



Effetto del processo di cottura sui pezzi ceramici decorativi stampati con produzione additive



Efecto del proceso de cocción de piezas cerámicas decorativas impresas por manufactura aditiva

Hernández-Hernández, Celia Massiel ^a, Melo-Máximo, Lizbeth * ^b, Melo-Máximo, Dulce Viridiana ^c e Vega-Morón, Roberto Carlos ^d

^a ROR Instituto Tecnológico de Tlalnepantla •  0000-0002-2472-8683 •  1107422

^b ROR Instituto Tecnológico de Tlalnepantla •  0000-0002-7081-0661 •  299373

^c ROR Polytechnic University of the Valley of Mexico •  0000-0001-7488-7677 •  170068

^d ROR Instituto Tecnológico de Tlalnepantla •  0000-0003-4772-7904 •  513822

Classificazione:

DOI: <https://doi.org/10.35429/P.2025.1.35.42>

Area: Ingegneria

Campo: Ingegneria

Disciplina: Ingegneria chimica

Sottodisciplina: Materiali ceramici

Punti chiave del manuale

Questo studio si concentra sul processo di cottura di pezzi di argilla per la loro conversione in ceramica mediante il metodo della forgia e del forno, effettuando un confronto tra le trasformazioni fisico-chimiche indotte da ciascuna tecnica. Si sottolinea che il processo di forgiatura consente l'essiccazione del pezzo con un minor consumo energetico, ma con lo svantaggio che le proprietà di finitura superficiale sono diverse rispetto al processo di cottura in forno. L'argilla in pasta ha mostrato un buon comportamento strutturale oltre che estetico, evidenziando variazioni di colore, minore porosità e quindi maggiore omogeneità nell'ottenimento di pezzi decorativi, oltre al fatto che il metodo di cottura in forno elettrico migliora notevolmente le caratteristiche del materiale dopo il processo di vetrificazione.

Area: Promozione della ricerca all'avanguardia e della scienza di base in tutti i campi del sapere

Citazione: Hernández-Hernández, Celia Massiel, Melo-Máximo, Lizbeth, Melo-Máximo, Dulce Viridiana e Vega-Morón, Roberto Carlos. 2025. Effetto del processo di cottura sui pezzi ceramici decorativi stampati con produzione additive. 35-42. PIREQA.

* ✉ [\[lizbeth.mm@tlalnepantla.tecnm.mx\]](mailto:lizbeth.mm@tlalnepantla.tecnm.mx)

URL dello scaffale del manuale: <https://www.pireqa.org/proceedings.php>



ISBN 978-607-8948-70-3 /©2009 Autore/i. Pubblicato da PIREQA-México, S.C. per la sua Holding Mexico per conto dell'Proceeding PIINI. Questo è un libro ad accesso libero con licenza CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Revisione tra pari sotto la responsabilità del Comitato Scientifico MARVID®- nel contributo al processo di revisione tra pari in ambito scientifico, tecnologico e dell'innovazione attraverso la formazione delle risorse umane per la continuità nell'analisi critica della ricerca internazionale.



Sommario

Questa ricerca ha confrontato il comportamento di quattro tipi di argilla utilizzati nella produzione additiva per creare oggetti decorativi. Gli oggetti sono stati sottoposti a due metodi di cottura: forno elettrico e fucina. La modellazione e la progettazione sono state eseguite utilizzando il software open source SketchUp e Ultimaker Cura. Gli oggetti sono stati caratterizzati mediante esame stereoscopico con ingrandimento 40x, sia della superficie che della sezione trasversale; sono state analizzate le variazioni di colore quando gli oggetti sono stati esposti a diverse condizioni di illuminazione. I risultati mostrano che le argille in polvere hanno un limite di utilizzo nella produzione additiva a causa delle fratture che hanno mostrato durante il processo di cottura. Tuttavia, il corpo in argilla ha mantenuto una buona uniformità e una porosità inferiore quando cotto in forno. È evidente che il tipo di argilla e il metodo di cottura influenzano in modo significativo la qualità meccanica ed estetica dei pezzi.



