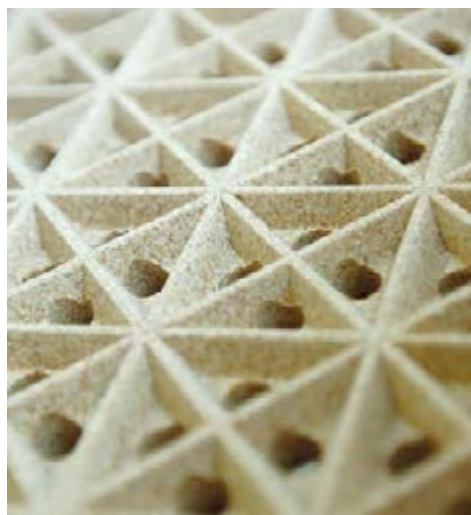
.....
15 <http://www.personalfab.it/shop/estrusore-argilla-kit-2-0/>



img. 15, estrusore a vite senza fine.



3. I MATERIALI CERAMICI



Le argille costituiscono il materiale di partenza con cui, attraverso varie lavorazioni, si ottengono tutti quei prodotti genericamente chiamati “ceramiche”.

Sono forse il materiale più antico con cui l'uomo ha iniziato a produrre diversi artefatti e tuttora hanno grande rilevanza commerciale e tecnologica come dimostra la varietà di applicazioni e prodotti per cui vengono usati.

E' un materiale presente in abbondanza in natura ed è estremamente versatile per le infinite possibili composizioni degli impasti, le numerose modalità di lavorazione diverse, di trattamenti superficiali e di cotture, con medi e bassi costi di materie prime e fabbricazione.

Proprio per questa versatilità è però necessario un approccio al problema specifico di progettazione o al contesto dell'impiego con una profonda conoscenza del materiale, di come dargli forma, reagire al suo comportamento ed esprimere un obiettivo.¹

proprietà

L'importanza dei materiali ceramici deriva anche dalle loro proprietà meccaniche e fisiche che li distinguono dagli altri materiali. Tuttavia le prestazioni sono poco prevedibili a causa della natura casuale delle imperfezioni nella loro struttura e dell'influenza delle variabili di lavorazione, in particolare per quanto riguarda i prodotti in ceramica tradizionale.²

Sono rigidi e fragili, con un comportamento puramente elastico ed elevato modulo di elasticità.

Hanno buone caratteristiche di resistenza a compressione ma scarse di resistenza a trazione, con un bassi valori di tenacità a frattura. Grazie all'elevata durezza abbiamo inoltre una buona resistenza all'usura.

La maggior parte dei materiali ceramici è più leggera dei metalli e più pesante dei polimeri, con una densità di 2-2,5 g/cm³, che diminuisce per i materiali più porosi.

.....
1 Anthony Quinn (2009), *Ceramica: principi, tecniche e processi*, Hoepli, Milano

2 Mikell P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing, materials, processes and systems*, John Wiley & Sons, USA

Grazie all'elevata temperatura di fusione (maggiore di quella dei metalli) hanno un ottima resistenza alle alte temperature ed un basso coefficiente di dilatazione che le rende spesso utilizzate come isolanti termici e refrattari.

L'assenza di elettroni di conduzione le rende adatte all'isolamento elettrico, con alcune eccezioni (esistono tipologie di materiali ceramici usati anche come conduttori), e sono materiali amagnetici.

Grazie ai legami forti che le compongono hanno anche ottima stabilità chimica, non si degradano né a contatto con l'acqua né con solventi organici, che le rende spesso usate in applicazioni per laboratori e ospedali e per i sanitari.

tipologie

In geologia le argille, dette anche terre, sono definite come rocce sedimentarie clastiche poco coerenti; in altre parole sono rocce più o meno friabili costituite da piccoli frammenti di vari minerali, ossia i “clasti” (denominati sabbie o silt a seconda delle dimensioni dei granuli) tenuti assieme da un materiale cementante poco tenace costituito dai cosiddetti minerali delle argille (minerali dell'alluminio, alcuni idrossidi ed alcuni silicati, di origine chimica). Esistono numerosi minerali che, mescolati ai clasti, danno origine ad un grandissimo numero di argille diverse tra loro come composizione e come proprietà.

Le argille possono essere classificate in diversi modi a seconda di composizione chimica, comportamento durante la lavorazione e alle alte temperature o, come vedremo, in base ai prodotti che vengono ottenuti.

terraglie

Si possono trovare allo stato naturale o come impasti artificiali (preparati miscelando componenti selezionati).

Nel primo caso si tratta di argille che contengono notevoli quantità di ossidi di ferro, calcare ed altre impurezze che ne abbassano la temperatura di cottura. Anche la plasticità ed il colore dipendono dalle impurezze contenute ed in genere danno prodotti porosi e sono usate per ceramiche a basso costo. Esempi sono le argille ferruginose, ricche di ossidi di ferro che agiscono sia da fondenti abbassando la

temperatura di cottura che da coloranti dando il caratteristico colore rosso o rosso bruno, o le argille silicee, usate per produrre oggetti destinati alla cottura grazie alla percentuale elevata di silice che favorisce la resistenza agli sbalzi di temperatura. Altri tipi di argille usate in miscela con altre sono ad esempio le bentoniti, usate per rendere più plastico l'impasto, o le argille calcaree.

Nel secondo caso invece è possibile preparare degli impasti più pregiati, costituiti ad esempio da argille bianche (ball clays) sia prima che dopo la cottura, che vengono usate per imitare le porcellane, con l'aggiunta anche di piccole quantità di caolino. Le terraglie sono argille stabili, che si contraggono poco con la cottura.



img. 16, lavorazione artigianale della terraglia

porcellane

Si tratta di impasti formati da caolino e ball clays o altre argille bianche che costituiscono la parte argillosa. Cuociono tra 1400 e 1500°C, o a circa 1200°C per le porcellane tenere, dando un prodotto bianco e traslucido.

I caolini sono argille primarie costituite da caolinite (il nome deriverebbe da quello di una località cinese chiamata Kao Ling) quasi pura ed hanno origine da processi idrotermali dovuti all'azione di acque circolanti in zone vulcaniche attive, molto calde e ricche di gas.

Sono costituite da particelle relativamente grosse e con una granulometria non uniforme e di solito contengono anche piccoli frammenti di roccia madre non reagita (ad esempio quarzo).

Per queste ragioni, nonostante il contenuto piuttosto elevato di minerali argillosi, il caolino non è molto plastico. Per renderlo più plastico e per abbassare la temperatura di cottura viene mescolato con argille bianche più plastiche e con fondenti come feldspati (alluminosilicati molto diffusi in natura). Le porcellane si contraggono e restringono molto durante la cottura, quindi occorre tenerne conto in fase di definizione del progetto.

Un'argilla costituita essenzialmente da caolinite si può trovare in depositi di origine primaria ed è un materiale piuttosto raro e costoso, componente indispensabile per ottenere porcellane pregiate, mentre è molto più comune in depositi sedimentari di origine secondaria dove si trova mescolata ad altri materiali. I maggiori giacimenti di caolino si trovano nelle località più famose per le porcellane.



img. 17., oggetti in porcellana

gres

Materiale ceramico a pasta dura, compatta e impermeabile, ottenuto per cottura a temperature relativamente elevate (da 1200 a 1400°C) fino a incipiente vetrificazione dell'impasto. La natura dell'impasto di

partenza varia in funzione del tipo e dell'impiego e di solito si distingue in gres ordinario, gres fino, gres porcellanato e gres chimico.

Il gres ordinario è quello ottenuto impastando argille plastiche refrattarie. Le argille refrattarie sono argille che vetrificano a temperature elevate e sono più ricche in minerali argillosi, in silice ed in allumina soprattutto ma anche caolinite, mentre mancano quasi del tutto gli ossidi di ferro, i carbonati ed altre sostanze che agiscono come fondenti abbassando la temperatura di cottura. Il gres fino invece si ottiene con impasti più puri a base di caolino e viene cotto a temperature più alte (1300-1400 °C), mentre il gres porcellanato viene fabbricato con caolino impuro e viene usato per le buone proprietà di resistenza. Il gres chimico, preparato principalmente con miscele di argille refrattarie e di caolino, è caratterizzato da bassa porosità e da marcata resistenza all'azione degli agenti chimici.



img. 18, piastrelle in gres porcellanato

refrattari

I refrattari sono materiali con un punto di fusione molto alto, in grado di mantenere le proprietà strutturali e resistere a temperature molto elevate, agli sbalzi termici, all'attacco chimico, all'abrasione, in presenza di elevati carichi statici. La materia prima di partenza è un impasto solitamente poco plastico di argille refrattarie (vedi gres ordinario), con sabbia o chamotte in percentuale elevata.

Vengono utilizzati in quantità rilevanti nelle industrie che utilizzano apparecchiature che lavorano a temperature elevate, ad esempio nell'industria metallurgica e del vetro, dove i forni sono esposti anche a materiali fusi e gas estremamente corrosivi.



img. 19, particolare di mattone refrattario speciale

ceramici avanzati

La definizione ISO (TC 206) di advanced ceramics è: "materiale altamente ingegnerizzato, di alte prestazioni, prevalentemente non metallico e inorganico, dotato di specifici attributi funzionali e strutturali."³ Per prestazioni strutturali si intende la capacità del ceramico di resistere alle sollecitazioni meccaniche ed all'usura, in condizioni di temperatura e pressione molto elevate; mentre vengono considerate funzionali le eventuali proprietà elettriche, elettroniche, ottiche e magnetiche che essi possono presentare in particolari condizioni ambientali.

Sono essenzialmente composti puri o quasi puri formati soprattutto da ossidi, carburi o nitrucci; si va dalla grafite ai cermets (composti ceramo-metallici) ed ai compositi rinforzati con fibre ceramiche. La preparazione del materiale avviene chimicamente e come i ceramici tradizionali, una volta formati, subiscono un trattamento termico, in questo caso di sinterizzazione.

.....
3 http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=54756

Innumerevoli sono i campi di impiego: dalle memorie per i computer (ferriti), ai materiali abrasivi (allumina, carburo di silicio), da quelli per utensili (cermets), a quelli adottati per la costruzione di palette di turbine (nitruro di silicio), da quelli ad altissima refrattarietà (carburi, azoturi e ossidi), ai nuovissimi superconduttori ceramici, dai materiali adottati come dielettrici e isolatori alle alte frequenze (titanato di bario), ai materiali resistenti allo shock termico (vetroceramica a dilatazione nulla), dai materiali piezoelettrici usati in oscillatori elettronici (quarzo), ai bio-materiali (allumina e vetri bio-attivi) alle fibre ottiche ed ai dispositivi per l'elettronica.



img. 20, componenti meccaniche in ceramica tecnica

lavorazioni

Tutte le argille assorbono e trattengono più o meno facilmente l'acqua trasformandosi in una massa pastosa che, in determinate condizioni di viscosità, può essere modellata.

Quando un'argilla è umida gli aggregati di cristalli dei minerali argillosi si circondano di molecole d'acqua che permettono loro di scivolare uno sull'altro se il materiale viene sottoposto ad una sollecitazione meccanica e di rimanere nella nuova posizione quando la sollecitazione cessa di agire. Questa proprietà, di poter essere modellate a temperatura ambiente in qualsiasi forma, senza rompersi e creparsi, è chiamata plasticità. Le stesse, asciugando all'aria, si contraggono sen-

sibilmente, spesso screpolandosi e formando una crosta superficiale molto dura e difficilmente bagnabile, ma possono ritornare plastiche quando vengono nuovamente bagnate.

Questo comportamento è più evidente nelle argille povere di sabbia e ricche di minerali argillosi, sono infatti questi ultimi quelli che hanno la proprietà di assorbire e legare fortemente l'acqua, mentre la sabbia è costituita da particelle che assorbono e legano pochissimo l'acqua.

La grandezza e l'uniformità delle particelle che compongono un'argilla hanno una notevole influenza sulla sua plasticità, infatti più le particelle costituite da aggregati di minerali argillosi sono piccole, più è estesa la superficie esposta in grado di legare e trattenere l'acqua e, quindi, l'argilla è più plastica.

Plasticità e ritiro sono due caratteristiche strettamente collegate tra loro: siccome la plasticità di una argilla è determinata essenzialmente dalla capacità dei minerali delle argille di assorbire l'acqua mentre il ritiro è dovuto essenzialmente alla perdita di acqua da parte dei suddetti minerali delle argille, possiamo dire che in genere se aumenta il contenuto di minerali delle argille aumenta la plasticità ma aumenta anche il ritiro durante l'essiccamento e la cottura perché è maggiore il volume di acqua prima assorbito e legato e poi perso. Al contrario se diminuisce il contenuto di minerali delle argille, diminuisce la plasticità ma diminuisce anche il ritiro. Le eventuali aggiunte devono essere fatte sapendo che nel momento stesso in cui miglioriamo una proprietà peggioriamo l'altra. Un'argilla ideale dovrebbe avere la massima plasticità durante la lavorazione ed il minimo ritiro durante l'essiccamento e la cottura.¹

Per aumentare la plasticità l'impasto dovrà essere ricco di minerali delle argille (come la bentonite), mentre per diminuire la plasticità si possono aggiungere delle sostanze che legano poco l'acqua, come la chamotte, la silice o semplicemente sabbia.

La chamotte, termine francese, consiste in scarti di argilla cotta e macinata e si trova in commercio già pronta in varie granulometrie, è un ottimo 'dimagrante' per le argille troppo plastiche, facilita l'essiccamento e dà maggiore resistenza agli oggetti durante la cottura.

La proporzione ottimale di argilla (ed eventuali minerali, ossidi, ecc.) ed acqua dipende dal processo di formatura utilizzato. Alcuni pro-

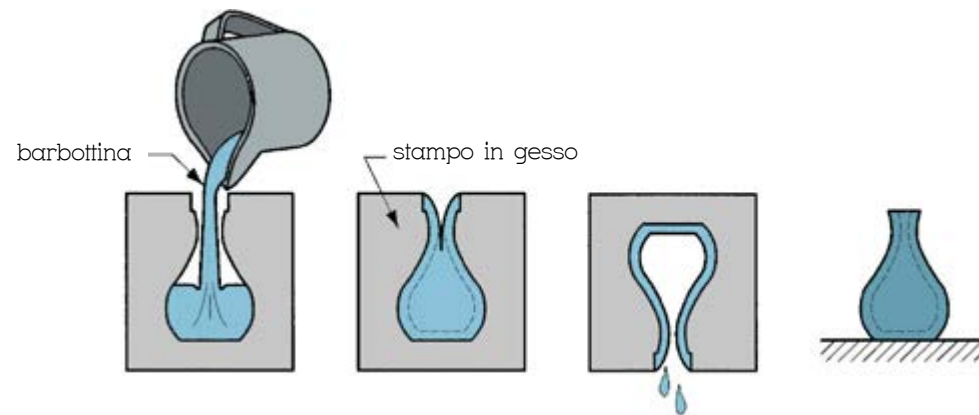
.....
¹ Nino Caruso, (2003) Ceramica Viva, manuale pratico delle tecniche di lavorazione antiche e moderne dell'occidente e dell'oriente, Hoepli, Milano

cessi richiedono un materiale molto fluido altri invece lavorano su composizioni con basse percentuali di acqua. A circa il 50% di acqua l'impasto si comporta già come un liquido ma riducendo il contenuto d'acqua è necessaria una pressione molto maggiore per avere un simile flusso.

I processi di formatura possono essere divisi a seconda della consistenza dell'impasto: stampaggio a barbottina, con un impasto è composto dal 25 al 40% d'acqua, formatura plastica quando è composto dal 15% al 25% d'acqua, pressatura a umido con il 10-15% d'acqua e pressatura a secco quando l'acqua è meno del 5%, ogni categoria include poi diverse varianti.²

stampaggio a barbottina

Nello stampaggio a barbottina una sospensione liquida di ceramica, chiamata barbottina, viene versata in uno stampo in gesso, in questo modo l'acqua viene gradualmente assorbita dal gesso formando uno strato solido di argilla nella parte a contatto con lo stampo. La composizione della barbottina è solitamente formata dal 25% al 40% d'acqua, in modo da essere sufficientemente fluida per riempire tutte le cavità dello stampo; un minor contenuto d'acqua rende il processo più veloce.



img. 21, processo del stampaggio a barbottina

Nel processo tradizionale lo stampo viene poi ribaltato in modo da far scolare la barbottina in eccesso e ricavare un oggetto cavo che viene poi estratto dallo stampo. Questa tecnica viene utilizzata per

² (Mikell P. Groover, Fundamentals of modern manufacturing, materials, processes and systems, John Wiley & Sons, USA)

la produzione di vasi, tazze, teiere, ceramiche artistiche ma anche sanitari.

Lo stesso processo viene utilizzato anche per produrre pezzi solidi, lasciando che il gesso assorba quasi tutta l'acqua contenuta nell'impasto. In questo caso lo stampo deve essere riempito periodicamente con altra barbottina per compensare il ritiro del materiale.

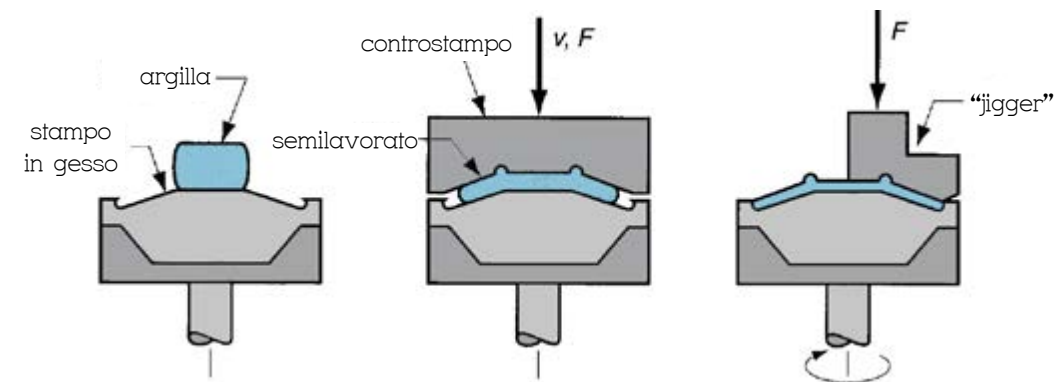
Una volta estratto dallo stampo il pezzo viene lasciato essiccare completamente e poi cotto. Questo processo garantisce una produzione di qualità fine ed un'ottima accuratezza, oltre a permettere una grande libertà formale (sottosquadri, cavità).

Lo stampaggio a barbottina è ideale per la produzione a lotti, per la possibilità di reiterare la stampa, ed è un processo che può essere artigianale, nel caso la produzione degli stampi e del pezzo sia manuale, o industriale, in cui l'intero processo viene automatizzato.

Varianti industriali sono la colata centrifuga o sotto pressione e lo stampaggio a cera persa.

formatura plastica

Questa categoria include svariati metodi, sia manuali che meccanizzati, che richiedono un impasto plastico con una percentuale d'acqua dal 15% al 25%. Solitamente le tecniche manuali utilizzano percentuali di acqua più elevate per avere maggiore plasticità, che comporta però anche un maggiore ritiro, mentre quelle industriali riescono a lavorare anche impasti più secchi.



img. 22, processo della formatura plastica

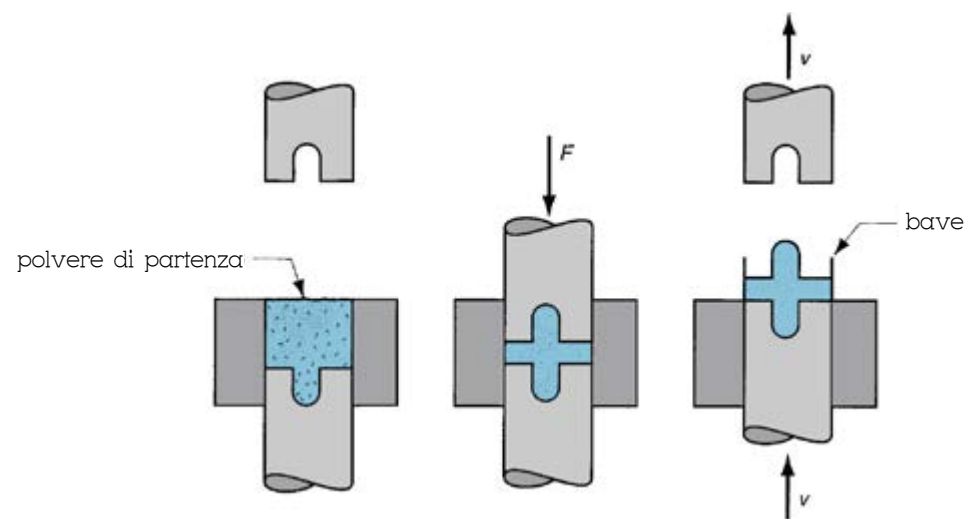
I processi artigianali, usati da centinaia di anni, consistono nella modellazione manuale della massa plastica di argilla nella geometria desiderata, spesso con l'aiuto di stampi e conformatori. Esempi di queste tecniche sono la lavorazione al tornio e il colombino.

Metodi invece più meccanizzati sono il jiggering, la formatura a pressione e l'estrusione. Il jiggering è un'evoluzione della lavorazione al tornio, in cui l'impasto plastico viene posizionato su di uno stampo convesso messo in rotazione per venire poi lavorato meccanicamente con diversi strumenti posti a contatto con l'argilla. Una variante è il jolleying, in cui lo stampo è concavo anziché convesso.

Nell'stampaggio a pressione invece l'impasto viene schiacciato tra le due metà di uno stampo in modo da prenderne la forma. Anche in questo caso lo stampo è fatto in materiale poroso come il gesso in modo da assorbire l'umidità dell'argilla. Questo processo ha una produttività maggiore del jiggering e non è limitato a oggetti dalla simmetria radiale. Le forme sagomate per pressione sono robuste, con ampi spessori, e di profondità variabile.

L'estrusione è invece utilizzata per produrre lunghi tratti di sezione uniforme che vengono poi tagliati in pezzi della lunghezza richiesta. Il materiale in questo caso viene mescolato direttamente dalla macchina con un'azione a vite e poi spinto attraverso una matrice aperta. Questo metodo è ampiamente usato per produrre mattoni forati, tegole sagomate, tubi, isolanti e semilavorati.

pressatura a umido



img. 23, processo della pressatura a umido

Nella pressatura a umido la percentuale di acqua è del 10-15%, l'impasto risulta poco plastico e richiede pressioni elevate per essere forzato all'interno della cavità di uno stampo. Spesso si formano delle bave per l'argilla in eccesso schiacciata tra le due metà dello stampo.

pressatura a secco

In questo caso la percentuale di acqua è del solo 5%, a cui vengono aggiunti leganti e fluidificanti. A causa dell'abrasività e non plasticità dell'impasto la geometrie dei pezzi devono essere relativamente semplici e le quantità di materiale usato devono essere esatte.

I vantaggi di questa tecnica sono la velocità, in quanto non è necessario l'essiccamento, e l'accuratezza dimensionale poiché non c'è ritiro, inoltre non c'è formazione di bave. Applicazioni tipiche sono piastrelle, isolanti elettrici e mattoni refrattari.

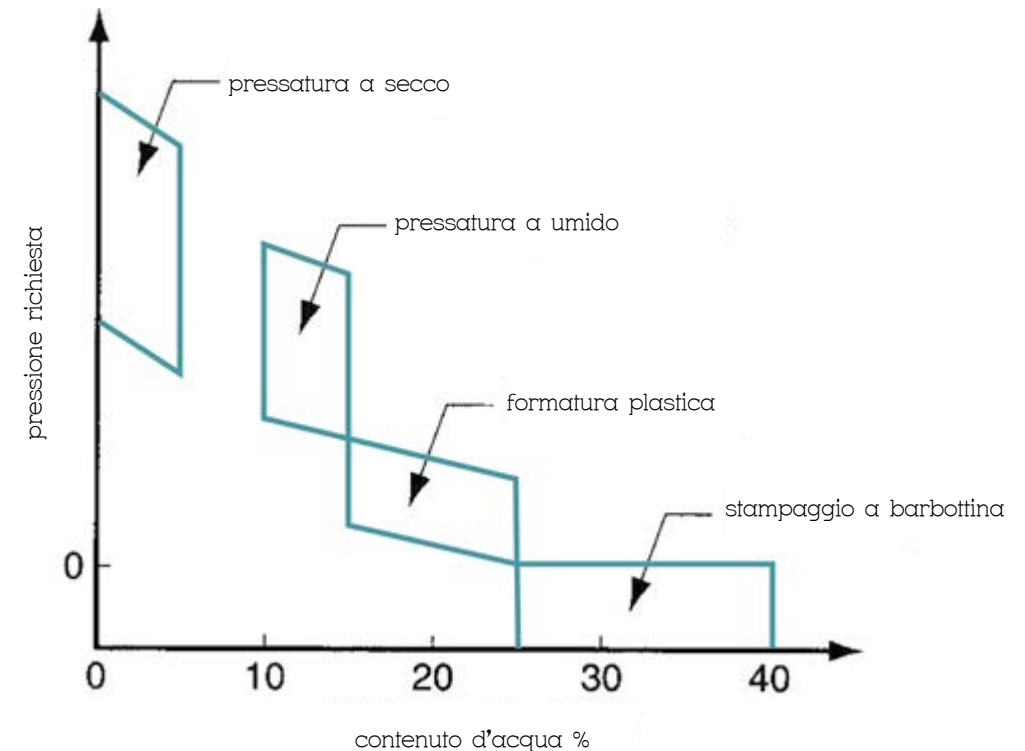


grafico 1, pressione necessaria vs. percentuale di acqua.



4. GLI IMPASTI



La realizzazione dell'impasto è un punto cruciale e fondamentale in tutte le tecniche di lavorazione della ceramica. Un impasto ben fatto garantisce e facilita una buona riuscita del pezzo e permette di evitare numerosi errori e problematiche possiamo poi trovare in fase di stampa. Industrialmente questo viene effettuato con dosaggi molto precisi ed in atmosfera controllata ma nel nostro caso la preparazione è più simile a quella artigianale.

Esistono moltissime tipologie di argille differenti ed è necessaria un po' di esperienza e ricerca prima di trovare gli impasti ideali. Possiamo trovare impasti già pronti con il dosaggio dei diversi componenti già effettuato, o impasti più "puri" a cui possiamo aggiungere diversi elementi a seconda delle necessità. Solo provando diversi impasti ognuno troverà quello più adatto al proprio sistema di estrusione e ai lavori che desidera.

materiali

argilla

Il materiale di base è ovviamente costituito dall'argilla nelle tipologie viste nel capitolo precedente (terracotta, porcellana, gres o refrattaria), che possiamo trovare facilmente in commercio in tre differenti stati: polvere, granuli ed impasto plastico.

• polvere:

L'argilla venduta essiccata in polvere viene solitamente utilizzata come barbotina per il colaggio, miscelata con una buona percentuale di acqua ad uno stato quasi liquido.

Per la stampa 3D è sufficiente una percentuale d'acqua intorno al 20%, a seconda della tipologia di argilla, di eventuali aggiunte, e soprattutto della pressione di estrusione di cui disponiamo. La polvere risulta molto comoda per la preparazione dell'impasto poiché è facile da mescolare, non forma grumi, ed assorbe l'acqua abbastanza velocemente.

A seconda del tipo di argilla che vogliamo utilizzare è possibile aggiungere all'impasto materiali aggiuntivi, come chamotte, altra argilla, fluidificanti.

• granuli:

Anche l'argilla essiccata in granuli viene solitamente usata, miscelata ad acqua, come barbotina per il colaggio. La percentuale d'acqua anche in questo caso è intorno al 20%, sempre seconda della tipologia di argilla, di eventuali aggiunte, e della pressione di estrusione di cui disponiamo.

I granuli risultano più difficili da mescolare ed è consigliabile ridurli il più possibile in polvere, utilizzando ad esempio un martello, o lasciare che assorbano l'acqua ammorbidendosi. I tempi di preparazione sono più lenti, l'impasto va miscelato a lungo e controllato per evitare che rimangano dei granuli che potrebbero intasare l'estrusore.

Come per la polvere a seconda della composizione dei granuli è possibile aggiungere all'impasto materiali aggiuntivi, come chamotte, altra argilla, e fluidificanti.

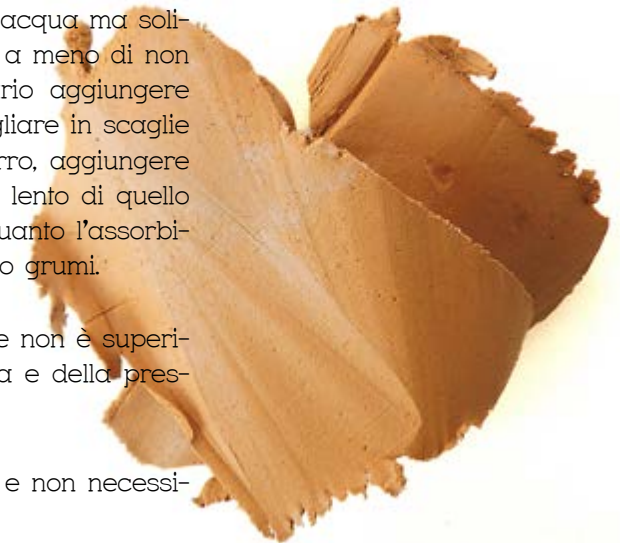
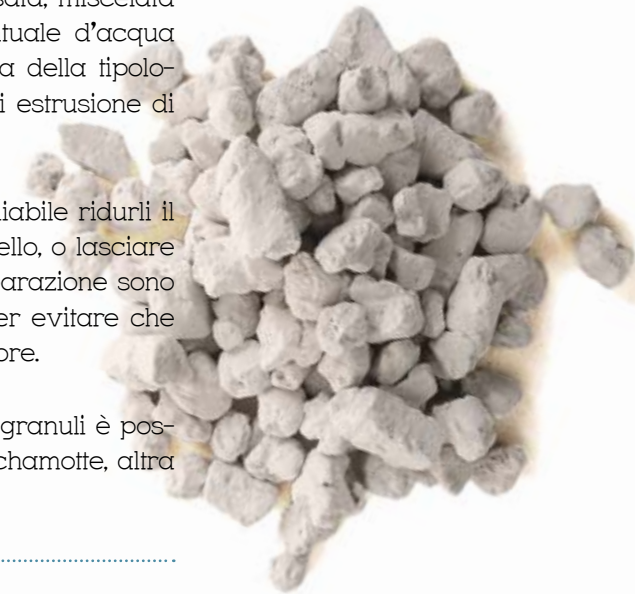
• impasto plastico:

L'argilla in impasto plastico viene venduta in pezzi a forma di parallelepipedo o cilindro di diverse grandezze e con un diverso grado di durezza a seconda della lavorazione da svolgere (tornio, pressa...). Imballati in una pellicola plastica possono mantenere il loro grado di umidità anche per lunghi periodi.

Gli impasti plastici contengono già una percentuale di acqua ma solitamente non è sufficiente all'estrusione e alla stampa, a meno di non disporre di pressioni molto forti, per cui è necessario aggiungere dell'acqua e rimiscelare l'impasto. Conviene quindi tagliare in scaglie il panetto con uno strumento tagliente o un filo di ferro, aggiungere l'acqua e reimpastarlo. Il processo è leggermente più lento di quello con la polvere, ma più veloce rispetto ai granuli in quanto l'assorbimento dell'acqua è più facile e difficilmente si formano grumi.

In questo caso la percentuale di acqua da aggiungere non è superiore al 10%, sempre a seconda della tipologia di argilla e della pressione di estrusione di cui disponiamo.

Generalmente sono impasti miscelati già pronti all'uso e non necessitano di materiali aggiuntivi.



chamotte

La chamotte, termine francese, è un materiale ricavato dalla macinazione più o meno fine di argilla refrattaria cotta ad alta temperatura.

La sua granulometria è solitamente più grossolana di quella delle argille e degli altri materiali usati per la preparazione degli impasti, ed ha una bassa densità.

Viene impiegata miscelata all'argilla cruda al fine di evitarne l'eccessivo ritiro e le deformazioni in cottura, soprattutto per pezzi di grandi dimensioni e refrattari, o come dimagrante negli impasti troppo plastici.

Favorisce l'essiccamento in cui riduce la possibilità che si formino crepe e conferisce al pezzo finale una finitura rugosa e porosa. Rende inoltre il materiale più resistente e strutturale anche allo stato plastico, favorendo la modellazione e nel nostro caso la stampa del pezzo.

Si trova in commercio di diversi colori e granulometrie. Più fini sono le particelle di chamotte, e vicine a quelle dell'argilla cruda, più denso e resistente sarà il pezzo finale.

La percentuale di chamotte dipende dalla tipologia di argilla, di cottura, e dall'utilizzo che avrà il pezzo finale. Solitamente si utilizza una percentuale del 20%¹, che aumenta per refrattari o argille particolari come quelle utilizzate per la tecnica raku.

Altri materiali che agiscono in maniera simile a quella della chamotte sono la silice, usata per gli oggetti destinati alla cottura, e la sabbia, caratteristica di alcune tipologie di argilla e solitamente già presente negli impasti.

fluidificante

Il fluidificante viene usato nello stampaggio a barbotina per sollecitare la fluidità dell'impasto, poiché "defloccula" (attiva un fenomeno di repulsione tra le particelle) l'argilla permettendo la riduzione dell'acqua da utilizzare.

.....
¹ Giovanna Bubbico, Joan Crous (2004), Ceramica. Manuale completo. Tecniche, materiali, realizzazioni, Giunti Editore

Solitamente è costituito da silicato di sodio e o carbonato di sodio, viene aggiunto all'argilla secca in una proporzione di massimo l'1%².

Spesso l'argilla da barbotina che si trova in commercio è già defloculata, è quindi consigliabile consultare il catalogo prima dell'eventuale aggiunta.

acqua

La percentuale di acqua determina la viscosità dell'impasto ed è un punto critico nella sua preparazione per la stampa 3D, poiché dipende da moltissimi fattori.

Innanzitutto dai materiali che stiamo utilizzando, dalla loro plasticità e granulosità. Un materiale plastico e fine avrà bisogno di una percentuale di acqua minore di uno più grossolano e chamottato.

Come già visto dipende anche dallo stato materiale di partenza che utilizziamo, che può essere in polvere, granuli o impasto plastico.

Ovviamente l'ideale per la stampa sarebbe un impasto il più viscoso possibile, in modo che ogni strato sia in grado di reggere perfettamente quello successivo senza deformarsi. Questo è limitato però dal sistema di estrusione e dipende dalla pressione che possiamo esercitare sul materiale, dalla lunghezza del tratto che l'argilla deve percorrere prima di arrivare all'estrusore e dalla conformazione dell'estrusore stesso.

Infine vi è anche una leggera dipendenza dal clima, che potrebbe far variare le percentuali di acqua necessaria a seconda della stagione o del tempo climatico (caldo o freddo, secco o umido).

La giusta percentuale di acqua sarà quindi diversa per ogni stampante e per ogni materiale e non è calcolabile, ma raggiungibile solo con la sperimentazione e l'esperienza. Come vedremo più avanti è possibile in parte correggere il flusso di materiale dovuto a un impasto troppo o poco viscoso anche attraverso la stampante.

