

Diseño de mezclas de hormigón sostenible para impresión 3D utilizando metacaolín y filler calizo

Design of sustainable concrete mixtures for 3d printing using metakaolin and limestone filler

Paloma Funes García^a, Belén González Fonteboa^b, Sindy Seara Paz^c y Diego Carro López^d

^a Graduada en Arquitectura Técnica. Estudiante de doctorado. Universidade da Coruña (UDC). p.funes@udc.es

^b Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Catedrática de Universidad. Universidade da Coruña (UDC). b.fonteboa@udc.es

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Titular de Universidad. Universidade da Coruña (UDC). gumersinda.spaz@udc.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Titular de Universidad. Universidade da Coruña (UDC). diego.carro@udc.es

RESUMEN

El uso generalizado del cemento en la construcción contrasta con su impacto ambiental, ya que su fabricación produce elevadas emisiones de CO₂. Este estudio propone una alternativa más sostenible a través de la sustitución parcial del cemento por metacaolín, filler calizo y cenizas de biomasa para crear una mezcla de hormigón apta para impresión 3D. Para garantizar su viabilidad, se analizan las propiedades en fresco (fluidez, capacidad de autosostenerse, capacidad de extrusión y tiempo abierto) y parámetros de impresión como el tiempo y la velocidad. Los resultados obtenidos demuestran que la mezcla diseñada es viable y respetuosa con el medio ambiente, manteniendo las propiedades necesarias para la impresión.

ABSTRACT

Cement is a widely used material despite its CO₂ emissions, which make it highly polluting. This study proposes the partial replacement of cement with metakaolin, limestone filler and biomass ash to create a more sustainable concrete mix for 3D printing. To ensure that the mix is optimal, the properties of the fresh material (flowability, buildability, extrudability and open time) are analysed, along with key printing parameters such as time and speed. The results obtained show that the designed mix is viable and environmentally friendly, maintaining the properties required for 3D printing.

PALABRAS CLAVE: Hormigón3D, mezcla sostenible, fluidez, capacidad de autosostenerse

KEYWORDS: 3D concrete, sustainable mixture, flowability, buildability

1. Introducción

Desde su llegada como una forma de construcción digital, la tecnología de impresión 3D ha sido objeto de investigación y desarrollo tanto por parte de la academia como de la industria de la construcción. Esto es debido a las múltiples posibilidades y ventajas que ofrece la tecnología, entre ellas la reducción de mano de obra, costes, tiempos y flexibilidad en el diseño

[1]. Además, esta técnica presenta una oportunidad para la reducción del impacto ambiental, ya que minimiza los residuos de construcción y elimina el uso necesario de encofrados.

Sin embargo, existe potencial para mejorar la sostenibilidad a través del diseño de la mezcla de hormigón, con el uso de materiales

alternativos al cemento, que es un contribuyente significativo a las emisiones de CO₂, o la adición de residuos a la mezcla.

Lograr una mezcla óptima para la impresión 3D requiere un equilibrio preciso entre las principales características de la impresión 3D, como la fluidez, la capacidad de extrusión, el tiempo abierto y la capacidad de autosostenerse [2].

En este contexto, el presente estudio analiza la viabilidad de una mezcla de hormigón más sostenible para impresión 3D, en la que el cemento es parcialmente sustituido por metacaolín, filler calizo y cenizas de biomasa. El análisis abarca tanto las propiedades en estado fresco como los parámetros clave para la impresión, evaluando el comportamiento de las mezclas a distintas velocidades de impresión. Un aspecto esencial de este estudio ha sido el tiempo abierto, que ha jugado un papel crucial en el diseño y desarrollo del programa experimental.

2. Materiales y diseño de mezclas

2.1 Cemento y materiales cementantes complementarios

En este estudio se ha trabajado con dos mezclas diferentes, una mezcla de referencia en la que se ha usado Cemento Portland ordinario (OPC) de tipo CEM-I 52.5, y una segunda mezcla en la que se ha sido sustituido hasta un 40% de OPC. Parte de este porcentaje ha sido remplazado por Metacaolín (MK) y filler calizo (LF), Figura 1. Para hacer la mezcla más sostenible, también se ha incluido un 15% de ceniza de biomasa (BA), un residuo procedente de la industria maderera.