Stampa, Colorimetria, Argilla

Resumen

La presente investigación comparó el comportamiento de cuatro tipos de arcilla utilizando manufactura aditiva para generar piezas decorativas. Se sometieron a dos métodos de cocción: horno eléctrico y fragua. El modelado y diseño de las piezas se realizó en el software libre SketchUp y Ultimaker Cura. Las piezas se caracterizaron por estereoscopia a 40x tanto de la superficie como de la sección transversal; se analizaron los cambios de color al exponer las piezas a diferentes ambientes luminosos. Los resultados exhiben que las arcillas en polvo mantienen una limitante para su uso en la manufactura aditiva por las fracturas que presentaron desde el proceso de cocción, sin embargo, la pasta mantuvo una buena uniformidad, menor porosidad al utilizar la cocción por horno. Se evidencia que el tipo de arcilla y el método de quema influyen significativamente en la calidad mecánica y estética de las piezas.

Efecto del proceso de cocción de piezas cerámicas decorativas impresas por manufactura aditiva



Impresión, Colorimetría, Arcilla

Introduzione

La produzione additiva, o stampa 3D, ha conosciuto un grande boom negli ultimi anni poiché, rispetto ai processi sottrattivi [ad esempio la fresatura], presenta vantaggi quali la riduzione dei residui di produzione e la realizzazione di geometrie complesse con dettagli specifici che non è possibile ottenere con i processi convenzionali [Wolf, Rosendahl, & Knaack, 2022].

La produzione additiva ha aperto un panorama di gradi di libertà nella fabbricazione di prodotti che non sarebbero raggiungibili con un controllo solo XYZ, inoltre è possibile migliorare la qualità di stampa dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche e soprattutto estetiche. [Wolf et al., 2022]

La prima fase del processo consiste nel realizzare un progetto assistito da computer che sarà utilizzato come modello strutturale per la fabbricazione del pezzo finale, successivamente viene eseguito un processo di laminazione che fornirà le caratteristiche necessarie per generare un modello 3D nel linguaggio della stampante e in questo modo creare il pezzo strato dopo strato. [Horst, Duvoisin, & Vieira, 2018]

A seconda del materiale con cui si lavora, si deriverà il processo di produzione additiva, tuttavia esistono due modelli che presentano somiglianze: la struttura diretta a vasca, in cui si utilizza il processo di estrusione continua di un materiale [inchiostro] con buone caratteristiche reologiche; il secondo è la modellazione per deposizione fusa in cui, mediante estrusione, un filamento termoplastico semisciolto viene posizionato strato per strato e lasciato solidificare sulla piattaforma di stampa. [L. Chen et al., 2022]

Il processo di estrusione è comune alle due tecniche descritte nel paragrafo precedente, in cui è indispensabile mantenere la continuità dell'alimentazione del materiale per mantenere la consistenza degli strati stampati. Esiste una modellazione che utilizza queste stesse caratteristiche, il modello per deposizione in pasta. [Ruscitti, Tapia, & Rendtorff, 2020]

Il modello di deposizione in pasta utilizza come materia prima l'argilla/il fango, che può essere utilizzato sia in applicazioni ingegneristiche che artistiche; tutto inizia con la miscelazione di polveri composte principalmente da silicati di alluminio con acqua e, in alcuni casi, additivi o leganti, con cui viene scolpita una forma tridimensionale. [Z. Chen et al., 2019]

Una volta ottenuto il pezzo richiesto con le caratteristiche specifiche, è necessario lasciarlo asciugare a temperatura ambiente affinché si solidifichi con l'evaporazione del contenuto di acqua o solventi del materiale; dopo questo processo, il pezzo viene denominato "pezzo verde". Una volta ottenuto il pezzo "verde", è necessario sottoporlo a un processo di sinterizzazione ad alte temperature per ottenere la densificazione del materiale e conferirgli le caratteristiche di un ceramico. [Z. Chen et al., 2019]