.....
² Giovanna Bubbico, Joan Crous (2004), Ceramica. Manuale completo. Tecniche, materiali, realizzazioni, Giunti Editore

strumentazioni e tecniche

Preparare gli impasti è semplice e non necessita di tanti strumenti.

Indispensabile è innanzitutto avere a disposizione secchi, ciotole, spatole e bilancia per contenere, pesare e maneggiare i materiali. Altri materiali che potrebbero servire sono strumenti per tagliare i panetti di impasto plastico, come un filo metallico, o per ridurre in polvere i granuli, come un martello.

Per impastare fisicamente i diversi elementi vi sono invece diverse opzioni. La più semplice consiste nell'utilizzare una frusta miscelatrice da trapano, economica e facilmente reperibile in negozi per edilizia e fai da te. In questo caso conviene inserire gradualmente i diversi materiali e l'acqua all'interno di un secchio, miscelandoli man mano immergendovi la frusta. Il metodo è efficace anche se un po' lento e faticoso, soprattutto con gli impasti più viscosi e granulosi. Inoltre è necessario cambiare spesso la frusta che con un uso intensivo si scrosta e tende a deformarsi.

Un'alternativa, soprattutto in caso di uso frequente di grandi quantitativi di materiale, consiste nell'acquistare un piccolo miscelatore a rotazione. Questo è più costoso ma anche più veloce ed efficace, e limita il lavoro manuale al pesare ed inserire i materiali nel recipiente del miscelatore.

Importanti, soprattutto nel caso di argille in polvere o chamotte, sono l'utilizzo di una mascherina e la scelta di un luogo areato, per evitare di respirare le polveri.



gestione dell'impasto

L'assorbimento dell'acqua da parte dell'argilla non è immediato e continua anche dopo la prima miscelazione.

Nel caso utilizzassimo la frusta è consigliabile lasciare riposare l'impasto appena miscelato per circa un giorno e rimescolarlo prima del suo utilizzo, in modo da garantire il completo assorbimento dell'acqua, eliminare eventuali grumi e renderlo uniforme.

Nel caso disponessimo di una miscelatrice invece è possibile lasciare l'impasto in rotazione per tempi più lunghi per cui questa procedura non è necessaria.

Per conservare al meglio l'impasto è importante tenerlo il più chiuso possibile, ad esempio con un grosso sacco in plastica, e porlo in un ambiente lontano da aria e calore, in modo che mantenga l'umidità e le caratteristiche originarie.

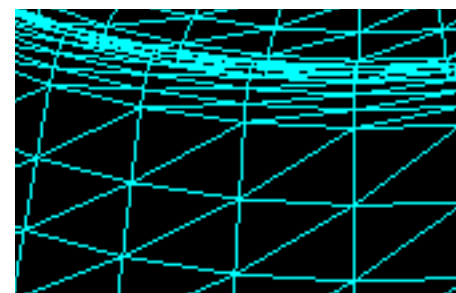
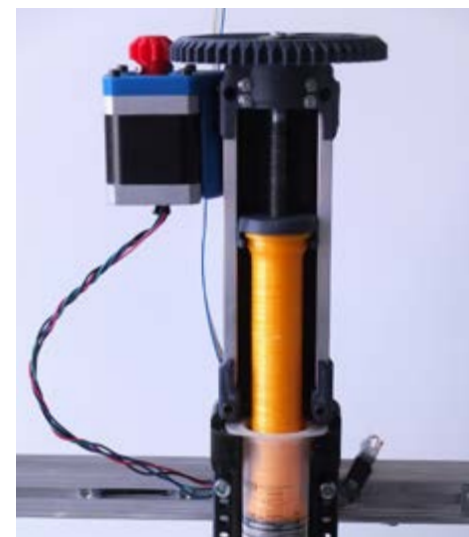
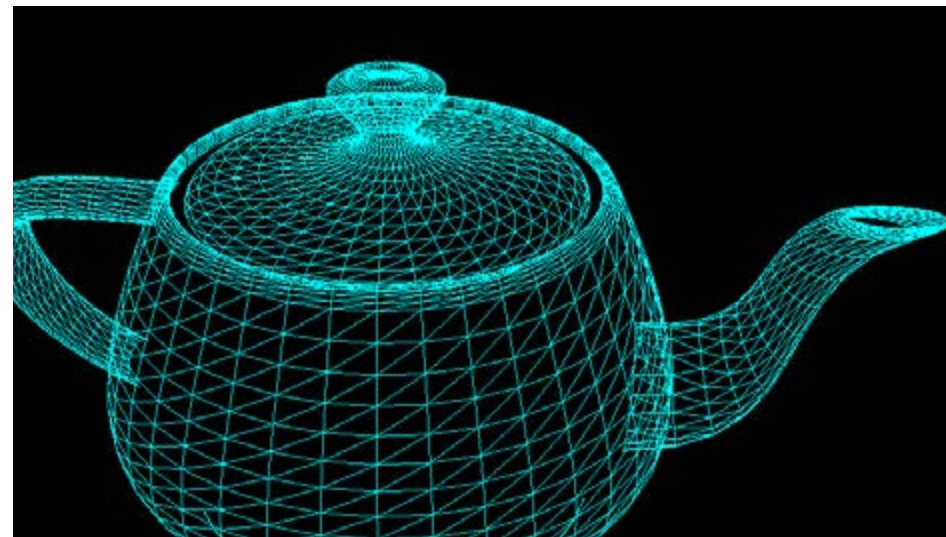
Nonostante ciò se un impasto non viene utilizzato per molto tempo tenderà comunque a perdere parte di umidità, che potrà essere reintegrata semplicemente aggiungendo una piccola percentuale di acqua e rimescolando l'impasto. Anche in questo caso durata e comportamento dipendono dal tempo e dal clima, per cui con buona probabilità un impasto durerà di più in inverno o con un clima umido e meno d'estate.

riciclo

Fino a quando non viene cotta l'argilla, anche se secca, ritorna plastica ed utilizzabile se viene nuovamente bagnata.

Questo implica che sia un impasto secco che eventuali errori o scarti di stampa possono venire facilmente riciclati, cercando di ridurli il più possibile in polvere o piccoli pezzi e rimescolandoli con l'acqua.

Nel riciclarli possiamo cercare di conservare i pezzi secchi di un'unico materiale o mescolarne diversi, tenendo conto però che devono avere la stessa temperatura di cottura e che perderemmo le percentuali dei materiali di partenza.



5. IL PROCESSO DI STAMPA



software cad

modello digitale
esportazione .stl

software macchina

configurazione
eprom
slicing g-code
connessione

macchina

preparazione:
serbatoio
estrusore
compressore
piatto

stampa e gestione

operazioni manuali

finiture

essiccamento

cottura

Il processo di stampa

Il processo si compone di una parte in cui segue le fasi tipiche della stampa 3D fdm, con alcune modifiche, e di una seconda parte che corrisponde invece alle fasi di essiccamento e cottura comuni a tutte le tecniche di lavorazione della ceramica. Dopo la modellazione e l'esportazione del modello digitale dell'oggetto da stampare in un formato compatibile(stl), il processo continua attraverso il software macchina. Questo come anche lo slicing che porta alla generazione del g-code devono essere configurati appositamente a seconda del sistema di estrusione e delle modifiche apportate alla stampante. A questo segue la fase vera e propria di stampa, preceduta dalla preparazione della stampante, più lunga ma necessaria.

settaggio

Per quanto riguarda la parte di software è sufficiente apportare alcune modifiche alle configurazioni originarie già usate per la stampa 3D fdm. Tali impostazioni vengono configurate una sola volta, a meno che non siano necessarie successive modifiche.

eprom

Dopo aver collegato il motore dell'estrusore alla scheda bisogna determinare il valore di step x E necessari alla fuoriuscita della corretta quantità di materiale, e sostituirlo all'interno del "Eeprom" attraverso il software "Repetier Host".¹

Config > firmware Eeprom settings > steps per mm > E

Utilizzando l'estrusore a siringa e la stampante 3Drag l'impostazione del fine corsa, ovvero l'altezza da cui l'estrusore inizia a stampare, è manuale e non dobbiamo modificare altre impostazioni. Per quanto riguarda l'estrusore a vite montato sulla Delta Wasp invece, dal momento che tale impostazione è automatica e che l'estrusore utilizzato è di dimensioni differenti da quello precedente per la stampa fdm, dobbiamo modificare anche questo parametro. Dobbiamo quindi misurare la differenza di altezza tra i due estrusori e lo spessore del nuovo piatto di stampa, e modificare il valore di Z dell'Homing Offset all'interno dell'Eeprom.

Config > firmware Eeprom settings > Homing Offset > Z

1 <http://www.repetier.com/>

gcode

Nel software di slicing utilizzato, "Cura" dell'azienda "Ultimaker"², è necessario creare un profilo macchina differente da quello preimpostato modificando il codice del Gcode ed alcuni parametri. In "Basic Settings" dobbiamo dare valore 0 ai parametri Printing Temperature e Bed Temperature, in quanto l'argilla viene estrusa a freddo. Il valore da assegnare al Filament/Diameter equivale invece al diametro interno della siringa o della camera dell'estrusore a vite. Spesso questo dato non è esatto e determina un flusso scarso o eccessivo, che è possibile in parte regolare da stampante. Un numero troppo grande comporta un flusso scarso mentre un numero troppo piccolo lo aumenterà. L'impostazione degli altri parametri di stampa verrà affrontata nel capitolo 7, Parametri di stampa o 8, Modalità di stampa. I codici di "Start Gcode" sono stati modificati con le seguenti istruzioni, eliminando i parametri temperatura di stampa M109 e temperatura del piatto di stampa M190 e sostituendoli con il codice M302 di stampa a freddo.

esempio con stampante 3Drag

```
;Sliced at: {day} {date} {time}
;Basic settings: Layer height: {layer_height} Walls: {wall_thickness}
Fill: {fill_density}
;Print time: {print_time}
;Filament used: {filament_amount}m {filament_weight}g
;Filament cost: {filament_cost}
M302 ;estrusione a freddo
G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M82 ;set extruder to absolute mode
M107 ;start with the fan off
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
G28 Z0 ;move Z to min endstops
G1 Z15.0 F{travel_speed} ;move the platform down 15mm
G92 E0 ;zero the extruded length
G1 F200 E3 ;extrude 3mm of feed stock
G92 E0 ;zero the extruded length again
G1 F{travel_speed}
;Put printing message on LCD screen
M117 Printing..
```

2 <https://ultimaker.com/en/products/cura-software>

preparazione della stampante

Prima di avviare la stampa è necessario preparare adeguatamente la stampante, e quindi caricare il materiale, montare l'estrusore e predisporre un piatto di stampa adatto.

caricamento del materiale

Il caricamento del materiale è una fase che incide in parte sulle tempistiche del processo in quanto deve essere svolta manualmente e con alcuni accorgimenti.

Nel sistema a cartucce, che sfrutta come serbatoio una siringa, il materiale può essere caricato utilizzando una spatola o uno strumento analogo. Importante è evitare la formazione di bolle d'aria che potrebbero causare errori in fase di stampa, soprattutto con questo sistema di estrusione. Per eliminarle a posteriori è possibile sfruttare uno strumento lungo e sottile per bucare l'argilla fino alla bolla in modo da far uscire l'aria.

Per quanto riguarda l'estrusore a vite invece il caricamento del serbatoio avviene pressando gradualmente il materiale all'interno del cilindro metallico, dopo avervi inserito il pistone ad un'estremità. Anche in questo caso è necessario porre attenzione a non formare sacche d'aria: un metodo per evitarle consiste nel "lanciare" porzioni di materiale all'interno del serbatoio da una distanza ravvicinata. Con questo sistema di estrusione le piccole bolle d'aria non costituiscono un problema in fase di stampa. Utilizzando pressioni elevate per l'estrusione è importante ingrassare bene il pistone, la filettatura e gli o-ring dei tappi del serbatoio, rimuovendo accuratamente eventuale argilla dagli stessi componenti, per poi chiuderlo con forza.



montaggio dell'estrusore

Con il sistema a cartucce questa fase risulta facile e veloce in quanto consiste semplicemente nell'inserire la siringa con il pistone nell'apposito alloggiamento, dopo averlo regolato tramite l'ingranaggio superiore. Prima di iniziare a stampare è consigliabile estrarre parte di materiale manualmente, in modo da controllare sia il montaggio che l'impasto.

Con il sistema di estrusione a vite invece la preparazione risulta più lunga e prevede il montaggio sia dell'estrusore che del serbatoio, ed il collegamento tra questi ed il compressore. L'estrusore viene infatti in parte smontato e lavato dopo ogni utilizzo, in modo che l'argilla non si solidifichi al suo interno. Prima della stampa viene semplicemente rimontato ed alloggiato sulla piastra di supporto della stampante tramite viti. Utilizzando un sistema Bowden, necessario per lavorare ad alte pressioni, e dei tubi in , si procede poi al collegamento del serbatoio all'estrusore e del compressore al serbatoio.

Prima di collegare l'estrusore è possibile controllare sia la qualità dell'impasto che la corretta chiusura del serbatoio estraendo parte di materiale dal tubo di collegamento, in modo da velocizzare anche il successivo inizio della stampa.

posizionamento del piatto di stampa

Il piatto di stampa utilizzato per la stampa FDM, solitamente in vetro, risulta poco adatto alla stampa con l'argilla. La presenza di acqua che, man mano che il pezzo si asciuga, tende a scendere agli strati più bassi, necessita di un materiale in grado di assorbirla, soprattutto stampando oggetti con una grande superficie a contatto con il piatto di stampa. Un materiale poroso garantisce inoltre una migliore adesione, nel caso stampassimo oggetti con una piccola superficie a contatto con il piatto, che potrebbero asciugarsi in fretta e staccarsi. Importante è però che il materiale non si attacchi al piatto di stampa, cosa che potrebbe causare spaccature durante l'essiccazione.

Il materiale ideale è il gesso, già utilizzato per le sue proprietà di assorbimento dell'acqua nello stampaggio a barbotina e in produzioni artigianali come base per l'essiccazione dei pezzi. In questo caso è necessario preparare manualmente la base di gesso da inserire sulla stampante.

Un altro materiale che garantisce buoni risultati ed è più facile da reperire ed adattare è l'mdf, che è possibile acquistare e fare tagliare nelle dimensioni necessarie. Man mano che viene utilizzato ed assorbe l'acqua il piatto in mdf tende a imbarcarsi, per cui è necessario utilizzare lastre di medio spessore e sostituirle quando rovinate. Prima di avviare la stampa è consigliabile bagnare leggermente la superficie del piatto con acqua o meglio barbottina per garantire una buona adesione del materiale, soprattutto con gli impasti più viscosi.



img. 24, stampa su supporto in mdf

Come già visto bisogna tenere conto dello spessore del piatto di stampa utilizzato nel settaggio della stampante, quando viene impostato l'Homing Offset dell'asse z. Cambiando il piatto di stampa se cambia lo spessore è necessario riconfigurare l'EEPROM.

avviamento e gestione

L'avviamento della stampa segue la normale procedura, come se stessi stampando un oggetto in materiale termoplastico, ma richiede una gestione più attenta. In particolare nel caso del sistema a vite, dal momento che utilizziamo un compressore che lavora a pressioni anche elevate, è necessario controllare frequentemente la stampa per assicurarsi che non vi siano problemi nelle connessioni. Soprattutto all'inizio, per garantire una buona riuscita del pezzo, è consigliabile

controllare e se necessario regolare la pressione del compressore ed il flusso e velocità di stampa dalla stampante. Talvolta potrebbe risultare necessario pulire l'ugello in corso di stampa, se ad esempio abbiamo impostato una layer height troppo bassa rispetto al flusso. Per aiutare l'essiccamento del pezzo in corso di stampa, nel caso di impasti poco viscosi e clima non favorevole, è possibile utilizzare ventole o un ventilatore esterno. La ventilazione non deve essere però troppo diretta o potrebbe provocare la formazione di crepe nel pezzo. Attualmente, soprattutto con sistemi open source, il processo non è ancora autonomo e automatizzato come quello della stampa 3D fdm e richiede maggiore controllo da parte dell'utente. Un vantaggio è però la durata delle stampe, solitamente abbastanza breve rispetto a quella di un oggetto stampato fdm.

essiccamento e cottura

Dopo la stampa il pezzo subisce gli stessi procedimenti che possiamo trovare in quasi tutte le tecnologie e metodi di lavorazione della ceramica, che avvengono in una fase di essiccamento e in una di cottura. Durante queste fasi è possibile ancora agire sul pezzo ad esempio lavorandolo manualmente o applicandovi diverse finiture in cottura, argomenti che verranno trattati nel capitolo 10.

essiccamento

Terminata la stampa il pezzo deve asciugare lentamente ed in modo il più possibile uniforme. Un essiccamento troppo rapido o non uniforme può causare la rottura del pezzo che dovrà asciugare al riparo dal sole, da fonti di calore e da correnti d'aria. Il tempo richiesto per l'essiccamento, in termini di giorni o di settimane, dipende dal tipo di impasto, dalle dimensioni e dallo spessore dell'oggetto, dalle condizioni ambientali. Forme massicce devono avere cave all'interno o possedere dei fori di aereazione in modo da permettere la fuoriuscita regolare e completa dall'acqua sotto forma di vapore, anche durante la cottura. Dopo alcune ore il pezzo acquista la cosiddetta "durezza cuoio" e può essere maneggiato o subire lavorazioni o decorazioni di tipo meccanico come il taglio di piccole parti, svuotamenti, scanalature o incisioni.

Le argille porose permettono all'umidità di uscire più rapidamente e, di conseguenza, il loro essiccamento è più rapido e sicuro. La porosità è data dalla presenza di sabbia o di chamotte costituiti da gran-

uli spigolosi che favoriscono la formazione di micro cavità. Quando l'argilla asciuga l'acqua presente tra le particelle evapora e queste ultime tendono ad avvicinarsi riempiendo gli spazi rimasti vuoti.

La riduzione di volume dipende dalla composizione dell'impasto, per una normale argilla di giusta plasticità può essere dell'8 - 10%. Più acqua assorbe un'argilla più essa si ritira quando asciuga, argille con particelle molto piccole, di dimensioni uniformi e molto plastiche, trattengono di più l'acqua; per questo solitamente più un'argilla è plastica più essa si ritira quando asciuga. Un ritiro eccessivo può portare facilmente alla deformazione ed alla rottura di un oggetto plasmato, specialmente se l'essiccamento non è uniforme.

L'oggetto lasciato asciugare per una o due settimane acquista una consistenza dura ma fragile chiamata "secco assoluto". Fino a questo punto non c'è nessuna variazione nella composizione chimica dell'argilla, se l'oggetto venisse immerso in acqua tornerebbe argilla fluida. A temperatura ambiente ed in condizioni di umidità normali l'argilla conserva sempre nel suo interno una certa quantità di acqua libera, detta acqua igrometrica, che sparisce completamente durante la cottura.

cottura

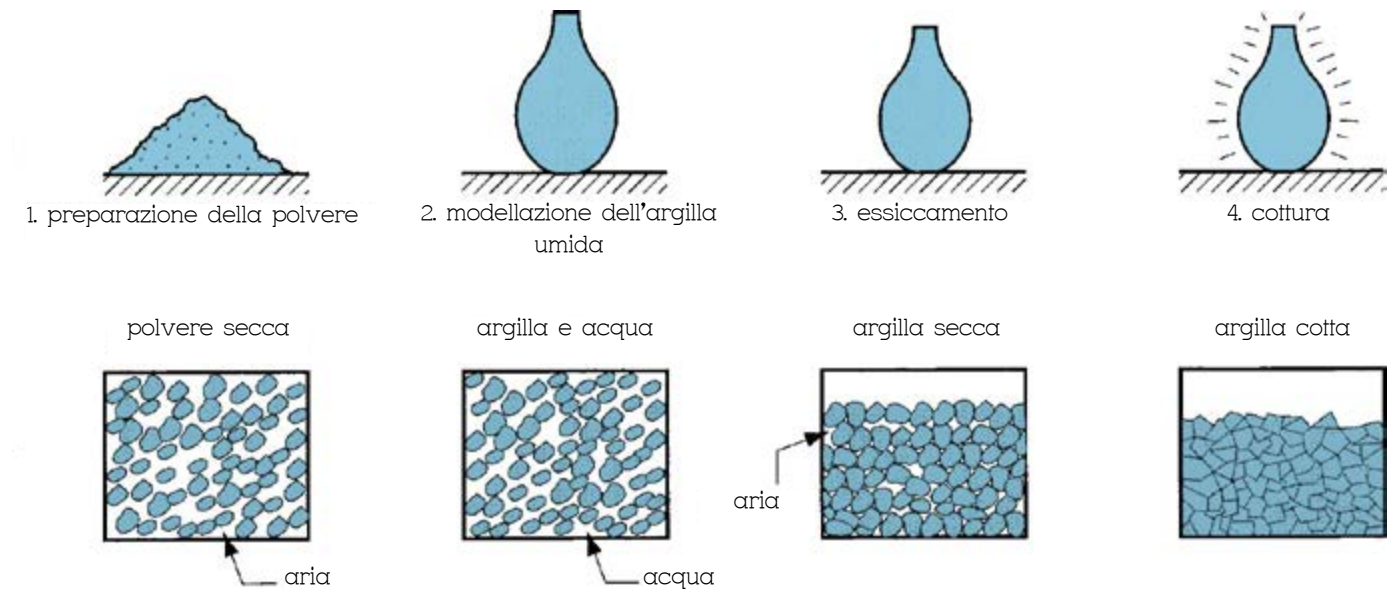
Anche dopo l'essiccamento l'argilla rimane un materiale fragile, da maneggiare con cautela, prima di essere messa nel forno e cotta. La cottura avviene di solito in due fasi, nella prima l'argilla viene riscaldata ad una temperatura inferiore a quella di vetrificazione in modo da rimanere porosa e quindi permeabile (biscotto). Questa prima cottura rende il materiale più sicuro da maneggiare durante l'applicazione di vetrine e di smalti, mentre la porosità della pasta ne facilita l'assorbimento. Il manufatto quindi viene cotto nuovamente fino alla temperatura ottimale detta temperatura di maturazione.

Nei primi stadi della cottura la temperatura deve salire lentamente per consentire all'acqua residua di evaporare. Se la temperatura raggiungesse i 100°C troppo rapidamente le eventuali piccole sacche di acqua rimaste nell'argilla si trasformerebbero velocemente in bolle di vapore che, non potendo uscire altrettanto velocemente, provocherebbero la rottura del pezzo. A circa 120°C tutta l'acqua di impasto che non è evaporata durante l'essiccamento, risulta eliminata.

I primi cambiamenti nella composizione cominciano a verificarsi sopra i 350°C quando l'acqua di idratazione, legata chimicamente agli

elementi presenti nel reticolo cristallino dei minerali delle argille, inizia ad essere eliminata. A circa 500°C l'argilla è completamente disidratata, e siccome sono spariti i gruppi ossidrilici che catturavano e legavano le molecole di acqua, essa non può più essere riutilizzata perché la sua composizione chimica risulta modificata in modo irreversibile.

I successivi processi di fusione e reazione a temperature elevate dei composti presenti nell'argilla che la rendono dura, vitrea e non porosa, vengono detti processi di vetrificazione. L'oggetto subisce un'ulteriore ritiro del 2-4 %, ma in alcuni casi può arrivare al 10%, ad esempio per le porcellane. Se a questo punto aumentiamo ulteriormente la temperatura l'oggetto si affloscia e poi fonde trasformandosi in un liquido.



img. 25, processo di ritiro in essiccamento e cottura

Ogni argilla ha la sua temperatura di vetrificazione. Le terraglie tenere che contengono molte impurezze, vetrificano a basse temperature, e si fondono a temperature alle quali argille come il caolino non hanno ancora cominciato a vetrificare; è importante cuocere l'argilla alla temperatura a cui raggiunge la massima durezza senza afflosciarsi e fondere, la cosiddetta temperatura di maturazione.



PARTE 2

LA SPERIMENTAZIONE

La seconda parte della tesi si compone di diverse prove di stampa e casi studio, volte a ricercare le caratteristiche della tecnologia in modo da identificarne le regole di stampa e progettazione, le possibilità che offre ma anche le sue criticità.

La sperimentazione è stata compiuta con la strumentazione presente al +LAB, composta da estrusori costruiti e sviluppati all'interno del laboratorio ed adattati a comuni stampanti 3D fdm. Con ogni prova vengono ricercati i principi e le regole generali del processo, cercando di eliminare la componente dipendente dalla strumentazione utilizzata.

Vengono inizialmente effettuate delle prove per valutare la viscosità ideale dell'impasto, a cui segue una "materioteca", in cui vengono testati diversi materiali in modo da valutarne le caratteristiche e la qualità per definire quelli che più si adattano al processo. Scelti due materiali di diversa tipologia vengono effettuate diverse prove variando i parametri e modalità di stampa per ricercarne l'influenza e le regole. Viene poi variata anche la forma del campione, incentrandosi soprattutto su diverse tipologie di sbalzo che costituiscono un aspetto critico per la stampa 3D, e verificando l'influenza di alcuni parametri nella riuscita della stampa. Infine vengono brevemente illustrate le diverse tipologie di lavorazione e finitura che possono essere effettuate sul pezzo prima e dopo la stampa, che permettono di incrementare le possibilità offerte dalla tecnologia. La stampa delle diverse prove ha permesso inoltre di definire anche diverse criticità tipiche del processo che verranno brevemente affrontate per poi definirne le design rules, le regole di progettazione per la stampa in 3D dei materiali ceramici, supportate da alcuni casi studio.

la ricerca della viscosità ideale

Prima di effettuare la sperimentazione era necessario ricercare la viscosità ideale per la stampa tenendo conto della strumentazione e pressione disponibile. Viene quindi scelto un materiale in polvere, in quanto risulta più facile da lavorare e non contiene già una percentuale di acqua, e vengono preparati cinque diversi impasti variando le percentuali di acqua e argilla. Il materiale scelto è l'argilla rossa, con una percentuale di chamotte fissa del 15%. Vengono effettuate prove di viscosità con estrusione libera a 5/6 bar di 30 e 60 secondi, e poi stampati campioni cilindrici e a tronco di cono per ogni impasto in modalità spiral con estrusore a vite.

chamotte 15% – acqua 23% – argilla 62%

L'impasto è troppo molle, non si effettuano le prove.

chamotte 15% – acqua 22% – argilla 63%

L'impasto è troppo molle, tende a collassare e deformarsi per le vibrazioni del piatto, lo spessore di parete è troppo grande, i layer tendono a fondersi tra loro e il campione si schiaccia.

chamotte 15% – acqua 21% – argilla 64%

L'impasto è ancora troppo molle, l'aderenza tra i layer è giusta, non collassa, ma risente delle vibrazioni del piatto. Lo spessore di parete è troppo grande ed il campione si schiaccia.

chamotte 15% – acqua 19% – argilla 66%

L'impasto ha una corretta viscosità, l'aderenza tra i layer è buona, non risente delle vibrazioni, lo spessore di parete è molto vicino a quello impostato e le dimensioni del campione stampate sono giuste. Viene leggermente influenzato dalle variazioni di pressione, come è possibile notare dalle variazioni nello spessore della parete. Una percentuale di acqua del 20% potrebbe essere un buon compromesso.

chamotte 15% – acqua 18% – argilla 67%

L'impasto è troppo viscoso e non si riesce ad estrarre alla pressione disponibile.



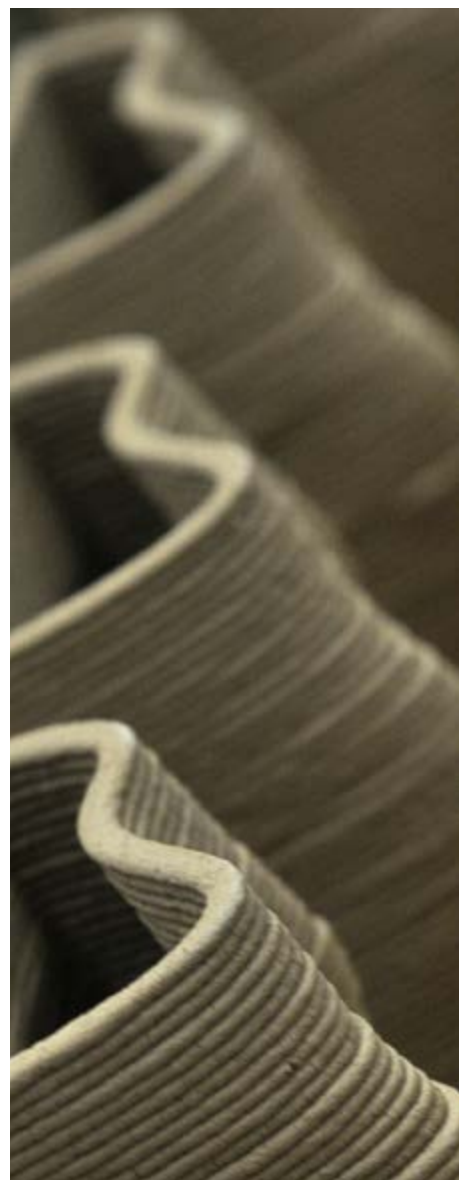
acqua 22%



acqua 21%



acqua 19%



6. MATERIOTECA



perché una materioteca?

Come già visto quello dei materiali ceramici è un mondo molto vasto, sia per le diverse tipologie esistenti sia per la possibilità di ricavare diversi materiali dalla stessa tipologia variandone la composizione e percentuale dei componenti.

L'intento della "materioteca" è quello di verificare la stampabilità di alcune delle diverse tipologie e composizioni di materiali ceramici e di valutarne le caratteristiche e differenze, in modo da poter definire i materiali adatti a questo processo e le modalità con cui devono essere trattati.

Sono quindi stati scelti 8 materiali diversi per tipologia (terracotta, porcellana, gres, refrattaria), per stato del materiale di partenza (polvere, granuli, impasto plastico), e per percentuale e finezza di chamotte per quanto riguarda le terrecotte.

Per la necessità di cambiare rapidamente e comodamente il materiale e fare stampe di piccole dimensioni con ognuno è stata usata la stampante 3Drag con estrusore a siringa, dal più facile caricamento rispetto alla Delta Wasp.

Dopo aver preparato i diversi impasti come descritto nel capitolo 4 per ogni materiale, ricercando la viscosità ideale, sono stati quindi stampati campioni di 70x50x40 mm in modalità spiral, in cui viene stampato il solo perimetro esterno dell'oggetto con un andamento a spirale, ed è stata effettuata una prima valutazione di stampabilità e delle caratteristiche di ognuno (stampabilità, plasticità, granulosità, collosità, ritiro).



argilla rossa

Terraglia rossa essiccata in polvere con aggiunta di chamotte rossa fine¹.

Prodotto atomizzato adatto alla lavorazione per colaggio senza aggiunte di fluidificanti.

Argilla porosa, non impermeabile, facile da lavorare e poi cotta a temperature relativamente basse.

Viene usata soprattutto per ceramiche a basso costo, ceramiche artistiche, ceramica strutturale e ornamentale (laterizi ed edilizia) o con rivestimento superficiale anche per vasellame e stoviglieria da cucina (come tazze e piatti).

stampabilità

L'impasto risulta plastico, poco coloso e poco granuloso per la tipologia di chamotte scelta, e dall'ottima consistenza e stampabilità.

Il materiale è poco soggetto a ritiro, sia in essiccamento che in cottura.

Il colore finale, dopo la cottura, è un rosso mattone pallido.

• Casa produttrice:
Colorobbia

• Tipologia:
Terraglia da colaggio

• Stato:
Polvere

• Temperatura di cottura:
920°- 960°

• Dosaggio:

Argilla:	58 %
Acqua:	21 %
Chamotte rossa fine:	20 %
Carb. sodio:	1 %

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	69 x 49 x 38
Pezzo asciutto:	68 x 47 x 37
Pezzo cotto:	67 x 47 x 37

Ritiro %: 3% 4% 3%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	60
Pezzo asciutto:	52
Pezzo cotto:	45

1 <http://www.colorobbia.it/>



argilla bianca

Terraglia bianca essiccata in granuli, con aggiunta di chamotte bianca.

Realizzata con la miscela di argille caoliniche e carbonati di calcio e magnesio².

Adatta alla lavorazione per colaggio a diverse densità, con aggiunta di fluidificante.

Usata per vasellame e stoviglieria da cucina (come tazze e piatti) o come imitazione delle porcellane.

stampabilità

Impasto un pò granuloso, dovuto alla chamotte in questo caso poco fine, per cui la plasticità e stampabilità sono molto buone ma con tendenza all'intasamento dell'ugello.

Come per l'argilla rossa l'impasto è soggetto a scarso ritiro, sia in essiccamento che in cottura.

Il colore finale è bianco-rosato.

• Casa produttrice:
Colorobbia

• Tipologia:
Terraglia da colaggio

• Stato:
Polvere

• Temperatura di cottura:
920°- 980°

• Dosaggio:

Argilla:	63 %
Acqua:	19 %
Chamotte bianca:	17 %
Carb. sodio:	1 %

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	70 x 49 x 38
Pezzo asciutto:	69 x 47 x 37
Pezzo cotto:	68 x 47 x 37

Ritiro %: 3% 4% 3%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	60
Pezzo asciutto:	50
Pezzo cotto:	42

² <http://www.colorobbia.it/>



pirofila

Impasto plastico di terra pirofila degasata e purificata³, con percentuale di chamotte e acqua già presenti.

Materiale resistente agli sbalzi termici e dal basso coefficiente di dilatazione, indicato per la realizzazione di oggetti da fuoco.

Viene quindi usata soprattutto in applicazioni per la cucina, come pentole e pirofile da porre direttamente sulla fiamma.

Il basso coefficiente di dilatazione rende inevitabile la presenza del fenomeno del “cavillo” sullo smalto, che appare incrinato.

stampabilità

L'impasto è molto colloso ma dall'ottima stampabilità e plasticità.

Si percepisce la presenza di molta sabbia (la silice che ne conferisce la resistenza agli sbalzi termici) ma fine.

Risulta facile la formazione di crepe e spaccature, per cui la ventilazione non dev'essere troppo forte e diretta e l'essiccazione dev'essere lenta e graduale.

Il materiale è soggetto a ritiro elevato soprattutto in altezza e durante l'essiccazione, poco in cottura.

Il colore finale è un arancio/rosso mattone intenso.

• Casa produttrice:
Colorobbia

• Tipologia:
Terra pirofila

• Stato:
impasto plastico

• Temperatura di cottura:
920°- 980°

• Dosaggio:

Argilla:	91 %
Acqua:	9 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	/

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	70 x 45 x 36
Pezzo asciutto:	61 x 43 x 34
Pezzo cotto:	60 x 43 x 34

Ritiro%: 14% 5% 6%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	45
Pezzo asciutto:	38
Pezzo cotto:	34

³ <http://www.colorobbia.it/>



nera raku

• Casa produttrice:
Fornace Curti

• Tipologia:
Terracotta nera

• Stato:
Impasto plastico

• Temperatura di cottura:
960°- 980°

• Dosaggio:

Argilla:	93 %
Acqua:	7 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	/

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	67 x 46 x 36
Pezzo asciutto:	66 x 45 x 35
Pezzo cotto:	65 x 45 x 35

Ritiro %: 3% 2% 3%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	53
Pezzo asciutto:	46
Pezzo cotto:	43

Impasto plastico di terra nera per cottura raku⁴, con percentuale di chamotte e acqua già presenti.

