

Manufactura aditiva de materiales basados en suelos: estado actual y perspectivas futuras de esta tecnología de construcción amigable con el ambiente

Additive manufacturing of soil-based materials: state-of-the-art and future perspectives of this environmentally friendly construction technology

Nathalia Conde-Caicedo ^{1a}, Mónica A. Villaquirán-Caicedo ^{1b}, Ruby Mejía de Gutiérrez ^{1c}

¹ Grupo Materiales Compuestos (GMC), Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Colombia.
Orcid: 0009-0008-7278-623X ^a, 0000-0001-5145-0472 ^b, 0000-0002-5404-2738 ^c. Correos electrónicos:
nathalia.conde@correounivalle.edu.co ^a, monica.villaquiran@correounivalle.edu.co ^b,
ruby.mejia@correounivalle.edu.co ^c.

Recibido: 10 octubre, 2023. Aceptado: 27 marzo, 2024. Versión final: 2 mayo, 2024.

Resumen

En los últimos años, se ha generado gran interés en la construcción sostenible, lo que ha llevado a un mayor interés en la impresión 3D o manufactura aditiva. Sin embargo, el uso de esta técnica con materiales convencionales no es suficiente para disminuir el gran impacto ambiental que genera el sector de la construcción. Aunque la mayoría de las investigaciones y avances están centralizadas en la impresión 3D de concreto Portland, esta revisión se ha trabajado orientada hacia la impresión 3D de materiales de construcción basados en suelos y arcillas, los con los cuales se puede proporcionar un enfoque asequible (ya que es un material localmente disponible en muchas regiones del planeta), sostenible ambientalmente, y con bajo costo, lo cual es altamente beneficioso para la construcción de viviendas. Este documento se ha orientado hacia la búsqueda de literatura científica y prototipos que se han elaborado utilizando materiales ancestrales, como son suelos-arcillas-arena-fibras como paja y agua, para elaboración de piezas constructivas tipo muros o adobes impresos en 3D. El objetivo de este documento es cerrar la brecha sobre la utilización de mezclas basadas en suelos, que, aunque parezcan totalmente estudiadas por varios siglos, a la fecha su aplicación en impresión 3D es reducida. Reajustes en propiedades de las mezclas de suelos como la fluidez para el bombeo o extrusión, edificabilidad y buen tiempo de trabajo, son variables que se reportan en este documento. Además, en esta revisión se describen las mezclas que han sido desarrolladas para impresión 3D a partir de suelos y arcillas, y las principales características que se han encontrado. Finalmente, se presentan los desafíos que aún persisten para que las mezclas puedan aplicarse a una escala industrial masiva.

Palabras clave: manufactura aditiva; impresión 3D de suelos; materiales basados en tierra; adobe; cob.

Abstract

In recent years, there has been great interest in sustainable construction, which has led to an increased interest in 3D printing or additive manufacturing. However, the use of this technique with conventional materials is not enough to reduce the large environmental impact generated by the construction sector. Although most of the research and advances are focused on the 3D printing of Portland concrete, this review has been oriented towards the 3D printing of building materials based on soils and clays, which can provide an affordable (as it is a locally available material in many regions of the planet), environmentally sustainable, and low-cost approach, which is highly beneficial for housing construction. This paper has been oriented towards the search of scientific literature and prototypes that have been elaborated using ancestral materials, such as soil-clay-sand-sand-fibers like straw and water, for the elaboration of constructive pieces such as 3D printed walls or adobes. The objective of this paper is to close the gap on the use of mixtures based on soils, which, although they seem to have been fully studied for several centuries, to date their application in 3D printing is reduced. Readjustments in properties of soil mixtures such as fluidity for pumping or extrusion, buildability and good working time are variables that are reported in this paper. In addition, this review describes the mixtures that have been developed for 3D printing from soils and clays, and the main characteristics that have been found. Finally, the challenges that still remain for the blends to be applied on a massive industrial scale are presented.

Keywords: additive manufacturing; soil 3D printing; soil-based materials; adobe; cob.

1. Introducción

Alrededor del mundo, las industrias han venido incursionando hacia la transformación digital, la cual se ha acelerado en diferentes sectores industriales por medio del crecimiento de tecnologías como la robotización inteligente, uso de sensores, instrumentación industrial, la manufactura digital, inteligencia artificial y aprendizaje asistido por máquina (en inglés *machine learning*). Esto ha generado que las empresas y los diferentes procesos industriales necesiten rápidamente adaptarse hacia la transformación digital y el avance tecnológico para ser más competentes en su sector, el término con el cual han agrupado lo mencionado anteriormente es industria 4.0 [1], [2]. Dentro de las tecnologías más populares en las industrias 4.0 está la impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, la cual se ha hecho popular en muchos sectores y en especial en el sector de la construcción civil.

La impresión 3D hace referencia a la fabricación de objetos por medio de la deposición de capa sobre capa, a partir del modelado del elemento que se va a imprimir a través de un diseño asistido por computador, luego mediante la combinación de diversas técnicas, da origen al objeto tridimensional mediante la superposición de capas [3], [4]. En el sector de la construcción civil esta tecnología ofrece varias ventajas en comparación con los métodos de construcción tradicionales. Por un lado, permite una mayor flexibilidad en términos de personalización y diseño, al mismo tiempo que mejora la seguridad y la accesibilidad, y reduce significativamente la cantidad de errores y residuos [5], [6], [7]. Debido a la integración entre el software y el equipo mecánico, es posible reducir significativamente el uso de mano de obra

y aumentar la eficiencia de producción [8], [9]. Se ha estimado que el tiempo de construcción de una estructura mediante impresión 3D es una cuarta parte del tiempo requerido por los métodos tradicionales [10], [11]. Esta ventaja puede ser especialmente valiosa en situaciones de emergencia, como catástrofes naturales o conflictos armados, donde las estructuras impresas pueden ser utilizadas para restaurar rápidamente la infraestructura y las viviendas [5]. Socialmente, el proceso de construcción tradicional es un trabajo intenso y puede ocasionar varios problemas de salud para los obreros. En Australia se ha estimado que 5,2% de los obreros reportan problemas de salud asociados a sus condiciones laborales, en Estados Unidos se ha estimado en 4,0%, en contraste la impresión 3D reduce la mano de obra y por lo tanto los problemas de salud asociados [12]. En lo económico hay igualmente ventajas, en la construcción convencional la mano de obra puede representar más del 50% del costo total y los materiales y equipos pueden representar hasta un 20% adicional, mientras en el caso de las estructuras impresas el costo del material puede ser mayor, pero el costo de mano de obra y accidentes laborales se reduce significativamente [6], [13].

La Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) reportó que en 2021 un 38% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial estuvieron relacionadas con el sector de la construcción [14]. Por otra parte, la construcción de edificaciones es considerada como una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), debido a la destrucción de hábitats naturales [15]. Además, la construcción tradicional y operación de edificios requieren una gran cantidad de energía y recursos

naturales (30% y 40%, respectivamente) [16]. Debido a esto es fundamental desarrollar alternativas de construcción con materiales más sostenibles que reduzcan el impacto ambiental tanto en la construcción como en la deconstrucción.

Por lo tanto, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre la impresión 3D utilizando materiales más amigables con el ambiente como lo son los suelos y arcillas. La revisión fue dividida en dos partes: (i) análisis bibliométrico de documentos científicos encontrados en la base de datos Scopus de Elsevier, utilizando para TITULO-RESUMEN-PALABRAS CLAVES la siguiente ecuación de búsqueda: *3d AND printing AND earth AND based AND clay OR cob OR adobe*. La búsqueda se realizó para publicaciones científicas en inglés entre el año 2010 hasta abril de 2024. Y la segunda parte (ii) consistió en la búsqueda en internet de casos de estudio y prototipado los cuales no salen reportados en Scopus puesto que no han sido difundidos a través de artículos o conferencias, y se explican en el capítulo 5 de este documento.

De los datos extraídos en la búsqueda bibliométrica en Scopus, un mapa de co-ocurrencias de las palabras claves fue elaborado con ayuda del programa de acceso libre VOSviewer. Los resultados arrojaron tan sólo 30 documentos científicos han sido publicados sobre impresión 3D de materiales basados en suelos o arcillas (Figura 1), indicando que hay mucho por explorar en este campo.

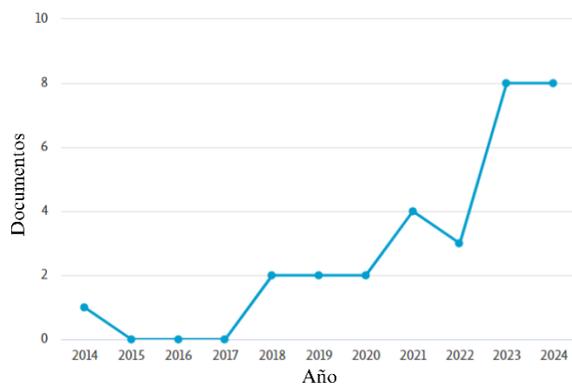


Figura 1. Documentos por año sobre la impresión 3D de materiales basados en suelos y/o arcillas en TITULO-RESUMEN-PALABRAS CLAVES, empleando la ecuación de búsqueda: *3d AND printing AND earth AND based AND clay OR cob OR adobe*. Información colectada y procesada de la base de datos Scopus. Fuente: elaboración propia.

De los 30 documentos encontrados, autores mayoritariamente de Estados Unidos y Reino Unido

reportan 9 y 7 documentos respectivamente. Los autores Gommaa, Mohamed de la Universidad de Melbourne con 6 documentos y Jabi, Wassim de la Universidad de Cardiff en Reino Unido con 5 documentos cada uno son los que más han publicado en el tema. En cuanto a la tipología de los documentos el 63% corresponde a artículos de investigación, y el 11% a capítulos de libros (Figura 2).