A ambas mezclas se les ha añadido un superplastificante de alto rendimiento, Sika ViscoCrete-90 NG, para lograr las propiedades en estado fresco requeridas por el hormigón para impresión 3D. También se ha utilizado Sulfato de Aluminio (AS) para acelerar el proceso de fraguado, Figura 2.



Figura 1. De izquierda a derecha: filler calizo (LF), metacaolín (MK) y ceniza de biomasa (BA)



Figura 2. De izquierda a derecha: sulfato de aluminio (AS) y superplastificante, Sika ViscoCrete-90NG

2.2 Áridos

Se ha utilizado una arena caliza convencional que presenta un tamaño máximo de partícula de 4 mm, una absorción de agua del 1,6 % y una densidad de 2,68 kg/m³. El tamaño máximo de partícula es clave en este proceso para evitar posibles bloqueos en la boquilla durante el proceso de extrusión. Un tamaño de partícula adecuado ayuda a mantener un flujo continuo y garantiza una extrusión uniforme.

2.3 Dosificación del hormigón

En base a experiencias previas, se han determinado varios factores clave para diseñar que se han usado a lo largo de este estudio. Estas mezclas deben fluir con facilidad a través del sistema de suministro y la boquilla en los primeros momentos, al tiempo que deben desarrollar rápidamente sus resistencias iniciales para poder soportar el proceso de impresión.

El proceso de diseño se comenzó con la mezcla de referencia (REF), que incluía la arena convencional, el OPC, el sulfato de aluminio y el superplastificante. A continuación, se ajustó la mezcla sostenible (SUST), basada en la mezcla REF, pero reemplazando el cemento con un 15% de filler calizo, 10% de metacaolín y 15% de ceniza de biomasa forestal para mejorar la

sostenibilidad. Después de algunos ajustes se obtuvieron las proporciones finales de ambas mezclas, Tabla 1.

Tabla 1. Dosificaciones de referencia y sostenible.

Dosificación (kg/m ³)	REF	SUST
Cemento	1051.771	616.43
Metacaolín	-	125.95
Filler Calizo	-	86.93
Ceniza de Biomasa	-	132.37
Arena	1002.32	1002.32
Agua	283.17	289.78
Superplastificante	6.15	7.45
Sulfato de Aluminio	9.90	9.67

3. Programa experimental

La sustitución parcial del cemento por materiales cementantes suplementarios modifica las propiedades del hormigón en estado fresco, lo que afecta a su capacidad de impresión. Por ello, se ha llevado a cabo una investigación sobre las principales propiedades en estado fresco de las mezclas de hormigón impresas en 3D, con un posterior análisis del impacto de los parámetros de impresión, incluida la velocidad de impresión, el tiempo de impresión, el tamaño de la boquilla y la altura de la capa, en el proceso de impresión. Este análisis de los parámetros de impresión y de las propiedades en estado fresco se ha llevado a cabo en paralelo, ya que están interrelacionados y uno afecta al otro.

3.1 Fluidez

Para comenzar el análisis de las propiedades en fresco, se ha estudiado la fluidez de la mezcla y la evolución de esta con el paso del tiempo. La fluidez es esencial para la impresión 3D, para garantizar que la mezcla puede ser bombeada o transportada por el sistema de impresión hasta la boquilla.



Figura 3. Ensayo de mini-slump para analizar la evolución de la fluidez

Esta propiedad se ha medido a través del ensayo de mini-slump a diferentes edades, para poder conocer la evolución de la fluidez con el tiempo. Este ensayo se ha realizado con un cono de diámetro interior superior de 70 mm, un diámetro inferior de 100 mm y una altura de 60 mm. Cada 20 minutos después del contacto agua-cemento, respetando los mismos tiempos que se han utilizado durante todas las fases de la campaña experimental, se ha llenado el molde y se han medido dos diámetros perpendiculares, Figura 3.

Al mismo tiempo que se ha realizado este ensayo, se comienzan las pruebas de impresión, así se ha conseguido establecer una relación entre la fluidez de la mezcla y su capacidad de impresión [3].