Il Raku è una tecnica di cottura giapponese della ceramica legata alla cerimonia del tè.

L'argilla utilizzata per realizzare oggetti Raku deve avere caratteristiche particolari poiché la tecnica sottopone i pezzi ad uno shock termico rilevante.

Il materiale adatto a questo tipo di lavorazione è quindi una terra ricca di materiale refrattario (chamotte o sabbia silicea) che resiste alle tensioni che si creano durante la riduzione (in cui l'aria nel forno è povera di ossigeno) e quando l'oggetto, in pochi secondi, subisce un brusco raffreddamento passando da circa 1000°C a temperatura ambiente.

stampabilità

L'impasto risulta molto granuloso, per l'elevata percentuale di chamotte grossolana che necessita la tecnica di cottura.

Nonostante la granulosità elevata e la consistenza un po' collosa il materiale ha una buona stampabilità ed è poco soggetto a ritiro sia durante l'essiccazione che la cottura.

Il colore finale è nero-marrone scuro.

⁴ <http://www.fornacecurti.it/>



terra etrusca

• Casa produttrice:
Colorobbia

• Tipologia:
Terracotta etrusca

• Stato:
Impasto plastico

• Temperatura di cottura:
980°

• Dosaggio:

Argilla:	95 %
Acqua:	5 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	/

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	67 x 47 x 37
Pezzo asciutto:	65 x 45 x 36
Pezzo cotto:	64 x 45 x 36

Ritiro %: 5% 4% 3%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	56
Pezzo asciutto:	48
Pezzo cotto:	44

Impasto plastico di terra etrusca⁵, con percentuale di chamotte ed acqua già presenti.

Indicato per la realizzazione di pezzi da esterno (giardino etc.) di ogni forma e misura, ha come caratteristica pregnante la presenza di “granello” oltre a presentare, in superficie, efflorescenze saline che consentono di ottenere effetti molto interessanti. La presenza di calcinello è caratteristica di questo impasto, rappresenta quindi un pregio e non un difetto.

Ha una buona resistenza agli sbalzi termici e longevità.

stampabilità

L'impasto risulta simile al precedente (nera raku), poco meno granuloso e un po' coloso, ma dalla buona stampabilità.

Materiale soggetto a lieve ritiro sia durante l'essiccamento che la cottura.

Il colore finale è grigio-marrone scuro.

⁵ <http://www.colorobbia.it/>



porcellana limoges

Impasto essiccato atomizzato da colaggio di porcellana⁶.

Miscela di caolino (50-90%) e quarzo (10-25%).

La porcellana Limoges è una porcellana a pasta dura molto pregiata prodotta a partire dal 1771 in diverse fabbriche della città di Limoges, in Francia, dove venne scoperto un importante giacimento di caolino.

Ceramica dura, vetrificata e traslucida per bassi spessori.

Tra le caratteristiche principali abbiamo ottima durezza ed eccellente resistenza chimica, ma bassa resistenza allo shock termico.

Utilizzata principalmente per vasellame pregiato e ceramica ornamentale.

stampabilità

L'impasto ha una consistenza fine e poco collosa, ma è tenace, poco plastica e dal comportamento quasi "elastico".

La stampabilità risulta scarsa ed i campioni sono stati stampati al 40-50% della velocità prevista a causa della tendenza a deformarsi per il comportamento elastico del filamento.

Nonostante ciò risultano comunque meno precisi di quelli stampati con gli altri materiali, soprattutto sugli spigoli che si arrotondano molto.

Il colore finale è bianco.

• Casa produttrice:
Cecchetto

• Tipologia:
Porcellana

• Stato:
Polvere

• Temperatura di cottura:
1220° - 1250°

• Dosaggio:

Argilla:	75 %
Acqua:	24 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	1 %

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	67 x 47 x 37
Pezzo asciutto:	65 x 45 x 36
Pezzo cotto:	54 x 42 x 33

Ritiro %: 19% 11% 11%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	50
Pezzo asciutto:	39
Pezzo cotto:	36

⁶ <http://www.ceramicacecchetto.it/>



porcellana azzurrata

Porcellana azzurrata essiccata in granulato da colaggio⁷.

Miscela di caolino (40-50%) feldspato (30-35%) e quarzo (10-15%).

Ceramica dura e vetrificata; tra le caratteristiche principali abbiamo ottima durezza ed eccellente resistenza chimica, ma bassa resistenza allo shock termico.

Usata soprattutto per vasellame, stoviglieria, ceramica ornamentale.

stampabilità

Impasto elastico anche se meno della porcellana limoges, dalla consistenza molto fine e un pò collosa, ma dalla stampabilità è ottima.

Tendenza a ritirare e spaccarsi per cui la ventilazione non dev'essere troppo forte e diretta e l'essiccazione dev'essere lenta e graduale.

Il ritiro è molto elevato in cottura, poco durante l'essicamento.

Il colore finale è grigio-azzurro, lucido per la vetrificazione.

• Casa produttrice:	
Cecchetto	
• Tipologia:	
Porcellana	
• Stato:	
Granuli	
• Temperatura di cottura:	
1240°-1260°	
• Dosaggio:	
Argilla:	81 %
Acqua:	19 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	/
• Verifica del ritiro (mm):	
Pezzo stampato:	69 x 47 x 38
Pezzo asciutto:	67 x 46 x 37
Pezzo cotto:	54 x 41 x 30
Ritiro %:	
	22% 12% 21%
• Peso (g):	
Pezzo stampato:	51
Pezzo asciutto:	40
Pezzo cotto:	37



⁷ <http://www.ceramicacecchetto.it/>

gres enk

Gres porcellanato essiccato in granulato da colaggio⁸.

Miscela di caolino (40-50%), feldspato (35-40%) e quarzo (10-15%).

Ceramica a pasta compatta e dura, non porosa, cotta a temperatura elevata fino a vetrificazione.

Caratteristiche principali sono l'ottima impermeabilità, l'eccellente resistenza chimica, ma la bassa resistenza a shock termico e trazione.

Molto buone anche la durezza e quindi la resistenza all'abrasione e la resistenza meccanica.

Tra le più importanti applicazioni vi sono piastrelle, pavimentazioni e coibentazione, tubature, contenitori e bottiglie per sostanze alimentari.

stampabilità

Impasto dalla consistenza molto fine e dall'ottima stampabilità, leggermente più plastico delle porcellane.

Lieve tendenza a ritirare e spaccarsi anche se meno delle porcellane.

Il ritiro è molto elevato in cottura, poco durante l'essiccamento.

Il colore finale è bianco crema.

• Casa produttrice:
Cecchetto

• Tipologia:
Gres porcellanato

• Stato:
Granulato umido

• Temperatura di cottura:
1180°-1200°

• Dosaggio:

Argilla:	84 %
Acqua:	16 %
Chamotte:	/
Carb. sodio:	/

• Verifica del ritiro (mm):

Pezzo stampato:	69 x 48 x 37
Pezzo asciutto:	68 x 47 x 36
Pezzo cotto:	60 x 42 x 33

Ritiro %: 13% 12% 11%

• Peso (g):

Pezzo stampato:	53
Pezzo asciutto:	44
Pezzo cotto:	40

⁸ <http://www.ceramicacecchetto.it/>



confronto

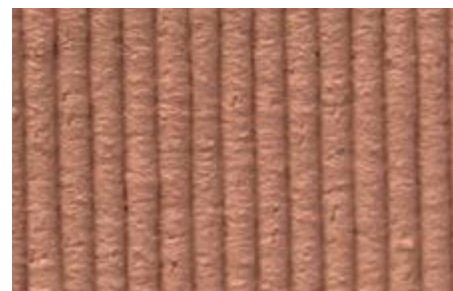
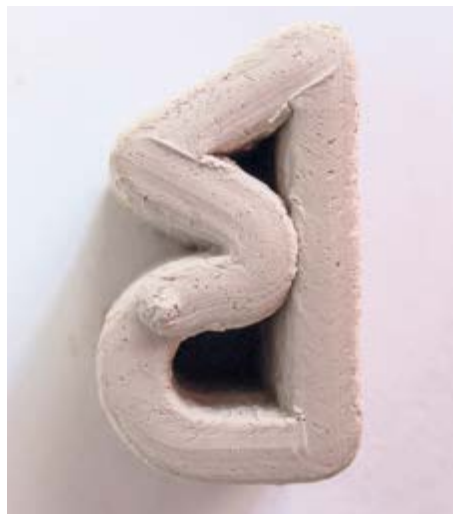
Con questa prima prova di stampa si nota subito la differenza tra le due principali categorie di materiale: terrecotte e porcellane/gres.

Le prime hanno una consistenza granulosa, che dipende dalla quantità e dalla finezza della chamotte al loro interno. La chamotte tenacizza il materiale ma costringe ad un aumento della percentuale di acqua per poterlo estrudere, motivo per cui risultano anche più collose rispetto alle porcellane. Argilla rossa e pirofila hanno un'ottima stampabilità e consistenza dovuta alla chamotte/silice molto fine. L'argilla bianca invece, impastata con una chamotte più grezza, tende ad intasare la siringa rendendo la stampa difficoltosa, nonostante la buona plasticità. Terra estrusca e nera raku sembrano al tatto ancora più granulose ma nonostante ciò risultano ben stampabili, mentre il semirefrattario, dall'impasto con il 40% di chamotte, non può essere stampato con l'estrusore a siringa. La maggioranza di questi materiali infine è poco soggetta a ritiro (circa 4%), più elevato in altezza, fatta eccezione per la pirofila che invece presenta un ritiro elevato soprattutto durante l'essiccamento, con la conseguente tendenza a spaccarsi. La finitura di questi materiali dopo la cottura è ruvida e porosa, a seconda di percentuale e tipologia di chamotte.

Le porcellane ed il gres hanno invece una consistenza molto fine (non c'è la chamotte) e meno collosa. La porcellana Limoges presenta un comportamento quasi "elastico" durante la stampa che la rende poco gestibile. Il materiale estruso in filamento tende a seguire l'estrusore fondendosi meno agli strati precedenti e causando la deformazione del pezzo stampato, ad esempio negli angoli che si arrotondano. Nella porcellana azzurrata e nel gres questo comportamento non si presenta e la stampabilità rimane ottima. Per questi materiali abbiamo un ritiro lieve durante l'essiccamento ma elevato con la cottura (circa il 10%), sempre a causa dell'assenza di chamotte. La vetrificazione del pezzo, che dev'essere cotto a temperature molto maggiori rispetto a quelle delle terraglie, lo rende lucido e compatto.

Per la successiva fase di ricerca dei parametri e modalità di stampa ottimali e delle regole di progettazione per la stampa 3d in materiale ceramico si scelgono quindi due materiali appartenenti alle due categorie descritte. Come terracotta viene scelta la terraglia rossa con una percentuale di chamotte fine del 20% mentre per la categoria delle porcellane/gres viene scelto il gres porcellanato.

	stampabilità	finezza	ritiro	plasticità
argilla rossa	● ● ●	● ●	●	● ● ●
argilla bianca	● ●	● ●	●	● ● ●
pirofila	● ● ●	● ●	● ●	● ● ●
terra raku	● ●	●	●	● ●
terra estrusca	● ●	●	● ●	● ●
p. limoges	●	● ● ●	● ● ●	●
p. azzurrata	● ● ●	● ● ●	● ● ●	●
gres enk	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ●



7. PARAMETRI DI STAMPA



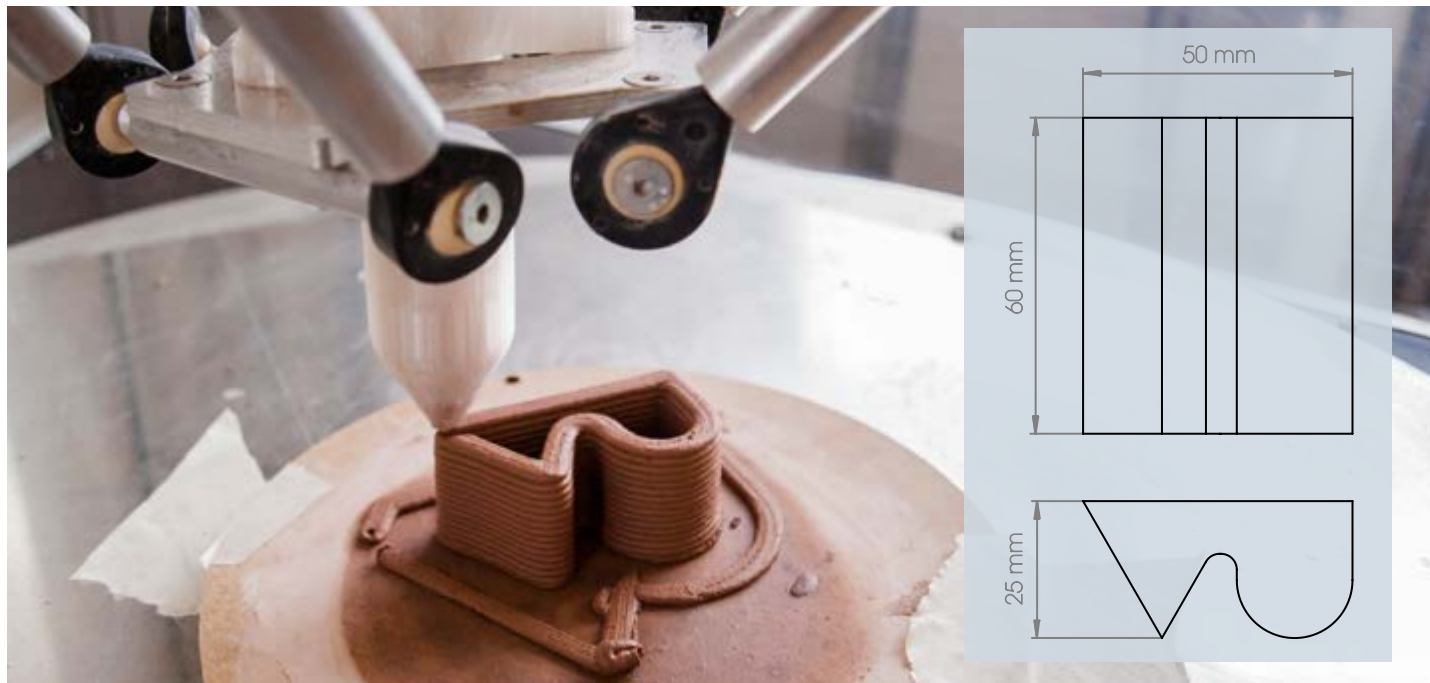
Imparare ad utilizzare le stampanti è semplice ma riuscire ad ottenere buoni risultati è invece più impegnativo e richiede molta esperienza soprattutto nella gestione dei numerosi parametri di stampa.

La corretta impostazione dei parametri di stampa determina la riuscita del pezzo stampato, alcuni elementi sono determinanti per la stampa e possono anche arrivare a causarne il fallimento.

Partendo dai parametri e dalle regole di impostazione utilizzate per la stampa f3m si effettueranno diverse prove e campioni volti a trovare i parametri ideali per la stampa l3m in materiale ceramico.

Il provino scelto, un semplice estruso di dimensioni 50 x 25mm di base per 60mm di altezza, contiene nella sua sezione due curve di diverso raggio, un angolo a 90 gradi, due spigoli acuti ed una superficie piana, in modo da poter valutare la resa e la fedeltà geometrica ottenibile con il materiale nelle diverse situazioni e a seconda dei diversi parametri.

Anche queste prove verranno stampate “spiral”, modalità in cui viene stampato il solo perimetro esterno dell’oggetto con un andamento a spirale che evita il visibile cambio di layer e possibili errori, in modo da semplificare al massimo l’oggetto e isolare l’effetto dei singoli parametri per poterli valutare singolarmente.



Le prove sono state effettuate con estrusore a vite su Wasp Delta 40x60, ad una pressione di circa 5.5 bar.

Per indicare i nomi dei parametri si fa riferimento al software di slicing Cura sviluppato dall’azienda Ultimaker, utilizzato per la generazione dei gcode.

dimensione dell’ugello

La dimensione dell’ugello (nozzle size) è un parametro molto importante che influisce sull’intera generazione del pezzo e su altri parametri come altezza del layer e spessore di parete. Non è possibile controllare questa caratteristica durante il processo come succede invece per altri parametri che verranno affrontati più avanti, come la velocità o il flusso.

Gli ugelli utilizzati, progettati e stampati all’interno del laboratorio come lo stesso estrusore, sono di 6mm, 4mm, 3mm e 1mm (stampato con stereolitografia). La scelta della dimensione dell’ugello varia seconda della dimensione del pezzo da stampare, dalla precisione e robustezza richieste, ed anche dal tempo a disposizione.

Un diametro dell’ugello più grande sarà migliore per stampe veloci: il numero di strati necessari per la stampa è minore poiché depositerà strati più spessi, riducendo così il tempo di stampa. Gli strati saranno inoltre più larghi, rendendo il pezzo più robusto e solido, ma più impreciso nel caso di piccole dimensioni, angoli e dettagli.

Nel nostro caso è importante tenere conto delle dimensioni del pezzo che si andrà a stampare, se questo è particolarmente sproporzionato in altezza sarà necessario un ugello abbastanza grande in modo che la parete sostenga gli strati soprastanti, o bisognerà aumentare i perimetri che lo compongono, poiché il materiale è pesante e la sua solidificazione non immediata.

Lo spessore di parete viene definito dal numero di linee perimetrali per ogni sezione orizzontale e si definisce impostando un multiplo (corrispondente al numero di perimetri) della larghezza dell’ugello. Come vedremo, con la stampa in materiale ceramico, lo spessore del pezzo stampato non sarà quasi mai uguale a quello impostato, e varierà a seconda degli altri parametri di stampa.

altezza del layer

L'altezza del layer (layer height) determina direttamente il numero di sezioni con cui viene tagliato il modello 3D. Rappresenta sostanzialmente la risoluzione verticale ed è un parametro molto importante che influisce sia sulla resa qualitativa dell'oggetto stampato sia ovviamente sul tempo di stampa.

Come per la dimensione dell'ugello uno spessore elevato permette di ridurre i tempi di stampa ma realizza superfici meno rifinite, mentre uno spessore basso migliora la qualità (e la robustezza della parte) a scapito di tempi di stampa superiori.

L'altezza layer dipende direttamente dal diametro dell'ugello.

Nella stampa fdm lo spessore minimo dipende dalla stampante (alcune arrivano a 0,05 mm) e quello massimo non può essere superiore all'80% del diametro dell'ugello, un valore intermedio consigliato corrisponde ad $\frac{1}{4}$ del diametro dell'ugello.

Con l'argilla cambia il materiale e cambiano le regole: si lavora innanzitutto ad una scala maggiore, e non abbiamo più un termoplastico ma un materiale che ha un comportamento ed un processo di solidificazione diverso (essiccamento).

velocità di stampa

La velocità (printing speed) è uno dei parametri che produce più effetti benefici sui tempi di stampa e consiste nella velocità con cui si muove la testa di stampa (o il piatto di stampa a seconda della struttura della stampante) ed è espressa in mm/s.

Ad alte velocità si ottengono delle stampe qualitativamente basse ma in tempi rapidi, abbassando la velocità di stampa si aumenta la qualità e il tempo di stampa.

Il range di valori tipico per la stampa fdm va dai 30 ai 120 mm/s.

Per quanto riguarda i ceramici dobbiamo abbassare la velocità di stampa, tenendo conto che il sistema di estrusione è diverso e che il materiale non ha un indurimento veloce come quello di un termoplas-

tico per la stampa fdm. Data però la risoluzione più bassa in termini di layer height, questo non si ripercuote sui tempi di stampa come per la plastica, e la stampa riesce ad essere mediamente più rapida.

Soprattutto se la sezione è piccola, il pezzo è sproporzionato in altezza o vi sono sbalzi consistenti devono essere utilizzate velocità basse poiché velocità elevate causerebbero oscillazioni del pezzo stesso o il suo collasso dovuto all'insufficiente essiccamento degli strati sottostanti.

flusso

Il flusso (flow) rappresenta la quantità di materiale che viene estruso dall'ugello ed è determinato, per la stampa fdm, da quanto il motore dell'estrusore spinge il filo all'interno dell'estrusore.

Si misura in Estep/mm, cioè il numero di giri compiuti dal motore per estrarre 1mm di filamento.

E' un parametro difficile da determinare per quanto riguarda la stampa in materiale ceramico in quanto può variare moltissimo a seconda della viscosità dell'impasto, della pressione utilizzata, del sistema di estrusione.

Il metodo migliore consiste nell'impostarlo al 100% da codice ed agire poi direttamente dalla stampante, verificando al momento la percentuale di flusso adeguata, anche a seconda del risultato che si vuole ottenere.

Variando la percentuale di flusso è possibile in parte anche correggere errori fatti nella generazione del codice (ad esempio nell'impostazione dell'altezza layer o della velocità) o avere uno spessore di parete maggiore senza cambiare l'ugello.



img. 26, parametri di base in Cura

dimensione dell'ugello

Parametri:

• layer height = nozzle size/2

• shell thickness = nozzle size

• bottom/top thickness = 0

• fill density = 0

• print speed = 10 mm/s

• diameter = 15 mm

• flow = 100 %

• modalità: spiral

• nozzle size = 3 mm
layer height = 1.5 mm
tempo di stampa = 11 minuti

• nozzle size = 6 mm
layer height = 3 mm
tempo di stampa = 4 minuti

L'ugello da 3 mm risulta adeguato alle dimensioni del pezzo, e la stampa è ben riuscita come forma e risoluzione.

Gli spigoli presentano un raggio dal diametro pari o leggermente maggiore a quello dell'ugello ma le altre caratteristiche geometriche del provino vengono rispettate.

L'ugello da 6 mm invece appare subito eccessivo per le dimensioni del pezzo, il perimetro esterno infatti viene rispettato ma risulta troppo arrotondato, e la parte interna troppo piena. Il tempo di stampa però si dimezza.

E' necessario quindi scegliere bene la dimensione dell'ugello a seconda delle dimensioni del pezzo e dalla presenza dei dettagli, ed in base al livello di precisione e robustezza richiesto: se abbiamo un oggetto grande ma molto dettagliato possiamo utilizzare un ugello piccolo aumentando però lo spessore di parete in modo da renderlo abbastanza robusto, se invece abbiamo un oggetto piccolo ma molto semplice possiamo utilizzare anche un ugello grande, risparmiando molto sul tempo di stampa.

Per effettuare le prove seguenti si sceglie quindi l'ugello da 3mm, con un buon compromesso tra tempo e qualità di stampa.

Raddoppiando la dimensione dell'ugello e di conseguenza l'altezza del layer notiamo che il tempo di stampa per la prova effettuata con l'ugello di 6 mm risulta meno della metà di quella con l'ugello di 3 mm.

3 mm



6 mm



3 mm



6 mm



altezza del layer

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 10 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- modalità: spiral

I migliori risultati si ottengono con un'altezza layer di 1,5 mm o 1 mm, pari cioè al 50% o 33% del diametro dell'ugello. Con 1,5 mm abbiamo maggiore fedeltà geometrica al modello, mentre con 1 mm abbiamo una migliore finitura superficiale e planarità, per la maggiore adesione degli strati tra loro. Un'altezza layer di 1,25 mm potrebbe costituire un buon compromesso. Inoltre il tempo di stampa varia poco (5 minuti) tra i due valori.

Un'altezza layer poco minore, di 0,75 mm, oltre a raddoppiare i tempi di stampa, provoca già eccessive deformazioni al pezzo: il materiale viene schiacciato, lo spessore di parete aumenta e la finitura superficiale peggiora con il materiale in eccesso che viene spinto fuori formando "bave".

Ad altezze layer maggiori abbiamo buoni risultati ma con una stratificazione molto evidente, un arrotondamento delle forme soprattutto in corrispondenza degli spigoli, una leggera diminuzione dello spessore di parete rispetto alle altre prove. Nel caso non sia necessaria una grande fedeltà geometrica e finitura superficiale un'altezza layer attorno al 60/70 % è ideale per una stampa veloce.

I tempi di stampa variano di conseguenza, raddoppiando o dimezzandosi per altezze layer pari a meno del doppio o della metà di quella intermedia di 1,5 mm. L'altezza del layer va quindi scelta non solo a seconda della precisione richiesta ma anche a seconda del tempo che richiede la stampa del pezzo. Questo è un altro vantaggio della stampa 3D in materiale ceramico, che permette grande flessibilità per alcuni parametri come l'altezza layer. Nel caso quindi sia necessaria una stampa veloce è possibile aumentare l'altezza del layer e diminuire così i tempi di stampa, garantendo comunque una buona riuscita del pezzo.

0,75 mm



1 mm



1,5 mm



2 mm



2,25 mm



altezza del layer

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 10 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- modalità: spiral

Come per l'argilla rossa anche in questo caso i risultati migliori si ottengono con un'altezza layer di 1,5mm o 1mm, al 50% o 33% del diametro dell'ugello per cui un'altezza layer di 1,25 mm potrebbe costituire un buon compromesso. Con entrambe la fedeltà geometrica al modello risulta buona, con un lieve aumento dello spessore di parete con 1mm di altezza layer che influenza la resa degli spigoli. A differenza invece dell'argilla rossa anche la stampa a 0,75mm di altezza layer risulta buona, con un'ottima finitura superficiale e planarità ed una molto minore evidenza dei layer, grazie alla maggior finezza del materiale privo di chamotte. Anche in questo caso abbiamo un aumento dello spessore di parete dovuto allo schiacciamento del materiale che incide sulla precisione degli spigoli. Con il gres porcellanato è quindi possibile abbassare di più l'altezza layer, nel caso i layer debbano essere meno visibili o per lisciare il pezzo in seguito.

Come per l'argilla rossa ad altezze layer maggiori abbiamo buoni risultati ma con una stratificazione molto evidente, un arrotondamento delle forme soprattutto in corrispondenza degli spigoli, una leggera diminuzione dello spessore di parete. Nel caso non sia necessaria una grande fedeltà geometrica e finitura superficiale un'altezza layer attorno al 60/70 % è ideale per una stampa veloce.

I tempi di stampa variano di conseguenza, raddoppiando o dimezzandosi per altezze layer pari a meno del doppio o della metà di quella intermedia di 1,5 mm. L'altezza del layer va quindi scelta non solo a seconda della precisione richiesta ma anche a seconda del tempo che richiede la stampa del pezzo. Questo è un altro vantaggio della stampa 3D in materiale ceramico, che permette grand flessibilità per alcuni parametri come l'altezza layer. Nel caso quindi sia necessaria una stampa veloce è possibile aumentare l'altezza del layer e diminuire così i tempi di stampa, garantendo comunque una buona riuscita del pezzo.

0,75 mm



1 mm



1,5 mm



2 mm



2,25 mm



velocità di stampa

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.5 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- modalità: spiral

- first print speed = 10 mm/s
tempo di stampa = 11 minuti
- print speed: 150 % = 15 mm/s
tempo di stampa = 8 minuti
- print speed: 200 % = 20 mm/s
tempo di stampa = 6 minuti
- print speed: 250 % = 25 mm/s
tempo di stampa = 5 minuti
- print speed: 300 % = 30 mm/s
tempo di stampa = 4 minuti

La velocità di partenza impostata era volutamente molto bassa per non influenzare la stampa nelle altre prove, ma adeguata alle dimensioni del campione che risulta ben stampato sia come finitura che come fedeltà geometrica al modello.

Provando ad aumentare la velocità da stampante al 150% notiamo che la qualità di stampa rimane buona ed il flusso si regola, assottigliando la parete che si avvicina di più allo spessore impostato da gcode. La deposizione del materiale rimane comunque adeguata.

Da una velocità alzata al 200% al 300% notiamo invece un aumento della deformazione del pezzo soprattutto in sezione orizzontale, gli spigoli si arrotondano, i lati piani si inclinano e c'è una tendenza a piegarsi nel verso della stampa dovuto al trascinarsi del "filo" estruso che non ha il tempo di aderire bene allo strato sottostante.

Anche nella parete esterna possiamo notare la formazione di qualche errore per la deposizione scorretta del materiale, un assottigliamento che aumenta con l'altezza, e un ripiegarsi degli angoli verso l'alto, comportamento simile a quello della plastica sempre dovuto ad una velocità eccessiva.

Infine man mano che aumenta la velocità il flusso tende a diminuire, se si stampa troppo velocemente senza un adeguato flusso di materiale si ha, come per la plastica, l'effetto di stampa 'magra'.

La velocità va quindi adeguatamente gestita insieme al flusso.

Volendo aumentare la velocità, e diminuire così il tempo di stampa, conviene aumentare il flusso di conseguenza, tenendo conto però che più materiale avrà bisogno di più tempo per solidificarsi e ad una velocità troppo alta la stampa potrebbe comunque deformarsi o crollare.

10 mm/s



15 mm/s



20 mm/s



25 mm/s



30 mm/s



velocità di stampa

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.5 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- modalità: spiral

- first print speed = 10 mm/s
tempo di stampa = 11 minuti
- print speed: 150 % = 15 mm/s
tempo di stampa = 8 minuti
- print speed: 200 % = 20 mm/s
tempo di stampa = 6 minuti
- print speed: 250 % = 25 mm/s
tempo di stampa = 5 minuti
- print speed: 300 % = 30 mm/s
tempo di stampa = 4 minuti

La velocità di partenza impostata era volutamente molto bassa per non influenzare la stampa nelle altre prove, ma adeguata alle dimensioni del campione che risulta ben stampato sia come finitura che come fedeltà geometrica al modello.

All'aumentare della velocità da stampante al 150% non si notano differenze consistenti rispetto alla prima velocità impostata, se non una regolazione del flusso che migliora l'uniformità della stampa.

Anche ai successivi aumenti, del 200%, del 250% e del 300%, non vi sono particolari deformazioni e l'effetto di stampa 'magra' come per l'argilla rossa, la stampa risulta buona in tutti i casi con un lieve assottigliamento dello spessore di parete ed una leggera inclinazione del pezzo nel verso di stampa alle velocità più alte, ed un quasi impercettibile rialzo dei layer in corrispondenza degli spigoli.

La finezza del materiale garantisce in questo caso una più facile estrusione che permette una stampa anche a velocità elevate senza perdita di qualità.

10 mm/s



15 mm/s



20 mm/s



25 mm/s



30 mm/s



flusso

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.5 mm
- shell tickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 10 mm/s
- diameter = 15 mm
- modalità: spiral

Abbassando di poco il flusso, al 75%, abbiamo una maggiore fedeltà dimensionale soprattutto nello spessore di parete, ma più difficoltà a seguire la forma del modello che si arrotonda per il trascinamento del materiale estruso insufficiente. Ad una velocità bassa però la stampa non presenta particolari difetti.

Ad un flusso ancora minore, del 50%, abbiamo un effetto simile a quello riscontrato a velocità alta, in cui gli spigoli tendono ad alzarsi e deformarsi nella direzione della stampa, lo spessore di parete diminuisce molto ed il materiale estruso ha un aspetto più secco e poroso (effetto di stampa 'magra'). Anche alla velocità impostata la qualità di stampa è insufficiente.

Aumentando il flusso invece abbiamo un ispessimento della parete, che ingrandisce però il pezzo in tutte le direzioni (aumentando invece la larghezza dell'ugello le dimensioni esterne vengono rispettate) ed arrotonda gli spigoli, rendendo la stampa meno precisa.

Peggiora leggermente anche la finitura superficiale del pezzo, con la formazione di errori e bave per il materiale schiacciato spinto verso l'esterno.

- first flow = 100 %
- flow 1 = 125 %
- flow 2 = 150 %
- flow 3 = 75 %
- flow 4 = 50 %

50 %



75 %



100 %



150 %



200 %



flusso

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.5 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 10 mm/s
- diameter = 15 mm
- modalità: spiral

- first flow = 100 %
- flow 1 = 125 %
- flow 2 = 150 %
- flow 3 = 75 %
- flow 4 = 50 %

In questo caso la finezza del materiale, che garantiva una buona riuscita della stampa anche al variare della velocità e dell'altezza layer, determina una forte sensibilità alla variazione del flusso.

Al 75% la qualità di stampa rimane buona senza particolari deformazioni, se non un lieve arricciamento sullo spigolo e una leggera diminuzione dello spessore di parete.

Al 50% invece abbiamo l'effetto di stampa 'magra', in cui il filamento di materiale depositato è troppo sottile e molto poroso, la geometria si deforma nel senso della stampa, gli angoli si arricciano.

Ad un aumento di flusso del 125% e 150% la quantità di materiale depositato aumenta subito eccessivamente (in quantità molto maggiore che con l'argilla rossa), deformando la geometria del pezzo che si allarga, e formando difetti superficiali per il troppo materiale che schiacciato viene spinto verso l'esterno.

50 %



75 %



100 %



150 %



200 %



risultati

Nella generazione del codice per la stampa è innanzitutto importante un'impostazione corretta dell'altezza layer in funzione dell'ugello scelto.

Dalle dimensioni dell'ugello dipenderà lo spessore di parete, per cui la scelta dipende soprattutto dalle dimensioni del pezzo da stampare e dalla risoluzione voluta, ma anche dal tempo a disposizione e dalla presenza di dettagli. Un diametro dell'ugello piccolo ad esempio garantirà una precisione maggiore, soprattutto nel caso di dettagli e spigoli, ma una stampa più lenta ed uno spessore di parete sottile che se necessario dovrà essere allargato aggiungendo più perimetri per avere una migliore robustezza.

L'impostazione dell'altezza del layer risulta invece molto flessibile e offre diverse possibilità. Con un'altezza layer pari al 50%-30% dell'ugello abbiamo una buona finitura superficiale, con una stratificazione evidente ma compatta, ed una buona fedeltà geometrica anche sugli spigoli e nei dettagli. Abbassandola ulteriormente il materiale si schiaccia ed abbiamo una stratificazione meno evidente ma un allargamento dello spessore di parete che riduce la precisione della stampa.

Con materiali più fini come il gres e le porcellane si ottengono buoni risultati anche ad altezze layer molto basse (circa il 20% dell'ugello), mentre con un materiale chamottato la finitura superficiale peggiora.

Gli altri parametri fondamentali sono la velocità ed il flusso. Questi devono essere impostati da codice ma possono essere controllati durante la stampa, permettendo la correzione di eventuali errori nelle impostazioni e l'adattamento alla viscosità del materiale poco prevedibile.

La velocità dipende dalle dimensioni del pezzo e dalla presenza di dettagli, ma anche dal materiale utilizzato. Dalle prove notiamo infatti che il gres, più fine dell'argilla rossa, sostiene meglio anche velocità alte in rapporto alla dimensione del pezzo. Ad una velocità di 30 mm/s, il triplo di quella impostata inizialmente, non si formano particolari difetti o deformazioni che invece appaiono nei campioni in argilla ad una velocità di 20 mm/s.

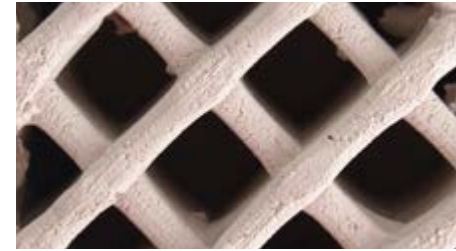
La velocità può regolare in parte anche il flusso di materiale, rendendo la stampa più precisa. Nel caso di velocità molto bassa, come la prima velocità impostata di 10 mm/s, notiamo infatti un perimetro

meno preciso e leggermente più largo che ad una velocità poco maggiore, in cui si regolarizza.