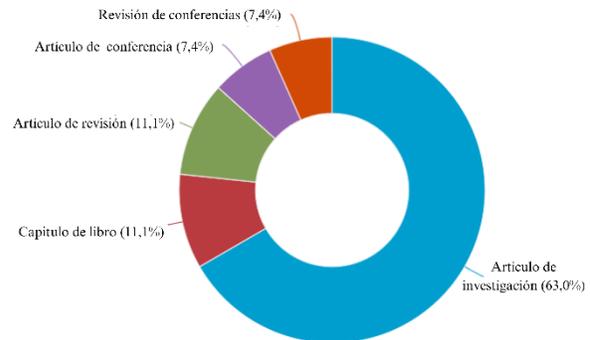


Figura 2. Documentos por tipo sobre la impresión 3D de materiales basados en suelos y/o arcillas Información colectada y procesada de la base de datos Scopus. Fuente: elaboración propia.

El análisis de co-ocurrencia de las palabras claves se reporta en el análisis bibliométrico de la Figura 3 (clusters) y Figura 4 (mapeo de densidad de la co-ocurrencia). Se han podido identificar 4 clusters de co-ocurrencia con las siguientes palabras claves: 1) *additive manufacturing* (color rojo); 2) *compressive strength* (color verde); 3) *adobe* (color azul); y 4) *global warming* (color amarillo).

De la Figura 4, el mapa de calor identifica que las palabras predominantes son “*additive manufacturing*” y “*compressive strength*”, aunque también se identifica palabras como “*cob, earth-based material and clay*” las cuales son el objetivo de esta revisión.

Basados en el anterior contexto, el objetivo de este artículo es generar un puente entre la investigación científica que se ha reportado para la impresión 3D de materiales basados en suelos/arcillas y los casos de estudio que se han presentado en diferentes partes del mundo. A su vez, la impresión 3D de materiales basados en suelos y arcillas tienen la ventaja de poseer un menor impacto ambiental en comparación a la construcción con cemento [17], no obstante, los parámetros de diseño de las mezclas todavía no están claros. Esta revisión crítica pretende establecer una percepción de los autores sobre el potencial y limitaciones de la impresión 3D de materiales de construcción basado en suelos y arcillas.

2. Manufactura aditiva en el sector de la construcción

El proceso de impresión 3D empleado en el sector de la construcción más popular es el que utiliza la extrusión, debido a su rendimiento, bajo costo y capacidad para producir piezas de una manera rápida. Para garantizar la eficacia de este proceso, es fundamental que los materiales utilizados posean ciertas propiedades específicas, como la “extrudabilidad”, la “fluidez” y la “edificabilidad” [18], [19]. La extrudabilidad se refiere a la capacidad de los materiales para ser extruidos sin obstrucciones en los componentes de la maquinaria, como los tubos y las boquillas. La fluidez se relaciona con la capacidad de un material para fluir de manera uniforme y constante, lo que permite una impresión 3D eficiente sin separación ni sangrado. Por último, la edificabilidad se refiere a la capacidad de un material para mantener su forma sin deformarse ni colapsar durante la extrusión y la superposición de capas [5], [20], [21], [22].

Diferentes proyectos alrededor del mundo han planteado la posibilidad de utilizar impresión 3D para la construcción de estructuras de concreto. En Austin (Texas), un centro para personas sin hogar fue construido en tan sólo 27 horas empleando concreto portland [23]; en Tabasco (México) un vecindario entero (New Story) ha sido fabricado empleando tan solo 24 horas por casa [24]. En Ontario (Canadá), han construido la casa Cobod Bod 2.5 empleando una gran impresora de concreto de la empresa Nidus 3D [25]. Al sur de Alemania en la ciudad de Heidelberg han construido en tan sólo 140 horas de trabajo un edificio en concreto de 55m de largo, 11m de ancho y 9m de alto [26]; aquí en Colombia, fue construida la primera casa de un nivel empleando concreto portland, el proyecto fue realizado entre la Constructora Conconcreto y Corona® [27], [28], [29]. Sin embargo, aunque el desarrollo de la impresión 3D es de gran interés en los últimos años, el material más popular empleado para estos desarrollos es el concreto de cemento portland (OPC). No obstante, su producción y uso a gran escala ha generado importantes emisiones de CO₂ a nivel mundial (7%) [30], gran consumo energético [31], consumo de recursos naturales [32] y contaminación del aire, suelo y agua [33].

Por lo anteriormente descrito, estudiar materiales alternativos que puedan llegar a reemplazar grandes cantidades de OPC es una solución para desarrollar mezclas sostenibles en los procesos de impresión 3D. Algunos de los materiales alternativos sostenibles para la impresión 3D, incluyen geopolímeros, cementos aluminosos, cementos a base de óxido de magnesio (MgO), materiales a base de yeso y arcillas calcinadas

[20]. Otra alternativa que ha captado la atención de los investigadores son los suelos, ya que el uso de materias primas locales puede promover la sostenibilidad económica y ambiental [17], además de reducir costos, retrasos y la huella ecológica relacionados con el transporte de los materiales y herramientas necesarias para llevar a cabo el proyecto, dando a su vez el beneficio del confort térmico [34]. No obstante, los suelos sin tratar presentan algunas desventajas, como la baja resistencia mecánica, la alta vulnerabilidad a la erosión por agua y el agrietamiento durante el secado [35]. Por lo tanto, se ha investigado la adición de diferentes materiales para disminuir estas desventajas. Estos aspectos serán objeto de discusión en las siguientes secciones.

3. Materiales de construcción basados en suelos

A lo largo de la historia, muchas culturas han utilizado materiales basados en el suelo para la construcción. En África, por ejemplo, se ha utilizado la tierra cruda como material de construcción durante miles de años, así mismo, en América del Sur, los pueblos precolombinos construían con adobe y tapial [36]. En Europa, se han encontrado casas construidas con tierra cruda que datan de hace más de 8.000 años. La construcción con suelos se basa en los materiales, necesidades y habilidades locales, lo que ha llevado a su redescubrimiento reciente debido a su bajo costo, baja conductividad térmica y bajo impacto ambiental, el cual se asocia a la no utilización de acero de refuerzo ni a la utilización de cemento [17]. La construcción con tierra permite una disminución de entre 38-83% del consumo de energía embebida, así como una reducción del potencial de cambio climático entre 60-82% en comparación con la construcción con concreto de cemento [37]. Aún hoy en día en las zonas rurales de América Latina, así como también en países como España, Francia, Italia, Inglaterra, Bélgica y República Checa se pueden encontrar edificaciones con muros y paredes elaborados con monolitos de mezclas de suelo+arena+paja conocida como “cob” [34], [38], [39], [40], [41].

La construcción con suelos se divide en dos categorías principales según el tipo de mezcla y características del proceso [39]. Los (*i*) métodos húmedos usan suelo en estado plástico y la resistencia se gana mediante el endurecimiento durante el proceso de secado. Esto incluye la arcilla a la que se le añade agua, también el adobe y el cob que se componen de suelo, agua y fibras (por ejemplo, paja de arroz o trigo), lo que aumenta su resistencia a la tracción y reduce la contracción, resultando en un mayor rendimiento térmico y estructural [42]. El adobe se refiere a la construcción utilizando ladrillos secados al sol, mientras que el cob se refiere a la construcción de muros de tierra monolíticos [22], [39],

[43]. Los materiales basados en suelo mediante este método tienen resistencias bajas si se compara al cemento, estando en el rango de 0,4-5 MPa [37], [44].

El (ii) método seco involucra la compactación del suelo sin la adición de agua (*rammed earth construction en inglés*). Entre estos se encuentra la tierra apisonada, que ocasionalmente se le añade cal y/o cemento para estabilizar la mezcla [2]. Los muros de tierra desempeñan funciones tanto portantes como no portantes y su grosor varía según el tipo de construcción, la función del muro y las cargas previstas. En general, las propiedades mecánicas de las mezclas de tierra dependen de varios factores, como las propiedades del subsuelo, el contenido de agua, el uso de fibra y la calidad de la mano de obra [45], [46], [47], para este método se pueden encontrar valores de resistencia a compresión entre 5-20 MPa [48].

4. Impresión 3D de materiales basados en suelos

Los materiales de construcción basados en suelos representan un futuro prometedor para la disminución de la huella de carbono en el sector de la construcción. Las construcciones con materiales basados en suelos pueden tener un impacto ambiental significativamente menor que las construcciones convencionales que utilizan materiales a base de cemento, en especial por la disponibilidad de estos y su carácter renovable, además al encontrarse localmente se reduce la necesidad de su transporte, sumado a la ventaja del confort térmico de los materiales [21], [42]. Estos materiales son comúnmente asociados a pobres propiedades mecánicas y baja durabilidad, la cual es de manera general asociada a la gran variabilidad en la composición del suelo y la alta sensibilidad de los suelos al ser mezclados con agua. Por lo tanto, la estabilización del suelo es esencial para garantizar un mejoramiento de la resistencia mecánica y la durabilidad frente al agua [42], [49], [50].

La norma UNE 41410:2008 establece que el contenido de OPC utilizado para estabilizar suelos, no debe ser superior al 15%, la inclusión de OPC influye significativamente en el proceso de endurecimiento del material, y su desempeño mecánico puede verse mejorado hasta cuatro veces en comparación al suelo no tratado. A diferencia de los procesos de impresión en materiales basados en cemento, la impresión 3D de suelos difiere en el comportamiento de flujo viscoso, en el caso de impresión 3D de materiales basados en cemento requieren un aumento de viscosidad, no obstante, en el caso del suelo la viscosidad y pegajosidad es tan alta que se requiere reajuste en presión de extrusión o bombeo de la mezcla [49]. Por lo tanto, el suelo debe ser lo suficientemente fluido y de baja viscosidad para

que pueda fluir a través del sistema extrusión, y tener la suficiente edificabilidad en estado fresco [21], [22].