3.2 Capacidad de extrusión

Seguidamente a la fluidez, se ha analizado la capacidad de la mezcla para ser extruida. Esta es una propiedad fundamental para el hormigón para impresión 3D, ya que garantiza que la mezcla pueda ser extruida de manera continua a través de la boquilla, sin roturas ni bloqueos [4]. Esta propiedad influye directamente en el proceso de impresión y en la calidad de los elementos impresos.

Para poder estudiar la capacidad de extrusión de las mezclas se ha diseñado un patrón de impresión, el cuál ha servido para analizar diferentes parámetros de impresión y obtener información útil para optimizar el proceso de impresión. Se evaluaron cinco velocidades de impresión y tres alturas de capa, lo que permite evaluar el efecto de diferentes velocidades de flujo.



Figura 4. Muestras impresas analizar la capacidad de extrusión a una edad V10, V40, V70, V100 y V130 representan las velocidades de impresión (mm/s) y h15, h25 y h35 corresponden a las alturas de capa (mm).

Igual que en el procedimiento de medida del mini-slump, se han llevado a cabo las pruebas de impresión cada 20 minutos, para poder analizar la relación entre estas propiedades. En cada prueba, se imprimieron 15 especímenes, como muestra la Figura 4. Los especímenes diseñados para las pruebas de impresión tienen una longitud de 350 mm y una altura que varía según la altura de capa definida y han sido impresos a cinco velocidades diferentes. En este estudio, se ha trabajado con una boquilla de 35 mm de diámetro, analizando alturas de capa de 15, 25, y 35 mm y velocidades de 10, 40, 70, 100 y 130 mm/s.

3.3 Tiempo abierto

Estrechamente relacionada con la capacidad de extrusión, otra propiedad principal en estado fresco en la impresión 3D de hormigón es el tiempo abierto, definido como la ventana de tiempo durante la cual la mezcla puede imprimirse continuamente sin interrupción. El tiempo abierto también se refiere al período de tiempo durante el cual la mezcla mantiene sus propiedades frescas óptimas [5]. El tiempo abierto es clave para garantizar resultados exitosos, planificar con precisión, usar parámetros adecuados y evitar bloqueos.

En este estudio, el tiempo abierto se ha definido a través de las pruebas de impresión diseñadas para estudiar la capacidad de extrusión. Este ensayo ha permitido definir el inicio y el final del tiempo de impresión para cada mezcla. El inicio del tiempo abierto se ha definido como el momento en el que la mezcla pudo conservar su forma. En las primeras edades el elevado flujo causó una deformación excesiva del espécimen debido a una alta fluidez de la mezcla, Figura 5a. El final del tiempo abierto se ha definido como el momento en el que la mezcla ya no pudo extruirse de forma continua, como se muestra en la Figura 5b.

Al combinar el análisis de la capacidad de extrusión y el tiempo abierto, se ha logrado una mayor comprensión del comportamiento en estado fresco de las mezclas de hormigón para impresión 3D, lo que ha ayudado a optimizar el proceso de impresión y garantizar la calidad de los elementos impresos.

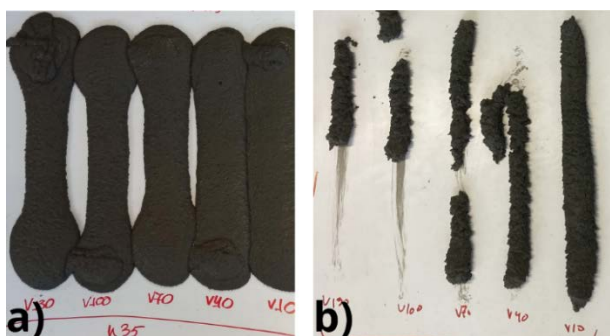


Figura 5. Análisis del tiempo abierto a través del ensayo de capacidad de extrusión: a) extrusión antes del inicio del tiempo abierto, donde la mezcla no es capaz de mantener su forma; b) extrusión después del final del tiempo abierto, donde la mezcla genera discontinuidades y bloqueos.

3.4 Capacidad de autosostenerse

La última propiedad en estado fresco que se ha analizado para completar el conocimiento del comportamiento de las mezclas es la capacidad de autosostenimiento. Es crucial que las mezclas aumenten su resistencia lo suficientemente rápido después de la extrusión para poder mantener su forma y soportar el peso de las capas superiores y la presión de la propia extrusión [6].