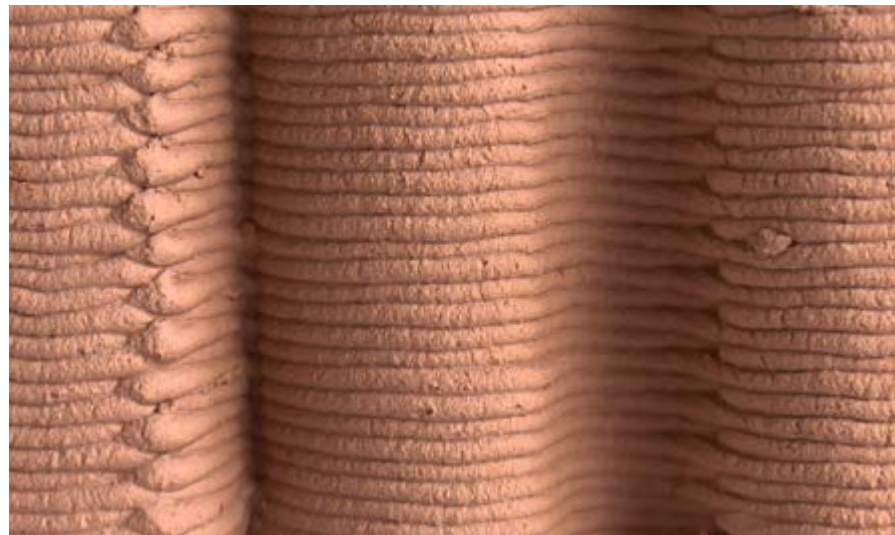
L'impostazione del flusso è molto importante perché permette di adattarsi alle diverse viscosità degli impasti. Preparare ogni impasto manualmente con la stessa viscosità è quasi impossibile ed è quindi difficile prevedere il flusso corretto nella generazione del codice. Conviene quindi effettuare una stampa di prova ogni volta che viene cambiato l'impasto, in modo da poter regolare il flusso dalla stampante.

Il flusso corretto è quello che garantisce uno spessore di parete pari a circa il diametro dell'ugello ma può essere modificato per ottenere spessori minori e maggiori, a seconda del risultato che vogliamo ottenere. Un flusso troppo alto o troppo basso provoca invece grandi deformazioni nel pezzo. Variando il flusso è anche possibile correggere eventuali errori nell'impostazione di altri parametri come l'altezza layer, aumentandolo se troppo alta e diminuendolo se troppo bassa.

Come vedremo più avanti la regolazione del flusso dipende anche da ulteriori parametri e dalla modalità di stampa scelta. Anche in questo caso il comportamento cambia a seconda del materiale e notiamo che il gres, più fine dell'argilla, risulta molto più sensibile alle variazioni di flusso per cui il parametro sarà più difficile da impostare.



8. MODALITÀ DI STAMPA

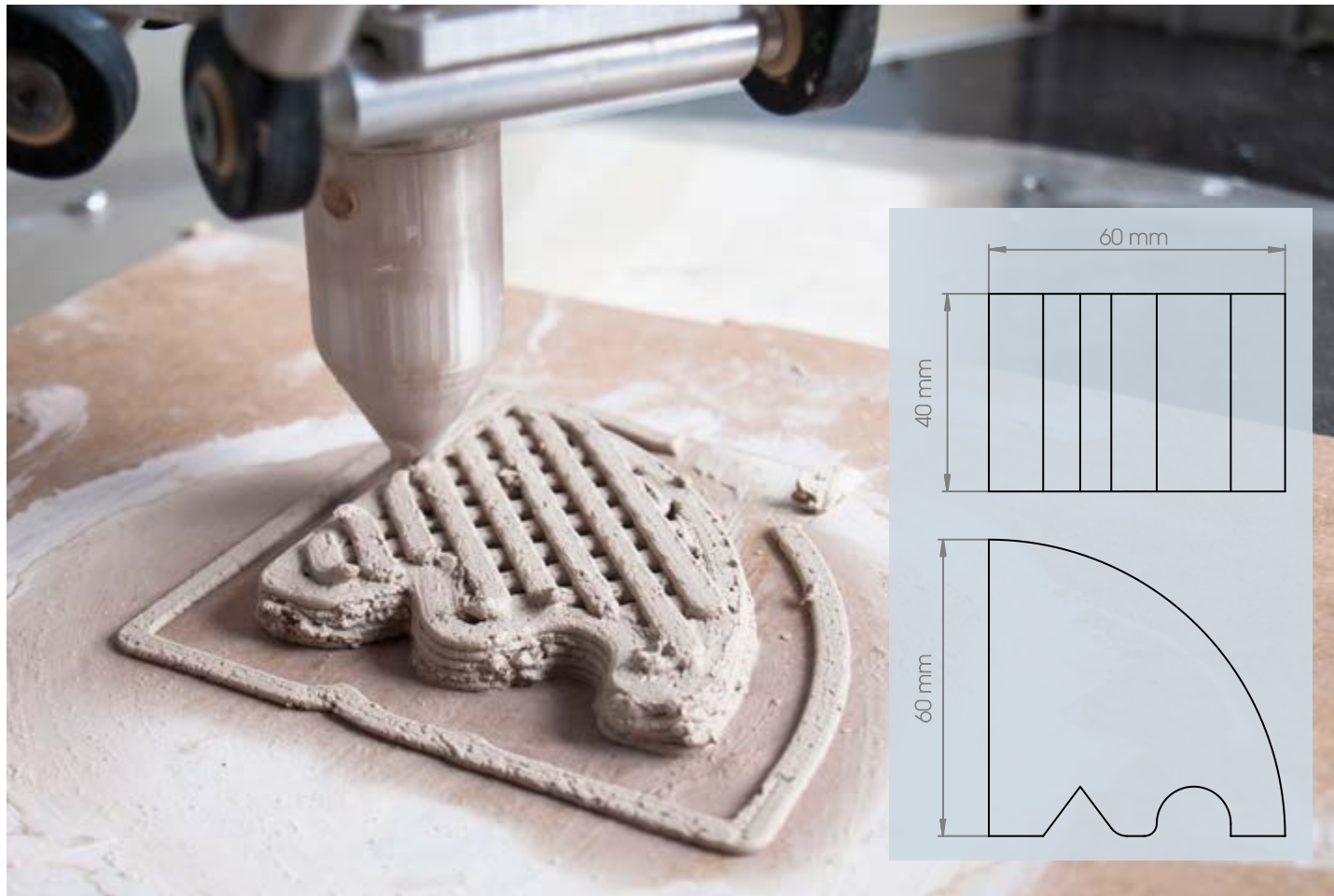


Come modalità di stampa intendiamo il metodo impostato in fase di generazione del codice ed utilizzato per la creazione del pezzo.

La scelta della modalità di stampa non dipende solo dalla forma del pezzo ma anche dal risultato che vogliamo ottenere, sia come qualità e precisione che per la sua futura funzionalità.

Il provino scelto è in questo caso un semplice estruso di dimensioni 60 x 60 mm di base per 40 mm di altezza, e contiene nella sua sezione un lato curvo, un lato piano, e un terzo lato in cui sono presenti spigoli e curve più piccoli.

Bisogna tenere conto che, utilizzando un ugello più piccolo con lo stesso modello e quindi aumentando la risoluzione, i risultati sarebbero sicuramente migliori, ma sarebbe più difficile evidenziare i possibili errori e difetti.



contorno

Un metodo, nel caso in cui l'oggetto debba o possa essere cavo, consiste nello stampare il solo contorno dell'oggetto, e può avvenire in due diverse modalità: una di queste è "spiral", (modalità con cui sono stati stampati anche i campioni precedenti) in cui il contorno esterno dell'oggetto viene stampato con un andamento a spirale continuo, un'altra modalità invece è per perimetri, in cui lo stesso contorno viene stampato ma a sezioni distinte, e dove al cambio di layer l'estrusore deve alzarsi e ripartire, lasciando un segno sulla superficie esterna del pezzo.

La modalità a perimetri consente di aumentare lo spessore di parete a multipli del diametro dell'ugello, finché le dimensioni dell'oggetto lo consentono; i perimetri sono concentrici e vengono aggiunti verso l'interno, in modo da rispettare le dimensioni esterne dell'oggetto.

Un oggetto stampato spiral apparirà più preciso ma sarà più fragile e avrà maggiore tendenza a deformarsi per il ritiro durante l'essiccazione e la cottura, mentre un pezzo stampato con più perimetri sarà più solido e manterrà più facilmente la propria forma (soprattutto la planarità).

base

Per stampare oggetti cavi fatti dal solo contorno con una base chiusa è necessario impostare da codice un riempimento pari a 0 ed un valore di "solid infill bottom" pari ad un multiplo dell'altezza layer. In questo caso bisogna tenere conto che la base deve avere circa lo stesso spessore della parete, per evitare deformazioni o rotture durante essiccazione e cottura dovuti al diverso ritiro.

La stampa della base è un aspetto critico della stampa 3D dei materiali ceramici. Solitamente, se osserviamo dei comuni oggetti in ceramica, il fondo non è mai completamente piatto ma presenta un bordo che funge effettivamente da base mentre la superficie interna è leggermente rialzata o concava. Questo sistema viene adottato per la smaltatura del pezzo, che in questo caso può essere effettuata anche sul fondo, lasciando scoperto solo il bordo a contatto con il forno.

Con la stampa 3D sarebbe impossibile realizzare una base fatta in

questo modo, che invece potrà essere solamente piatta. Una superficie completamente piatta può però rappresentare un problema durante l'essiccamento, in cui è necessario accertarsi che non rimanga a contatto per troppo tempo con il piatto umido, e cercare quindi di spostare il pezzo non appena si riesce a staccarlo. Il piatto umido, tenendo il pezzo incollato, ostacola l'essiccamento ed il ritiro della base che potrebbe spaccarsi. Questo problema si presenta soprattutto nel caso di grandi superfici a contatto con il piatto di stampa e dallo spessore non troppo elevato. Importante è la proporzione, sia tra lo spessore di parete e quello della base, che devono essere quasi uguali, che tra lo spessore della base e le sue dimensioni, che devono essere adeguate in modo da non infragilire il pezzo.

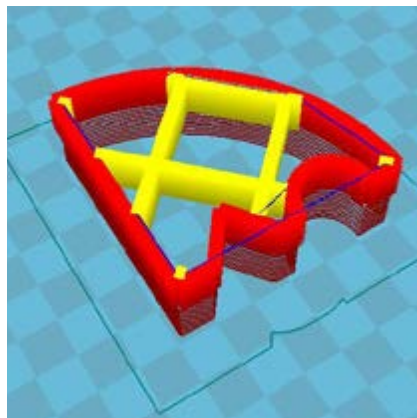
Per quanto riguarda la smaltatura non sarà quindi possibile smaltare la base che rimarrà porosa e del colore originale. Una superficie piana smaltata a contatto con la base del forno fonderebbe incollandosi a questa e spaccandosi.

riempimento

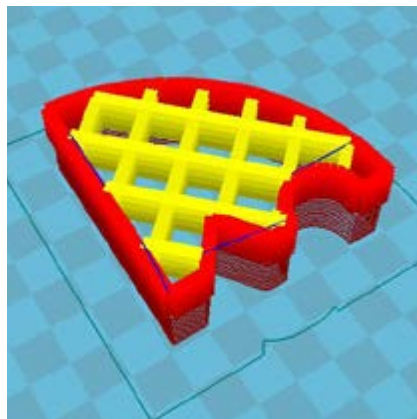
Nel caso il pezzo da stampare non possa essere cavo o abbia delle grandi superfici a sbalzo o orizzontali bisognerà prevedere un riempimento, chiamato fill density su Cura. Il riempimento è un parametro influente poiché serve ad aumentare la solidità strutturale e permette di avere una base d'appoggio al materiale per chiudere le superfici superiori del modello. Stampare il riempimento con un pattern controllato consente di gestire al meglio rigidità, tempo e leggerezza del pezzo.

Il valore si esprime in percentuale ed è pari al quantitativo di materiale che sarà presente nel riempimento di ogni strato rispetto all'aria: un riempimento al 20% significa che ogni strato sarà costituito al 20% da materiale e all'80% da aria. La percentuale di riempimento è molto importante al fine di ottenere una stampa corretta; se impostata troppo alta richiederà maggiori quantitativi di materiale e tempi di stampa molto più lunghi, se troppo bassa sarà difficile chiudere le superfici superiori orizzontali.

Per la stampa 3D fdm solitamente viene usato un riempimento entro il 24%, per quanto riguarda i materiali ceramici nel caso vi siano superfici superiori da chiudere è consigliabile una percentuale che rimanga uguale o superiore al 25%, poiché il peso del materiale e la



img. 27, riempimento del 24%



img. 28, riempimento del 25%

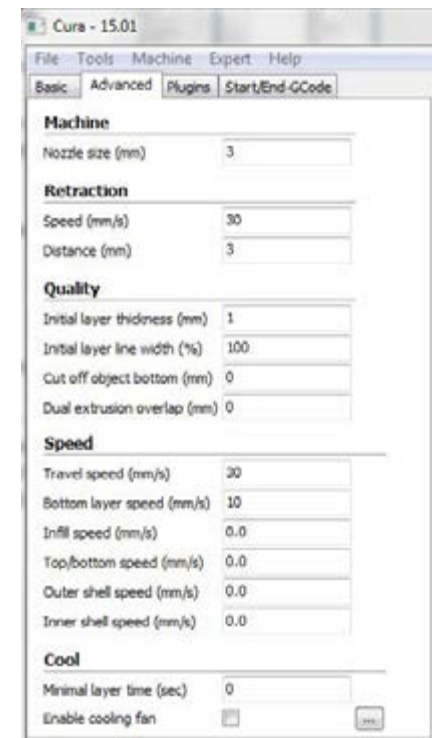
sua viscosità non permettono la costruzione di “ponti” molto ampi ed il materiale di chiusura rischierebbe di crollare all'interno. Un ulteriore problema riscontrato è la scarsa adesione del materiale dell'infill alle linee sottostanti, dovuta allo spazio vuoto tra le linee e al movimento e velocità dell'estrusore, e migliorabile aumentando ulteriormente la percentuale. Maggiore sarà la percentuale usata più stabile e preciso sarà il riempimento.

Esistono diverse tipologie di riempimento, quella che verrà utilizzata è quella prevista dal software Cura, a griglia rettilinea, disposta a 45 gradi rispetto agli assi principali del modello. Diverse tipologie renderebbero la stampa più difficoltosa: una griglia formata da linee rette è di più facile riuscita rispetto ad una trama ad honeycomb ad esempio, in cui il passaggio dell'estrusore rischierebbe di deformare la griglia in corrispondenza dei diversi segmenti degli esagoni che la formano.

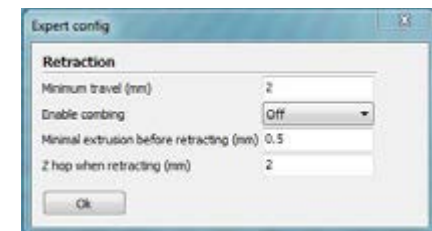
Dal momento che non stiamo più stampando i soli perimetri dell'oggetto è necessario impostare un ulteriore parametro, la “travel speed”. Travel speed è la velocità con cui l'ugello si muove da un punto A a un punto B nel momento in cui non deve essere depositato del materiale. Questa velocità deve essere abbastanza alta, rispetto alla velocità di stampa e alle dimensioni del pezzo, per evitare difetti sul pezzo finale come tracce di materiale estruso per gravità durante lo spostamento.

Altro parametro da tenere in considerazione è l' “infill overlap”, la sovrapposizione di una percentuale di riempimento con il perimetro, che garantisce una migliore adesione del materiale di infill e una maggiore stabilità della griglia (soprattutto con i materiali ceramici ha la tendenza ad essere trascinato e non “attaccarsi” alla parete). Tale percentuale non deve però essere eccessiva o potrebbero emergere difetti dovuti alla sovrapposizione eccessiva di materiale e al suo trascinarsi. Una percentuale del 10% è sufficiente.

Infine un sistema spesso usato nella stampa fdm per migliorare la qualità di stampa è la “retraction”, azione dell'estrusore che ritrae il filamento nei passaggi in cui è necessario che il materiale non venga depositato. In questo caso però non viene abilitata solo per la sua principale funzione quanto per lo “z-hop”, che consiste in un leggero spostamento verso l'alto dell'ugello durante i travel in modo da non farlo passare a contatto con il materiale appena depositato. Si nota infatti che spesso parecchi difetti sono provocati dal passaggio dell'ugello durante i travel che spostano e trascinano parte del materiale. Tale azione risulta molto efficace soprattutto con il sistema Delta.



img. 29, parametri avanzati in Cura



img. 30, parametri di retraction in cura

contorno

Parametri:

Spiral

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell tickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- spiral: on

Perimetri

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell tickness = 3-9 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- spiral: off

Il vantaggio della modalità spiral è la buona finitura superficiale esterna, che non avrà deformazioni dovute allo spostamento dell'estrusore grazie al suo andamento continuo a spirale, ma con il limite di poter fare il solo perimetro dell'oggetto, e quindi uno spessore pari al massimo al diametro dell'ugello, o poco maggiore variando parametri come il flusso.

Con la modalità a perimetro abbiamo gli stessi risultati, ma il pezzo presenta una leggera deformazione dovuta allo spostamento dell'estrusore al cambio di layer, che appare come una linea verticale simile ad una cucitura sulla superficie interna ed esterna del pezzo. Questo difetto appare in ogni modalità eccetto quella spiral.

In termini di tempo un oggetto stampato spiral o con un solo perimetro sono uguali. Anche il peso dei due campioni è analogo, 85 grammi per quello stampato in modalità spiral, 90 grammi per quello a perimetro.

Stampando più perimetri lo spessore del pezzo aumenta verso l'interno, rispettando le dimensioni esterne che subiscono però un leggero allargamento dovuto alla pressione dello strato accanto. Quando si stampano più perimetri è quindi consigliabile abbassare il flusso in modo da avvicinarsi il più possibile allo spessore di parete impostato da codice, per non avere un'eccessiva sovrapposizione dei perimetri ed il successivo trascinarsi del materiale in eccesso.

Avendo abbassato il flusso il peso dei campioni con tre perimetri è inferiore a quello che si poteva prevedere moltiplicando per tre il peso dei campioni precedenti con un solo perimetro, ed è di 158 grammi.



spessore di parete = 3 mm; spiral



spessore di parete = 3 mm



spessore di parete = 9 mm

contorno

Parametri:

Spiral

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- spiral: on

Perimetri

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3-9 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 75 %
- spiral: off

Il vantaggio della modalità spiral è la buona finitura superficiale esterna, che non avrà deformazioni dovute allo spostamento dell'estrusore grazie al suo andamento continuo a spirale, ma con il limite di poter fare il solo perimetro dell'oggetto, e quindi uno spessore pari al massimo al diametro dell'ugello (o poco maggiore variando parametri come il flusso).

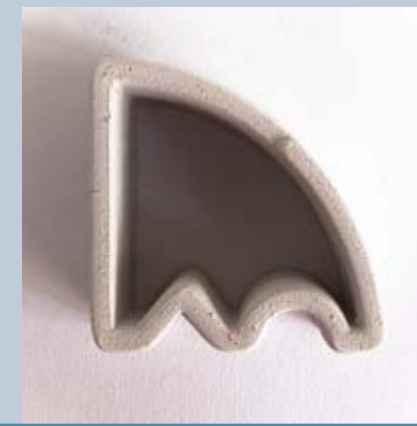
Con la modalità a perimetro abbiamo gli stessi risultati, ma con la leggera deformazione simile a una cucitura causata dallo spostamento dell'estrusore al cambio di layer. Con il gres però il difetto risulta molto meno evidente che con l'argilla rossa.

In termini di tempo un oggetto stampato spiral o con un solo perimetro sono uguali, in questo caso il tempo di stampa è di 7 minuti per entrambi i campioni. Anche il peso dei due campioni è analogo, 72 grammi per quello stampato in modalità spiral, 66 grammi per quello a perimetro, e risulta inferiore a quello dei campioni in argilla rossa.

Stampando più perimetri lo spessore del pezzo aumenta verso l'interno, rispettando le dimensioni esterne che subiscono però un leggero allargamento dovuto alla pressione dello strato accanto. Quando si stampano più perimetri è quindi consigliabile abbassare il flusso (in questo caso al 75%) in modo da avvicinarsi il più possibile allo spessore di parete impostato da codice, per non avere un'eccessiva sovrapposizione dei perimetri ed il successivo trascinamento del materiale in eccesso. In questo caso la linea a cucitura di cambio layer risulta più evidente che nella prova precedente.

In questo caso, a differenza dell'argilla rossa, il peso del campione con tre perimetri è superiore a quello che si poteva prevedere moltiplicando per tre il peso dei campioni precedenti con un solo perimetro, ed è di 152 grammi.

Il tempo di stampa per il campione con tre perimetri è leggermente inferiore al triplo di quelli con un solo perimetro, ed è di 17 minuti.



spessore si parete = 3 mm; spiral



spessore di parete = 3 mm



spessore di parete = 9 mm

base

Parametri:

Spiral + base

- spiral: on
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom thickness = 2.5
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %

Possiamo notare che la costruzione della base cambia a seconda della modalità di stampa: nella modalità spiral questa viene costruita a strati concentrici mentre nella modalità a perimetri segue traiettorie rettilinee. Nel primo caso il riempimento della base risulta meno preciso, a causa degli angoli che diminuiscono man mano che ci si avvicina al centro del pezzo, diventando troppo piccoli per la dimensione dell'ugello.

Un problema che notiamo è un leggero aumento della sezione in corrispondenza della base, causato dallo schiacciamento del materiale. Per migliorare la stampa è quindi utile mantenere un flusso più basso per la base e più alto nel perimetro, in modo da evitare questo difetto per la sovrapposizione di materiale in eccesso nella base ma ottenere un perimetro solido e geometricamente fedele al modello. Nella modalità spiral ad esempio il flusso per la base è stato impostato a circa il 60% mentre per il perimetro, essendo di un solo strato, al 90%. Mantenendo anche il perimetro al 60% la stampa sarebbe comunque riuscita ma la parete sarebbe stata molto sottile.

Perimetri + base

- spiral: off
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 6 mm
- bottom/top thickness = 5 mm
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 70 %

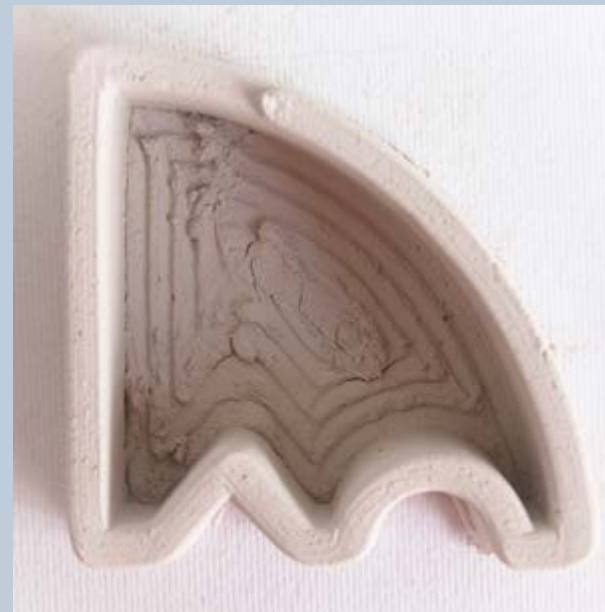
Invece in una modalità a più perimetri il flusso ideale per la base e per la parete non cambia se non leggermente, per cui è possibile impostare anche lo stesso flusso per l'intera stampa, una volta trovata la percentuale ideale.



spessore di parete= 9 mm



spessore di parete= 9 mm



spessore di parete= 9 mm



spessore di parete= 9 mm

riempimento al 25%

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 25 %
- infill overlap = 10 %
- print speed = 20 mm/s
- travel speed = 30 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 60 %

Retraction:

- speed = 30 mm/s
- distance = 3 mm
- z hop = 2 mm

Con infill al 25% e retraction non abilitata abbiamo consistenti deformazioni del pezzo e bave dovute ai travel e al materiale trascinato. Per migliorare la stampa è possibile diminuire il flusso, in questo caso al 60%, in modo da diminuire il trascinamento di materiale e le sovrapposizioni. Un flusso troppo basso rischia però di rendere difficile la stampa dell'infill. Numerosi sono anche i segni sulla superficie esterna dove l'ugello passa dal perimetro all'infill. Non si forma la linea a "cucitura" come nella modalità a perimetri ed i segni di cambio layer hanno una disposizione casuale. I difetti sono evidenti soprattutto in corrispondenza dello spigolo, che si deforma molto. La chiusura del pezzo è buona ma porta i segni del passaggio dell'estrusore a contatto con il materiale durante i travel.

Con infill al 25%, retraction abilitata con z hop e flusso al 60% come per la prova precedente non ci sono più le deformazioni da trascinamento, ma rimane qualche bava provocata dal materiale estruso durante i travel, che viene spinto all'esterno. Anche nella chiusura, che risulta buona, ritroviamo lo stesso difetto, con la presenza di materiale in eccesso quando l'ugello si alza per compiere il tratto di stampa successivo. Aumentando ancora la velocità dei travel è possibile migliorare anche questo difetto. Eliminate le deformazioni dovute al trascinamento da parte dell'ugello è evidente l'azione benefica del perimetro che aiuta a cancellare alcuni errori causati dall'infill e dai travel, per cui si sceglie di effettuare una prova con 2 perimetri esterni.

Con infill al 25%, retraction abilitata con z hop, due perimetri e flusso al 60% la finitura esterna risulta molto migliore. Ricompare la tipica linea a "cucitura" dovuta al cambio di layer ma in due punti. Abbiamo però un'ottima finitura e molti meno errori nelle parti più dettagliate e strette come lo spigolo.

Il peso dei campioni è simile per tutte le prove, con un leggero aumento per quello con uno spessore di parete maggiore, che pesa 157 grammi contro i 140 e 142 dei campioni con uno spessore di parete inferiore. Possiamo notare che l'aumento dello spessore di parete provoca un aumento significativo del peso, soprattutto se confrontiamo i campioni stampati con riempimento a quelli formati dal solo contorno, in cui quello con tre perimetri di parete pesava 158g.

Il tempo di stampa dei campioni non varia abilitando la retraction, rimanendo di 14 minuti, mentre aumenta aggiungendo un perimetro, diventando di 18 minuti.



riempimento = 25 %



riempimento = 25 %; z hop



riempimento = 25 %; z hop; spessore di parete = 6 mm

riempimento al 25%

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 25 %
- infill overlap = 10 %
- print speed = 20 mm/s
- travel speed = 30 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 80 %

Retraction:

- speed = 30 mm/s
- distance = 3 mm
- z hop = 2 mm

Con infill al 25% e retraction non abilitata abbiamo risultati molto migliori di quelli ottenuti con l'argilla rossa. La finitura superficiale è ottima con un leggero difetto su di uno spigolo dovuto ai cambi di layer, ma non sono presenti bave da trascinarsi del materiale.

Anche la chiusura del pezzo è buona ma porta i segni del passaggio dell'estrusore a contatto con il materiale durante i travel, unico difetto particolarmente evidente. La formazione dell'infill inoltre risulta migliore, con meno problemi di adesione nella griglia rispetto all'argilla rossa.

Con infill al 25%, retraction abilitata con z hop e flusso al 60% come per la prova precedente abbiamo un buon risultato ma compare qualche bava provocata dal materiale estruso durante i travel, che viene spinto all'esterno, per cui nel complesso risulta migliore la prova precedente. Migliora invece la chiusura, che non porta più i segni del passaggio dell'estrusore ma solamente qualche bava dovuta al materiale in eccesso estruso quando l'ugello si alza per compiere il tratto di stampa successivo. Aumentando ancora la velocità dei travel è possibile migliorare anche questo difetto.

Con infill al 25%, retraction abilitata con z hop, 2 perimetri e flusso al 60% abbiamo un risultato ancora peggiore, con un comportamento contrario a quello dell'argilla rossa.

Si formano numerose bave sulla superficie esterna, dovute probabilmente al materiale in eccesso. Difficile in questo caso la definizione del flusso ideale, poiché abbassando il flusso per migliorare i perimetri e la finitura esterna si compromette l'infill. Come visto nelle prove dei parametri di stampa questo materiale è molto più sensibile dell'argilla rossa alle variazioni di flusso, a causa della sua finezza. Per lo stesso motivo però risultano migliori le due prove precedenti.

Anche in questo caso il peso dei campioni è abbastanza simile per tutte le prove, con un aumento per quello con uno spessore di parete maggiore, che pesa 157 grammi contro i 128 e 132 dei campioni con uno spessore di parete inferiore. I campioni stampati in gres porcellanato risultano nuovamente più leggeri di quelli in argilla rossa.

Il tempo di stampa dei campioni non varia abilitando la retraction, rimanendo di 14 minuti, mentre aumenta aggiungendo un perimetro, diventando di 18 minuti.



riempimento = 25 %



riempimento = 25 %; z hop



riempimento = 25 %; z hop; spessore di parete = 6 mm

riempimento al 100%

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 100 %
- infill overlap = 0 %
- print speed = 20 mm/s
- travel speed = 30 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 45 %

Retraction:

- speed = 30 mm/s
- distance = 3 mm
- z hop = 2 mm

Nelle prove con infill al 100% il comportamento del materiale è simile a quello riscontrato nelle prove con 25% di infill.

Con infill al 100% e la retraction non abilitata abbiamo grandi deformazioni dovute allo schiacciamento del materiale, anche con un flusso al 45%, e allo spostamento durante i travel. Il pezzo risulta eccessivamente deformato e con una finitura superficiale dai troppi difetti. Si nota che il perimetro “sistema” in parte gli errori nel riempimento.

Con infill al 100%, retraction abilitata con z hop e flusso al 45% come nella prova precedente vi sono molte meno deformazioni ed una finitura abbastanza buona. Ricompare la tipica linea a “cucitura” dovuta al cambio di layer ma in due punti. Il pezzo risulta però ancora deformato ed allargato dallo schiacciamento del materiale, ed anche la verticalità delle pareti non è precisa. Non abbiamo bave esterne come per la prova al 25% di infill ma rimangono quelle sulla superficie di chiusura. Evidente è l'azione benefica del perimetro che cancella alcuni errori causati dall'infill e dai travel, per cui si sceglie anche in questo caso di effettuare una prova con 2 perimetri esterni.

Con infill al 100%, retraction abilitata con z hop, 2 perimetri e flusso al 45% i risultati sono molto migliori. La finitura superficiale è buona, con due sole linee di “cucitura” per il cambio layer, ed anche la fedeltà geometrica è migliore ed il pezzo risulta meno schiacciato. Rimane qualche bava di materiale in eccesso sulla superficie di chiusura.

Il peso dei campioni risulta simile per tutte le prove, per il primo campione è di 197 grammi, per il secondo 212 grammi e per il terzo 205 grammi.

Il tempo di stampa dei campioni rimane invariato per tutte le prove ed è di 30 minuti, quasi il doppio di quello dei campioni stampati con un riempimento del 25%.



riempimento = 100 %



riempimento = 100 %; z hop



riempimento = 100 %; z hop; spessore di parete = 6 mm

riempimento al 100%

Parametri:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 100 %
- infill overlap = 0 %
- print speed = 20 mm/s
- travel speed = 30 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 60 %

Retraction:

- speed = 30 mm/s
- distance = 3 mm
- z hop = 2 mm

Con infill al 100% e retraction non abilitata abbiamo risultati molto migliori di quelli ottenuti con l'argilla rossa. La finitura superficiale è buona con diverse linee del cambio di layer, ma non sono presenti bave da trascinarsi del materiale. Anche la fedeltà geometrica del pezzo risulta migliore a quella ottenuta con l'argilla rossa, con un leggero schiacciamento.

La chiusura del pezzo è buona ma porta i segni del passaggio dell'estrusore a contatto con il materiale durante i travel, unico difetto particolarmente evidente.

Con infill al 100%, retraction abilitata con z hop e flusso al 60% come per la prova precedente abbiamo un risultato migliore, a differenza di ciò che accadeva con il 25% di infill. Abbiamo una sola linea di "cucitura" di cambio layer, ed una buona finitura superficiale. Migliora anche la chiusura, che non porta più i segni del passaggio dell'estrusore ma che risulta leggermente incompleta in alcuni punti vicini al perimetro. Difetto dovuto probabilmente al flusso basso, che possiamo notare anche nell'aspetto un po' secco del materiale nelle pareti.

Con infill al 100%, retraction abilitata con z hop, 2 perimetri e flusso al 60% abbiamo un risultato simile al precedente, in cui aumentano però le linee di cambio layer, alcune disposte anche casualmente. Anche in questo caso l'aspetto del materiale è un po' secco ma abbiamo una superficie di chiusura migliore ed una buona fedeltà geometrica al modello.

Il peso dei campioni risulta simile per tutte le prove, per il primo campione è di 182 grammi, per il secondo 176 grammi e per il terzo 164 grammi. In questo caso i pesi sono molto inferiori a quelli dei campioni stampati in argilla rossa.

Il tempo di stampa dei campioni rimane invariato per tutte le prove ed è di 30 minuti, quasi il doppio di quello dei campioni stampati con un riempimento del 25%.



riempimento = 100 %



riempimento = 100 %; z hop



riempimento = 100 %; z hop; spessore di parete = 6 mm

risultati

In questa fase emergono diverse criticità del processo.

Notiamo subito che la modalità spiral è quella che garantisce maggiore precisione e migliore finitura, ma che risulta anche molto limitante. Permette infatti la costruzione di oggetti cavi con uno spessore di parete pari a circa il diametro dell'ugello, con poche variazioni regolando il flusso. Avremo quindi oggetti molto fragili, in rapporto alle dimensioni del pezzo e dell'ugello scelto.

Anche un eventuale base risulterà fragile dal momento che lo spessore dovrebbe essere uniforme in tutto il pezzo, e quindi anch'essa dovrà essere pari allo spessore di parete.

Una modalità più flessibile è quella a perimetri, in cui possiamo variare lo spessore di parete a multipli del diametro dell'ugello. Aggiungendo più perimetri l'impostazione del flusso deve essere corretta in modo da dare dimensioni precise allo spessore di parete per far sì che non vi siano sovrapposizioni di materiale. In questo caso la costruzione della base risulta migliore e più robusta.

Con questa modalità appare però il difetto sulla superficie causato dal cambio di layer, per cui la finitura cambia rispetto a quella ottenibile con la modalità spiral.

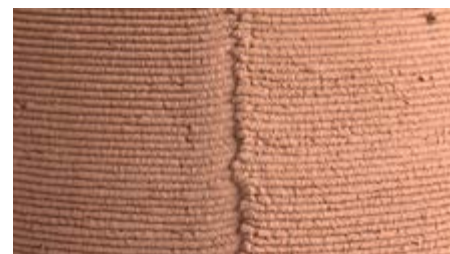
Nel caso l'oggetto non possa essere cavo deve essere stampato con un riempimento, pari o maggiore al 25%. Un riempimento maggiore comporterà l'utilizzo di più materiale e l'aumento dei tempi di stampa ma garantirà una riuscita migliore. La costruzione del riempimento è infatti un'altra fase critica per il processo, a causa dei numerosi spostamenti dell'estrusore e della natura del materiale; in particolare è importante la regolazione del flusso in modo che non venga estruso materiale in eccesso.