La cottura è un processo in cui i materiali argillosi sono sottoposti a cambiamenti fisico-chimici subendo una serie di trasformazioni; il cambiamento inizia con la disidratazione, successivamente, aumentando la temperatura, il materiale genera una fase vetrosa a causa della mobilità atomica che riduce la porosità, aumenta la resistenza meccanica e la densità. È importante controllare la velocità di cottura per evitare che una contrazione rapida produca tensioni che favoriscono la formazione di crepe e difetti nel pezzo. [Gómez, Blanco, & Mora, 2018]

I fattori determinanti della trasformazione dei materiali argillosi dipendono dalla loro composizione mineralogica, tuttavia gli studi sperimentali indicano che il punto di fusione di questi materiali si trova tra i 1000 °C e i 1500 °C; prima di questo punto critico, le fasi strutturali cambiano a causa del fenomeno della deidrossilazione [perdita di gruppi idrossilici generalmente sotto forma di acqua]. [González, García, & Martínez, 1983]

Il processo di cottura è lo stesso indipendentemente dalla tecnica utilizzata, sia che si tratti di un forno a gas, elettrico o rudimentale a legna. È importante considerare che i pezzi non possono essere sottoposti a temperature elevate in modo brusco, esistono fasi fondamentali che devono essere controllate per ridurre al minimo i difetti nel pezzo: preriscaldamento, cottura e raffreddamento. [Gómez et al., 2018]

La curva di riscaldamento inizia a temperature comprese tra 150 °C e 200 °C, quando il materiale rilascia completamente l'acqua contenuta e inizia la decomposizione del silicato di allumina; quando il materiale raggiunge i 500 °C, la materia organica proveniente dalla decomposizione dell'argilla pura brucia; tra i 700 °C e gli 800 °C circa si forma una miscela di ossido di ferro, magnesio, calcio, allumina e vari silicati che daranno luogo alla formazione della fase vetrosa da 800 °C a 1200 °C a seconda del tipo di argilla.

La cottura è completata quando gli ossidi, i silicati e l'allumina si uniscono formando strutture cristalline che vetrificano il materiale, che manterrà la sua forma indefinitamente. Successivamente, come all'inizio del processo di cottura, è fondamentale aumentare la temperatura in modo controllato; il processo di raffreddamento deve essere effettuato allo stesso modo per evitare sollecitazioni del materiale che potrebbero portarne al cedimento. [Arquíñigo Trujillo, 2011]

A seconda della temperatura raggiunta nel processo di cottura, i pezzi di argilla presentano diverse tonalità a causa della contrazione dovuta al riscaldamento e al cambiamento di densità. Se il pezzo continua a riscaldarsi dopo aver raggiunto la sua massima densità, la fase vetrosa favorisce nuovamente l'espansione e il surriscaldamento, figura 1. [Dave, 2022]

Scatola 1

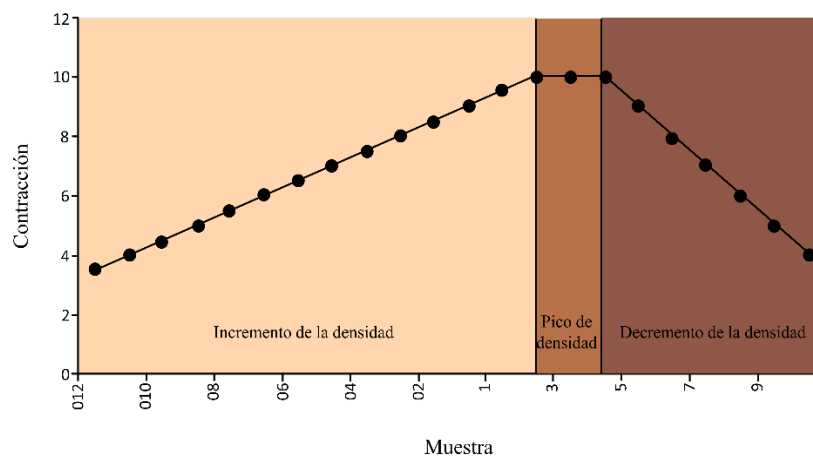


Figura 1

Curva di contrazione per un corpo di argilla [Dave, 2022]