Esta propiedad se puede estudiar determinando cuántas capas se pueden imprimir antes de que colapsen, o se puede definir garantizando un número objetivo de capas que se deben imprimir sin que colapsen.

En este caso, se han sometido al proceso de impresión ambas mezclas, para comprobar si se pueden imprimir al menos 15 capas. Para ello se seleccionó una geometría de figura cilíndrica. El cilindro diseñado para la prueba tiene un diámetro de 250 mm. La boquilla utilizada, como en el resto de la campaña experimental, fue de 35 mm de diámetro, y el alto de capa de 15 mm.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos anteriores (capacidad de extrusión y tiempo abierto), se definió el tiempo de fabricación de los cilindros y la velocidad de impresión a utilizar.

4. Resultados

A lo largo del programa experimental se ha estudiado y analizado el comportamiento de las mezclas diseñadas en estado fresco, con el objetivo de comprender las diferencias existentes entre ellas.

4.1 Fluidez

A través del ensayo de fluidez realizado mediante mini-slump se ha podido evidenciar un comportamiento diferente con el paso del tiempo entre las mezclas, como se aprecia en la Tabla 2. Para poder extraer resultados, se han medido los diámetros perpendiculares del mini-slump y posteriormente se han calculado los valores promedio para cada tiempo, reflejados en la Figura 6.

A partir de estos datos se ha observado que la mezcla REF presenta desde sus primeras edades una mayor consistencia y cierta capacidad de retención de forma. Esta consistencia aumenta gradualmente sin cambios bruscos. Sin embargo, la mezcla SUST muestra un comportamiento diferente. Inicialmente es muy fluida y carece de capacidad de retención de forma, pero experimenta un cambio repentino, ganando consistencia rápidamente, llegando a no poder extruirse a los 100 minutos.

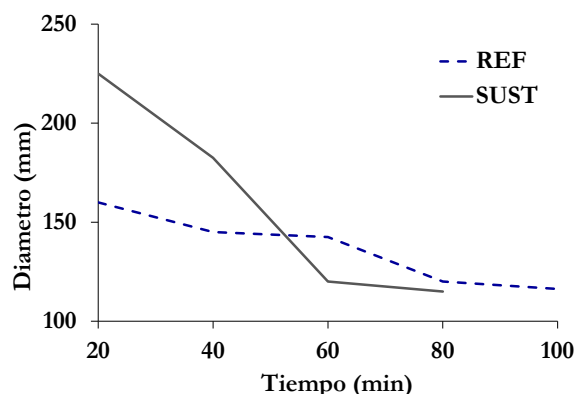


Figura 6. Evolución de la fluidez a lo largo del tiempo mediante el ensayo de mini-slump

Tabla 2. Evolución y comparación del ensayo de fluidez realizado a través del mini-slump.

Mezcla	T20	T40	T60	T80	T100
Ref					
Sust					--

4.2 Capacidad de extrusión

Mediante las pruebas para estudiar la capacidad de extrusión de las mezclas, se han analizado algunos de los principales parámetros de impresión que interfieren en el proceso. En estos ensayos se ha podido observar diferentes comportamientos entre las mezclas. La velocidad es un parámetro que hay que tener en muy cuenta para el análisis de la capacidad de extrusión.

La mezcla REF no presenta limitaciones de extrusión a las velocidades estudiadas (10, 40, 70, 100 y 130 mm/s), ya que puede imprimirse adecuadamente a cualquiera de ellas. Sin embargo, el uso de velocidades muy lentas en los primeros minutos da lugar a un flujo excesivo de material, lo que hace que el espécimen impreso pierda la forma diseñada.

La mezcla SUST presenta un comportamiento diferente. Esta mezcla presenta dificultades de impresión a las velocidades más altas, con discontinuidades, atascos de la boquilla y pérdida de capacidad de impresión. Por este motivo, se decidió modificar las velocidades en el análisis de la segunda mezcla, descartando la velocidad de 130 mm/s e introduciendo la de 20 mm/s. Tras esta modificación, se han definido como velocidades de impresión más adecuadas para la mezcla SUST las velocidades de impresión más bajas.

En cualquier caso, ambas mezclas son aptas para la impresión una vez definidas las velocidades óptimas específicas para cada una de ellas.