Notiamo subito un comportamento diverso a seconda del materiale: con il gres risulta migliore la stampa senza retraction mentre con l'argilla rossa risulta migliore quella con retraction abilitata. La probabile causa è sempre la finezza del materiale, che nel gres permette una buona deposizione nonostante i passaggi dell'estrusore a contatto con il materiale ma necessita di una retraction maggiore perchè non si formino delle bave dovute al materiale in più estruso durante i travel.

Con l'argilla rossa, meno fine e con una percentuale di chamotte, è sufficiente una retraction minore, come quella impostata inizialmente.

Un metodo che permette invece di migliorare la stampa con l'argilla rossa consiste nell'aumentare lo spessore di parete, diminuendo di conseguenza il flusso. Questo metodo funziona meno con il gres a causa della sua sensibilità alla variazione di flusso, che rende difficile trovare una percentuale corretta adatta sia al riempimento che alla parete.

La finitura superficiale in presenza di riempimento sarà inferiore a quella ottenibile con spiral o per perimetri. Avremo diversi segni del cambio di layer, disposti in linea o casualmente, oltre che possibili difetti causati dal materiale in più spinto all'esterno.



9. GLI SBALZI



Modellare e progettare forme corrette per le tecniche additive costituisce il primo passo verso un uso efficiente di esse. Ci sono infatti alcune regole di Design for Manufacturing da tenere in considerazione quando si progetta un oggetto che dovrebbe essere stampato. Quando però non si può intervenire sulla conformazione dell'oggetto è importante sapere come impostare e gestire al meglio la stampa.

Un'aspetto critico di molte tecnologie additive riguarda la gestione degli sbalzi, tra cui possiamo includere anche i ponti, i fori, le cupole, e qualunque figura si inclini rispetto alla verticale. Per la stampa 3d fdm vi sono alcune regole di progettazione e stampa a riguardo che genericamente possono essere applicate anche alla stampa 3d ldm e che verranno utilizzate come punto di partenza.

Con i materiali ceramici abbiamo alcuni importanti svantaggi, come la non immediata solidificazione del materiale e la sua densità elevata che ne aumentano la tendenza al collasso soprattutto in presenza di componenti a sbalzo in cui il peso non viene distribuito sugli strati sottostanti, o l'impossibilità di utilizzare dei supporti, che complicherebbero troppo la stampa e lascerebbero segni molto evidenti su di essa.

Come sempre la viscosità del materiale ha una grande influenza anche in questo ambito, per cui un materiale più viscoso sarà ovviamente più portato a reggere delle componenti a sbalzo.

Con le seguenti prove si intende verificare le tipologie ed i gradi di sbalzo che questa tecnologia consente anche a seconda del diverso materiale, ma soprattutto come poterli gestire al meglio per una buona riuscita della stampa, nei limiti del possibile con diverse viscosità e stampanti.

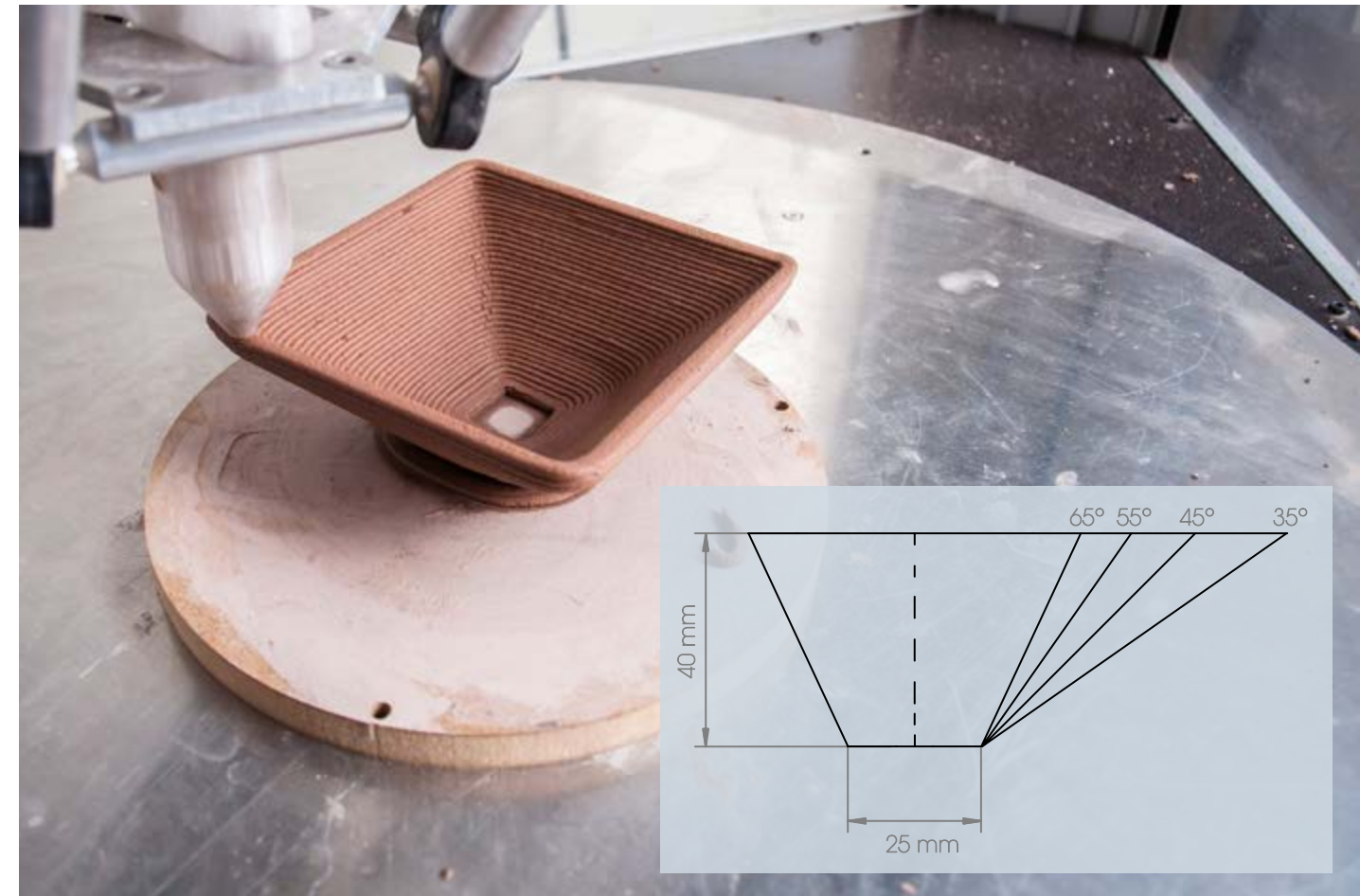
Tali regole di progettazione sono generiche e devono essere sempre contestualizzate, a seconda del modello che si andrà a stampare. Importante è innanzitutto la scelta dell'orientamento di stampa del pezzo che spesso è discriminante per la riuscita della stampa e permette di evitare numerosi problemi dall'inizio. Altri fattori che devono essere presi in considerazione sono ad esempio la presenza di riempimento, che in parte sostiene le pareti a sbalzo impedendole di collassare, o lo sviluppo in altezza del pezzo e quindi il peso che la parte a sbalzo dovrebbe supportare.

Per effettuare le prove si classificano gli sbalzi in rettilinei e curvi, questi ultimi divisi a loro volta in concavi o convessi. Lo sbalzo può poi essere rivolto verso l'esterno o verso l'interno rispetto al corpo di cui fa parte; solitamente uno sbalzo rivolto verso l'interno risulta di

più facile riuscita in quanto il peso rimane all'interno e viene sostenuto meglio dal pezzo.

Per definire l'inclinazione ottenibile si sceglie uno sbalzo rettilineo, in particolare un tronco di piramide rovesciata. Volutamente la forma risulta più critica rispetto ad esempio ad un tronco di piramide non rovesciata, con lo sbalzo rivolto all'interno, o ad un tronco di cono. Infine la forma scelta permette di valutare anche la planarità della parete a sbalzo, cosa che non potrebbe essere fatta con una forma dalla sezione circolare o curva.

Le prove verranno eseguite su modelli cavi in modo da isolare l'effetto dell'inclinazione sulla parete senza il sostegno del riempimento, partendo dal presupposto che questo influenzi poco o positivamente la stampa.



sbalzo rettilineo

Parametri di base:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0 %
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- spiralize: on

A 75 e 65 gradi l'inclinazione non rappresenta un problema per la stampa. Con l'essiccamento emerge un lieve difetto nella parte superiore del pezzo probabilmente dovuto al ritiro, per cui gli ultimi layer si incurvano leggermente verso l'alto arrotondando la forma.

A 55 gradi invece le pareti iniziano presto a cedere portando al cedimento del pezzo. La stampa si sarebbe forse conclusa ma il risultato sarebbe stato inaccettabile per la geometria eccessivamente deformata.

flusso = 150%

Aumentato il flusso al 150%, a 55 gradi la stampa regge abbastanza bene l'inclinazione ma si perde la planarità a causa delle pareti che tendono a cedere verso l'esterno, deformando la figura che alla sua sommità ha i lati che si incurvano invece verso l'interno.

A 45 gradi il pezzo tende ad imbarcarsi già in corso di stampa e cede.

altezza del layer = 1 mm

Abbassando l'altezza del layer da 1.25 mm a 1 mm la stampa migliora sia per la stratificazione maggiore ed un leggero aumento dello spessore di parete, ma anche per il tempo di stampa che aumenta a causa dei layer aumentati, permettendo una maggiore solidificazione durante la stampa.

A 55 gradi di inclinazione non ci sono quasi problemi di cedimento e la stampa non contiene i difetti ottenuti aumentando solamente il flusso.

A 45 gradi iniziano a riemergere i difetti dovuti al cedimento della parete, la stampa si conclude ma risulta leggermente deformata.

A 35 gradi invece il pezzo cede da subito.

spessore di parete = 6 mm

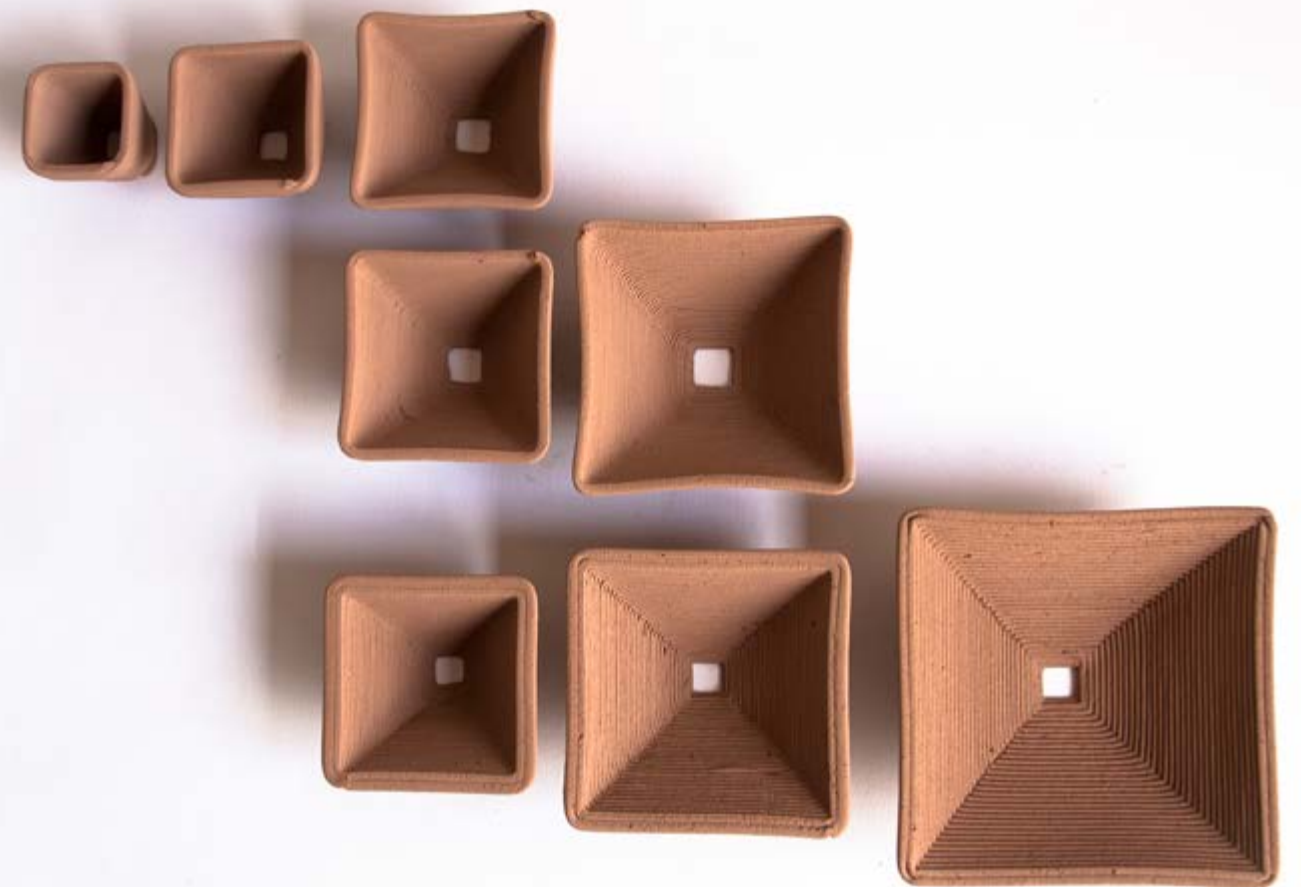
Aumentando il numero di perimetri la stampa subisce molto meno l'influenza dell'inclinazione e mantiene anche meglio la forma e la

planarità, l'unico difetto è la linea causata dal cambio layer presente sulla superficie esterna ed interna del pezzo.

Sia a 55 che a 45 gradi di inclinazione la stampa non ha problemi di cedimento, risulta più precisa e mantiene bene la forma anche dopo l'essiccamento.

A 35 gradi abbiamo un lieve cedimento in corrispondenza degli spigoli che si incurvano verso il basso, a differenza che con un solo perimetro in cui gli spigoli avevano tendenza ad rialzarsi per il peso della parete che invece cedeva.

Si effettua un tentativo anche a 25 gradi ma come previsto l'inclinazione risulta eccessiva e la stampa cede.



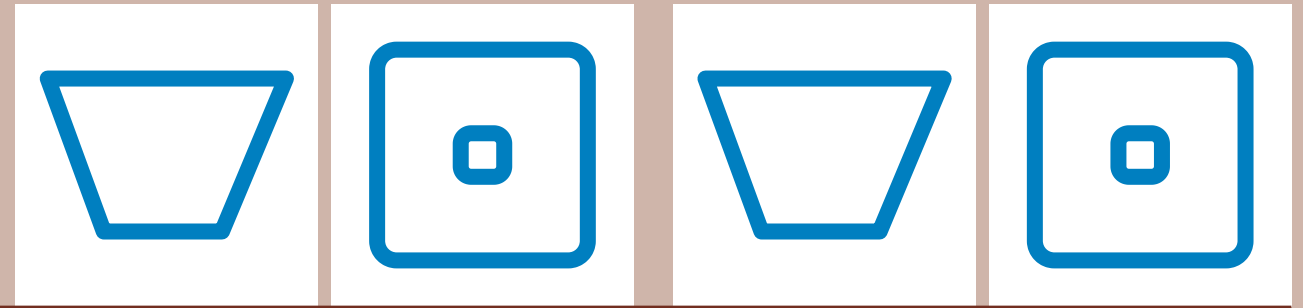
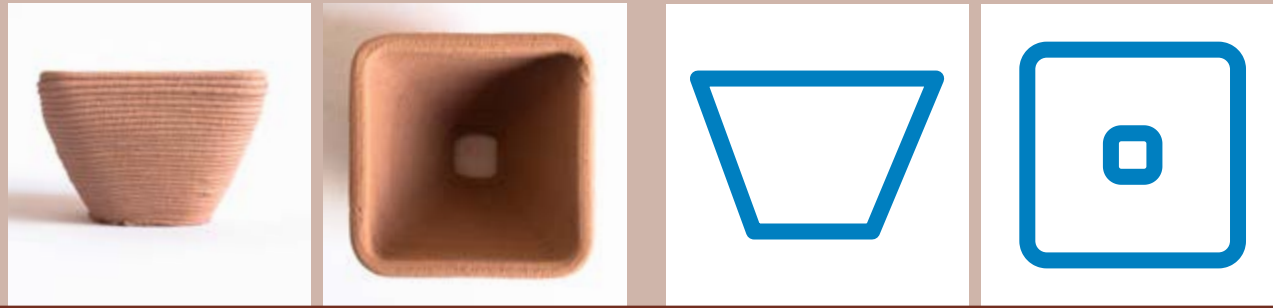
altezza layer = 1,25 mm

flusso = 150 %

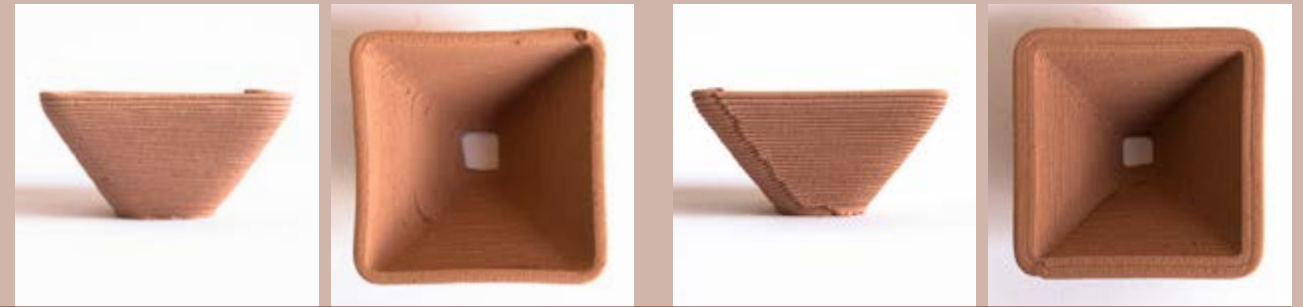
altezza layer = 1 mm

spessore di parete= 6 mm

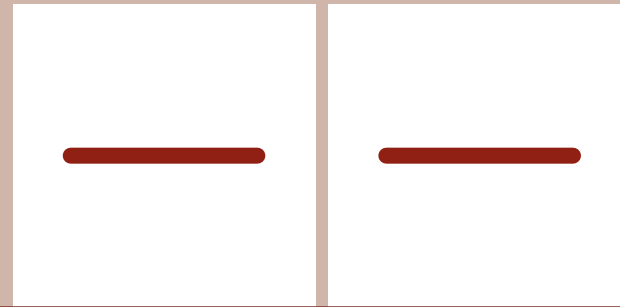
65°



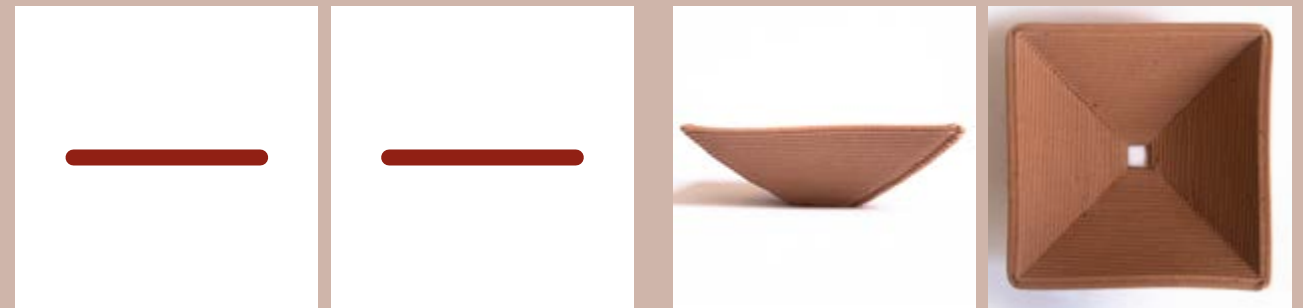
55°



45°



35°



sbalzo rettilineo

Parametri di base:

- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0 %
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %
- spiralize = on

A 75 e 65 gradi l'inclinazione non rappresenta un problema per la stampa. Con l'essiccamento emerge un lieve difetto nella parte superiore del pezzo probabilmente dovuto al ritiro, per cui gli ultimi layer si incurvano leggermente verso l'alto arrotondando la forma.

A 55 gradi invece le pareti iniziano presto a cedere portando al cedimento del pezzo. La stampa si sarebbe forse conclusa ma il risultato sarebbe stato inaccettabile per la geometria eccessivamente deformata.

flusso = 150%

Aumentato il flusso al 150%, a 55 gradi la stampa regge bene l'inclinazione anche se si perde leggermente la planarità a causa delle pareti che tendono a cedere verso l'esterno, deformando la figura che alla sua sommità ha i lati che si incurvano invece verso l'interno.

A 45 gradi il pezzo tende ad imbarcarsi già in corso di stampa e cede.

altezza del layer = 1 mm

Abbassando l'altezza del layer da 1.25 mm a 1 mm la stampa migliora sia per la stratificazione maggiore ed un leggero aumento dello spessore di parete, ma anche per il tempo di stampa che aumenta a causa dei layer aumentati, permettendo una maggiore solidificazione durante la stampa.

A 55 gradi di inclinazione la stampa regge bene l'inclinazione anche se, come nella prova precedente, si perde leggermente la planarità a causa delle pareti che tendono a cedere verso l'esterno.

A 45 gradi però iniziano a riemergere i difetti dovuti al cedimento della parete e la stampa non si conclude.

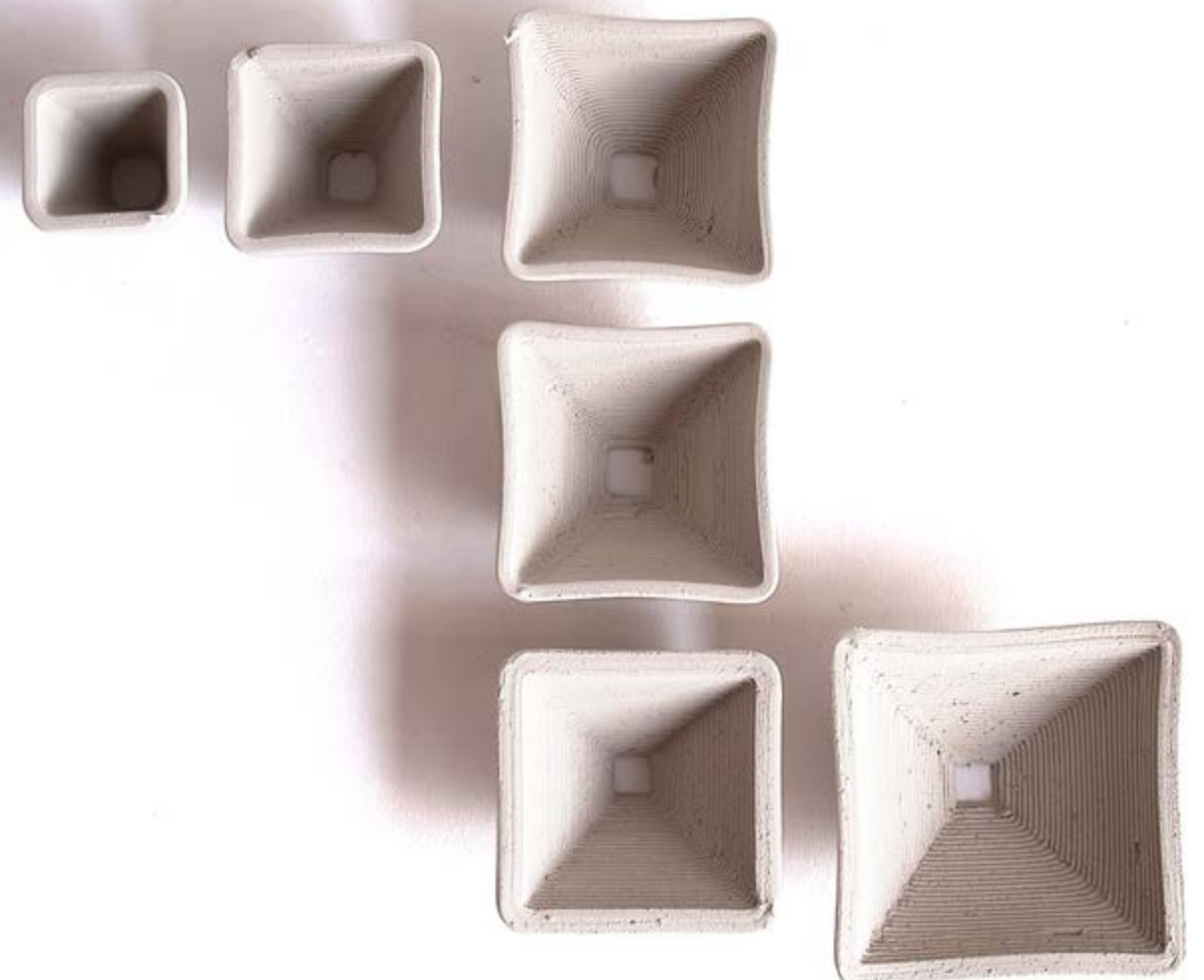
spessore di parete = 6 mm

Aumentando il numero di perimetri la stampa subisce molto meno l'influenza dell'inclinazione e mantiene anche meglio la forma e la planarità, l'unico difetto è la linea causata dal cambio layer presente sulla superficie esterna ed interna del pezzo.

A 55 gradi di inclinazione la stampa non ha problemi di cedimento, risulta più precisa e mantiene bene la forma e la planarità anche dopo l'essiccamento.

A 45 gradi il risultato rimane buono, con una leggera deformazione del pezzo dovuta al cedimento delle pareti che si incurvano verso il basso, come già notato nelle prove precedenti con un solo perimetro. In questo caso però la forma rimane più stabile e si mantiene meglio anche con l'essiccamento e la cottura.

Si effettua un tentativo anche a 35 gradi ma l'inclinazione risulta eccessiva e la stampa cede.



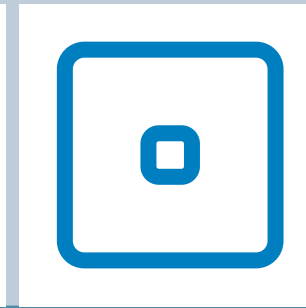
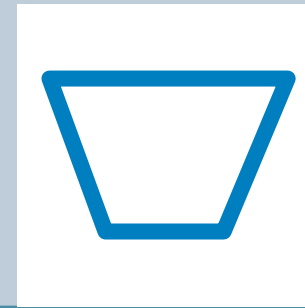
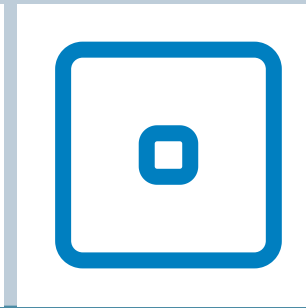
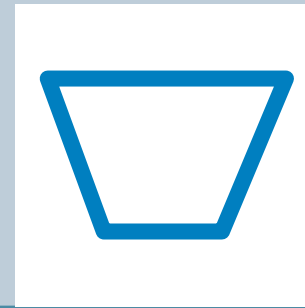
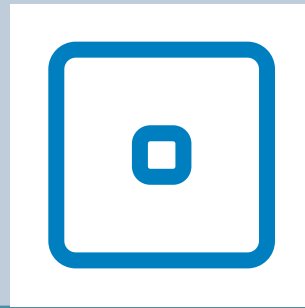
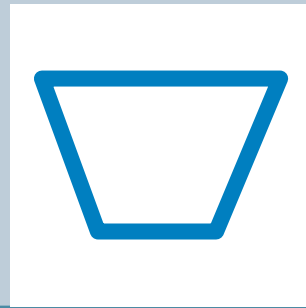
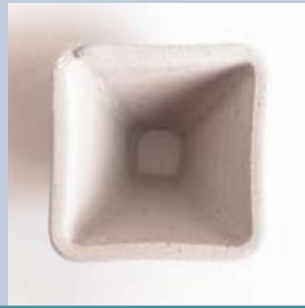
altezza layer = 1,25 mm

flusso = 150 %

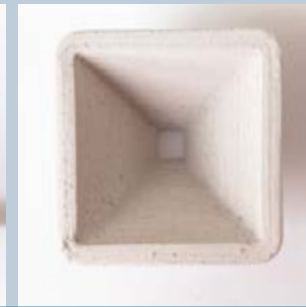
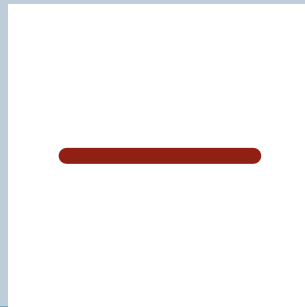
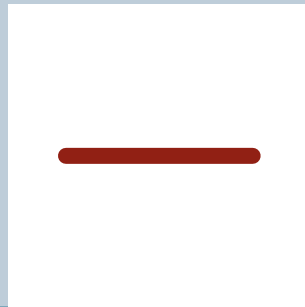
altezza layer = 1 mm

spessore di parete = 6 mm

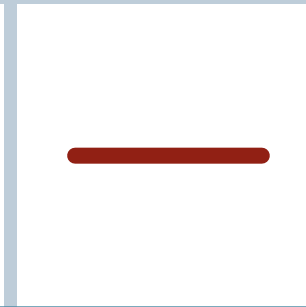
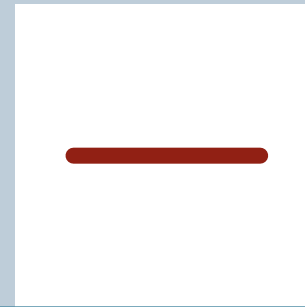
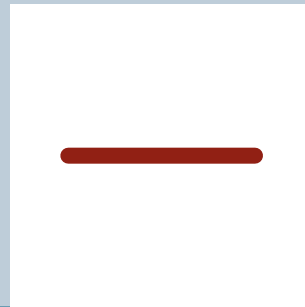
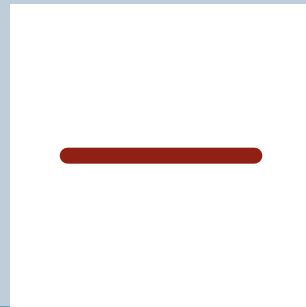
65°



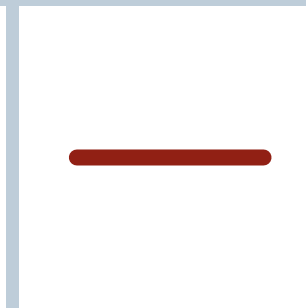
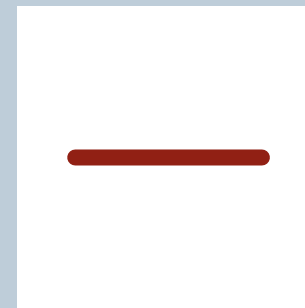
55°



45°



35°



risultati

Dalle prove effettuate notiamo che con i materiali ceramici è possibile, tramite i dovuti accorgimenti, stampare inclinazioni anche maggiori che con la stampa 3d fdm.

Il loro vantaggio consiste nella versatilità del materiale alla modifica dei parametri di stampa, che permette ad esempio di abbassare molto l'altezza del layer, schiacciando il materiale e aumentando così lo spessore di parete in modo da sostenere lo sbalzo.

Il metodo migliore consiste nell'aumentare il numero di perimetri, soprattutto nel caso di superfici piane a sbalzo, poiché aiuta anche a mantenere la planarità.

Anche aumentando il flusso, abbassando l'altezza dei layer o combinando entrambe le azioni si possono ottenere buoni risultati.

In tutti i casi minore è la velocità migliore sarà il risultato, poiché gli strati inferiori hanno il tempo di essiccare e solidificarsi per sostenere quelli superiori, a discapito però dei tempi di stampa.

Infine notiamo che l'argilla rossa consente sbalzi maggiori del gres porcellanato. Questo a causa della chamotte, non presente nel gres, che irrobustisce il materiale rendendolo più stabile nonostante la percentuale di acqua. Ne deduciamo che le terrecotte, con aggiunta di chamotte, saranno più adatte in presenza di sbalzi rispetto alle porcellane, e che maggiore sarà la percentuale di chamotte più stabile sarà l'oggetto durante la stampa.

A riconferma dei risultati ottenuti vengono effettuate ulteriori prove con sbalzi curvi concavi e convessi, con un perimetro solo in modalità spiral e con più perimetri, il metodo ritenuto migliore dopo le prove precedenti. Tutti gli sbalzi curvi scelti hanno un raggio di 5 cm e sono formati dalla rivoluzione di un quarto di circonferenza in quattro diverse direzioni, in modo da ottenere due sbalzi concavi e due sbalzi convessi, interni ed esterni.

Alla prova con gli sbalzi curvi segue una prova sulla formazione di fori e ponti. Vengono prese come riferimento alcune regole usate per la stampa fdm, secondo cui risultano consigliabili e di più facile riuscita fori e ponti aventi la parte superiore non più ad arco di circonferenza ma a cuspid.



sbalzo cruvo

Parametri:

Spiral

- spiral: on
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %

Le prove con gli sbalzi curvi riconfermano quanto ricavato con gli sbalzi rettilinei.

Nelle forme a cupola, concave o convesse, notiamo particolarmente la differenza tra quelle stampate in modalità spiral e quelle con uno spessore di parete maggiore.

Queste ultime non solo risultano più complete ma mantengono meglio anche la forma. In quelle convesse la differenza è meno accentuata ma si può notare che la parte superiore cede prima nel pezzo stampato in modalità spiral, trascinando leggermente anche gli strati precedenti. Nella prova stampata con 3 spessori di parete invece la cupola risulta quasi completa, e ha una maggiore fedeltà geometrica.

Più evidente è la differenza nella cupola concava, stampata eliminando 5 mm dalla parte inferiore in modo da dare una base d'appoggio ai primi layer. Nonostante questo accorgimento nella stampa in modalità spiral buona parte degli strati inferiori cede deformando il pezzo.

Perimetri

- spiral: off
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 9 mm
- bottom/top thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 70 %

Per quanto riguarda la forma a “ventaglio“ la stampa riesce solamente in un verso, mentre nell’altro cede subito. In questo caso gli strati superiori risultano migliori nel pezzo stampato in modalità spiral, probabilmente per il peso inferiore rispetto alla stampa con spessore di parete maggiore. Tale forma risulta la più critica tra gli sbalzi selezionati.



spiral



spessore di parete = 9 mm

sbalzo cruvo

Parametri:

Spiral con base

- spiral: on
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 3 mm
- bottom thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 100 %

Perimetri

- spiral: off
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell thickness = 9 mm
- bottom/top thickness = 0 mm
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 80 %

Mentre con gli sbalzi rettilinei nelle prove precedenti era evidente la differenza tra argilla rossa e gres porcellanato, per cui quest'ultimo risultava meno adatto agli sbalzi, nelle prove con gli sbalzi curvi non vi sono grandi differenze tra i due materiali. Il gres porcellanato tende a cedere di più e soprattutto dopo la cottura le forme risultano più schiacciate.

Come per l'argilla rossa è evidente la differenza tra le prove stampate in modalità spiral e quelle stampate invece con uno spessore di parete maggiore. Queste ultime non solo risultano più complete ma mantengono meglio anche la forma.