Il presente lavoro si concentra proprio su quest'ultima caratteristica, mettendo a confronto due processi di cottura. Vengono stampati elementi decorativi di circa 4,5 cm di altezza mediante produzione additiva utilizzando 4 tipi di argilla. Gli elementi vengono cotti con un metodo rudimentale simile alla fucina, utilizzando legna da ardere, dopodiché vengono cotti in un forno elettrico. Entrambi i processi sono stati caratterizzati mediante stereoscopio per identificare i difetti sia del processo di estrusione che di cottura, inoltre, utilizzando Smart Tools con l'applicazione Color Picker, sono stati identificati i modelli di colore in due ambienti diversi: luce naturale e luce artificiale.

Metodologia

Per poter visualizzare le differenze tra i processi di cottura, si è optato per la creazione di pezzi decorativi, prendendo ispirazione da una figura umana [donna], semplice e senza dettagli marcati.

-Progettazione del pezzo

Il progetto è stato realizzato con il software di modellazione online SketchUp, successivamente laminato con il software open source CURA.

- Preparazione della materia prima

Sono stati selezionati quattro tipi di argilla: tre in polvere [verde, rossa e nera] e l'ultima in pasta. Le argille in polvere sono state preparate in un rapporto di 80% di solido e 20% di liquido fino a ottenere una consistenza plastica.

- *Stampa del pezzo*

L'argilla viene caricata nel contenitore della stampante per iniziare la generazione del pezzo. È importante sottolineare che, per evitare che la figura perda improvvisamente la sua umidità, come base di stampa viene utilizzata una piastra di acciaio. La velocità di stampa è impostata a 20 mm/s e l'altezza tra gli strati a 1 mm. La stessa procedura viene eseguita per i quattro tipi di argilla, che vengono poi lasciati asciugare all'ombra fino al cambiamento di colore [da opaco a chiaro].

- *Cottura dei pezzi mediante forgia*

Per la cottura con il metodo tradizionale è stato utilizzato un “anafre”, mattoni refrattari e un pezzo di argilla per costruire una sorta di forno e dirigere la fiamma generata direttamente sui pezzi. Prima di inserire le figure nel forno, vengono lasciate temperare naturalmente al calore del sole per circa 1 ora. Quando inizia a generare calore, i pezzi vengono posizionati in modo che la fiamma li colpisca direttamente; con i mattoni si forma una camera che avrà un'uscita nella parte superiore [pezzo di argilla] come mostrato nella figura 2. Il processo ha avuto una durata di 12 ore per la cottura e 12 ore extra per il raffreddamento.

Scatola 2

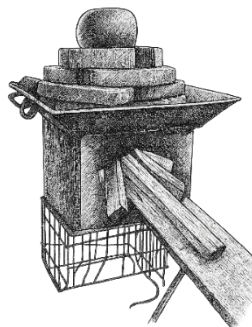


Figura 2

Schema del processo di forgiatura [immagine elaborata con IA]]

- *Cottura dei pezzi in forno elettrico*

È stato utilizzato un forno elettrico a basso costo che ha raggiunto una temperatura di 750 °C. Come nel processo di forgiatura, i pezzi vengono temperati, in questo caso riscaldati a una temperatura compresa tra 40 °C e 50 °C prima di essere inseriti nel forno. Il processo complessivo è durato circa 6 ore di riscaldamento, seguito da un raffreddamento di circa 8 ore.

Scatola 3

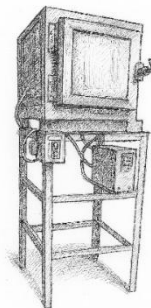


Figura 3

Schema del processo del forno elettrico [immagine elaborata con IA]]

- *Caratterizzazione*

I pezzi cotti sono stati valutati mediante stereoscopia a 40x, inoltre è stata identificata la tavolozza dei colori sotto luce naturale e artificiale [bianca] tramite un software.