En estos materiales la fluidez no se puede medir con la norma estándar de los morteros la ASTM C230, por lo cual Rückrich y colaboradores han empleado un cilindro (45 mm Ø y 45 mm largo) el cual es llenado manualmente con la masa de suelo a extruir (Figura 5a), una vez llenado el cilindro se retira y se mide el diámetro de la masa de suelo dispersa (Figura 5b) [21]. El valor de fluidez se determina de acuerdo con la ecuación 1 [21].

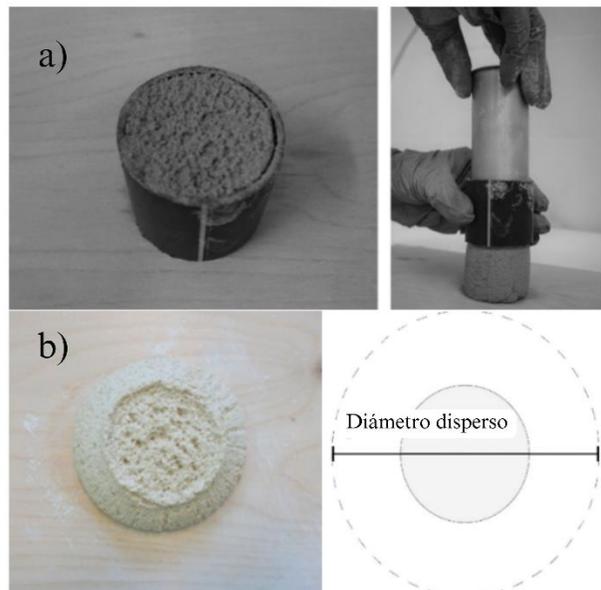


Figura 5. Mezcla de suelo en verde vaciada en cilindro y medición de fluidez [21].

$$\%fluidez = \frac{(\phi \text{ disperso} - \phi \text{ inicial})}{\phi \text{ inicial}} \times 100 \quad (1)$$

En la Tabla 1 se muestran las principales variables encontradas en los documentos científicos sobre impresión 3D de suelos/arcillas. Es de resaltar que la fluidez de los materiales compuestos basados en suelos es altamente sensible a la composición de mezcla.

Los materiales de construcción basados en suelos presentan algunas desventajas en comparación con el concreto convencional, como su inestabilidad al agua y su baja resistencia mecánica. Sin embargo, algunos investigadores han estudiado la incorporación de diversos materiales y fibras para mejorar estas propiedades. Entre las más comunes se encuentran las fibras naturales, como la paja y la fibra de coco, que se usan para mejorar la durabilidad y aumentar la resistencia a tracción y flexión.

Tabla 1. Materias primas, adiciones y aditivos empleados para la impresión 3D de suelos y arcillas en estado plástico (Parte 1)

Materia prima	Adiciones (%)	Aditivos	Agua (%)	Ensayos	Comentario
Arcilla caolinita y sedimento de suelo (20% máx.)	Arena (Ø máx 1 mm). Mejor desempeño usando entre 50%-60%.	Parafina: (2-10%)	35% y 45%	Resistencia a compresión	Max 2% de parafina. Mayores cantidades reducen Rc en más del 50%. Uso de parafina reduce la pegajosidad de la mezcla y por tanto esfuerzos cortantes en mezclas. Mezcla optima Rc: 1200 kPa
Arcilla caolinita (980 gr)	Caolín: arena 1:0,5; 1:1, 1:2, 1:3.	Fibras: 1,5%, 1,7%, 2,5%, 3%. Microfibras de celulosa (L: 40 µm). Estiércol de caballo (L: 0,5-1 cm). Cañamo (L: 1-2,5 cm)	12%, 14%, 15%	Fluidez, Bombeabilidad, Capacidad de extrusión, Edificabilidad Resistencia	Mortero (1:2) +1,7% microfibra Rc: 120 kPa. Imprimible, pero cordón no continuo Mortero (1:0,5) Rc: 69 kPa. I Imprimible, pero cordón no continuo Mortero (1:1) +1,7% microfibra Rc: 166 kPa. Imprimible y buena calidad
M1: Porcelana mezcla de impresión comercial V1: Arcilla-1 55% V2: Arcilla-2 32,25% V3: Suelo arcilla/limo 38,8%	V2: arena 48,38% V3: arena 28,8%	V1: 25% NaCl, V2: 0,53% hexametáfosfato (SHMP) V3: 0,43% SHMP + 0,43% fibras de paja.	V1: 55% V2: 18, 81% V3: 21, 54%	Velocidad de impresión: 5, 9 - 12, 15 mm/s.	<u>Extrusión en equipo 1:</u> Wasp extruder, con Ø boquilla: 1, 4, 6 mm, motor rotacional y tanque con pistón neumático. <u>Extrusión en equipo 2:</u> 3D potter Linear actuador extruder, boquilla: 12 mm, motor rotacional con actuador lineal.
48%-50% Arcilla caolinita - escoria siderúrgica- ceniza volante	Escoria + ceniza volante: 1:1, 1:2, 1:3. Arena	NaOH: 4M y 8M.		Fluidez (ASTM C1437), Capacidad de extrusión, Edificabilidad Resistencia	Fluidez entre 40-50% permiten las propiedades reológicas y fluidez necesaria para impresión 3D. 8M NaOH con arena y 1:2 permiten la mayor edificabilidad: 46 cm, Rc: 19-34 MPa.
Suelo - OPC		OPC: 13% Fibras de sisal 1% en peso.	18% - 24%	Trabajabilidad por medición del torque (<i>Shear Vane Test</i>)	La incorporación de fibras y OPC incrementa el esfuerzo de fluencia por corte. La mezcla de suelo + fibra sí está dentro del rango permitido para bombeabilidad.
- M1: 30%MK-15% CaCO ₃ -50%OPC. -M2: 50%MK-25% CaCO ₃ - 25% OPC -M3: 60%MK-30% CaCO ₃ - 10% OPC	Morteros: mezcla/Arena de 1:1,5	Superplastificante: policarboxilato eter (PCE) 1,5% para M1 y para M2 y M3 1,5% y 2%. Modificador de viscosidad: hidroxipropil celulosa (HPMC) en 0,24%	30%	Fluidez, Retención de forma, Retención de agua, Capacidad de extrusión, Tiempo de fraguado, Edificabilidad, Resistencia	La incorporación de HPMC mejora resultados de Retención de forma, aunque afectan la fluidez. Boquilla Ø: 15 mm
-Suelo arcilloso natural. -Suelo ingenieril (bentonita + arcilla caolinita + arena)	Suelo ingenieril con arena entre 27% y 50%.	<u>Suelo natural:</u> Biopolimero 9%; alginato de sodio y goma Locust. <u>Suelo ingenieril:</u> Biopolimero en 1% y 2%: metilcelulosa, chitosano, goma Guar, goma Xanthan, Fibras banano, sisal, kenaf, paja (2% y 13%).) y cañamo (2% y 13%).	27-36% 23-46%	Capacidad de extrusión Edificabilidad	<u>Extrusión en equipo 1:</u> Extrusión directa 3D PotterBot 4 Pro. <u>Extrusión en equipo 2:</u> Delta WASP 401000 Clay. Boquillas: 4,5,6 y 8 mm. Mezclas con paja y cañamo presentan alta edificabilidad y capacidad de extrusión. Longitud de fibras no mayor a 3 mm, por problemas de obstrucción.
73% suelo (19-20% arcilla y 80-81% arena)		2% Fibras de paja L: 3-5 cm	25%	Resistencia a compresión de cilindros impresos 20x40 cm Análisis estructural de diferentes modelos de muros	<u>Equipo de impresión:</u> 6-ejes KUKA KR60 HA brazo robótico. Boquilla Ø: 45mm Rc: 0,87 MPa y E: 22,9 MPa.

Tabla 1. Materias primas, adiciones y aditivos empleados para la impresión 3D de suelos y arcillas en estado plástico (Parte 2)