In quelle convesse la differenza è meno accentuata ma si può notare che la parte superiore cede prima nel pezzo stampato in modalità spiral. Nella prova stampata con 3 spessori di parete invece la cupola risulta quasi completa, e ha una maggiore fedeltà geometrica.

Più evidente è la differenza nella cupola concava, stampata eliminando 5 mm dalla parte inferiore in modo da dare una base d'appoggio ai primi layer. Nonostante questo accorgimento nella stampa in modalità spiral buona parte degli strati inferiori cede deformando il pezzo.

Per quanto riguarda la forma a "ventaglio" la stampa riesce solamente in un verso, mentre nell'altro cede subito. In questo caso le due prove sono analoghe ma gli strati superiori risultano migliori nel pezzo stampato in modalità spiral, probabilmente per il peso inferiore rispetto alla stampa con spessore di parete maggiore. Tale forma risulta la più critica tra gli sbalzi selezionati.

Notiamo infine che le stampe formate da più perimetri hanno una finitura superficiale peggiore di quelle stampate in modalità spiral, per la presenza di materiale in eccesso sulla superficie. Ciò è dovuto probabilmente ad un flusso leggermente più alto del dovuto, essendo il gres molto sensibile alle sue variazioni.



spiral



spessore di parete = 9 mm

fori e ponti

Parametri:

- spiral: off
- nozzle size = 3 mm
- layer height = 1.25 mm
- shell tickness = 6 mm
- bottom thickness = 0
- fill density = 0
- print speed = 20 mm/s
- diameter = 15 mm
- flow = 80 %

Fori e ponti sono altre figure critiche per la stampa 3D a causa della presenza di parti a sbalzo praticamente orizzontali. Per quanto riguarda la stampa in materiale ceramico si escludono fori e ponti aventi una chiusura superiore completamente orizzontale, quasi impossibili da realizzare a meno che non siano di dimensioni molto contenute, in quanto il filamento di materiale difficilmente rimarrebbe intatto nel passare da una parte all'altra, spezzandosi e cadendo.

Vengono presi in considerazione fori circolari e ponti aventi la parte superiore curva, modificati poi secondo regole tipiche della stampa 3D fdm, secondo cui risultano di più facile riuscita fori e ponti aventi la parte superiore a cuspide. Sullo stesso campione vengono quindi posizionati un foro circolare, un foro a cuspide, un ponte curvo e un ponte a cuspide. La chiusura a cuspide facilita la riuscita della stampa poiché elimina l'ultima parte della curva a tangente orizzontale.

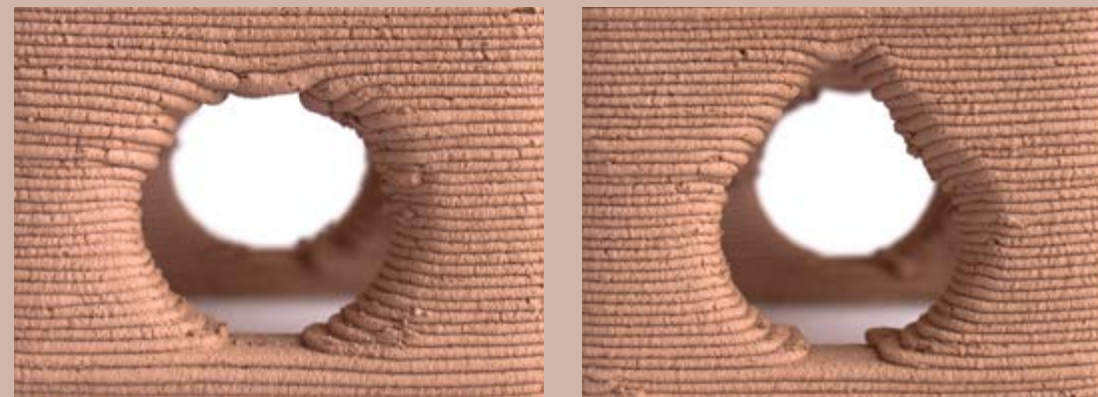
In questo caso il fattore più importante è il rapporto tra le dimensioni del foro/ponte e l'altezza del layer: in più strati si dividerà la figura, ovvero più alta sarà la sua risoluzione, migliore sarà il risultato. La riuscita e la resa finale quindi non dipendono tanto dalle dimensioni del foro o del ponte, quanto dalle dimensioni in rapporto all'altezza del layer usata. Nella creazione di un ponte di piccole dimensioni con un ugello e altezza layer grandi ad esempio la stampa forse riuscirà a completare la figura che avrà però una parte superiore rettilinea e deformata.

Nella stampa dei campioni emerge un'ulteriore problematica legata al processo, per cui si formano delle bave di materiale quando l'ugello si sposta da un punto all'altro senza stampare, rovinando in questo caso il profilo dei fori e dei ponti. Notiamo un accumulo di bave di materiale soprattutto nel punto in cui l'ugello riprende la stampa. L'errore può essere in parte corretto tramite la funzione di retraction e con l'impostazione di una velocità di travel abbastanza alta, ma l'efficacia dipende dalla viscosità dell'impasto ed il segno non verrà mai completamente eliminato.

ponti



fori



ponti

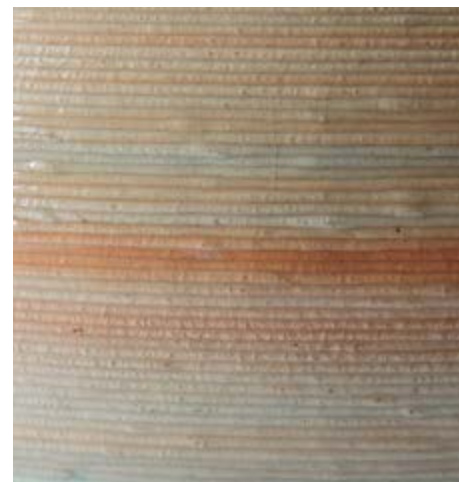


fori





10. FINITURE



Un'altro grande vantaggio dei materiali ceramici consiste nelle numerose lavorazioni e tipologie di finiture possibili, che permettono di modificare l'aspetto e il colore del materiale prima e dopo la sua formatura, in questo caso la stampa.

lavorazioni post stampa

Dopo la stampa il pezzo può subire ancora lavorazioni e ritocchi prima di essere cotto e diventare un prodotto finito.

aggiunta di materiale

Una prima possibilità consiste nell'aggiunta di materiale, sia per ritoccare elementi non riusciti nella stampa sia per aggiungere componenti che sarebbe stato difficile o impossibile stampare. Questo processo deve avvenire poco dopo la stampa, in modo che il pezzo non asciughi eccessivamente o il materiale aggiuntivo non farebbe presa. Per facilitare la presa occorre ungere le estremità delle parti da unire con della barbotina. Nell'aggiunta di materiale bisogna ricordare che un pezzo stampato in 3D ed un componente lavorato in altro modo, modellato a mano per esempio, hanno una finitura molto diversa. Per uniformare le due parti è possibile ad esempio lisciare il pezzo per eliminare la visibilità dei layer, come spiegheremo in seguito.

lavorazioni meccaniche

Alcune ore dopo la stampa il pezzo acquista la cosiddetta "durezza cuoio" e quando è in questo stato può essere maneggiato e subire lavorazioni o decorazioni di tipo meccanico come il taglio di piccole

parti, svuotamenti, scanalature o incisioni. Queste lavorazioni sono utili nel caso si debba rifinire il pezzo eliminando eventuali bave, come quelle lasciate durante i travel, o per creare a posteriori dei fori che avrebbero complicato la stampa. Per una buona riuscita della lavorazione è necessario procurarsi strumenti adeguati e prestare attenzione a non deformare il pezzo ancora morbido.

lisciatura

Altra utile lavorazione consiste nella lisciatura del pezzo, nel caso si vogliano eliminare i segni dei layer. In questo caso è necessario lisciare manualmente il pezzo tramite una spugnetta umida, per poi lasciarlo asciugare lentamente e al riparo, in quanto l'operazione aumenta il rischio di rotture. La lisciatura può avvenire sia poco dopo la stampa, con il rischio però di deformare il pezzo, che con il pezzo quasi completamente secco, risultando però più difficoltosa e rischiosa per la formazione di spaccature. La facilità di lisciatura e l'effetto finale cambiano a seconda del materiale di base. Con un'argilla



img. 31, strumenti per la lavorazione della ceramica



chamottata ad esempio, in particolare se questa è a grana grossa, rimarranno dei granuli sporgenti sulla superficie del pezzo liscio. La porcellana al contrario risulterà molto liscia ma anche più difficile da lavorare poiché da secca assorbe meno facilmente l'acqua, per cui è consigliabile lisciarla quando è ancora abbastanza umida.

rivestimenti ceramici

I trattamenti superficiali, in questo caso detti rivestimenti ceramici, servono principalmente a proteggere la superficie della ceramica cotta, chiudendone le porosità. Rendono gli oggetti impermeabili e più resistenti all'attacco degli agenti esterni, ne facilitano il lavaggio e la pulizia, oltre ad avere una funzione decorativa sia modificando la qualità della superficie, che può diventare opaca, lucida o satinata, che colorandola.



In genere vengono chiamati vetrine o cristalline quando sono trasparenti e smalti quando sono colorati e opachi. Questi vengono stesi ad umido in strato sottile sull'oggetto e fissati ad esso in cottura per azione del calore che ne provoca la fusione.

Le materie prime che li compongono sono praticamente le stesse che servono a produrre i vetri, come la silice, il borace, il carbonato di calcio e di sodio, mentre per renderli colorati si impiegano dei composti inorganici. I più comuni sono gli ossidi dei metalli, che possono

agire come coloranti, quando si legano chimicamente ai componenti della vetrina, o come pigmenti, quando non si legano chimicamente ai componenti della vetrina ma rimangono dispersi sotto forma di polvere finissima formando una sospensione.

Gli smalti si possono acquistare in negozi di forniture di ceramica sotto forma di liquidi oppure in polvere da stemperare in acqua, alcuni sono già pronti all'uso altri possono essere miscelati e creati.

Lo smalto può poi essere applicato con diversi metodi, usati singolarmente o abbinati: è possibile versare lo smalto sull'oggetto o immergere direttamente l'oggetto nello smalto, mentre per rese più artistiche è possibile dipingere con lo smalto tramite un pennello o una spugna. La metodologia prevalente però consiste nello spruzzare lo smalto tramite una pistola spray, posizionando l'oggetto su di una piattaforma girevole all'interno di una zona di aspirazione, fino a quando si crea uno spessore uniforme. Questo metodo permette di ricavare una smaltatura più sottile. Nel caso di oggetti cavi l'interno viene smaltato versandovi lo smalto, per poi spruzzare l'esterno.

Una particolarità dei colori per le ceramiche è il cambiamento di tonalità che si verifica con la cottura a seconda delle condizioni in cui questa avviene, per cui è buona norma testare gli smalti su forme di prova per capire quale sarà la qualità finale del manufatto. Anche la reazione a seconda del materiale di base dell'oggetto può variare, lo smalto può distaccarsi o screpolarsi a causa del ritiro, o venire più o meno assorbito, cambiando l'effetto visivo. Prima di usare uno smalto è meglio controllare che esso sia compatibile con l'oggetto da ricoprire durante l'essiccazione e la cottura.



Con la smaltatura di un oggetto stampato in 3D è possibile ottenere diversi effetti. L'applicazione di cristallina con un buono spessore renderà la superficie liscia lasciando però i layer visibili, soprattutto se l'oggetto è stato stampato con una bassa layer height ed un ugello piccolo. Applicando invece uno smalto di colore coprente nasconderemo quasi del tutto i layer, anche senza lisciarne la superficie.

Come già visto nel capitolo 8 un aspetto critico è l'impossibilità di smaltare la base degli oggetti in ceramica stampati in 3D, in cui non è presente un bordo o un fondo concavo, e la superficie è a contatto con il forno.

trattamenti dell'impasto

Altri metodi di finitura consistono nell'agire direttamente sull'impasto, per poi avere una resa differente con la stampa. Anche ai pezzi stampati in questo modo è possibile applicare in seguito i trattamenti descritti precedentemente.

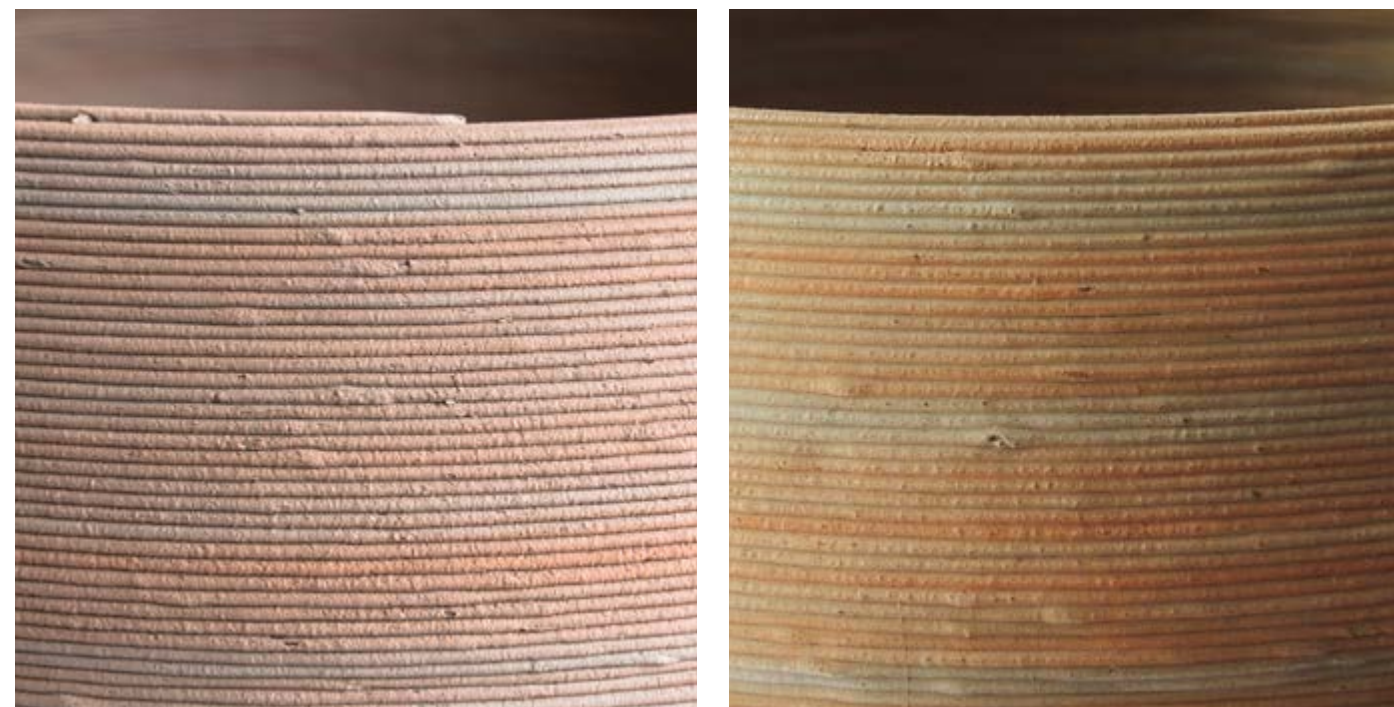
ingobbio



E' possibile colorare direttamente il corpo dell'argilla aggiungendo all'impasto dell'ingobbio. Gli ingobbi sono miscele più o meno fluide di argilla ed acqua, usate per coprire o decorare, con un colore diverso, l'argilla usata per creare il pezzo. Il colore naturale dell'argilla è spesso modificato aggiungendo un ossido metallico colorante. Essendo già allo stato fluido nel preparare un impasto con l'ingobbio è necessario ridurre leggermente la percentuale di acqua. L'effetto dell'ingobbio varierà a seconda del colore utilizzato e del materiale di partenza, è consigliabile eseguire delle prove per valutarne il risultato. Anche il colore dell'impasto, del pezzo asciutto e del pezzo cotto potrebbero variare in diversa misura. Infine prima di usare un ingobbio è necessario controllare che esso sia compatibile con il materiale dell'oggetto da ricoprire durante l'essiccazione e la cottura.

uso di più materiali contemporaneamente

Un'altro metodo per modificare l'aspetto dell'oggetto finale senza l'utilizzo di aggiunte consiste nell'utilizzo contemporaneo di più materiali. Nel caricamento del serbatoio è possibile infatti inserire diversi materiali in modo che vengano estrusi sequenzialmente e il pezzo finale appaia stratificato di diversi colori, a seconda dei materiali scelti. Prima di mescolare diversi materiali è necessario accertarsi che siano compatibili, ovvero che abbiano la stessa temperatura di cottura e percentuali di ritiro simili. Ad esempio è possibile usare lo stesso materiale, in parte del colore originale, in parte colorato in pasta con ingobbio.





11. CRITICITÀ



Durante la sperimentazione sono emerse alcune criticità tipiche del processo. Alcune sono risolvibili ed evitabili soprattutto dopo aver maturato esperienza nella preparazione degli impasti e nel caricamento del materiale, ma soprattutto dopo aver collaudato il sistema, stabilito la pressione ideale, imparato quali possono essere i segnali che precedono l'errore. Altre invece sono caratteristiche intrinseche del processo, possono essere contrastate in modo da ridurre l'effetto ma non possono essere del tutto eliminate, almeno attualmente e con la strumentazione disponibile.

segni del cambio di layer

Prima e fondamentale criticità del processo riguarda il tipico segno simile ad una cucitura che si forma sul pezzo a causa del cambio di layer che compie l'ugello per alzarsi, a meno che questo non venga stampato in modalità spiral. In presenza di riempimento non avremo una sola linea ma diverse, o addirittura dei punti isolati. Tale caratteristica è ineliminabile e può essere resa meno evidente abbassando l'altezza del layer e impostando un flusso/velocità corretti. Spesso è così evidente ed importante da influenzare l'aspetto del pezzo e non essere più un difetto quanto una caratterizzazione, che può più o meno essere apprezzata, dell'oggetto stesso e della sua lavorazione.



difetti nei travel

Questa problematica emerge soprattutto nella stampa di oggetti con un profilo aperto e all'interno del riempimento, dove però non risulta un problema poiché questo non è quasi mai visibile. Consiste nell'estrusione per gravità di materiale durante i travel, quando l'ugello si sposta da un punto all'altro senza stampare. Questo provoca un accumulo di bave di materiale soprattutto nel punto in cui l'ugello riprende la stampa. Le bave possono essere poi rimosse a pezzo asciutto, rendendo meno evidente il difetto. Tale errore è in parte risolvibile tramite la funzione di retraction, e con l'impostazione di una velocità di travel abbastanza alta, ma l'efficacia dipende dalla viscosità dell'impasto: con un impasto troppo molle il materiale tenderà comunque a scendere per gravità all'interno dell'estrusore.

- impasto
- codice



intasamento

L'intasamento dell'estrusore può verificarsi in caso di granuli e grumi dell'impasto o per la presenza di corpi estranei al suo interno. Soprattutto se prepariamo un impasto a partire da materiale in granuli è necessario aspettare che questi abbiano assorbito acqua a sufficienza per essere miscelati, in modo che non rimangano pezzi solidi. Inoltre sia durante la preparazione dell'impasto che nel caricamento

- impasto
- caricamento del serbatoio

del serbatoio è importante accertarsi che non vi entrino corpi e materiali estranei, come ad esempio pezzi di materiale secco o scaglie di vernice della frusta. Nel sistema a cartucce anche un materiale con molta chamotte poco fine potrebbe intasare la siringa.

bolle

La formazione di bolle avviene a causa di uno scorretto caricamento del serbatoio. All'inizio è normale la presenza di alcune bolle, che scompaiono acquisendo esperienza e manualità. Bolle di piccole dimensioni provocano qualche difetto sul pezzo ma non compromettono la stampa mentre bolle più grandi possono rovinarlo in maniera più consistente e addirittura interrompere il flusso di materiale per qualche secondo, rendendo necessaria l'interruzione della stampa.

- caricamento del serbatoio



cambi di pressione

Gli sbalzi di pressione provocano variazioni del flusso del materiale ed appaiono sul pezzo stampato come assottigliamenti ed allargamenti sequenziali dello spessore di parete. Questo può accadere in caso di un impasto un po' troppo viscoso per la pressione massima esercitabile dal compressore, che quindi si scarica/ricarica molto frequentemente. E' consigliabile trovare una viscosità ideale estraribile a poco meno della pressione massima esercitabile, e regolare il compressore correttamente in modo che la mantenga.

- impasto
- gestione del compressore



collasso della stampa

Il collasso della stampa può avvenire a causa di un impasto troppo liquido o in presenza di geometrie inadatte come sbalzi, forme sproporzionate in altezza o grandi superfici piane. Per quanto riguarda l'impasto sono necessari un dosaggio corretto ed una buona preparazione e, nel caso risulti comunque poco viscoso, una stampa lenta che permetta una sufficiente solidificazione degli strati in corso di stampa. Fondamentale è anche la progettazione del pezzo da stampare in modo che sia adatto alla stampa e all'impasto utilizzato. Se presenta ad esempio grandi sbalzi o un'altezza elevata sono necessari un impasto sufficientemente viscoso, uno spessore di parete adeguato, ed un materiale adatto con una buona percentuale di chamotte.

- impasto
- geometria
- scelta del materiale



formazione di spaccature

La formazione di spaccature nel pezzo può avvenire a causa di un essiccamento troppo rapido e disomogeneo o di forme che non permettono un ritiro uniforme del materiale. Importante è la gestione del pezzo in questa fase, che deve avvenire in un'atmosfera protetta senza correnti o fonti di calore, ma con una buona umidità in modo che il processo sia graduale. Per quanto riguarda il ritiro invece la geometria del pezzo deve essere formata da spessori il più possibile uniformi, tenendo conto che le forme curve mantengono meglio la forma di quelle più geometriche, e che gli spessori sottili tendono a deformarsi di più. Anche l'utilizzo della ventilazione in corso di stampa può facilitare la formazione di crepe e rotture.

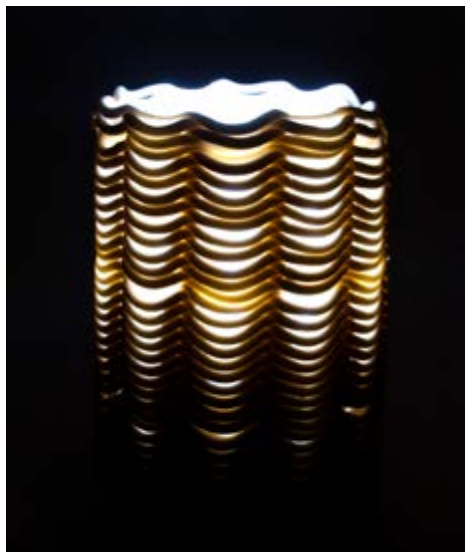
- essiccamento
- geometria



Influenza di temperatura e clima

Anche l'influenza della temperatura e del clima può essere considerata una criticità, in quanto fattore poco controllabile che condiziona sia l'impasto che l'essiccamento del pezzo. Soprattutto se ci si trova in un ambiente poco isolato è necessario tenerne conto in fase di preparazione dell'impasto che, come si può leggere nel capitolo 4, d'estate o con un clima secco dovrà essere un po' più umido, ed in fase di essiccamento, posizionando il pezzo al riparo da fonti di calore o correnti e prevedendo alla sua copertura.

- Impasto
- Essiccamento



12. PROGETTARE PER LA STAMPA



vantaggi della stampa 3D

Perché stampare la ceramica in 3D?

La stampa 3D della ceramica al contrario di quella della plastica non nasce come tecnologia di prototipazione rapida ma come tecnologia di produzione vera e propria, l'oggetto stampato non è un prototipo che poi verrà realizzato con altre tecnologie ma è un prodotto finito. Si colloca in una posizione intermedia tra quella dell'industria e quella dell'artigianato, consentendo una produzione veloce ed automatizzata di pezzi che però sono unici e personalizzabili, con diversi vantaggi che la rendono un'importante innovazione nel campo delle lavorazioni della ceramica.

Il costo della produzione è quasi interamente limitato a quello iniziale dell'attrezzatura, ovvero della stampante e del sistema di estrusione, senza bisogno di stampi e altre attrezzature dedicate, della materia prima, ed infine a quello di finitura e cottura comuni ad ogni processo di produzione della ceramica. Le stampanti utilizzate sono di tipo open source o stampanti desktop fdm adattate alla stampa della ceramica, dal basso e medio costo, anche se iniziano ad apparire in commercio sistemi di estrusione e stampanti dedicati.

Viene quindi completamente eliminata la fase di preparazione dello stampo, con vantaggi sia dal punto di vista dei costi che dei tempi. La produzione di eventuali prototipi può avvenire anch'essa con la stessa tecnologia, con maggior efficacia e minor perdita di tempo ma anche di materiale, poiché nel caso i pezzi non vengano cotti sono riciclabili. Il tempo effettivo per la stampa del pezzo è estremamente ridotto rispetto a quello della maggior parte delle tecniche di lavorazione tradizionali ed anche rispetto alla comune stampa 3D in materiale polimerico.

La stampa 3D infine consente una grande libertà formale in cui la complessità del pezzo non incide sui tempi ed i costi di produzione, e in cui non vi sono vincoli riguardanti sottosquadri, cambi di sezione o angoli di sforno. A causa della natura del materiale, che viene estruso a freddo ad una viscosità limitata solidificandosi per essiccamento graduale, tale libertà formale non è pari quella concessa dalla stampa fdm, e richiede alcuni accorgimenti soprattutto per pezzi sproporzionati in altezza e con grandi parti a sbalzo. In compenso abbiamo la completa "fusione" dei layer tra di loro che consente di produrre oggetti a tenuta di liquido e resistenti come pezzi analoghi prodotti con

tecnologie tradizionali.

Infine dopo essere stato stampato il pezzo può subire tutte le lavorazioni tipiche della ceramica, con una varietà infinita di possibili finiture. Si tratta di un processo semplice, che probabilmente richiede meno esperienza di una tecnica di tipo artigianale, ma che necessita di una buona conoscenza sia del materiale che delle tecnologie additive.

regole di progettazione

Nonostante permetta una grande libertà formale la stampa 3D, come ogni tecnologia di produzione, ha alcune regole di progettazione caratteristiche che si rivelano necessarie ai fini di ottenere un risultato ottimale. La conoscenza del materiale e delle sue proprietà deve essere unita a quella della tecnologia, adattando e rielaborando i principi generali della stampa 3D alla ceramica.

materiale

Importante innanzitutto è quindi una buona conoscenza del materiale, delle sue caratteristiche e proprietà, delle diverse tipologie e delle loro principali applicazioni, delle possibilità e dei limiti che offre. Vi sono alcune regole generali da tenere in considerazione che riguardano le principali proprietà del materiale, utilizzate in tutte le tecniche di lavorazione della ceramica. Sono caratteristiche comuni a tutti i materiali ceramici ma variano a seconda della tipologia di materiale scelto, per cui è necessario scegliere quello più adatto alle proprie esigenze, alla funzione dell'oggetto progettato ed alla sua forma. I materiali ceramici sono estremamente vari e versatili ma proprio per questo la scelta della tipologia, della lavorazione e della finitura adatta non sono facili.

Fondamentali sono considerazioni di tipo meccanico: sono materiali fragili e per nulla duttili per cui



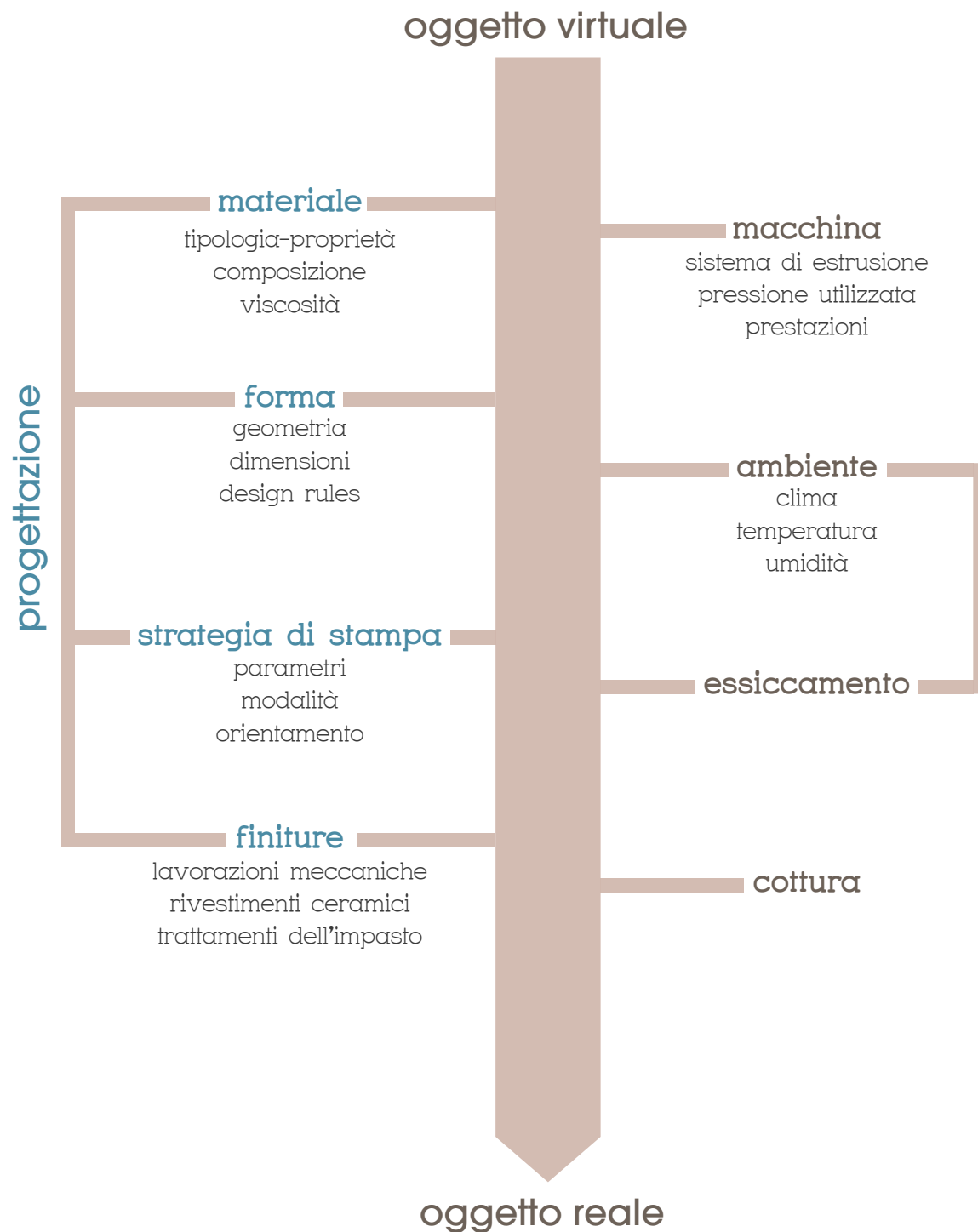
non devono essere usati in applicazioni che includono urti e forti sollecitazioni che ne potrebbero causare la frattura. Per lo stesso motivo bordi e angoli esterni ed interni devono avere smussi e raccordi e le filettature vanno evitate, poiché difficili da fabbricare e senza un'adeguata resistenza in servizio.

Inoltre sono molto più resistenti a compressione che a trazione e gli oggetti devono essere progettati di conseguenza, in modo da subire maggiormente sforzi di compressione ed eliminando il più possibile quelli a trazione.

Il ritiro del materiale durante essiccamento e cottura, soprattutto per alcuni materiali, è elevato e deve essere tenuto in considerazione nel dimensionamento, nella scelta delle tolleranze, ma anche nella progettazione della forma. Per sapere la percentuale di ritiro di un dato materiale la soluzione migliore consiste nell'effettuare delle prove, preparando delle lastre rettangolari di materiale e misurandole prima e dopo essiccamento e cottura. Acquistando un impasto già pronto invece l'azienda fornitrice dovrebbe comunicare i dati riguardanti il suo ritiro. Come regole generali è noto che le terraglie ed i refrattari, soprattutto se con una percentuale elevata di chamotte, ritirano meno delle porcellane e dei gres, e che più un impasto contiene acqua più avrà tendenza a ritirare. Il ritiro del materiale non provoca solo una diminuzione del volume ma può deformare o addirittura provocare delle spaccature nel pezzo. A seconda del materiale scelto è necessario dimensionare l'oggetto con un'abbondanza pari alla sua percentuale di ritiro prevista, mentre un'altra regola di base consiste nell'uniformare il più possibile gli spessori che lo formano. Anche attraverso la forma è possibile agevolare e prevedere il ritiro, secondo modalità che verranno illustrate più avanti.

A seconda della funzione di ciò che andiamo a progettare è necessario scegliere anche il materiale e la finitura più adatte. Come già visto nei capitoli 3 e 6 vi sono diverse tipologie di materiali ceramici e innumerevoli composizioni diverse tra cui scegliere, acquistando impasti già pronti o componendoli personalmente. Alcuni sono più adatti alle alte temperature o agli shock termici, altri più resistenti agli sforzi, altri più adatti a contenere liquidi, alcuni sono porosi altri più compatti, alcuni opachi altri lucidi o addirittura traslucidi, a loro volta trattabili con diversi tipi di finiture colorate, trasparenti, metalliche. Vi sono poi materiali più adatti alla stampa e altri meno, con comportamenti diversi a seconda della tipologia, della plasticità, della finezza.

	terraglie + chamotte	terraglie - chamotte	porcellane	gres	refrattari
stampabilità	● ●	● ● ●	● ● ●	● ● ●	● ●
finezza	●	● ●	● ● ●	● ● ●	●
ritiro	●	● ●	● ● ●	● ● ●	●
plasticità	● ● ●	● ● ●	●	●	● ●
porosità	● ● ●	● ●	●	●	● ● ●
fragilità	●	● ●	● ● ●	● ●	●
sbalzi	● ● ●	● ●	●	●	● ● ●
riempimento	●	● ●	● ● ●	● ● ●	●



Fattori e agenti che influenzano la riuscita della stampa

tecnologia

Scelto il materiale è necessario tenere conto di ulteriori regole di progettazione derivanti in questo caso dalle caratteristiche della tecnologia di produzione. Nonostante la grande libertà formale non tutto è concesso anche con la stampa 3D ed il risultato finale è condizionato soprattutto da una progettazione che ne deve considerare le possibilità ma anche i limiti.

Tali regole di progettazione riguardano da un lato la forma dell'oggetto che dovrà essere stampato e dall'altro l'impostazione dei parametri di stampa adatti a questa. Entrambe se progettate ed usate correttamente in combinazione portano al risultato voluto. Con i materiali ceramici infatti, ancor di più che con le plastiche usate comunemente, è necessaria una progettazione specifica per la stampa 3D.

Nella parte seguente del capitolo verranno affrontate le caratteristiche formali più importanti o più critiche per il processo, illustrando i suoi limiti e le possibilità, cercando di fornire delle regole di progettazione che garantiscano la corretta riuscita del pezzo e delle indicazioni riguardo l'impostazione dei parametri di stampa ideali a seconda della sua morfologia.

• geometria

Come già visto la stampa 3D permette una grande libertà formale ed elimina vincoli tipici di altre tecnologia come sottosquadri, cambi di sezione o angoli di sforno. Questo non significa però che si potrà stampare ogni cosa indipendentemente da come è stata progettata: a seconda della geometria dell'oggetto che andremo a stampare vi sono differenti considerazioni che devono essere fatte in fase di progettazione.