Risultati

Sono stati generati pezzi in duplicato che hanno mostrato una buona omogeneità durante la stampa, tuttavia, nel processo di evaporazione dell'acqua, le argille rossa, verde e nera hanno mostrato fratture di grande entità, per cui per la cottura in forno elettrico è stata utilizzata solo la stampa di argilla in pasta.

Il design del pezzo ha presentato un piccolo difetto nella laminazione poiché, come si può osservare nella figura 4a, il modello originale presenta piccole mani che nella laminazione sono andate perse a causa dello spessore dello strato [figura 4b].

Scatola 4

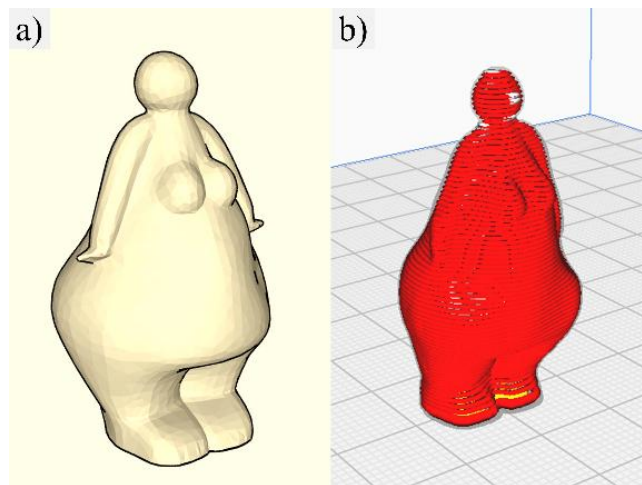


Figure 4

Modellazione del pezzo. a) Progettazione del pezzo con il software SketchUp; b) Laminazione del pezzo con Ultimaker Cura

I pezzi stampati sono stati sottoposti a due ambienti luminosi, le palette di colori hanno mostrato una variazione tra loro poiché in un ambiente artificiale i colori diventano più scuri, come possiamo osservare nella figura 5.

Scatola 5



Figura 5

Cambiamento di colore dei pezzi stampati in un ambiente naturale [parte superiore] e artificiale [parte inferiore].

La caratterizzazione mediante stereoscopia mostra il deposito strato per strato dell'argilla; nella sezione trasversale è possibile osservare strutture laminari e cavità generate dal processo di vetrificazione.

Il cambiamento più evidente si osserva nelle immagini del pezzo stampato in pasta, poiché i due metodi di cottura hanno generato una colorazione diversa, oltre a ridurre la porosità durante la cottura in un forno elettrico, figura 6.