Materia prima	Adiciones (%)	Aditivos	Agua (%)	Ensayos	Comentario
Arcilla (caolinita, cuarzo, illita)		3% de Alginato sodico: Cimalgin HS3®	45%	Reología, Resistencia en verde (Penetrómetro)	Usar alginato permite que la mezcla alcance un mayor esfuerzo de fluencia y modulo elástico aparente
Suelo arcilloso ~50%	Arena: 11-17% Ca(OH) ₂ : 10-11,6% OPC: 2,4%	Fibras de paja 1,5%	24%-32%	Plasticidad, Resistencia, Capacidad de extrusión, Edificabilidad	Extrusión manual Extrusión bomba eléctrica Rc 80-180 psi
63%, 44% y 3,47% Suelo arcilloso natural (partículas Ø>1,2 mm se eliminaron)		Alginato sódico: 0,97%, 0,93%, 2,47% Fibra: 4,8%, 8,2% y 15% L: 0,5 - 4 mm	31%, 46%, 79%	Capacidad de extrusión Resistencia Impresión Ø: 30°, 20° y 15°	<u>Extrusión en equipo:</u> Extrusión directa 3D PotterBot 4 Pro, Ø: 6 mm <u>Extrusión manual:</u> tubo de Ø: 5 mm Rc vaciadas: 0,14-1,35 MPa y Rc impresas: 0,87 MPa, 0,65 MPa y 0,39 MPa
30% Suelo arcilloso 79%	15% Arena 11% Arcilla china 11% Arcilla ball TWVA	Fibras de paja 15%	18%	Extrusión cambiando altura de capa 30%, 60% y 90% del Ø boquilla	<u>Equipo de impresión:</u> 6-ejes KUKA KR60 HA brazo robótico. Boquilla Ø: 30 mm
Arcilla comercial para impresión 3D			30	Resistencia arcilla sinterizada. Calidad de piezas impresas	Equipo de impresión 3D Potterbot 7: evalúan efecto de la forma de boquilla (circular Ø: 6mm y cuadrada 6x6 mm)
Arcilla caolinita + residuo polvo arco eléctrico	EAF: 0, 10, 20 y 30%		50, 55 y 60%	Edificabilidad Resistencia Reología	20% de EAF y 50% agua, mezcla con buena edificabilidad y resistencia.
Arcilla caolinita		0,2% y 0,8% de Silicato de sodio. Poliacrilato de sodio	L/S: 0,32; 0,36 y 0,41.	Resistencia sinterizada Estabilidad dimensional Reología	Arcilla presenta comportamiento de fluido seudo-plástico. La viscosidad decrece con el incremento en el esfuerzo de corte. El uso de Poliactilato hace que comportamiento cambie a fluido dilatante, es decir aumento de viscosidad con el aumento del esfuerzo cortante.
Arcilla caolinita			0,57-0,65	Resistencia sinterizada Reología	Altas cantidades de agua (mayor a 0,65) generan segregación, agua menor cantidad al 0,57 genera obstrucción en la boquilla.
Arcilla caolinita comercial IP:16%	Calidad de extrusión por rugosidad superficial y distorsión de la forma medida por medio de Análisis Digital de imágenes.				Equipo de impresión 3D Potter 7. Velocidad de impresión evaluadas 30, 60 y 105 mm/s. Ninguno de las tres muestras impresas tiene las medidas exactas de diámetro y altura del diseño, además de presentar defectos superficiales
OPC-GGBS-Suelo	Arena	Superplastificante: policarboxilato (SP) Modificador de viscosidad: éter de celulosa	0,38-0,52	Propiedades en fresco Reología Resistencia a la compresión Carbono incorporado	La adición de suelo mejora las propiedades en estado fresco, pero disminuye las propiedades en estado endurecido.
Suelo + Fibras	3% de paja de trigo 8% de cáñamo 11% de kenaf 11% de plátano.	Alginato de sodio, metilcelulosa y goma de algarroba	52,1-60,7	Resistencia a la compresión Conductividad térmica Propiedades en fresco Parámetros de impresión	Aumento en un125% en la resistencia a la compresión y una reducción de hasta un 86% en la conductividad térmica.
Suelo + Cal Suelo + Yeso Suelo + Cemento	Cal, Yeso y Cemento en 20 y 40%	-	0,57-0,71	Características físicas, mecánicas, de durabilidad y microestructura	La resistencia a la compresión disminuyó entre 9 y 33% en comparación con los métodos convencionales. El coeficiente de conductividad térmica se redujo en un 43%. Los mejores resultados fueron con cemento.

Además, materiales como la arena y la piedra triturada se utilizan para mejorar la resistencia a compresión y disminuir la porosidad de las arcillas; adiciones de cemento, cal y biopolímeros han sido usados como estabilizadores químicos y en algunos casos para mejorar la resistencia [35], [40], [48], [51].

En cuanto a las fibras naturales, se recomiendan la utilización de fibras como paja y cáñamo, las cuales, son flexibles por los bajos contenido de lignina y se pueden orientar fácilmente durante el proceso de extrusión; fibras de fique, plátano y sisal no se recomiendan puesto que tienden a formar grumos. En cuanto a fibras de más de 3mm de longitud se encontró que bloquean el cordón de extrusión, y un comportamiento similar sucede con partículas de arena, además que ocasionan fricción entre la pared de extrusión del cilindro; mezclas con fibras de cáñamo requieren mayores presiones de extrusión (5-6 psi) en comparación a mezclas con paja (3-4 psi), lo cual han asociado a una mayor delgadez de la fibra de cáñamo, y por tanto tendencia a aglomerarse. Finalmente, aunque las mezclas de suelo con fibras sean amigables al medio ambiente, y se dejen imprimir, pasadas 24 h se ha encontrado que mezclas suelo y paja pueden hacer crecer moho en su superficie, mientras que a las mezclas con cáñamo no, lo cual han asociado a descomposición fúngica de la paja. Rückrich e investigadores [21], también encontraron que, al comparar diferentes fibras naturales, las fibras más largas (1-2 cm) demandaban un 2% más de agua para alcanzar la misma fluidez que con fibras de tamaño micro (40 μm), por lo tanto, las microfibras disminuyen los esfuerzos de fluencia. Así mismo, los materiales se pueden extruir cuando la fluidez está entre 67%-89%, con proporción arcilla:arena de 2:1, y 1,7% de microfibras; logrando un cordón con buena cohesividad, sin segregación y uniforme.

Carcassi y sus colaboradores llevaron a cabo el desarrollo de mezclas de cob maximizando el contenido de fibra, alcanzando un 49% en volumen de fibras, equivalente al 13% en peso. Para lograrlo, emplearon una variedad de fibras que incluyen paja, cáñamo, kenaf y banano. Los resultados fueron extremadamente satisfactorios: observaron un aumento de hasta un 125% en la resistencia a la compresión y una reducción de hasta un 86% en la conductividad térmica [52].

Veliz e investigadores estudiaron la viabilidad de impresión 3D de tintas basadas en cob por medio de procesos de extrusión (Figura 6). Entre sus resultados más relevantes están que la utilización del cob genera una extrusión lenta, falta de uniformidad en el cordón impreso y un ciclo de relleno corto. Sin embargo, cambiar el contenido de agua de la mezcla de 18% al 25% facilitó el proceso de impresión [53], [54].

También Gomaa e investigadores realizaron pruebas de conductividad térmica en cuatro tipos de paredes de cob impresas en 3D a una escala de 1:4 (Figura 7), obteniendo resultados de 0,32 W/mK, lo que representa una conductividad térmica menor en comparación con la mayoría de los muros convencionales producidos de concreto y ladrillos de mampostería [34].

Posteriormente, los mismos autores evaluaron varios sistemas de impresión y diferentes variaciones geométricas para estos materiales y los resultados obtenidos indican que el sistema de extrusión desarrollado mejora significativamente el proceso de impresión 3D del cob en términos de velocidad de extrusión, continuidad del cordón impreso, consistencia, movilidad y acabado de la mezcla [55]. Así mismo se ha evaluado la capacidad estructural de muros impresos en cob, demostrando que estos muros pueden llegar a ser aptos para actuar como muros de carga en casas de pocos pisos [48].



Figura 6. Impresión 3D de Cob [53].



Figura 7. Impresión 3D de Cob [55].

En el caso de estudio de Gomaa e investigadores [48], los cilindros de suelo+paja impresos alcanzaron resistencias a compresión de 0,87 MPa, valores comparables a los resultados de muestras elaboradas por vaciado (0,4-1,35 MPa), y aunque parezcan valores bajos; han logrado diseñar muros estructurales a partir de diferentes geometrías (Figura 8) los cuales permiten el soporte de carga de edificaciones de hasta de dos pisos, además de

confort térmico y bajas emisiones de CO₂, sumado a bajo costo de los materiales.

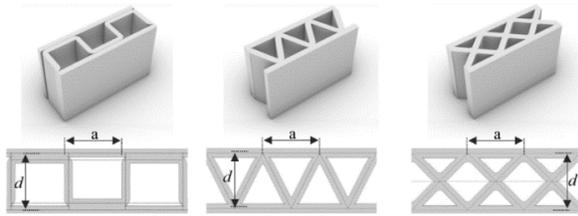


Figura 8. Muros impresos con diferentes geometrías [48].

Por otro lado, Sahoo y Gupta evaluaron mezclas basadas en suelo, con escoria siderúrgica (GBFS por sus siglas en inglés) y ceniza volante (FA por sus siglas en inglés), mezcladas con soluciones de NaOH al 4M y 8M. Los resultados mostraron que mezclas de arcilla, con altas molaridades y relaciones 1:2 entre GBFS:FA permiten una mayor edificabilidad, lo cual se asocia a una mayor viscosidad de la mezcla, mayor alcalinidad, y densificación y rigidez en estado fresco. Además, las mezclas extruidas lograron resistencia a compresión entre 19-34 MPa a 28 días [56]. Otros investigadores evaluaron mezclas de arcilla con residuos polvo fino de arco eléctrico [57], encontrando también que la incorporación del residuo mejora la resistencia a compresión y edificabilidad de las mezclas, lo cual se asocia a las finas partículas del residuo lo cual rellena espacios vacíos en la mezcla de arcilla.

El suelo se ha empleado como una alternativa a la arena natural en construcciones impresas en 3D con el fin de reducir la demanda de este recurso, utilizando OPC y GGBS como aglutinantes. La incorporación de suelo con un contenido de arcilla no expansiva del 42,5% ha demostrado mejorar la extrusión, la capacidad para mantener la forma y la estructura, así como la construcción en general. Sin embargo, esta adición de suelo ha conllevado un aumento en la cantidad de agua necesaria, lo que ha resultado en una mayor porosidad en los elementos impresos y, en consecuencia, en resistencias a la compresión más bajas [58].

Además, se han estudiado el uso de aditivos de biopolímeros como metilcelulosa, alginato de sodio, quitosano, entre otros, encontrando que pueden mejorar la edificabilidad en las mezclas con suelo [22], [59]. El alginato de sodio se solubiliza en presencia de agua y tiene la capacidad de formar enlaces de hidrogeno con hemicelulosa, formando a su vez una estructura de gran entrecruzamiento la cual incrementa la viscosidad de las mezclas y aumenta la capacidad de retención de forma [37], [60], [61].

En cuando a la estabilización de los suelos, el uso de OPC no debe ser superior al 15%, la inclusión de OPC influye significativamente en el proceso de endurecimiento del material, y desempeño mecánico. Por esto, Silva y colaboradores [35] estudiaron el efecto de la adición de OPC (1-13% en peso) y fibras de sisal en los esfuerzos cortantes de las mezclas, encontrando el material compuesto con OPC fue capaz de soportar el peso de un muro de 1m de altura después de una hora y de un muro de 3m de altura en 120 minutos. Sin embargo, las mezclas que contenían OPC superaban el límite de esfuerzo de fluencia cortante para una bombeabilidad adecuada. Y la mezcla que cumplió este parámetro es la mezcla de suelo+fibra con contenido de agua del 24,3% [35].