La forma che più si adatta alla tecnologia in questo caso è quella organica, caratterizzata da forme libere e curve, anche se di elevata complessità. Questo soprattutto a causa della movimentazione dell'estrusore e della natura del filamento, ma non solo. Una forma organica è anche più portata a mantenersi inalterata in fase di ritiro, in quanto non vi sono particolari concentrazioni di sforzi come per esempio accade negli spigoli, che caratterizzano una forma più geometrica. Questa infatti, caratterizzata da superfici piane e spigoli sarà più complessa da stampare correttamente poiché più soggetta a deformazioni sia in fase di ritiro che a causa del peso del materiale sugli strati sottostanti, e richiederà accorgimenti e risoluzioni maggiori.

Altri fattori importanti da tenere in considerazione sono le proporzioni e la strutturabilità dell'oggetto da stampare. Questo infatti deve essere in grado di rimanere nella sua posizione senza deformarsi o crollare, nonostante la viscosità del materiale. Un oggetto sproporzionato in altezza, con una base piccola e sezioni più grandi nella parte superiore, o sbilanciato da un lato, sarà più portato a cedere.

Come possiamo leggere nel capitolo 11 un'ulteriore criticità causata dalla geometria del pezzo riguarda le forme composte da sezioni discontinue, soggette ai difetti provocati dall'estrusore durante i travel. Una forma con un profilo chiuso e continuo sarà quindi più adatta al processo, ma nel caso non sia possibile l'impostazione di una retraction e una velocità di travel alte permettono di diminuire i difetti.

La stampa 3D permette la creazione di forme complesse ma anche dettagliate. L'accuratezza e la precisione nella stampa dei particolari è però determinata dalla risoluzione verticale ed orizzontale del pezzo, ovvero dal rapporto tra altezza layer e altezza del pezzo e dimensione dell'ugello e dimensioni della sezione orizzontale del pezzo.

•base

Per base in questo caso non si intende la superficie d'appoggio che avrà il prodotto finale ma la prima parte di questo che verrà stampata e che farà da sostegno per gli strati successivi. Spesso le due tipologie coincidono ma non esclusivamente, l'orientamento di stampa e la sua base infatti non devono per forza con quello che poi sarà l'orientamento di utilizzo effettivo dell'oggetto e la sua base di appoggio.

Un oggetto non può essere stampato senza una base che garantisca supporto agli strati successivi, non è possibile ad esempio stampare su di una cupola rovesciata o uno spigolo. La base può essere piena, formata dal solo contorno, o con una griglia di riempimento, a seconda della forma e funzione dell'oggetto, l'importante è che costituisca un punto di appoggio solido per gli strati successivi. Una base formata dal solo contorno o con un riempimento non costituisce un problema, più critica è invece una base piena, come già illustrato nel capitolo 8. Questa deve avere uno spessore il più possibile uniforme rispetto a quello di parete e del resto del modello, per non creare problemi in fase di ritiro. Per evitare ulteriori concentrazioni di sforzi e possibili punti di rottura è utile inoltre raccordare l'angolo interno tra la base e la parete. Infine il flusso deve essere adeguatamente regolato in modo depositare strati di larghezza pari a quella dell'ugello, per evitare la sovrapposizione di materiale e l'allargamento della

base rispetto al resto del modello.

Nella stampa fdm in materiale termoplastico la base deve essere sufficientemente larga o il pezzo potrebbe staccarsi in corso di stampa. Con i materiali ceramici tale problematica è meno frequente ma per oggetti con una base piccola e stretta ed una parte superiore alta e larga il pezzo si potrebbe sbilanciare e cadere, soprattutto quando il materiale inizia ad essiccare.

•spigoli

Uno spigolo nella sezione orizzontale del pezzo, indipendentemente da come viene progettato, dipenderà dalla dimensione dell'ugello e si arrotonderà di conseguenza. Se abbiamo un angolo particolarmente acuto ed un ugello grande in proporzione a questo, verrà ridotto fino a quando il diametro dell'ugello non potrà essere contenuto tra i due lati, e si arrotonderà della stessa dimensione. Internamente invece lo spigolo verrà mantenuto ma tenderà ad arrotondarsi con un angolo ottuso e a sovrapporsi con un angolo acuto. Se vogliamo ottenere uno spigolo evidente è quindi necessario scegliere un ugello il più piccolo possibile. Lo spigolo viene in parte influenzato anche dalla velocità di stampa e dal flusso, come possiamo notare nel capitolo 7. A velocità alta tenderà infatti ad arrotondarsi per il movimento troppo rapido dell'estrusore che non depositerà il materiale in maniera adeguata. Con un flusso elevato invece il materiale verrà schiacciato dall'ugello allargando la sezione del pezzo e di conseguenza anche gli spigoli che appariranno molto curvi.

Uno spigolo nella sezione verticale del pezzo sarà invece influenzato dalla risoluzione della stampa, ovvero dal rapporto tra altezza layer e le dimensioni dell'oggetto, in particolare la sua altezza. Per ottenere uno spigolo evidente è necessario impostare un'altezza layer bassa, con un ugello il più piccolo possibile, in rapporto all'altezza dell'oggetto.

Bisogna tenere conto però che gli spigoli, soprattutto interni, diventano concentratori di sforzi in fase di ritiro ostacolando il movimento del materiale, con la possibile formazione di fratture in corrispondenza dello spigolo. Una soluzione consiste nell'aumentare lo spessore della parete e nel raccordare lo spigolo se possibile, per uniformare il ritiro.

•planarità

La planarità è una caratteristica formale che può sembrare semplice

ma che in questo caso risulta abbastanza critica. Soprattutto se la superficie planare non è perfettamente verticale ma a sbalzo vi sono alcuni accorgimenti da tenere in considerazione in modo che mantenga la propria forma.

Le prime problematiche appaiono in fase di stampa: la planarità soprattutto se inclinata è strutturalmente meno portata a sostenere il peso del materiale che la compone, che tende quindi a incurvarla verso il basso, come possiamo vedere nel capitolo 9 nella parte riguardante gli sbalzi rettilinei. Ulteriori deformazioni avvengono poi in fase di ritiro, in particolare in pezzi con sezione geometrica ma non circolare. La superficie tenderà a ritirare verso il centro incurvandosi e gli sforzi si concentreranno sugli spigoli ai lati, talvolta provocando spaccature.

La soluzione consiste nell'aumentare lo spessore di parete per quanto riguarda gli oggetti cavi o nell'aggiunta di riempimento dove possibile. Anche il raccordo di eventuali spigoli aiuta il materiale in fase di ritiro ed impedisce la formazione di spaccature.

• sbalzi

Come già visto nel capitolo 9 un'importante caratteristica formale critica per la stampa 3D è quella dello sbalzo, ovvero di qualunque figura si inclini rispetto alla verticale, tra cui possiamo includere non solo pareti inclinate ma anche i ponti, i fori, le cupole.

Dalle prove effettuate, basate su regole e principi già utilizzati nella stampa 3D fdm, sono state ricavate delle indicazioni generali che possono essere di aiuto innanzitutto nella progettazione di sbalzi adeguati al processo, e dei metodi con cui, tramite un uso corretto dei parametri di stampa, è possibile gestire lo sbalzo e far sì che non costituisca una problematica nella riuscita del pezzo.

Per ricavare le regole di progettazione gli sbalzi sono stati ricondotti a figure semplici in modo da poterli dividere in poche categorie: abbiamo sbalzi rettilinei e curvi, questi ultimi concavi e convessi, che a loro volta possono essere esterni ed interni. Non sempre un oggetto presenterà sbalzi completamente regolari ed è compito del progettista ricondurli ad una forma semplice per ricavarne le regole. Sono regole generali ed esemplificative che devono essere usate come riferimento ma che presentano diverse variabili.

A prescindere dalla progettazione del pezzo vi sono variabili come

la viscosità dell'impasto e la tipologia di materiale che influenzano la stampa di uno sbalzo. Una viscosità maggiore ovviamente favorirà la riuscita della stampa, ed un materiale con tanta chamotte sarà più adatto ad un pezzo con superfici a sbalzo.

Generalmente gli sbalzi rivolti all'interno sono di più facile riuscita di quelli rivolti all'esterno, che giovano meno del supporto del materiale intorno. Per sbalzi rettilinei dai 90 ai 60 gradi non vi sono particolari problematiche, mentre scendendo fino ai 50/40 gradi è necessario impostare di conseguenza i parametri di stampa come vedremo in seguito. Con la stampa 3d in materiale ceramico è difficile ma possibile aumentare ulteriormente l'inclinazione, grazie ad un impasto viscoso, alla scelta del materiale e alla corretta impostazione dei parametri di stampa. Per quanto riguarda gli sbalzi curvi abbiamo una più facile riuscita degli sbalzi convessi rispetto a quelli concavi, tipologia che risulta più critica. Anche per questa categoria gli sbalzi interni sono di più facile riuscita. La parte superiore o inferiore di un arco di circonferenza, a tangente orizzontale, non può essere stampata. Come regola generale è consigliabile quindi non stampare la porzione dell'arco in cui la tangente risulta inferiore ai 35 gradi per quanto riguarda gli sbalzi interni e ai 30 gradi per quelli esterni. Nella progettazione del pezzo bisogna infine tenere conto della sua altezza, ed in particolare della quantità di materiale che graverà sullo sbalzo. Se ad esempio progettiamo un oggetto sproporzionato in altezza e con degli sbalzi pronunciati possibilmente questi non devono essere nella parte che verrà stampata inizialmente, o rischieranno di cedere per il peso degli strati successivi. Un pezzo con superfici a sbalzo eccessive o orizzontali esterne non può essere prodotto con la stampa 3d ldm. Nel caso queste siano interne invece è possibile stamparle con il sostegno di un riempimento, ma l'oggetto non potrà essere cavo.

La prima operazione da effettuare prima della stampa è la scelta del suo orientamento: molto spesso infatti è possibile evitare sbalzi e figure critiche solamente grazie a questo. Bisogna tenere presente che l'orientamento di stampa non deve essere per forza quello che poi sarà l'orientamento di utilizzo effettivo dell'oggetto, e che, come già visto, uno sbalzo interno sarà di più facile riuscita di uno sbalzo esterno. L'orientamento deve quindi essere progettato assieme alla forma del pezzo. Se anche con il migliore orientamento possibile il pezzo da stampare contiene ancora parti a sbalzo critiche è necessario valutarne la fattibilità e scegliere i parametri e la strategia di stampa corrette.

Come è possibile vedere nel capitolo 9 attraverso i parametri di stampa è possibile gestire gli sbalzi diversamente a seconda delle ne-

cessità. Un metodo consiste nell'aumento del flusso, in modo da allargare lo spessore di parete che può così sostenere lo sbalzo. Questo si ripercuote però sulla precisione del pezzo, che risulta più tozzo e schiacciato verso l'esterno. In maniera simile ma con meno influenza sull'aspetto finale del pezzo agisce l'altezza del layer, che nel caso di sbalzi è preferibilmente bassa (circa il 30% del diametro dell'ugello). Il metodo migliore consiste però nell'aumentare lo spessore di parete, più perimetri infatti garantiscono una più facile riuscita dello sbalzo ma anche meno deformazioni dovuta al ritiro. Bisogna infine tenere in considerazione che più bassa è la velocità di stampa più facile sarà la riuscita dello sbalzo poiché gli strati inferiori del pezzo riusciranno a essiccarsi e solidificarsi in modo da sostenere i successivi. I metodi possono essere anche combinati: l'aumento del flusso è più efficace assieme all'abbassamento dell'altezza layer, che può aiutare anche unito all'aumento dello spessore di parete. Quest'ultimo non può però essere abbinato all'aumento del flusso poiché il materiale in eccesso provocherebbe difetti per la sovrapposizione dei perimetri. L'impostazione di una velocità bassa può invece essere aggiunta a tutti i metodi, anche già combinati.

Come già citato un ulteriore fattore che facilita lo sbalzo e permette la stampa di superfici anche orizzontali, se interne, è il riempimento. La corretta impostazione del riempimento non è però sempre facile e spesso porta alla formazione di difetti, come illustrato nel capitolo 8. A causa della natura del materiale il riempimento deve avere una percentuale superiore o uguale al 25% in modo da garantire la chiusura superiore del pezzo. Altri parametri che ne migliorano la finitura ed evitano possibili errori sono la retraction e lo z-hop, che eliminano i segni lasciati dall'estrusore ed il materiale estruso per gravità, o l'aumento dello spessore di parete e quindi dei perimetri da cui è formata, che migliora la superficie esterna del pezzo. Per una descrizione più dettagliata dei parametri e delle diverse modalità di stampa possibili si rimanda al capitolo 8.

•layer

Caratteristica distintiva ed ineliminabile del processo, come per ogni tecnologia di produzione additiva, è la presenza dei layer. La loro visibilità sul prodotto finale dipende dalla tecnologia e dai parametri utilizzati, nonché da un eventuale finitura successiva.

Con la stampa 3D in materiale ceramico, a causa delle dimensioni degli ugelli comunemente utilizzati, i layer sono solitamente più evidenti rispetto alle altre tecnologie. La visibilità del layer non deve però essere vista come un difetto ma come elemento caratterizzante del

processo che lo distingue dalle altre tecniche di lavorazione della ceramica e ne incrementa le possibilità.

La costruzione a strati in questo caso non intacca la funzionalità dell'oggetto come nella stampa 3D fdm, grazie alla completa "fusione" tra i layer. La loro visibilità può essere diminuita aumentando la risoluzione verticale o utilizzando un materiale più fino. Inoltre se necessario è possibile lisciare il modello manualmente o utilizzare uno smalto spesso e coprente, eliminando completamente la loro presenza.

Sfruttando la costruzione a strati, giocando con i parametri di stampa e conoscendo le proprietà del materiale è possibile creare texture ed effetti impossibili da riprodurre manualmente o con uno stampo.

La tecnologia di tipo additivo permette infatti di creare texture anche complesse su tutta la superficie di un oggetto, senza tutti gli accorgimenti necessari quando viene utilizzato uno stampo e con più precisione e velocità rispetto alle tecniche manuali.

Infine progettando per la stampa è possibile isolare il percorso compiuto dall'ugello in ogni strato per generare forme in cui per ognuno o quasi vi è un cambiamento di sezione. In questo modo delle porzioni del filamento vengono stampate sul vuoto ma non si spezzano, grazie alla plasticità e viscosità del materiale, creando effetti simili ad un tessuto impossibili da ottenere con altre lavorazioni. Per ottenere tali effetti già in corso di progettazione è necessario tenere conto dei parametri che si utilizzerà, nel dimensionamento di ogni sezione del pezzo.


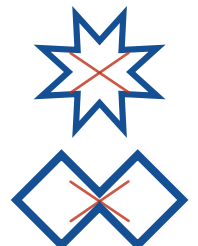

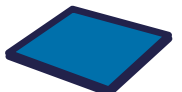

riassunto

Nelle pagine seguenti troviamo le considerazioni del capitolo riassunte e schematizzate per una più facile lettura ed un eventuale ricerca veloce.






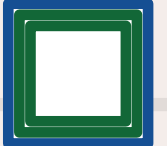









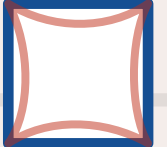
Le regole sono state divise in differenti categorie a seconda dei fattori più importanti da tenere in considerazione in fase di progettazione: abbiamo alcune regole generali ed altre più approfondite riguardo fedeltà geometrica, problematiche causate dal ritiro, visibilità dei layer, probabilità di collasso del pezzo e sbalzi.

A seconda della funzione e della geometria dell'oggetto da stampare o da progettare troviamo diverse considerazioni riguardanti sia le sue caratteristiche formali che la modalità di stampa e l'impostazione dei parametri corretta.

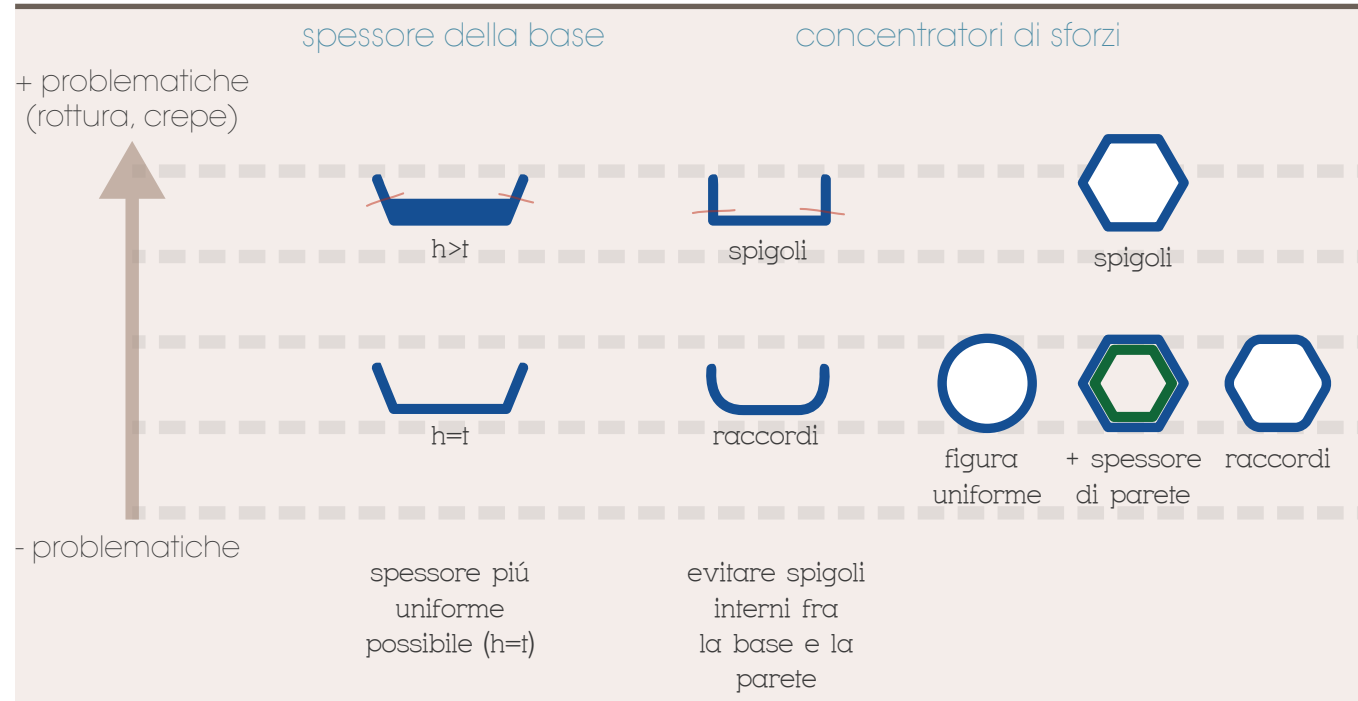
regole generali

strutturalità	spessore di parete	concentratori di sforzi	base	dettagli	riempimento	materiali	textures
<p>é consigliabile progettare oggetti autoportanti</p> <p>importanti forma e proporzioni</p> <p>la base deve essere in grado di sostenere i layer successivi</p> 	<p>il più uniforme possibile per mantenere un ritiro omogeneo</p>	<p>é consigliabile evitare spigoli e grandi cambi nella sezione perchè si potrebbero creare crepe o staccamenti durante il ritiro. Sono più critici gli spigoli interni e le forme geometriche con superfici planari</p> 	<p>solo contorno</p>  <p>contorno + riempimento</p>  <p>base piena*</p>  <p>*possibile allargamento della sezione *problematiche di ritiro *non si può smaltare sotto</p>	<p>+ risoluzione + dettagli</p> <p>dettagli piccoli e precisi difficili (ad esempio testi)</p>	<p>sbalzo interno eccessivo o chiusura orizzontale superiore: necessario impostare un riempimento</p> <p>sbalzo esterno eccessivo: non si può fare</p> 	<p>un materiale chamottato è più adatto a forme a sbalzo</p> <p>un materiale fino è più adatto a risoluzioni maggiori e alla stampa del riempimento, i layer si fondono meglio tra di loro</p>	<p>possibilità di sfruttare ed evidenziare i layer per la costruzione di texture ed effetti particolari</p> <p>cambio di sezione ad ogni layer stampa a vuoto</p>  <p>risultato a seconda della viscosità e plasticità del materiale</p>

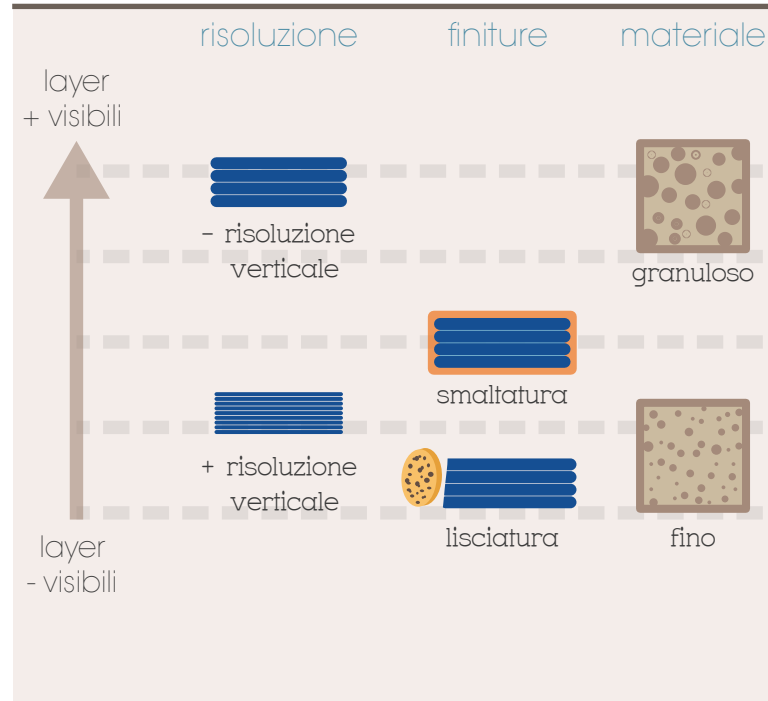
fedeltà geometrica

	forma	sezione	spigoli verticali	spigoli orizzontali	planarità verticale	planarità orizzontale
+ fedeltà geometrica	<p>forma libera/curva</p> 	<p>sezione continua</p> 		<p>+ risoluzione orizzontale</p> 	<p>sezione verticale</p> 	<p>sezione orizzontale</p> 
	<p>raccordi</p> 	<p>sezione discontinua</p> 	<p>+ risoluzione verticale</p>	<p>- velocità</p> 	<p>- flusso</p> 	
	<p>forma geometrica</p> 	<p>più sezioni</p> 	<p>- risoluzione verticale</p> 	<p>- risoluzione orizzontale**</p> 	<p>peso</p> 	<p>ritiro</p> 
- fedeltà geometrica	<p>- planarità/spigoli ritiro uniforme + fedeltà geometrica</p>	<p>+ di un percorso + segni di "travel" - finitura superficiale</p>	<p>- risoluzione verticale + fedeltà geometrica</p>	<p>**lo spigolo si arrotonda gli spigoli possono costituire una problematica in fase di ritiro (vedi pagina seguente)</p>	<p>in caso di superfici planari é necessario uno spessore maggiore per evitare deformazioni sia dovute al peso che al ritiro</p>	

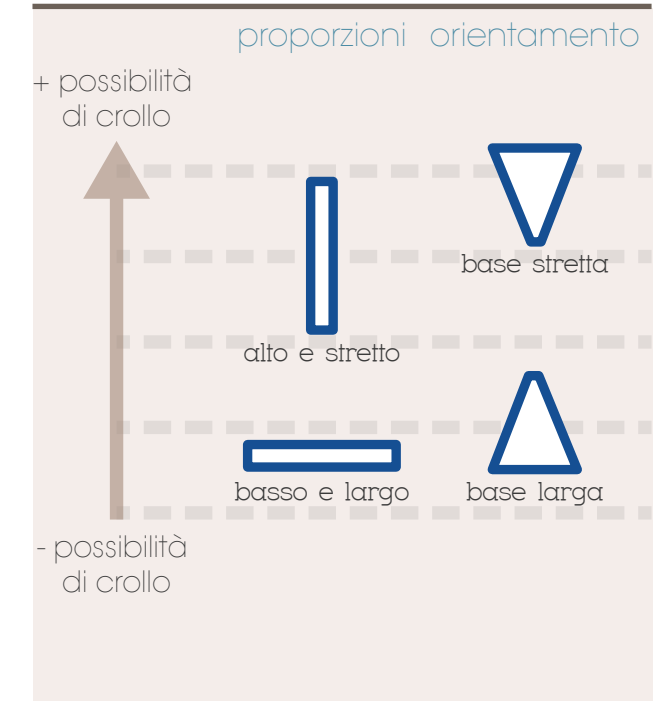
problematiche di ritiro



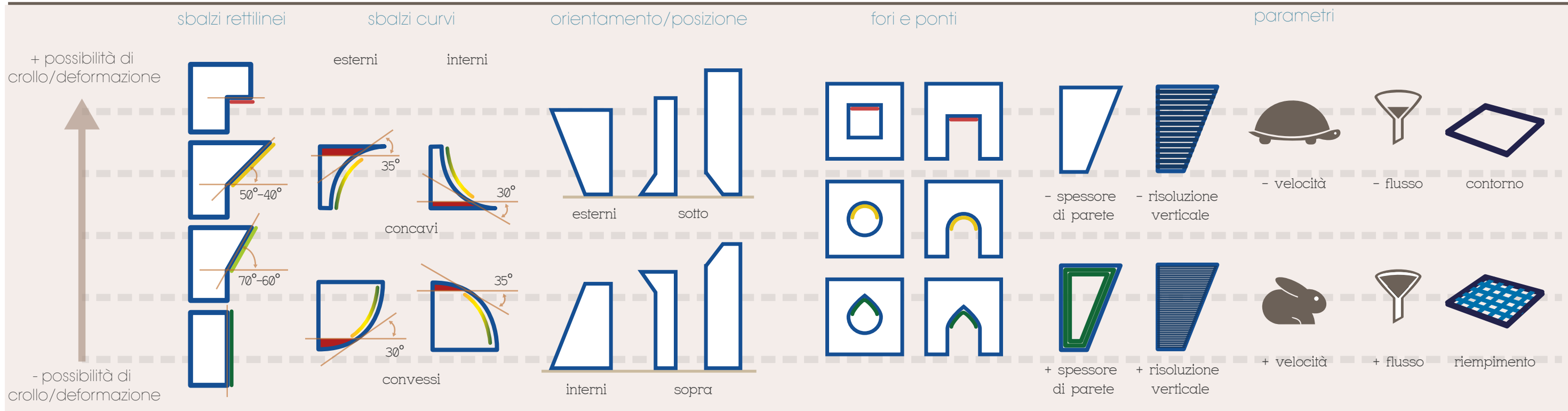
visibilità dei layer



probabilità di crollo



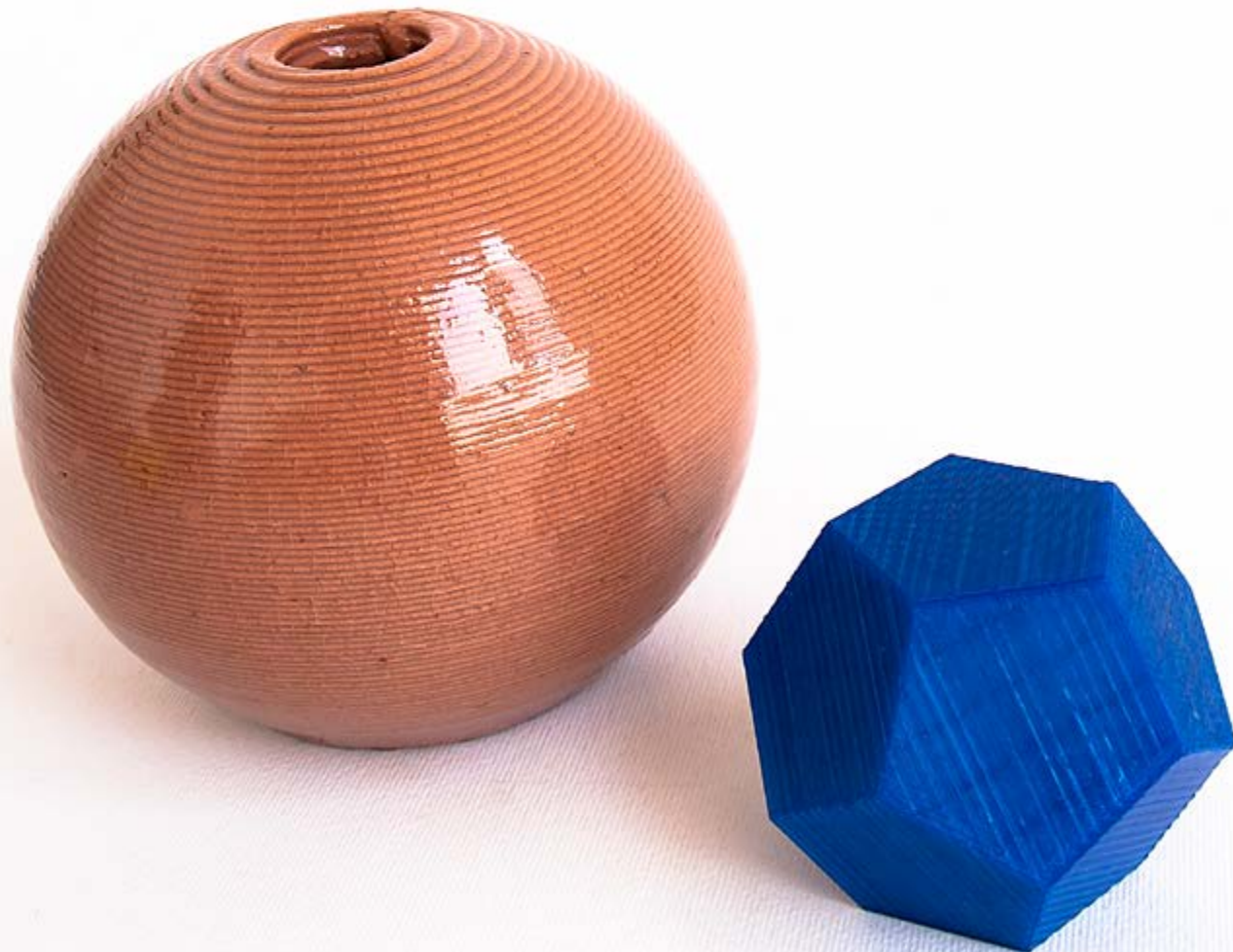
sbalzi



casi studio

Nell'ultima parte del capitolo verranno infine presentati alcuni casi studio, in cui vengono messe in pratica le diverse regole di progettazione precedentemente descritte e che offrono alcuni esempi di applicazioni effettive di oggetti stampati 3D in ceramica.

L'oggetto vuole essere un dimostratore della fedeltà geometrica consentita dalla stampa 3D progettando una forma adatta ed impostando correttamente i parametri. La forma è quella di una sfera perfetta, con la base troncata in modo da poter essere stampata. Il materiale scelto è l'argilla rossa con una percentuale di chamotte fine, soggetta a poco ritiro e con una buona finitura superficiale anche ad altezze layer basse. L'altezza layer impostata è infatti pari a un millimetro, meno di un terzo dell'ugello di tre millimetri, in modo da aiutare la stampa dello sbalzo ed avere una buona risoluzione verticale. Lo spessore di parete è elevato, in modo da mantenere la forma e reggere lo sbalzo fino a quasi la sommità della sfera. Per dare all'oggetto un aspetto ancora più preciso e liscio vi viene applicata una cristallina trasparente.



considerazioni progettuali:

scelta della forma: curva

scelta del materiale: poco ritiro, adatto agli sbalzi, buona finezza

spessore di parete elevato

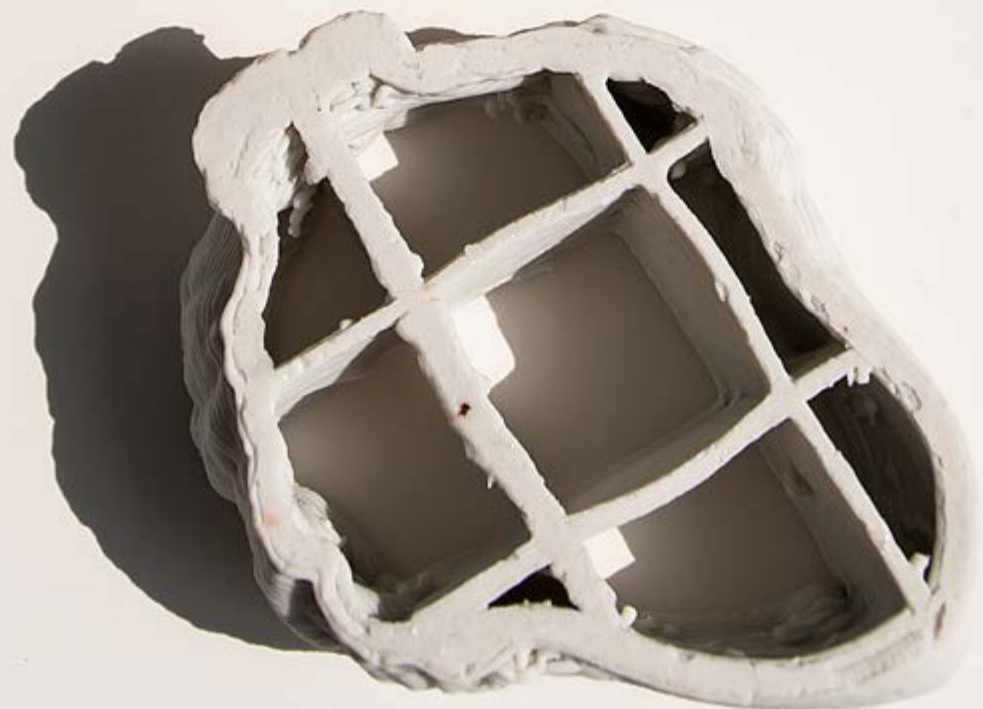
risoluzione verticale elevata

velocità bassa

finitura: cristallina



La stampa 3D di pezzi pieni o con riempimento è adatta soprattutto per le forme organiche e scultoree, la cui forma viene mantenuta più fedelmente. In questo caso vengono quindi stampato dei busti che vengono leggermente inclinati in modo da eliminare gli sbalzi eccessivi. Per una migliore resa dei dettagli si sceglie un ugello piccolo, di un millimetro, ed una risoluzione verticale elevata, in modo da stampare anche gli sbalzi in maniera ottimale. Viene impostato un riempimento ed aumentato lo spessore di parete per eliminare possibili difetti causati dalla stampa della griglia e dagli elementi a sbalzo. Il materiale scelto è la porcellana, più adatta a stampe piene e risoluzioni elevate grazie alla sua finezza. La stampa del busto più grande, nella pagina seguente, si interrompe per l'intasamento dell'estrusore causato da un corpo esterno. Data la finezza del materiale, l'alta risoluzione e la sua vetrificazione non vengono applicati rivestimenti ceramici ai pezzi.



considerazioni progettuali:

orientamento di stampa ottimizzato per gli sbalzi

risoluzione orizzontale e verticale elevate

scelta del materiale: finezza

spessore di parete elevato

riempimento

finiture: non necessarie



I seguenti oggetti sono stati realizzati al fine di provare diverse modalità di stampa che permettono la creazione di oggetti cavi provvisti di manici. Alcuni oggetti sfruttano la possibilità di creare pareti doppie anche in modalità spiral, dimensionandole affinché siano pari al doppio dello spessore di parete impostato ma in modo che l'estrusore possa compiere un percorso continuo. In questo caso gli spessori dell'oggetto non sono uniformi ma non recano problemi in fase di ritiro. Altri invece, più grandi, sono stati realizzati con la modalità a perimetri in modo da essere più resistenti e mantenere meglio la forma sia in corso di stampa che con il ritiro. In questo caso gli spessori di tutto il pezzo risultano uniformi. In ogni oggetto la base è piena e di spessore uguale o lievemente maggiore a quello delle pareti. Essendo questa non smaltabile si ricercano diverse forme in modo da ridurla il più possibile senza intaccare la funzionalità degli oggetti, che vengono comunque smaltati internamente ed esternamente. Dalle differenti forme è possibile notare come forme circolari e curve mantengano meglio la forma di quelle più geometriche. I materiali utilizzati sono diversi, dall'argilla rossa, poi smaltata di nero, al gres porcellanato, dalla terra estrusca, all'argilla bianca colorata in pasta con engobio azzurro.



considerazioni progettuali:

spessore a seconda di dimensioni e funzione

spiral per manici a doppia parete

forma circolare

base chiusa



Un'oggetto dalla forma difficile da creare con la stamp 3D è il piatto. Questo infatti dovrebbe essere stampato completamente planare, modalità inadatta alla stampa con possibili problemi in fase di essiccamento, o con uno sbalzo molto elevato.