4.3 Tiempo abierto

A la vez que se realizó al análisis de la capacidad de extrusión se ha estudiado el tiempo abierto de la mezcla, concluyéndose que el final de la ventana de impresión se caracteriza por una pérdida de capacidad de extrusión, dando lugar a discontinuidades o bloqueos en el proceso de impresión. En el caso de la mezcla REF no se producen discontinuidades hasta transcurridos 120 minutos, consiguiéndose resultados óptimos de impresión a los 100 minutos. Por el contrario, en la mezcla SUST el bloqueo de la boquilla se produjo a los 80 minutos, generándose discontinuidades en los especímenes impresos, Figura 7.



Figura 7. a) Resultados obtenidos con la mezcla REF a los 100 minutos; b) Bloqueo de la boquilla con la mezcla SOST a los 80 minutos.

En cuanto al inicio del tiempo abierto, se ha observado que la mezcla REF permite ser

impresa en edades más tempranas. Siguiendo los parámetros de impresión analizados en este estudio, 20 minutos puede considerarse un tiempo óptimo para la impresión, siempre que se tengan en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas de capacidad de extrusión y se ajusten las velocidades. En estos tiempos es importante utilizar velocidades altas para evitar el exceso de flujo que se produciría por la combinación de una mezcla aún muy fluida con una velocidad de impresión muy baja.

La mezcla SUST requiere un periodo más largo para desarrollar sus propiedades iniciales, por lo que a los 20 minutos aún no es óptima para la impresión. Por ello, se recomienda esperar hasta 40 minutos para iniciar el proceso de impresión con esta mezcla.

Por tanto, ambas mezclas presentan un tiempo abierto adecuado para su uso en impresión digital. En el caso de la mezcla REF este es de 100 min (entre 20 min y 120 min), mientras que en la mezcla SUST este tiempo se reduce a 40 min (entre 40 min y 80 min). En cualquier caso, también se ha constatado que, para los diferentes tiempos, deben ajustarse las velocidades de impresión de forma que se garantice una geometría óptima de la pieza impresa, como se muestra en la Figura 8 que se ha realizado.



Figura 8. Tiempo inicial y central de la prueba de impresión para ambas mezclas.

4.4 Capacidad de autosostenerse

Para evaluar la capacidad de autosostenerse y conocer si las mezclas son capaces de soportar el peso de las sucesivas capas manteniendo su forma durante el proceso de impresión, se han diseñado e impreso unas piezas cilíndricas. Para considerar que la mezcla es adecuada, se ha definido como objetivo superar las quince capas.

Las pruebas se realizaron dentro del tiempo abierto definido en el apartado anterior (60 minutos) y a una velocidad adecuada para este tiempo de impresión (también de acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos anteriores), 40 mm/s en ambas mezclas.

Se comenzaron las pruebas con la mezcla REF que consiguió superar las quince capas objetivo, como se muestra en la Figura 9. También se aprecia como la mezcla mantiene su forma y soporta el peso de las capas superiores, manteniendo la altura de capa definida. Se observa cómo se han alcanzado más de veinte capas.

Una vez concluidas las pruebas de capacidad de autosostenerse de la mezcla REF, se comenzó con la mezcla SUST. En las primeras pruebas se observó como el diámetro de 250 mm era demasiado pequeño para una boquilla de 35 mm, no permitiendo el correcto depósito de la mezcla, como se muestra en la Figura 10.

Por ello, se completó la prueba de impresión para la mezcla SUST con el diseño de un nuevo cilindro de 350 mm de diámetro. La mezcla, como se muestra en la Figura 11, superó esta prueba, llegando a alcanzar incluso las 20 capas. Este nuevo diseño, ayudó a mantener la geometría de la pieza, optimizar la impresión y mejorar la calidad final. En la Figura 12 se puede observar la diferencia de diámetro entre los dos cilindros.



Figura 9. Cilindro mezcla REF



Figura 10. Cilindro fallido mezcla SUST con diámetro 250mm



Figura 11. Cilindro mezcla SUST



Figura 12. Comparación de cilindros con mezcla SUST de (izquierda) y mezcla REF (derecha)

En cuanto a la calidad de la impresión, no se aprecian grandes diferencias entre las mezclas. Ambas presentan en alguna capa intermedia alguna leve deformación producida por un exceso de fluidez de la mezcla, pero en ambos casos la impresión es continua y no presentan irregularidades ni bloqueos, además las capas han mantenido la forma, soportando el peso de las capas superiores y manteniendo la altura de capa establecida en el diseño.