El empleo de diferentes adiciones como Ca(OH)₂, CaCO₃ y OPC también ha sido evaluados, junto con aditivos superplastificante (policarboxilato eter, PCE) y modificadores de viscosidad (hidroxipropil celulosa, HPMC) [40], [51]. Encontrando que la incorporación de HPMC mejora resultados de retención de forma, aunque afectan la fluidez y capacidad de extrusión; y en cuanto a la incorporación de OPC se encontró que bajos porcentajes (10%) reducen el tiempo de operación y ventana de extrusión se reducen indicando decrecimiento del flujo de material extruido, mientras que valores del 55% OPC aumentan el tiempo de operación y ventana de extrusión por encima de 96 minutos. A su vez las mezclas con bajo flujo y capacidad de extrusión exhibieron aumento de temperatura, lo cual aceleró la pérdida de agua en estado fresco, y por tanto se redujo el tiempo de endurecimiento [51]. También se ha estudiado sobre la estabilización de suelos utilizando cal, yeso y OPC (en concentraciones del 20 y 40%), arrojando resultados sumamente interesantes. Se observó que tanto el yeso como la cal reducen considerablemente la fluidez de la mezcla en comparación con el OPC, lo que podría afectar negativamente la capacidad de extrusión. Además, se encontró que estas adiciones también provocan una notable disminución en la conductividad térmica de las mezclas debido a la estructura más porosa. Este efecto también repercute negativamente en la resistencia a la compresión en comparación con las mezclas que incluyen OPC [62].

La utilización de Ca(OH)₂ tiende a reducir la demanda de agua y las mezclas con cal hidrata aparenta ser más húmeda conociendo que la arcilla es sensible a la mínima variación de agua, la optimización de mezclas adecuadas para impresión es un trabajo que depende del tipo de arcilla o suelo estudiado [42]. Alqenae y Memari encontraron que una mezcla de suelo puede ser imprimible y edificable (arcilla: 49%, agua: 24,2%, arena: 15,3%, Ca(OH)₂ 10% y 1,5% de paja) y a su vez tener mayor resistencia a compresión, comparado con

elementos elaborados por el método tradicional de vaciado; lo cual asocian a que los elementos impresos no tienen un molde, lo cual genera un mejor secado; y además las fibras pueden enredarse en la impresora, y hacer que los elementos impresos tengan menos cantidad de paja, resultando benéfico, puesto que pruebas preliminares mostraron que la incorporación de paja aunque mejora la contracción por secado disminuye la resistencia a compresión [42]. Un resultado interesante encontrado por Alqenaee y Memari es que aunque se logre encontrar una mezcla que satisfaga mecánicamente y tenga buena edificabilidad, es importante el tiempo de endurecimiento y diseño del muro, puesto que entre más rápido endurezcan las capas inferiores se puede lograr una mayor altura en el muro impreso, y también el diseño de paredes no totalmente sólida (núcleo abierto y celdas intercomunicadas) podría mejorar el tiempo de secado del filamento extruido, estabilizar las capas inferiores y por consiguiente mejorar la capacidad de soporte, obteniendo una mayor cantidad de capas superiores.

Finalmente, Alhumayani e investigadores [17] estudiaron las implicaciones ambientales de la construcción a gran escala utilizando impresión 3D, y la compararon con los métodos de construcción convencionales, para ello utilizaron dos materiales diferentes: concreto y cob (Figura 8). El muro de concreto, con un grosor de 40 cm, se basó en un proyecto de Arabia Saudita [63], y el muro de cob de 60 cm se basó en estudios de la Universidad de Cardiff y en WASP [53], [64]. Como era de esperarse el cob mostro un impacto ambiental global y un potencial de calentamiento global inferiores al del concreto. Además, EL-Mahdy y Ali recientemente llevaron a cabo una investigación sobre la viabilidad del empleo de fachadas de arcilla impresas en 3D en regiones con climas cálidos y áridos. Estas fachadas estaban específicamente diseñadas para proporcionar una protección solar óptima y minimizar la exposición al sol, lo que resultó en una notable reducción de la radiación solar recibida, que varía entre 52 y 158 kWh/m². Este hallazgo sugiere un gran potencial para la implementación de esta tecnología en áreas con climas similares, ofreciendo una mejora significativa en el confort térmico [65].

5. Parámetros y calidad de impresión 3D para suelos

La calidad de los objetos tridimensionales producidos mediante la impresión 3D está íntimamente relacionada con los materiales y los parámetros de impresión. Estos factores son cruciales para conseguir una impresión precisa. Cada material utilizado en la impresión 3D tiene su propia configuración de parámetros óptimos de impresión, tales como temperatura de impresión,

velocidad de impresión, grosor de la capa, entre otros. Estos parámetros deben ser ajustados cuidadosamente según las especificaciones del material, el objeto que se desea imprimir y el sistema de impresión empleado, con el fin de asegurar la calidad del resultado final [55].

Basándose en esta premisa Manikandan e investigadores estudiaron la calidad de impresión de una arcilla comercial al utilizar diferentes geometrías de boquilla (cuadrada y redonda), evaluando el efecto de la geometría del cordón impreso, propiedades mecánicas y la desviación del contorno de las construcciones impresas. Los resultados indicaron que la boquilla circular produce una menor rugosidad superficial y desviación del contorno, mientras que la boquilla cuadrada genera una mayor resistencia a la compresión debido a una mayor densidad [67]. Por otro lado, Perrot y colaboradores también estudiaron el efecto de la geometría de las boquillas circular y cuadrada (Figura 9), y se ensayaron a compresión. En el caso de la boquilla circular, se observaron algunos huecos en la sección debido a la forma circular de las capas extruidas, mientras que, para el caso de la boquilla cuadrada, se puede observar una sección completa, lo que se vio reflejado en una mayor resistencia a la compresión [61].



Figura 9. Cordones impresos y su sección transversal, boquilla circular (izquierda) y cuadrada (derecha) [61].

Kontovourkis y Tryfonos también estudiaron parámetros de impresión de suelos, para comprender mejor su aplicación en la construcción de muros no convencionales y reducir el tiempo de construcción. El estudio se centró en el desarrollo de un algoritmo

paramétrico para la planificación de trayectorias y el control de la extrusión, que puede ser adaptado para extrusoras de código abierto con boquillas pequeñas, medianas y grandes. Se eligieron materiales a base de tierra y arcilla debido a su menor impacto ambiental en comparación con los materiales a base de concreto (Figura 10). La investigación demostró que estudiar los parámetros de impresión de manera sistemática y replicable es clave para maximizar el rendimiento del tiempo de construcción. Además, una elección adecuada de los parámetros permite encontrar un equilibrio entre la altura de la capa, el grosor de pared, la densidad del relleno, el diámetro de la boquilla y la velocidad de extrusión. El estudio también comparó la impresión 3D con la tecnología convencional y encontró que la impresión 3D presenta grandes ventajas en términos de tiempo y costo de construcción, especialmente cuando se trata de formas complejas [66].



Figura 10. Impresión 3D de suelos y arcillas por: [66].

Para estudiar la calidad de impresión, Wi e investigadores utilizaron un método de medición sin contacto y no destructivo que se basa en un sistema de escaneo 3D con luz estructurada para evaluar la calidad de impresión de objetos de arcilla con diferentes niveles de defectos visuales, como la rugosidad y la distorsión. Los resultados han indicado que todas las muestras impresas presentaban diferencias en comparación con los valores de diseño, incluso aquellas que parecían bien impresas. En general, las muestras impresas tenían una altura total, un diámetro y un grosor de capa reducidos en comparación con el objeto diseñado, una anchura de capa mayor, una distorsión medible y una rugosidad superficial visible. Además, se reporta que la muestra de arcilla impresa con una velocidad de impresión baja (30 mm/s) y un caudal de extrusión ligeramente más alto (0,38 ml/s) tenía la mejor calidad de impresión, mientras

que la muestra fabricada con una velocidad de impresión más alta (60 mm/s) y un caudal de extrusión reducido (0,30 ml/s) presentaba la calidad de impresión más baja. Por lo tanto, es fundamental encontrar una combinación adecuada de velocidad de impresión y caudal de extrusión para controlar la calidad de impresión [70].

6. Casos de estudio: empleo de suelos para la elaboración de prototipos de estructuras impresas en 3D

Aunque las investigaciones científicas sobre el uso de suelos como material para la impresión 3D como se mostró en la primera sección de este documento son pocas, se han logrado algunos avances en la construcción de prototipos de estructuras, especialmente en el caso de la arcilla debido a sus buenas propiedades reológicas, que permiten un mayor control en el proceso de impresión 3D.

La empresa italiana WASP© fue la primera compañía en registrar una estructura impresa en 3D utilizando arcilla roja recolectada en el lugar de Ait Ben Haddou, en Marruecos, para producir prototipos de elementos de construcción (Figura 11a) [71]. En el año 2016, WASP© realizó su primer intento de construir una casa impresa tipo refugio elaborada en adobe llamada EREMO (Figura 11b) con un impacto ambiental cercano a cero. El objetivo principal del proyecto era probar la impresora BigDelta© 12MT, y se utilizaron 40 toneladas de material para construir muros circulares de 5 metros de diámetro. Aunque hubo algunos problemas técnicos y la estructura no se completó según lo previsto, el proyecto se consideró un avance significativo y una prueba de concepto exitosa para la construcción en tierra a gran escala [72]. Además, este tipo de arquitectura se considera que puede ser elaborada por personas utilizando materiales locales, es escalable, reproducible y sus materiales totalmente reciclables, además de las paredes de la casa poseer propiedades acústicas favorables (una pared de 14,2 cm permite una insonorización de 43 dB), garantizando confort térmico y frescura durante la época de verano y calor durante el invierno. En 2018, Wasp3D presentó GAIA (Figura 11c), la primera casa impresa con suelo. La tecnología de impresión 3D permitió la creación de diseños precisos y rápidos con geometrías complejas difíciles de replicar con sistemas de construcción convencionales.