Nella progettazione dell'oggetto sono stati ottimizzati tutti i fattori che contribuiscono alla riuscita di uno sbalzo anche elevato, in questo caso di 40 gradi. Si è quindi scelto un materiale con una percentuale elevata di chamotte, l'argilla nera per raku. Lo sbalzo scelto è rettilineo e l'oggetto ha una sezione quadrata, più soggetta a deformazioni da ritiro ma più strutturale. La parete è composta da due perimetri e quindi abbastanza spessa in modo da reggere lo sbalzo ma anche mantenere la planarità e la propria forma in fase di ritiro. Anche l'altezza del layer è volutamente bassa per agevolare la costruzione dello sbalzo e gli spigoli sono stati raccordati per uniformare ulteriormente il ritiro. L'altezza è in proporzione poco elevata ma il pezzo viene comunque stampato lentamente in modo da essiccare gradualmente gli strati inferiori.



considerazioni progettuali:

proprietà del materiale: adatto agli sbalzi

sbalzo rettilineo di 40 gradi

sezione quadrata

spessore di parete elevato

risoluzione verticale elevata

spigoli raccordati

altezza del pezzo bassa

velocità bassa



L'oggetto è stato realizzato con l'intento di testare una particolare modalità di finitura che consiste nell'uso di diversi materiali in contemporanea, caricando il serbatoio con diversi impasti alternati. I materiali utilizzati sono in questo caso argilla rossa con percentuale di chamotte molto fine e argilla bianca colorata in pasta con engobio azzurro. Viene quindi stampato un oggetto di grandi dimensioni per osservare come le variazioni di colore si distribuiscono nella stampa. Si nota che l'estrusione del materiale non rispetta esattamente l'ordine di inserimento all'interno del serbatoio, e man mano che la stampa avanza i due colori tendono a fondersi sempre di più. Inoltre il colore cambia notevolmente con la cottura del pezzo.



considerazioni progettuali:

uso contemporaneo di due materiali: stessa temperatura di cottura

colorazione dell'impasto

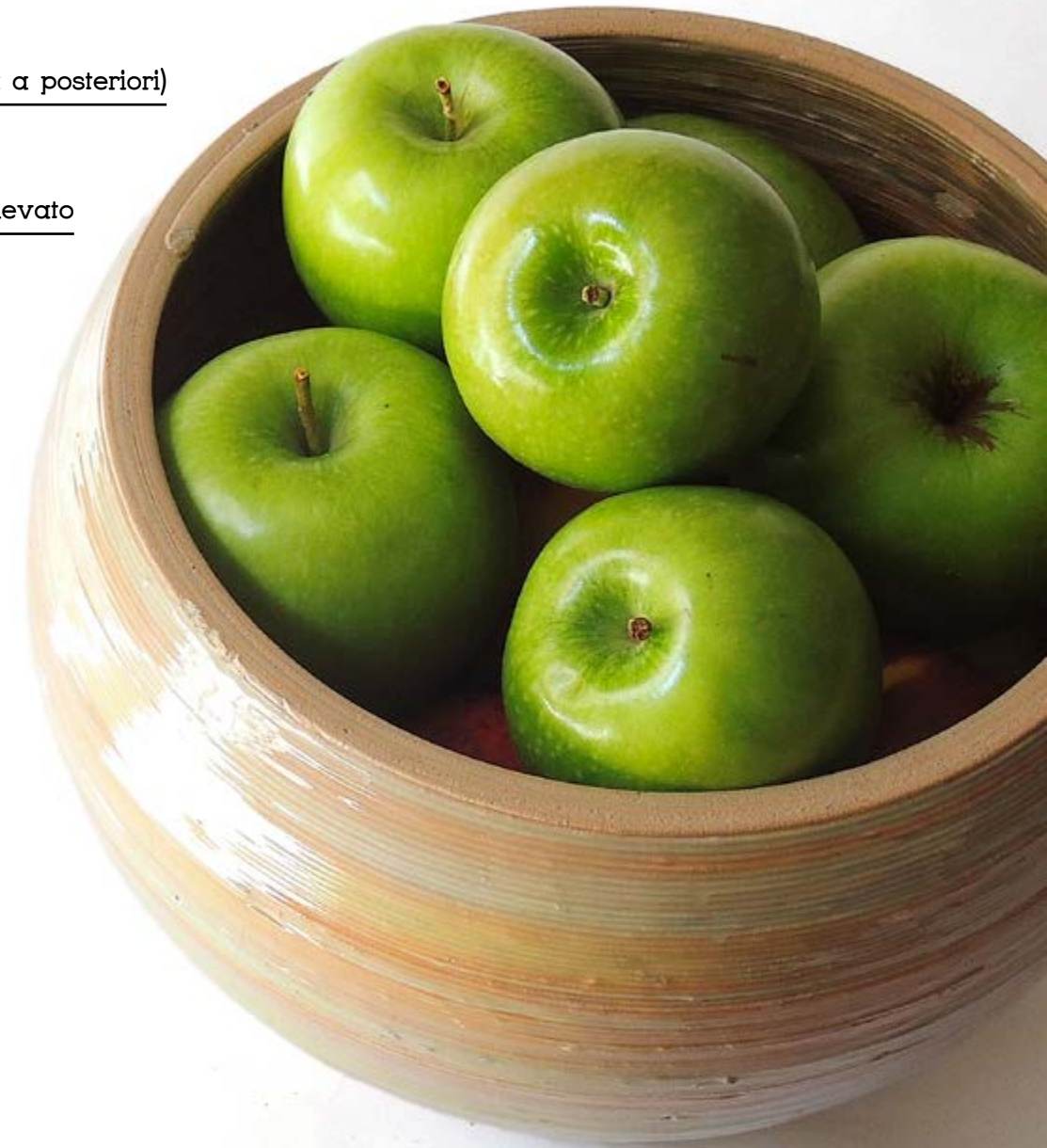
sbalzo curvo esterno

base vuota (aggiunta a posteriori)

sezione circolare

spessore di parete elevato

finitura: cristallina



Questi vasi sono stati progettati con l'intento di trovare una tecnica alternativa per stampare oggetti con una base chiusa. Sono stati quindi stampati al contrario, con il solo bordo a contatto con il piatto di stampa, e con la forma si chiude a punta nella parte superiore del pezzo grazie ad uno sbalzo che converge al centro, dimensionato in modo da non richiedere riempimento. Alla forma di base sono state aggiunte delle sporgenze che compongono una base piatta attorno alla punta dove culmina lo sbalzo, facendo da supporto all'oggetto. Il tutto è stato progettato per essere stampato in modalità spiral, senza una base e con un solo perimetro, che raddoppia nei supporti grazie alla traiettoria di stampa rendendoli più resistenti.

Sono state sviluppate diverse versioni dell'oggetto, basate su diverse forme geometriche di base, e scegliendo i materiali a seconda dello sbalzo che le compone. Abbiamo una forma triangolare di dimensioni contenute e superfici poco inclinate per il gres porcellanato, una di forma pentagonale più grande e con sbalzi maggiori per l'argilla bianca, colorata in pasta con engobbio azzurro, e per la terra estrusca chamottata, ed infine una di forma quadrata con sbalzi pronunciati per l'argilla nera per raku, molto chamottata. Notiamo la diversa resa a seconda dei materiali, con un leggero cedimento nel vaso pentagonale in argilla bianca ed in quello quadrato in argilla nera per raku. Essendo i materiali utilizzati porosi, fatta eccezione per il gres, agli oggetti viene applicata una cristallina trasparente, in modo da migliorarne finitura e impermeabilità.

considerazioni progettuali:

sbalzi ottimizzati

orientamento di stampa inverso

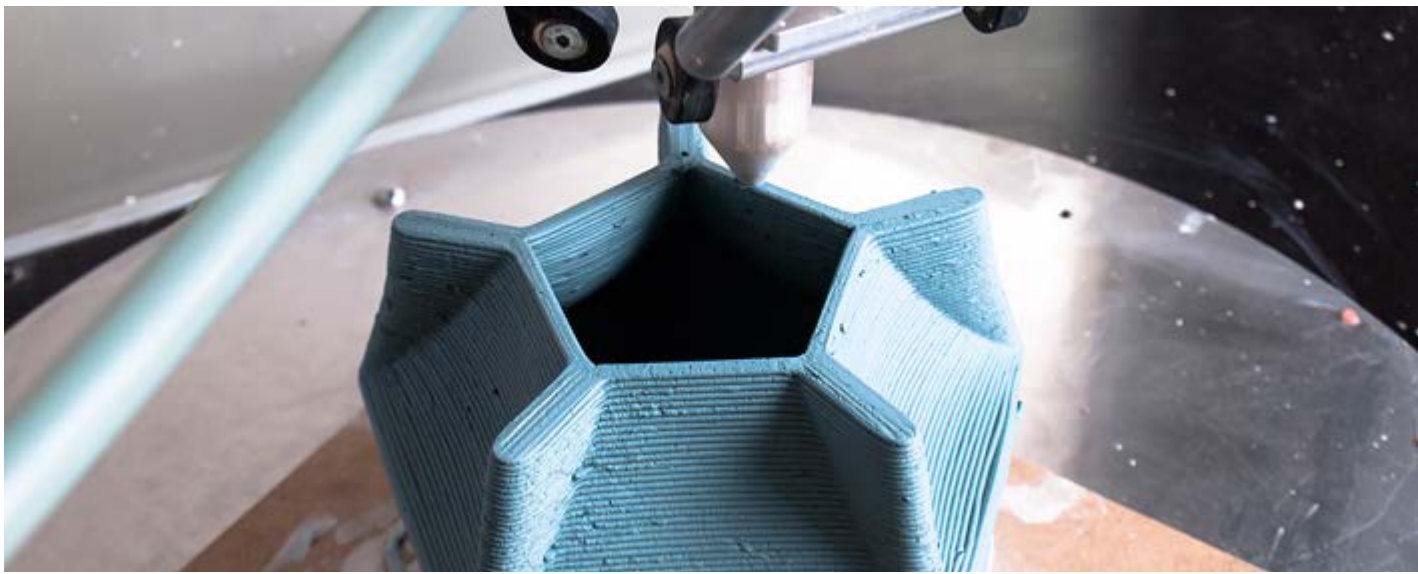
scelta del materiale a seconda dello sbalzo

modalità spiral: solo contorno

spiral per doppia parete

finitura: cristallina





Le porcellane o alcuni gres, come in questo caso, vengono spesso usate nel campo dell'illuminazione per la loro traslucenza. Con queste lampade la proprietà del materiale viene unita alle possibilità della stampa 3D di creare texture ed effetti particolari grazie alla costruzione a layer. A partire da una forma base molto stabile, un semplice cilindro aperto sui due lati, ne viene modificata la sezione per ogni layer o quasi. La progettazione delle sezioni prevede delle parti di stampa a vuoto controllate, in cui il filamento cede ma non si spezza, rimanendo in parte sospeso, rimangono così delle fessure tra alcuni layer che permettono il passaggio della luce. L'oggetto inoltre viene stampato in modalità spiral così da avere una parete sottile che ne risalti la traslucenza. La resa finale è progettata ma con una componente di imprevedibilità, poiché l'effetto dipende anche dal materiale usato e dalla sua viscosità. Per quanto riguarda le lampade da soffitto i fori che verranno usati per appenderle vengono creati a posteriori. Data la finezza del materiale e la sua vetrificazione non vengono applicati rivestimenti ceramici al pezzo.

considerazioni progettuali:

proprietà del materiale: traslucenza

risoluzione verticale e orizzontale bassa

forma cilindrica: stabilità

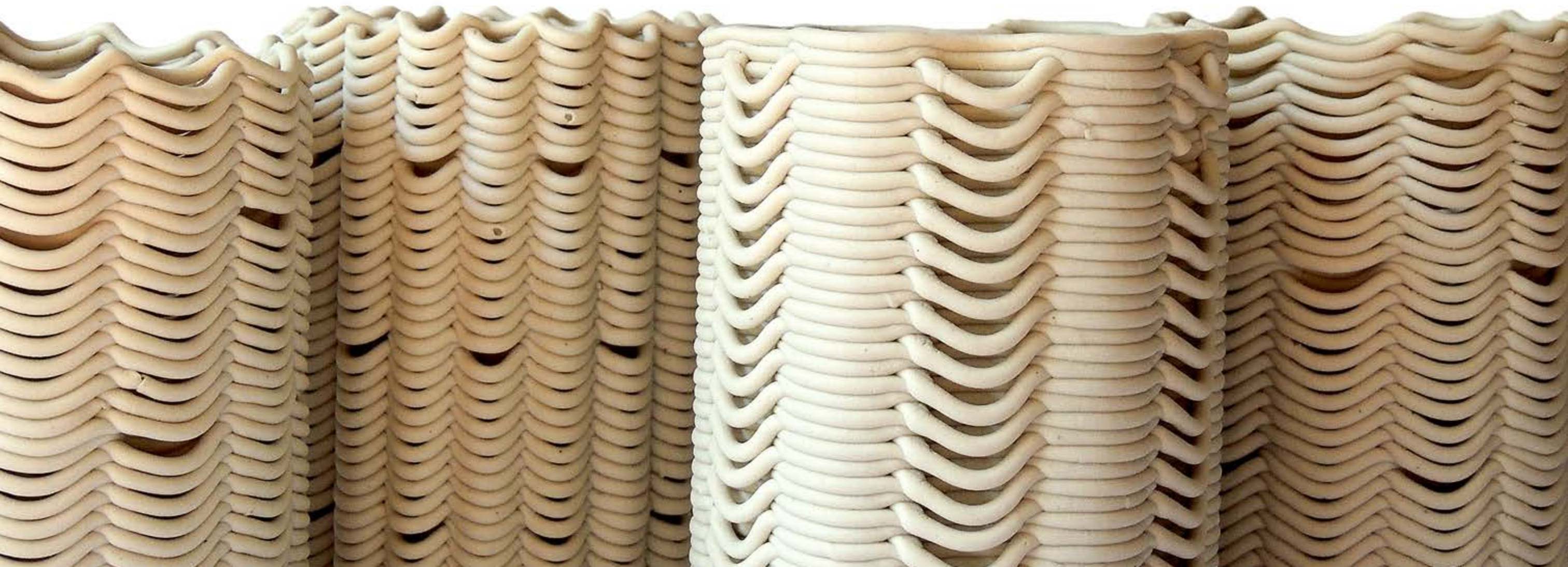
modalità spiral, solo contorno

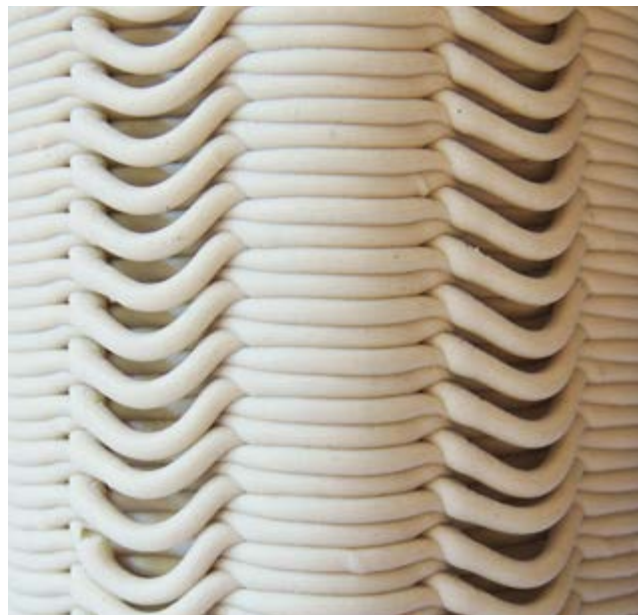
cambio di sezione continuo

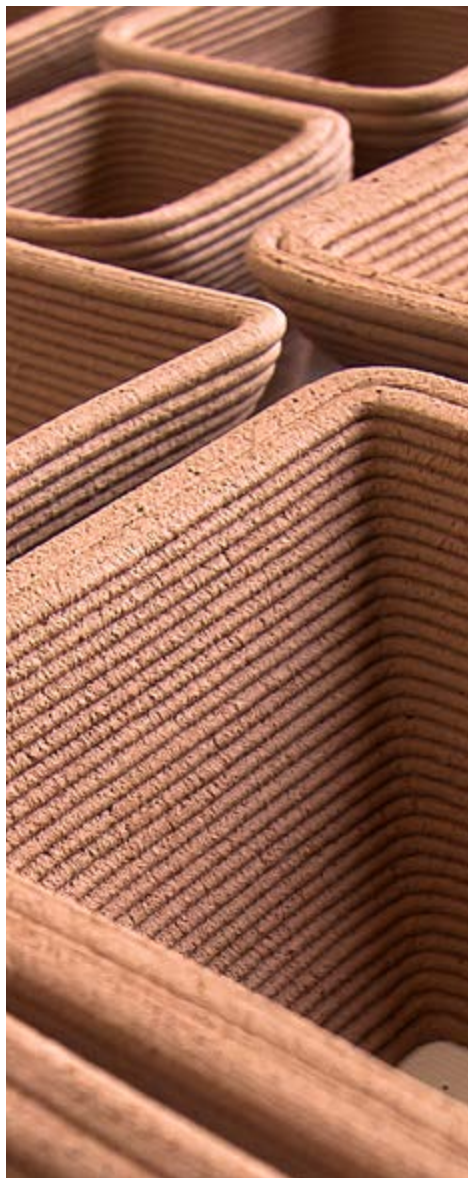
stampa a vuoto

lavorazioni post stampa: fori

finiture: non necessarie







13. CONCLUSIONI



La stampa 3D dei materiali ceramici si colloca in una posizione intermedia tra le tecnologie di produzione industriali per cui solitamente il designer si trova a progettare e tecniche invece più artigianali, comunemente associate al mondo della ceramica.

Possiamo dire che più di tutte le altre tecniche di stampa 3D collega il mondo digitale, contenuto in uno schermo, con quello fisico del mondo materiale, della terra.

Non solo rappresenta la potenzialità di una nuova tecnologia ma proietta nel futuro la storia passata di un materiale, e nonostante le somiglianze con le tecniche di lavorazione più tradizionali la costruzione a layer tipica delle tecnologie additive apre nuove possibilità e permette la creazione di nuovi linguaggi formali, che è compito del nuovo progettista saper comprendere e sfruttare.

Nella pratica del design questo implica però conoscenze e competenze diverse da quelle utilizzate da un progettista più tradizionale, conoscenze che riguardano tanto il materiale e la sua lavorazione manuale quanto aspetti più “digitali”, riguardanti l'utilizzo ed il settaggio della macchina e dei software dedicati, ed implica la partecipazione attiva al processo in tutte le sue fasi, dalla progettazione, alla produzione, al prodotto finito.

La ricerca compiuta attraverso la sperimentazione è stata una crescita, un percorso che è partito dalla base della stampa 3D fdm e della lavorazione della ceramica, fino alla scoperta dei principi fondamentali tipici del processo, che hanno permesso l'inizio di una progettazione ad hoc per la stampa e per la ceramica, insieme. Inizio poiché è tanto ancora il lavoro da fare, con una tecnologia in espansione ma non ancora sviluppata tecnologicamente come la stampa 3d fdm da cui ha origine.

Per effettuare la sperimentazione è stata utilizzata una comune stampante 3D fdm adattata e modificata alla stampa della ceramica, con

un estrusore autocostruito, in un ottica di Open Source come quella da cui la tecnologia ha origine, con tutti i limiti e le criticità che comporta. Già però iniziano ad apparire sul mercato stampanti e sistemi di estrusione dedicati che garantiranno una facilità di utilizzo ed una precisione sempre migliori.

Il lavoro svolto e raccolto in questa tesi cerca di definire i principi del processo il più possibile indipendentemente dalla tecnologia a disposizione, in un ottica progettuale, in modo da costituire una guida alla progettazione ad hoc per la stampa che non riguarda solo gli aspetti formali ma anche quelli “digitali” di impostazione dei parametri e delle modalità di stampa corrette.

Cerca infine di spingere ad un'utilizzo concreto e significativo del metodo, orientando i progettisti nel suo utilizzo e per le sue potenzialità creative, in una infinità di possibili applicazioni, che lo sviluppo tecnologico contribuirà ad aumentare sempre di più.

“As difficult as it is to pull all the technology and computerization together I suggest it is even more difficult to do something creative, fresh and meaningful with this technology”

Jonathan Keep

La tecnologia è reale e funziona, il suo sviluppo è in corso, per cui ci troveremo a che fare con sistemi sempre più avanzati e precisi. Compito del progettista è ora far parte di questo sviluppo imparando a sfruttare la tecnologia, ricavandone il meglio, ricercandone le applicazioni ideali e quelle invece inadatte, riconoscendone le possibilità ma anche i limiti, contribuendo così alla sua crescita.



BIBLIOGRAFIA



Aliverti P. (2014), *Stampa 3D, stazione futuro*, Hoepli, Milano

Anderson C. (2012), *Makers: The New Industrial Revolution*, Crown Business

Ashby M., Johnson K. (2005), *Materiali e Design: L'arte e la scienza della selezione dei materiali per il progetto*, Casa Editrice Ambrosiana

Barosum M. W. (2003), *Fundamentals of Ceramic*, Institute of Physics- series in Materials Science and Engineering, IoP

Boothroyd G., Dewhurst P., Knight W. A. (2002), *Product Design for Manufacture and Assembly, Second Edition, Revised and Expanded*, CRC Press

Bralla J. (1998), *Design for Manufacturability Handbook*, McGraw-Hill Professional

Bubbico G., Crous J. (2004), *Ceramica. Manuale completo. Tecniche, materiali, realizzazioni*, Giunti Editore

Caruso N. (2003), *Ceramica Viva, manuale pratico delle tecniche di lavorazione antiche e moderne dell'occidente e dell'oriente*, Hoepli, Milano

Confindustria Ceramica (2010), *Indagini statistiche sull'industria italiana*

The Economist (2012), *special report: manufacturing and innovation, a third industrial revolution*

Fausti V. (2014), *Lavoriamoci sù, Tesi di Laurea Magistrale in Design & Engineering*, Rel. Levi M., Politecnico di Milano

Gershenfeld N. (2005), *Fab. Dal personal computer al personal fabricator*, Codice Edizioni.

Groover Mikell P., *Fundamentals of modern manufacturing, materials, processes and systems*, John Wiley & Sons, USA

Harch M. (2014), *The maker movement manifesto. Rules for innovation in the new world of crafters, hackers and tinkers*, Mc Graw Hill Education

Heinrich Jürgen G., Gomes Cynthia M., *Introduction to Ceramics Pro-*

cessing, Lecture Manuscript, TU Clausthal

Khoshnevis B. (2004), Automated Construction By Contour Crafting – Related Robotics And Information Technologies, Published in Journal of Automation in Construction – Special Issue

Kwon Hongkyo (2012), Experimentation and analysis of contour crafting (cc) process using uncured ceramic material, university of southern california

Kwon H., Bukkapatnam S., Khoshnevis B., Saito J. (2001), Experimental investigation of contour crafting using ceramics materials, Rapid Prototyping Journal, Vol. 7

Lefteri C. (2003), Ceramics-Materials for Inspirational Design, RotoVision

Lipson Hod, Kurman Melba (2013), Fabricated: The New World of 3D Printing, John Wiley & Sons

Magagni G. (2014), Stampa 3D. Applicazioni di un'idea innovativa. Principi, utilizzo e opportunità di business, Libri Este

Maietta A., Aliverti P. (2013), Il manuale del maker: guida pratica e completa per diventare protagonisti della nuova rivoluzione industriale, Edizioni FAG Milano, Milano

Maietta A. (2014), Stampa 3D, guida completa, LSWR

Marano C., Del Curto B. (2008), Materiali per il design-Introduzione ai materiali e alle loro proprietà, CEA

Mongeon B. (2015), 3D Technology in Fine Arts and Craft, Focal Press

McGee W., Ponce de Leon M. (2014), Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design

McCullough (1997), Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand, MIT press

McGuirk J. (2013), The Belgian Affair, articolo su Domus 966

Natale G. (2013), 3D Composites Extrusion Project-verso la stampa 3D di materiali compositi, Tesi di Laurea Magistrale in Design & Engineering, Rel. Levi M., Politecnico di Milano

Philip Howes, Laughlin Zoe (2012), Material Matters: New Materials in Design, Black Dog Publishing

Pearce J. M (2010), 3D Printing of Open Source Appropriate Technologies for Self-Directed Sustainable Development, Journal of Sustainable Development Vol. 3 , Department of Mechanical and Materials Engineering School of Environmental Studies, Queen's University

Quinn A. (2009), Ceramica: principi, tecniche e processi, Hoepli, Milano

Rahimi M., Arhami M. and Khoshnevis B. (2001), Chrafting technologies, University of Southern California

Rawsthorn A. (2012), In the Shifting World of Product Design, the User Now Has a Voice, articolo su: The New York Times-art and design

Rawsthorn A. (2012), Rewiring the Design Process, articolo su: International Herald Tribune

Ridolfi S. (2014), Il senso della Z. Uno studio tassonomico delle potenzialità espressivo-sensoriali della stampa 3D FDM, Tesi di Laurea Magistrale in Design & Engineering, Rel. Levi M., Politecnico di Milano

Riva F. (2014), Superficie In Attesa. Processi di finitura superficiale per la stampa 3D FDM, Tesi di Laurea Magistrale in Design & Engineering, Rel. Levi M., Politecnico di Milano

Starsk Lara, Nasim Fashami, Sasa Jokic (2012), FabClay project, IaaC Barcelona, Spain

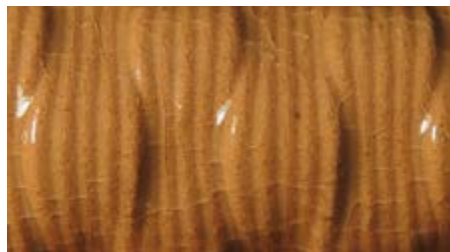
Tseng A.A., A. Tanaka, (2001), Advanced deposition techniques for free-form fabrication of metal and ceramic parts, Rapid Prototyping journal number 1

Verbruggen D. (2014), The Digital Craftsman and His Tools, All Makers Now? Conference Journal

Verbruggen D. (2014), The road to better paste extrusion, articolo su Reprap magazine, issue 3

Warnier, D. Verbruggen, S. Ehmann, R. Klanten (2014), Printing things-Vision and Essentials for 3D Printing, Gestalten

Richerson D. (2005), Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing, and Use in Design, Taylor and Francis



SITOGRAFIA



<http://www.3ders.org/>

<http://www.3dsystems.com>

<http://3dprinterplans.info/colour-3d-printer-uses-ceramics/>

<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/>

<http://3dprint.com/43732/the-vormvrij-clay-3d-printer/>

A

<http://anishkapoor.com/621/Cement-room.html>

http://www.architectmagazine.com/technology/using-additive-manufacturing-to-build-with-materials-sourced-from-the-jobsite_o

B

http://bioslab.unile.it/allegati/4-ceramici_v3.pdf

<http://blog.archpaper.com/2015/02/wrapup-data-clay-symposium-cca/>

C

<http://www.ceramicreview.com/>

<http://www.ceramicacecchetto.it/index.php>

http://www.cibasimpasti.it/Faq_Cibas/faq_elenco%20materiali.html

<http://www.colorobbia.it/>

<http://www.contourcrafting.org/>

D

<http://www.data-clay.org/>

<http://www.dezeen.com/2011/09/04/scaffolding-brut-by-beta-tank/>

<http://www.dienkedekker.com/?m=201309>

E

<http://www.elstudio.nl/?p=1356>

<http://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s07.pdf>

F

<https://fabbots.wordpress.com/2012/12/09/fabclay-2/>

<http://www.fabfoundation.org/>

<http://www.floriswubben.nl/>

<http://www.fornacecurti.it/>

G

<http://gt2p.com/>

<http://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.en.html>

I

http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=54756

K

<http://www.keep-art.co.uk/index.htm>

N

<http://www.neroetrusco.it/public/blog/?p=44>

<http://www.news.com.au/technology/the-3d-printer-that-can-build-a-house-in-24-hours/story-e6frfmr-1226798960267>

O

<http://oliviervanherpt.com/>

P

<http://www.piulab.it/>

<https://plus.google.com/communities/116145651172948712093>

<https://plus.google.com/u/0/communities/109375785524125994679>

<http://portfolios.risd.edu/gallery/22581223Additive-Manufacturing-Ceramic-Facade>

R

http://reprap.org/wiki/Ceramic_Extrusion

http://reprap.org/wiki/Ceramic_delta

<http://reprap.org/wiki/RepRap>

S

<http://soudasouda.com/collections/furniture>

<http://sundaymorning.ekwc.nl/>

<http://www.steinzeug-keramo.com/39-4-Pezzi-speciali.html>

T

<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ceramics-materials-joining-and-applications-054/>

U

<https://ultimaker.com/>

<http://unfold.be/>

<http://unfoldfab.blogspot.co.uk/>

W

<http://www.wasproject.it/w/>

X

<http://www.xmlab.org/projects/dpz/dpz-2014/ceramic-3d-printing/>



img. 1, Endless chair, Dirk van der Kooij
fonte: <https://www.pinterest.com/pin/56224695317571510/>

pag. 16

img. 2, Adrian Bowyer
fonte: <http://www.groaction.com/discover/3725/crowdsourcing-manufacturing-reprap-3d-printing-adrian-bowyer/>

pag. 18

img. 3, tecnica del colombino
fonte: <http://clay.scwclubs.com/files/2012/12/coiling.jpg>

pag. 21

img. 4, stampa 3D
fotografia di: Maria Luisa Miotti (Milano, 2015). archivio personale

pag. 21

img. 5, Scorrimento viscoso
fonte: <http://www.chimicamo.org/chimica-fisicaviscosita.html>

pag. 23

img. 6, Stampa 3D di ceramica nel mondo.
fonte: "Make your own ceramic 3D printer", google plus community.

pag. 27

img. 7, Stampa 3D di ceramica in Europa.
fonte: "Make your own ceramic 3D printer", google plus community.

pag. 27

img. 8:
a, tornio elettronico.
b, estrusore.
c, depuratore per acqua in ceramica.
d, stampante basata sul modello reprap.
e, f, g, esempi di oggetti in ceramica.
h, vetro soffiato in matrice ceramica.
fonte: <http://unfold.be/>

pag. 29

img. 9:
a, serie "Iceberg"
b, componenti della stampante.
c, stampante
d, serie "Seeds"
e, serie "Random Growth"
f, stampante in corso di stampa
fonte: <http://www.keep-art.co.uk>

pag. 31

INDICE DELLE IMMAGINI



img. 10: a, f, estrusore in corso di stampa. b, c, d, prove di stampa. e, stampante basata sul modello delta. g, texture di un oggetto stampato. h, esempi di oggetti stampati in ceramica. fonte: http://oliviervanherpt.com	pag. 33
img. 11: a, h, etrusore in corso di stampa. b, struttura stampata in terra cruda. c, modelli abitativi. d, stampante Delta Wasp. e, f, esempi di oggetti in ceramica. g, big Delta in corso di stampa. fonte: http://www.wasproject.it	pag. 35
img. 12: a, b, g, esempi di oggetti in ceramica. c, studio VormVrij. d, stampante per ceramica Lutum. e, estrusore in corso di stampa. f, serbatoi per la stampante. fonte: http://3dprint.com/43732/the-vormvrij-clay-3d-printer/	pag. 37
img. 13, progetti realizzati al +LAB fonte: archivio +lab	pag. 39
img. 14, estrusore a siringa fonte: archivio +lab	pag. 41
img. 15, estrusore a vite senza fine. fonte: archivio +lab	pag. 43
img. 16, lavorazione artigianale della terraglia fonte: http://ingpeaceproject.com/newark-museum-arts-workshop-ings-peace-project/pottery-the-wheel-thrown-vessel-with-john-watts-part-2/	pag. 48
img. 17, . oggetti in porcellana fonte: http://artaurea.com/profiles/lee-jeong-won-2	pag. 49
img. 18, piastrelle in gres porcellanato fonte: http://www.artisanbts.co.uk/tile-collections/fioranese/	pag. 50
img. 19, particolare di mattone refrattario speciale fonte: http://www.rsitaly.it/www/galleria_en.html	pag. 51

img. 20, componenti meccaniche in ceramica tecnica fonte: http://inn-therm.pl/produkty/ceramika-techniczna-kszaltki-wysokotemperaturowe/	pag. 52
img. 21, processo del stampaggio a barbotina fonte: <i>fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems, fourth edition</i>	pag. 54
img. 22, processo della formatura plastica fonte: <i>fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems, fourth edition</i>	pag. 55
img. 23, processo della pressatura a umido fonte: <i>fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems, fourth edition</i>	pag. 56
grafico 1, pressione necessaria vs. percentuale di acqua. fonte: <i>fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems, fourth edition</i>	pag. 57
img. 24, stampa su supporto in mdf fotografia di: Maria Luisa Miotti (Milano, 2015). archivio personale:	pag. 72
img. 25, processo di ritiro in essiccamento e cottura fonte: <i>fundamentals of modern manufacturing, materials, processes, and systems, fourth edition</i>	pag. 75
img. 26, parametri di base in Cura fonte: Cura	pag. 106
img. 27, riempimento del 24% fonte: Cura	pag. 128
img. 28, riempimento del 25% fonte: Cura	pag. 128
img. 29, parametri avanzati in Cura fonte: Cura	pag. 129
img. 30, parametri di retraction in cura fonte: Cura	pag. 129
img. 31, strumenti per la lavorazione della ceramica fonte: http://www.idartsupply.com/	pag. 168
Tutte le fotografie della parte 2. La sperimentazione, sono state realizzate da Maria Luisa Miotti e appartengono al suo archivio personale (Milano 2015)	