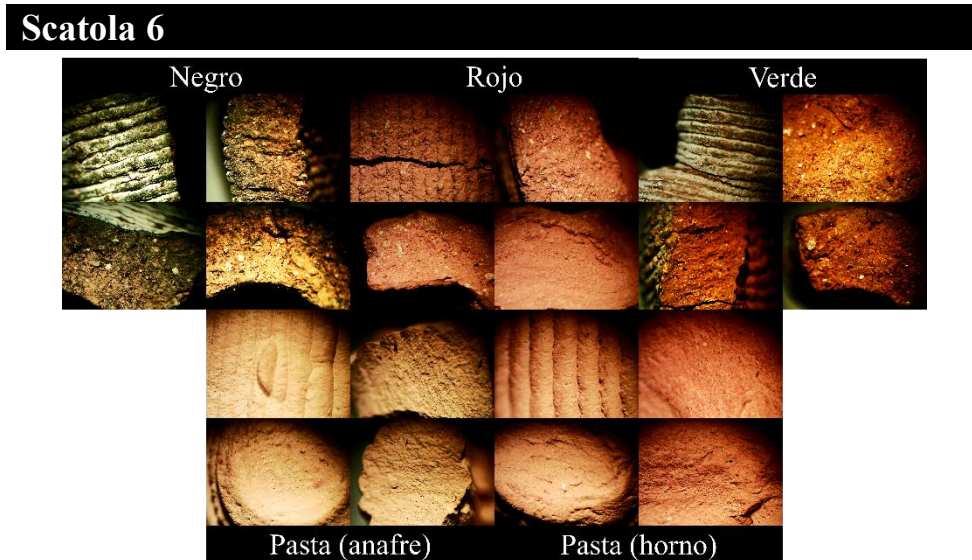


Figura 6

Stereoscopia 40x della sezione trasversale e superficiale dei pezzi

Conclusioni

La produzione additiva di argille presenta sfide tecniche che vanno dalla modellazione 3D dei pezzi alla loro laminazione, oltre al fatto che le argille in polvere tendono a fratturarsi durante il processo di essiccazione e cottura. L'argilla in pasta ha mostrato un buon comportamento strutturale oltre che estetico, evidenziando variazioni di colore, minore porosità e quindi maggiore omogeneità nell'ottenimento di pezzi decorativi, oltre al fatto che il metodo di cottura in forno elettrico migliora notevolmente le caratteristiche del materiale dopo il processo di vetrificazione.

Conflitto di interessi

Gli autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interessi. Non hanno interessi finanziari o relazioni personali che potrebbero aver influenzato questo libro.

Contributo degli autori

Hernández-Hernández, Celia Massiel: sperimentazione, caratterizzazione, analisi dei risultati, scrittura.

Melo-Máximo, Lizbeth: Consulenza sul progetto, concettualizzazione, analisi dei risultati, scrittura.

Melo-Máximo, Dulce Viridiana: Consulenza, concettualizzazione, caratterizzazione, analisi dei risultati.

Vega-Morón, Roberto Carlos: Consulenza sul progetto, concettualizzazione, analisi dei risultati, scrittura.

Disponibilità di dati e materiali

Pubblici.

Finanziamento

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del bando 2025: Progetti di ricerca scientifica, sviluppo tecnologico e innovazione, intitolato "Produzione di substrati ceramici mediante manifattura additiva, modificati superficialmente per ottenere proprietà fotocatalitiche"; M00-PR-03-R02 Progetto [22624].

Ringraziamenti

Ringraziamo SECIHTI per la borsa di studio concessa per svolgere gli studi di dottorato, il Tecnológico Nacional de México e l'Instituto Tecnológico de Tlalnepantla per l'opportunità di svolgere gli studi post-laurea e per il permesso di utilizzare le strutture del Laboratorio di Sintesi e Caratterizzazione.

Riferimenti

Antecedenti.

Chen, L., Zhou, S., Li, M., Mo, F., Yu, S., & Wei, J. [2022]. [Catalytic Materials by 3D Printing: A Mini Review](#). *Catalysts*, 12, 1081. doi:10.3390/catal12101081

Horst, D., Duvoisin, C., & Vieira, R. [2018]. [Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review](#). *International Journal of Engineering and Technical Research*, 8, 3-8.

Wolf, A., Rosendahl, P. L., & Knaack, U. [2022]. [Additive manufacturing of clay and ceramic building components](#). *Automation in Construction*, 133, 103956.

Elementi fondamentali

Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., . . . He, Y. [2019]. [3D printing of ceramics: A review](#). *Journal of the European Ceramic Society*, 39[4], 661-687.

Ruscitti, A., Tapia, C., & Rendtorff, N. [2020]. [A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes](#). *Cerâmica*, 66[380], 354-366.

Supporto

Arquíñigo Trujillo, W. N. [2011]. [Propuesta para mejorar la calidad estructural de los ladrillos artesanales de arcilla cocida de Huánuco](#).

Dave, F. [2022]. [A Simple Test Determines the Best Firing Temperature for a Clay Body, How to Determine How High to Fire Your Pottery Clay and Learn Your Ceramic Firing Temperature](#).

Gómez, G. G., Blanco, E. E., & Mora, N. E. [2018]. [Curva de cocción de la arcilla en la ladrillera el recreo](#). *Revista colombiana de tecnologías de avanzada [RCTA]*, 1[31], 35-41.

González, J. L., García, F. H., & Martínez, J. C. [1983]. [La arcilla como material cerámico. Características y comportamiento](#). *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 8, 479-490.