La impresión 3D tomó 10 días para construir la carcasa impresa que abarcaba un total de 30 m² de pared con un espesor de 40 cm, y un costo total en materiales de € 900. Se utilizó un material compuesto por 25% de suelo local (30% arcilla, 40% limo y 30% arena), 40% de paja de arroz, 25% cascarilla de arroz y 10% cal hidráulica. Este

material es considerado eficiente desde un punto de vista ecológico y bioclimático, ya que su impacto en términos energéticos es casi nulo, lo que significa que no requiere sistemas de calefacción ni aire acondicionado, y mantiene una temperatura suave y cómoda en el interior durante todo el año [73]. En 2019, Wasp3D presentó otro proyecto de construcción impresa en 3D llamado *TECLA* (Figura 11d), el cual fue diseñado por el arquitecto Mario Cucinella, utilizaron materiales naturales, reutilizables y reciclables provenientes del suelo local, y adecuados para cualquier clima y contexto. Para llevar a cabo este proyecto, se utilizaron por primera vez dos brazos de impresión sincronizados, lo que permitió imprimir *TECLA* en 200 horas, con 350 capas de 12 mm, 150 km de extrusión y 60 m³ de material [74]. En 2021, WASP presentó en Alemania un modelo de una estructura de tierra impresa en 3D que fue concebida originalmente como una obra de arte de Alison Knowles en 1968. Este proyecto, llamado "*The house of dust*" está ubicado en las afueras del Museo Wiesbaden de Alemania y se encuentra abierto a los visitantes (Figura 11e) [75].

En 2015 el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC) emprendió el proyecto *Pylos* (Figura 11f), con el objetivo de explorar las posibilidades del uso de la arcilla en la construcción a gran escala mediante un sistema de impresión 3D que combinaba un brazo robótico con un extrusor autónomo. El equipo de investigadores de postgrado del IAAC logró imprimir columnas de arcilla de hasta 2 m de altura y 3 m de largo, 1 m de alto, con un grosor de 20 cm, lo que fue visto como un sustituto más ecológico y económico a la construcción a base de cemento [76]. Dos años después, en 2017, los investigadores del IAAC desarrollaron un nuevo proyecto de impresión 3D con arcilla llamado *TerraPerforma* (Figura 11g). En este proyecto, se utilizaron módulos para desarrollar los primeros muros de arcilla a tamaño real, lo que fue visto como un paso importante en el uso de la tecnología de impresión 3D en la construcción de edificios [77]. En el mismo año durante la 20ª edición del Barcelona *Building Construmat*, un evento que promueve la innovación en la construcción, el IAAC se destacó notablemente al imprimir en 3D varias estructuras de arcilla en un lapso de cuatro días, entre las que se incluyó un amplio pabellón (Figura 11h). En conjunto, estos proyectos demuestran el potencial de la tecnología de impresión 3D en la construcción a gran escala con materiales alternativos y más sostenibles [78].

En 2018, los resultados obtenidos en los proyectos *Pylos* y *TerraPerforma* dieron frutos en el proyecto *Digital Adobe* (Figura 11i) liderado por un equipo de estudiantes del IAAC, que lograron aumentar el tamaño del muro 3D

a 5m de alto y 2m de ancho utilizando bloques modulares entrelazados [79].

En colaboración con WASP, en 2019 el IAAC continuó explorando las capacidades estructurales del adobe al construir un muro de 40 cm de espesor con una escalera empotrada (Figura 11j). Para lograrlo, se utilizó una mezcla de arcilla y paja de arroz por RiceHouse, con el fin de mejorar la extrusión del material. La impresión 3D tomó 40 horas y requirió el uso de 2 m³ de material [80]. El año 2022 fue testigo de la creación de *TOVA* (Figura 11k), el primer edificio impreso en 3D en España, gracias a la colaboración de WASP y el IAAC. Se utilizó la impresora Crane WASP y se empleó una mezcla de tierra, aloe, claras de huevo y enzimas extraídas de un área de 50 m alrededor del sitio de construcción. Además, se utilizó mano de obra local al 100%, con este proyecto se generaron cero residuos y prácticamente cero emisiones de carbono [81].

3D Potter y Emerging Objects© colaboraron en la creación de varios prototipos de construcción de tierra 3D en los Estados Unidos, utilizando la impresora 3D Scara H.D (Figura 11L). En 2019, construyeron los primeros prototipos conocidos como *Mud Frontiers* en El Paso, Texas, utilizando una mezcla de adobe local [82]. La segunda construcción fue la Casa Covida en 2020 (Figura 11m), que consta de tres espacios cerrados, una sala de estar, un dormitorio y un baño, con una altura total de 4 metros [83].

7. Impresión 3D de suelos en Colombia

En Colombia, el uso de suelos para la construcción ha sido una práctica muy común a lo largo de la historia, especialmente en zonas rurales. La gran variedad de suelos en Colombia brinda una amplia posibilidad de utilizar diferentes tipos de suelos dependiendo de las necesidades y características de los proyectos. Actualmente, el interés en la construcción con materiales sostenibles y económicos ha llevado a un aumento en el uso de materiales a base de suelos en la construcción, especialmente en proyectos de vivienda social y de bajo costo [84].

En el año 2017, Revelo & Colorado utilizaron arcilla caolinita de Colombia suministrada por Sumicol S.A como material para impresión 3D (Figura 12).



Figura 11. Prototipos impresos en 3D con materiales basados en suelos. (a) Primera estructura impresa en Arcilla de Ait Ben Haddou [71]; (b) EREMO primer intento de casa impresa en 3D [72]; (c) GAIA primera casa impresa en 3D [73]; (d) Proyecto TECLA [74]; (e) The house of dust [75]; (f) Proyecto Pylos [76]; (g) TerraPerforma [77]; (h) Pabellón [78]; (i) Digital Adobe [79]; (j) Muro con escalera [80]; (k) TOVA [81]; (l) Mud Frontiers [82]; (m) Casa Covida [83].

Se utilizaron muestras con relaciones agua/arcilla entre 0,65 y 0,69, y se imprimieron cilindros para realizar pruebas de resistencia a compresión que fueron curados durante un día a temperatura ambiente y luego expuestos a 1100 °C durante 1 h. Se encontró que los contenidos de agua en el rango del 36%-40% en peso producen muestras imprimibles. La formulación con una relación agua/arcilla de 0,60 mostró los mejores resultados en términos de acabado superficial, reología y pruebas de flujo. Los valores de resistencia a la compresión obtenidos fueron prometedores y podrían ser competitivos para arcillas utilizadas en sectores como el artístico y la producción de piezas estructurales. Estos resultados demostraron que la manufactura aditiva de

cerámica a base de arcilla de caolín es una tecnología sencilla y versátil que se puede ser implementada en Colombia [69].

En el estudio de Ordoñez et al., se investigó la posibilidad de utilizar residuos de polvo de acero de horno de arco eléctrico (EAFD) proveniente de una industria siderúrgica de Colombia, como material complementario para las arcillas a base de caolín en la impresión 3D. Esta combinación de materiales contribuye positivamente al medio ambiente, ya que permite estabilizar y reducir la contaminación generada por el residuo EAFD. Se produjeron muestras cilíndricas con diferentes proporciones de agua, arcilla y residuos, estos últimos

hasta un 20% en peso. Después de un proceso de sinterización y ensayos de compresión, se observó que la incorporación del residuo EAFD mejora la resistencia a la compresión de las muestras, especialmente en las formulaciones que contenían entre 10% y 20% del EAFD; sin embargo, en la muestra con 20% de residuo, no fue posible la impresión. Se resalta que algunos residuos pueden ser utilizados satisfactoriamente para procesos de fabricación por impresión 3D, teniendo potencial como materiales de construcción [57].

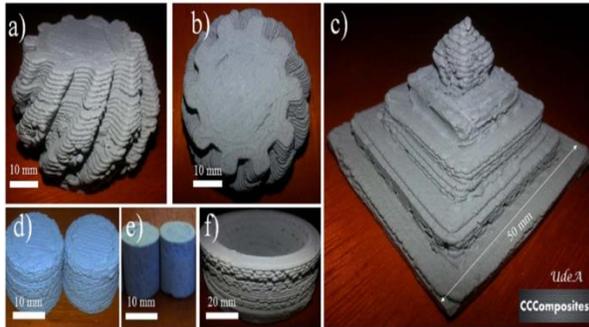


Figura 12. Impresión 3D de figuras en arcilla. Fuente: [69].

8. Retos y perspectivas sobre la impresión 3D de suelos

El interés mundial hacia la modernización sector de la construcción y su enganche en las industrias 4.0 ha despertado el interés desde diferentes aspectos en los cuales este sector puede actuar para disminuir su alto impacto ambiental. Desde el desarrollo de materiales con menor contenido de cemento, el empleo de cementos alternativos, la disminución del consumo de acero en estructuras, y también la modernización de los sistemas constructivos ha hecho que se dirija hacia la manufactura aditiva. Es sabido que como método constructivo es eficiente, se pueden lograr fabricar estructuras en un menor tiempo, se disminuye la generación de residuos, y también la ocurrencia de accidentes y enfermedades laborales de los trabajadores. Ahora bien, dentro de la búsqueda de materiales de construcción de menor impacto ambiental, se ha visto un nuevo auge moderno en la construcción con materiales provenientes de la tierra, como son los suelos.