5. Conclusiones

Este estudio ha permitido analizar y comparar las propiedades en fresco del hormigón para impresión 3D de las mezclas REF y SUST. Ambas mezclas han cumplido los requisitos establecidos en esta investigación, aunque presentan diferencias significativas en cuanto a su comportamiento.

La mezcla REF destaca por su estabilidad a diferentes edades, lo que le proporciona un tiempo abierto más prolongado, de hasta 100 minutos, ampliando así sus posibilidades de diseño. También permite trabajar con una amplia gama de velocidades, sin perder calidad ni continuidad en el proceso de impresión. Sin embargo, las velocidades muy bajas en las primeras edades provocan un exceso de flujo que conlleva la pérdida de forma del espécimen diseñado. Por el contrario, las velocidades muy altas, provocan la falta de material impreso, produciendo discontinuidades.

Por otro lado, la mezcla SUST diseñada y estudiada con un enfoque sostenible, sustituyendo parcialmente el cemento por

metacaolín, filler calizo y ceniza de biomasa, presentó particularidades en su comportamiento. Pese a su menor tiempo abierto, la mezcla demostró ser adecuada para velocidades de impresión más bajas (10, 20 y 40 mm/s), garantizando un flujo continuo. Sin embargo, las velocidades más altas, al igual que en la mezcla REF, provocaron discontinuidades y bloqueos.

Se concluye, por tanto, la necesidad de ajustar las velocidades de a las edades de impresión: uso de velocidades bajas a mayores edades, cuando la fluidez de la mezcla ya ha disminuido y velocidades altas a edades bajas, cuando la fluidez de las mezclas es elevada.

En cuanto a la prueba de capacidad de autosostenerse, ambas mezclas superaron con éxito las quince capas objetivo. Sin embargo, el diseño inicial del cilindro puso de manifiesto la necesidad de realizar modificaciones, ampliando 100 mm el diámetro del cilindro diseñado. Con este ajuste, la mezcla SUST consiguió alcanzar hasta las veinte capas. Esto pone en evidencia la importancia de adaptar los parámetros de impresión a las características de cada mezcla, y la importancia de conocer estas a la hora de realizar un diseño eficaz.

En conclusión, ambas mezclas son una opción válida para la impresión 3D, destacando el potencial de la mezcla SUST al ser una alternativa sostenible.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e innovación - Agencia Estatal de investigación a través de tres proyectos titulados: «Diseño de hormigones sostenibles para impresión 3D basado en la reología y en el control de propiedades muy tempranas (Eco3DConcrete)- PID2020-115433RB-I00», y “Aprovechamiento de los efectos sinérgicos entre la impresión 3D y las tecnologías de autocuración para diseñar hormigones sostenibles y duraderos (3DHealConcrete) - TED2021-129757B-I00”.

Referencias

- [1] Y. Chen, Z. Li, S.C. Figueiredo, O. Çopuroğlu, F. Veer, E. Schlangen, Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development, *Applied Sciences (Switzerland)* 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/app9091809>.
- [2] S.C. Paul, Y.W.D. Tay, B. Panda, M.J. Tan, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 18 (2018) 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.
- [3] Y. Chen, S. Chaves Figueiredo, Z. Li, Z. Chang, K. Jansen, O. Çopuroğlu, E. Schlangen, Improving printability of limestone-calcined clay-based cementitious materials by using viscosity-modifying admixture, *Cem Concr Res* 132 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106040>.
- [4] G.H. Ahmed, A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability, *Journal of Building Engineering* 66 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105863>.
- [5] M. Kaszyńska, M. Hoffmann, S. Skibicki, A. Zieliński, M. Techman, N. Olczyk, T. Wróblewski, Evaluation of suitability for 3D printing of high performance concretes, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301002>.
- [6] H. Ogura, V.N. Nerella, V. Mechtcherine, Developing and testing of Strain-

Hardening Cement-Based Composites
(SHCC) in the context of 3D-printing,
Materials 11 (2018).
<https://doi.org/10.3390/ma11081375>.