Los ingenieros y arquitectos están diseñando estructuras modernas por medio de la construcción con bloques y muros de adobe, y también el resurgir del cob con significantes beneficios desde el punto de vista de economía circular. Si bien estas tecnologías datan desde varios siglos y en América Latina se han empleado desde la época pre-hispana, con la demanda actual de una

industria de la construcción ligada y direccionada con los Objetivos de Desarrollo sostenible ha surgido interés en unir estas dos tendencias (impresión 3D + construcción con suelo). Y a pesar de haber reportado en los capítulos anteriores varios casos de estudios, prototipos, e investigaciones científicas (sólo 26 artículos en revistas indexadas) la información pública a nivel mundial es muy poca, y persisten diferentes aspectos tecnológicos que requieren un sustancial desarrollo para ayudar a acelerar esta tendencia. Con tan pocos resultados científicos, los prototipos que se tienen alrededor del mundo sobre la impresión 3D con suelos o arcillas carecen de rigor científico, y la evaluación de sus propiedades de desempeño no se conocen por tanto no tienen una validez, lo cual hace que a escala industrial sean difíciles de replicar.

Se ha encontrado que el diseño de mezclas para la impresión 3D no está estandarizado, no existe una normatividad o protocolos estandarizados para estos materiales, por lo cual deben ajustar protocolos para materiales elaborados por método convencionales; a su vez los componentes de la mezcla dependen del tipo de suelo empleado, aunque tradicionalmente se ha empleado paja como refuerzo para materiales de tierra, sus proporciones y longitudes deben ajustarse en el caso de impresión 3D, además de los contenidos de agua y aditivos para mejorar la reología en estado fresco, y lograr obtener un material extruible y edificable, con adecuado acabado superficial de la mezcla para 3D. La durabilidad de las estructuras también es un reto, puesto que es necesario estabilizar las mezclas de suelo con pequeñas cantidades de OPC o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con el objetivo de ser más durables frente al agua. En cuanto al diseño, se ha identificado que el mejor nivel de automatización en la construcción por tecnología 3D lo han alcanzado las estructuras con diseños más simples.

Así mismo, más del 90% de las publicaciones de la construcción digital con materiales de suelo o arcilla están en Europa, Australia y Asia, por lo cual para América Latina un con históricamente construcción basada en tierra como en México, Guatemala, Colombia, Perú, entre otro, no reportan avances en este campo, por lo tanto, hay todo por estudiar.

9. Conclusiones

Se ha producido un cambio significativo en la ética de la construcción con el objetivo de combinar materiales tradicionales y económicos con técnicas de construcción modernas. Las investigaciones han demostrado que los materiales a base de suelos, como arcilla, cob y adobe, tienen un gran potencial para sustituir parcialmente los materiales a base de cemento y desarrollar sistemas de

construcción más respetuosos con el medio ambiente. Los estudios presentados proporcionan un contexto sobre los materiales y los procesos que pueden utilizarse como punto de partida para futuras investigaciones. Se espera que estos resultados conduzcan a una mayor investigación e interés en el desarrollo de materiales sostenibles para la construcción con menor huella de carbón.

Financiación

Los autores desean extender su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle, Colombia, y al el proyecto “Desarrollo de un sistema de impresión 3D de materiales no convencionales sustentables para el avance de la infraestructura rural en el departamento del Cauca” de la Universidad del Valle, financiado por la Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias) a través de la Convocatoria de Financiamiento 6 del bienio 2021-2022 del Sistema General de Regalías (SGR) (BPIN 2020000100625).

Contribución de los autores

N. Conde-Caicedo: Investigación, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición. M. A. Villaquirán-Caicedo: Conceptualización, Supervisión, Administración del proyecto, Adquisición de fondos, Redacción – revisión y edición. R. Mejía de Gutiérrez: Conceptualización, Supervisión, Administración de proyectos, Adquisición de fondos, Redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] Deloitte, “Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies,” 2015.
- [2] M. Gomaa, S. Schade, D. W. Bao, Y. M. Xie, “Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect,” *J Clean Prod*, vol. 398, p. 136569, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>
- [3] B. Xiao, C. Chen, X. Yin, “Recent advancements of robotics in construction,” *Autom Constr*, vol. 144, p. 104591, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104591>
- [4] ASTM, “Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology,” *ISO/ASTM 52900*, 2015.
- [5] R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, M. A. Villaquirán-Caicedo, S. Delvasto Arjona, “3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector,” *Autom Constr*, vol. 146, p. 104693, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
- [6] G. De Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V. N. Nerella, G. Habert, and I. Agusti-Juan, “Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 25–36, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>
- [7] F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet, “Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,” *Virtual Phys Prototyp*, vol. 11, no. 3, pp. 209–225, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- [8] K. Yu, W. McGee, T. Y. Ng, H. Zhu, V. C. Li, “3D-printable engineered cementitious composites (3DP-ECC): Fresh and hardened properties,” *Cem Concr Res*, vol. 143, p. 106388, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106388>
- [9] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cem Concr Res*, vol. 112, pp. 37–49, Oct. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>

- [10] M. Batikha, R. Jotangia, M. Y. Baaj, I. Mousleh, “3D concrete printing for sustainable and economical construction: A comparative study,” *Autom Constr*, vol. 134, p. 104087, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104087>
- [11] G. Ma, L. Wang, Y. Ju, “State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction,” *Sci China Technol Sci*, vol. 61, no. 4, pp. 475–495, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
- [12] G. W. Ma, L. Wang, Y. Ju, “State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material—An emerging technique for construction,” *Sci China Technol Sci*, vol. 61, no. 4, pp. 475–495, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-016-9077-7>
- [13] G. Ma, L. Wang, “A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 382–400, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0430-x>
- [14] IEA, “Buildings – Sectorial overview.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/buildings>
- [15] CEPAL, “Daño y pérdida de biodiversidad | Comisión Económica para América Latina y el Caribe.” [Online]. Available: <https://www.cepal.org/es/temas/biodiversidad/perdida-biodiversidad>
- [16] Comisión Europea, “Climate & energy package | Climate Action,” 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en
- [17] H. Alhumayani, M. Goma, V. Soebarto, W. Jabi, “Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete,” *J Clean Prod*, vol. 270, p. 122463, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- [18] T. T. Le et al., “Hardened properties of high-performance printing concrete,” *Cem Concr Res*, vol. 42, no. 3, pp. 558–566, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- [19] A. Khalil, X. Wang, K. Celik, “3D printable magnesium oxide concrete: towards sustainable modern architecture,” *Addit Manuf*, vol. 33, p. 101145, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101145>
- [20] Y. Peng, C. Unluer, “Development of alternative cementitious binders for 3D printing applications: A critical review of progress, advantages and challenges,” *Compos B Eng*, vol. 252, p. 110492, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110492>
- [21] S. Rückrich, G. Agranati, Y. J. Grobman, “Earth-based additive manufacturing: A field-oriented methodology for evaluating material printability,” *Archit Sci Rev*, vol. 66, no. 2, pp. 133–143, 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2154739>
- [22] T. Akemah, L. Ben-Alon, “Developing 3D-Printed Natural Fiber-Based Mixtures,” *Bio-Based Building Materials*, pp. 555–572, 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_42
- [23] BIG Bjarke Ingels Group, “Cien casas impresas en 3D (Austin, Texas),” 2021. [Online]. Available: <https://arquitecturaviva.com/obras/100-casas-impresas-en-3d-en-austin>
- [24] New Story, “The world’s first community of 3D printed homes New Story,” [Online]. Available: <https://newstoryhomes.org/3d-community/>
- [25] Automate Construction, “First 2 Story REAL CONCRETE Printed Building in North America - YouTube.” [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=F_EJU43igP0
- [26] Euronews, “Only 140 hours needed to put together ‘Europe’s largest 3D-printed building’ | Euronews.” [Online]. Available: <https://www.euronews.com/next/2023/05/11/only-140-hours-needed-to-put-together-europes-largest-3d-printed-building>
- [27] O. Holland, “Comienza la construcción del vecindario impreso en 3D más grande del mundo en Texas,” CNN español. [Online]. Available: <https://cnnespanol.cnn.com/2021/11/04/construccion-casas-impresion-3d-texas-trax/>
- [28] D. Domínguez, “Así son las viviendas impresas en 3D para familias con pocos recursos,” *Economía Digital*. [Online]. Available: https://www.economiadigital.es/tecnologia/asi-son-las-viviendas-impresas-en-3d-para-familias-con-pocos-recursos_20018729_102.html

- [29] Semana, “Empresas en Colombia le apuestan a la construcción de casas con impresoras 3D,” Portafolio. [Online]. Available: <https://www.portafolio.co/mis-finanzas/vivienda/primer-prototipo-de-vivienda-construida-con-una-impresora-3d-510906>
- [30] GCCA, “Getting the Numbers Right - GCCA in numbers.” [Online]. Available: <https://gccassociation.org/sustainability-innovation/gnr-gcca-in-numbers/>
- [31] IEA, “Industry - Sectoral overview - International Energy Agent.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/industry>
- [32] A. Gangotra, K. Lebling, J. Feldmann, K. Kennedy, “What does ‘green’ procurement mean? Initiatives and standards for cement and steel.” [Online]. Available: <https://www.wri.org/insights/green-procurement-initiatives>
- [33] EPA, “Sources of Greenhouse Gas Emissions - United States Environmental Protection Agency.” [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#cement>
- [34] M. Gomaa, J. Carfrae, S. Goodhew, W. Jabi, A. Veliz Reyes, “Thermal performance exploration of 3D printed cob,” *Archit Sci Rev*, vol. 62, no. 3, pp. 230–237, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1606776>
- [35] G. Silva, L. Quispe, S. Kim, J. Nakamatsu, R. Aguilar, “Development of a stabilized natural fiber-reinforced earth composite for construction applications using 3D printing,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 706, no. 1, p. 012015, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/706/1/012015>
- [36] J. E. Gama-Castro et al., “Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica,” *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 64, no. 2, 2012.
- [37] Zackary Eugene Bryson, Wil V Srubar, Shihō Kawashima, and Lola Ben-Alon, “Towards 3d printed earth- and bio-based insulation materials: a case study on light straw clay,” *International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*, 2022, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6611394>
- [38] H. Houben, H. Guillaud, “de l’article/du chapitre earth construction.,” A comprehensive guide. distributeur Craterre-Eag, 1994.
- [39] L. Keefe, *Earth building: methods and materials, repair and conservation*. 2012.
- [40] J. Liu, V. Nguyen-Van, B. Panda, K. Fox, A. du Plessis, P. Tran, “Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials and Form-finding Structures: A Review on Recent Progresses,” *3D Print Addit Manuf*, vol. 9, no. 1, pp. 12–34, 2022, doi: <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0331>
- [41] L. Watson, K. McCabe, “La técnica constructiva del cob. Pasado, presente y futuro,” *Informes de la Construcción*, vol. 63, no. 523, pp. 59–70, 2011, doi: <https://doi.org/10.3989/ic.10.018>
- [42] A. Alqenae, A. Memari, “Experimental study of 3D printable cob mixtures,” *Constr Build Mater*, vol. 324, p. 126574, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126574>
- [43] E. Hamard, B. Cazacliu, A. Razakamanantsoa, J. C. Morel, “Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building,” *Build Environ*, vol. 106, pp. 103–119, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.009>
- [44] K. González-Velandia, R. Sánchez-Bernal, D. Pita-Castañeda, L. Pérez-Navar, “Caracterización de las propiedades mecánicas de un ladrillo no estructural de tierra como soporte de material vegetal en muros verdes,” *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 2019,
- [45] M. Gomaa, W. Jabi, V. Soebarto, Y. M. Xie, “Digital manufacturing for earth construction: A critical review,” *J Clean Prod*, vol. 338, p. 130630, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130630>
- [46] E. Quagliarini, A. Stazi, E. Pasqualini, E. Fratolocchi, “Cob Construction in Italy: Some Lessons from the Past,” *Sustainability*, vol. 2, no. 10, pp. 3291–3308, 2010, doi: <https://doi.org/10.3390/su2103291>
- [47] A. Weismann, K. Bryce, *Building with Cob: a step by step guide*. 2006.
- [48] M. Gomaa, J. Vaculik, V. Soebarto, M. Griffith, W. Jabi, “Feasibility of 3DP cob walls under compression loads in low-rise construction,” *Constr Build Mater*, vol. 301, p. 124079, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124079>

- [49] Y. Jacquet, A. Perrot, “Evolutionary Approach Based on Thermoplastic Bio-Based Building Material for 3D Printing Applications: An Insight into a Mix of Clay and Wax,” *Bio-Based Building Materials*, 2023, pp. 271–279. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_21
- [50] G. Silva, L. Quispe, S. Kim, J. Nakamatsu, R. Aguilar, “Development of a stabilized natural fiber-reinforced earth composite for construction applications using 3D printing,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 706, no. 1, p. 012015, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/706/1/012015>
- [51] Y. Chen, S. He, Y. Zhang, Z. Wan, O. Çopuroğlu, E. Schlangen, “3D printing of calcined clay-limestone-based cementitious materials,” *Cem Concr Res*, vol. 149, p. 106553, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2021.106553>
- [52] O. B. Carcassi, Y. Maierdan, T. Akemah, S. Kawashima, L. Ben-Alon, “Maximizing fiber content in 3D-printed earth materials: Printability, mechanical, thermal and environmental assessments,” *Constr Build Mater*, vol. 425, p. 135891, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135891>
- [53] A. Veliz Reyes, W. Jabi, M. Gomaa, A. Chatzivasileiadi, L. Ahmad, N. M. Wardhana, “Negotiated matter: a robotic exploration of craft-driven innovation,” *Archit Sci Rev*, vol. 62, no. 5, pp. 398 – 408, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/00038628.2019.1651688>
- [54] A. Veliz Reyes, M. Gomaa, W. Jabi, A. Chatzivasileiadi, N. M. Wardhana, “Computing Craft: Early Development of a Robotically- Supported Cob 3D Printing System,” 2018.
- [55] M. Gomaa, W. Jabi, A. Veliz Reyes, V. Soebarto, “3D printing system for earth-based construction: Case study of cob,” *Autom Constr*, vol. 124, p. 103577, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103577>
- [56] P. Sahoo, S. Gupta, “3D Printable Earth-Based Alkali-Activated Materials: Role of Mix Design and Clay-Rich Soil,” *Bio-Based Building Materials*, 2023, pp. 333–352, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_27
- [57] E. Ordoñez, S. Neves Monteiro, H. A. Colorado, “Valorization of a hazardous waste with 3D-printing: Combination of kaolin clay and electric arc furnace dust from the steel making industry,” *Mater Des*, vol. 217, p. 110617, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110617>
- [58] P. R. K. Soda, A. Dwivedi, S. C M, S. Gupta, “Development of 3D printable stabilized earth-based construction materials using excavated soil: Evaluation of fresh and hardened properties,” *Science of The Total Environment*, vol. 924, p. 171654, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171654>
- [59] Y. Maierdan et al., “Rheology and 3D printing of alginate bio-stabilized earth concrete,” *Cem Concr Res*, vol. 175, p. 107380, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107380>
- [60] S. Mallakpour, E. Azadi, C. M. Hussain, “State-of-the-art of 3D printing technology of alginate-based hydrogels—An emerging technique for industrial applications,” *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 293, p. 102436, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CIS.2021.102436>
- [61] A. Perrot, D. Rangeard, E. Courteille, “3D printing of earth-based materials: Processing aspects,” *Constr Build Mater*, vol. 172, pp. 670–676, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017>
- [62] G. Genc, R. K. Demircan, F. Beyhan, G. Kaplan, “Assessment of the sustainability and producibility of adobe constructions reinforced with Ca-based binders: Environmental life cycle analysis (LCA) and 3D printability,” *Science of The Total Environment*, vol. 906, p. 167695, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167695>
- [63] CyBe, “3D Studio 2030 | CyBe Construction.” [Online]. Available: <https://cybe.eu/cases/3d-studio-2030/>
- [64] 3DWASP, “WASP unveils the new concept store for Dior.” Available: <https://www.3dwasp.com/en/>
- [65] D. EL-Mahdy, M. Ali, “Assessing the solar radiation performance of self-shaded 3D-printed clay-based façades,” *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 20, no. 2, pp. 249–268, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2285325>

- [66] O. Kontovourkis, G. Tryfonos, “Robotic 3D clay printing of prefabricated non-conventional wall components based on a parametric-integrated design,” *Autom Constr*, vol. 110, p. 103005, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103005>
- [67] K. Manikandan, X. Jiang, A. A. Singh, B. Li, H. Qin, “Effects of Nozzle Geometries on 3D Printing of Clay Constructs: Quantifying Contour Deviation and Mechanical Properties,” *Procedia Manuf*, vol. 48, pp. 678–683, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.160>
- [68] E. Ordoñez, J. M. Gallego, H. A. Colorado, “3D printing via the direct ink writing technique of ceramic pastes from typical formulations used in traditional ceramics industry,” *Appl Clay Sci*, vol. 182, p. 105285, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CLAY.2019.105285>
- [69] C. F. Revelo, H. A. Colorado, “3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique,” *Ceram Int*, vol. 44, no. 5, pp. 5673–5682, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.219>
- [70] K. Wi, V. Suresh, K. Wang, B. Li, H. Qin, “Quantifying quality of 3D printed clay objects using a 3D structured light scanning system,” *Addit Manuf*, vol. 32, p. 100987, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100987>
- [71] 3DWASP, “Stampa 3D in argilla a Marrakech - Wasproject - WASP.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/marrakech-clay-3d-printing/>
- [72] 3DWASP, “3D printed houses for a renewed balance between environment and technology.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-houses-for-a-renewed-balance-between-environment-and-technology/>
- [73] 3DWASP, “The first 3D printed House with earth | Gaia | 3D Printers | WASP.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>
- [74] 3DWASP, “3D printed house TECLA - Eco-housing | 3D Printers | WASP.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>
- [75] 3DWASP, “Crowdfunding for The House of Dust | Art and Design | WASP.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/crowdfunding-for-the-house-of-dust/>
- [76] IAAC, “Plyos Project-Report,” 2015.
- [77] IAAC, “TerraPerforma - Institute for Advanced Architecture of Catalonia.” [Online]. Available: <https://iaac.net/project/terraperforma/>
- [78] IAAC, “IAAC Demonstrates On Site Robotics 3D Printing Construction Method in Barcelona - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing.” [Online]. Available: <https://3dprint.com/182052/iaac-3d-print-on-site-construction/>
- [79] IAAC, “Digital Adobe - IAAC.” [Online]. Available: <https://iaac.net/project/digital-adobe/>
- [80] IAAC & WASP, “3D printed earth wall with embedded staircase | 3D Printers | WASP.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-wall/>
- [81] IAAC & WASP, “TOVA è il primo edificio in terra stampato in 3D in Spagna.” [Online]. Available: <https://www.3dwasp.com/tova-edificio-stampato-3d-con-crane-wasp/>
- [82] 3D Potter & Emerging Objects, “Mud Frontiers: Part II | Emerging Objects.” [Online]. Available: <https://emergingobjects.com/project/mud-frontiers-part-ii/>
- [83] 3D Potter & Emerging Objects, “Casa Covida | Emerging Objects.” [Online]. Available: <https://emergingobjects.com/project/casa-covida/>
- [84] J. Rodríguez, J. Pinzón, “Estado del arte de la autoconstrucción sostenible en Colombia,” trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016. [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3457>