

Análisis de los parámetros de impresión 3D de hormigón: influencia de la velocidad de impresión

Analysis of 3d printing concrete parameters: influence of printing speed

Paloma Funes García^a, Sindy Seara Paz^b, Belén González Fonteboa^c y Javier Eiras 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. Titular de Universidad. Universidade da Coruña (UDC). gumesinda.spaz@udc.es

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

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

RESUMEN

En la impresión 3D de hormigón son clave parámetros como la geometría de la boquilla, el flujo del material o las propiedades del hormigón en estado fresco. En este estudio se analiza el impacto de la velocidad de impresión en la calidad y la geometría de las piezas. Se han impreso piezas de 250 mm de largo, utilizando boquillas de 25 mm y 35 mm de diámetro, con alturas de capa de 15 mm a 35 mm y velocidades desde los 10 mm/s hasta los 130 mm/s. Los resultados obtenidos muestran que, a mayor velocidad, se reduce el ancho de la pieza y disminuye la calidad de la pieza debido a la escasez de material depositado. Estos resultados destacan la importancia de optimizar el proceso de impresión 3D.

ABSTRACT

In 3D concrete printing, parameters such as nozzle geometry, material flow, and the properties of fresh concrete are key. This study analyses the impact of printing speed on the quality and geometry of the pieces. Specimens 250 mm long were printed using 25 mm and 35 mm diameter nozzles, with layer heights ranging from 15 mm to 35 mm and speeds from 10 mm/s to 130 mm/s. The results show that higher speeds reduce the piece's width and quality due to insufficient material deposition. These findings highlight the importance of optimizing the 3D printing process.

PALABRAS CLAVE: impresión 3D de hormigón, parámetros de impresión, velocidad de impresión.

KEYWORDS: 3D printing concrete, printing parameters, printing speed.

1. Introducción

En los últimos tiempos, la tecnología de la impresión 3D de hormigón ha avanzado rápidamente, presentando nuevos desafíos técnicos, económicos y sociales, que deben tratarse para conseguir una efectiva implantación de esta técnica en la industria de la construcción.

Entre los desafíos técnicos, para conseguir una impresión de calidad, se encuentra la necesidad de alcanzar ciertas propiedades finales, como resistencia y estabilidad, mientras se

garantizan las propiedades iniciales, como la fluidez, que el material fresco fluya por la boquilla [1]. Este proceso es muy sensible a variaciones, y la calidad de los filamentos impresos no solo depende de la mezcla, sino también por la velocidad de impresión, el flujo y la geometría de la pieza [2].

Con el objetivo de identificar los parámetros que ofrecen una mejor calidad de impresión, se diseña un patrón de prueba de

filamentos de una única capa, donde se modificarán las velocidades para observar su impacto [3]. Este patrón se repetirá a distintos tiempos, y con diferentes alturas de capa para evaluar la influencia del tiempo y la geometría en la calidad del producto final. Además, el proceso completo se repetirá con dos boquillas diferentes, lo que permitirá analizar su influencia en la impresión, junto a la velocidad, y la altura de capa [4].

Con esta investigación se busca una mayor comprensión de cómo afectan los distintos parámetros de impresión a la calidad del hormigón impreso en 3D, sirviendo esto de ayuda a la optimización de los mismos, mejorando la viabilidad y eficiencia de esta tecnología en aplicaciones reales.

2. Materiales y mezclas

En este estudio, basándonos en la revisión bibliográfica y con referencia a la experiencia previa, se utilizó una dosificación base con la que se trabajará en todo el plan de ensayos. Esta mezcla está compuesta por Cemento Portland Ordinario (OPC) tipo CEM-I 52.5, arena convencional, sulfato de aluminio (SA) y un superplastificante de altas prestaciones Sika ViscoCrete-90 NG. La dosificación utilizada se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de la mezcla de referencia.

Materiales	Dosificación (kg/m ³)
Cemento	1051.77
Arena	1002.32
Agua	283.17
Superplastificante	6.15
Sulfato de Aluminio	9.90

El uso de estos aditivos es importante en la impresión 3D de hormigón para conseguir una mezcla apta ser impresa. El superplastificante ayudará a conseguir una fluidez adecuada para que el hormigón sea capaz de salir a través de la boquilla de la impresora. Por otro lado, el sulfato

de aluminio trabajará como acelerante, reduciendo el tiempo de fraguado, lo que ayudará a que la mezcla sea capaz de autosostenerse.

Respecto a la arena utilizada, de origen calizo, esta cuenta con una absorción de agua del 1.6%, densidad de 2.68 kg/m³ y con un tamaño máximo de 4 mm. Es importante el tamaño máximo del árido, para que este no bloquee la boquilla de extrusión y no perjudique la calidad de la impresión. En la Figura 1 se puede ver la granulometría de la arena utilizada. El día previo a la realización de la amasada se saturó la arena para agilizar el proceso y disminuir los tiempos de espera. El procedimiento comienza mezclando la arena presaturada con el cemento, seguido de la adición progresiva del agua de amasado y, finalmente, se incorporan los aditivos.

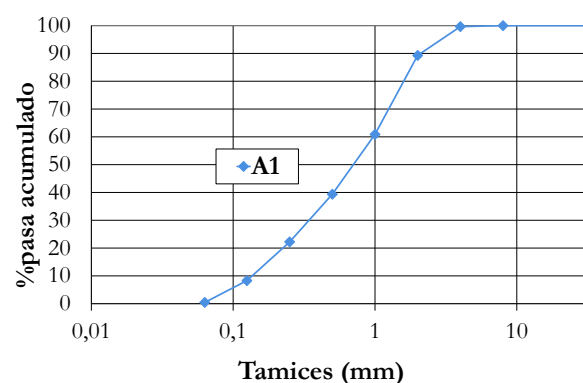


Figura 1. Granulometría arena.

3. Plan de ensayos

En la impresión de hormigón son muchos los factores que influyen en las propiedades de las piezas impresas, como la geometría de la boquilla, el flujo del material o las propiedades del hormigón en fresco.

En esta investigación se estudiaron parámetros como las velocidades de impresión, el tiempo de impresión o diferentes opciones de boquillas. Se realizó, a la par de cada tiempo de

impresión, un ensayo de mini slump para buscar una relación entre la consistencia y la calidad de la pieza.

Con estas pruebas se analizaron propiedades clave del hormigón para impresión 3D en estado fresco, como son su capacidad de ser impreso, su fluidez, su tiempo de impresión o su capacidad de retención de forma.

3.1 Parámetros de impresión

El análisis de los parámetros de impresión ha sido la parte central de esta campaña experimental, que buscaba determinar el tiempo abierto de impresión de la mezcla, es decir, el tiempo en el que es capaz de ser impresa. El programa de ensayos permitió también analizar cómo afecta el paso del tiempo a las propiedades de la pieza impresa y a la calidad de la misma. Para ello se realizaron pruebas de impresión a diferentes velocidades utilizando dos boquillas diferentes, lo que permitió analizar la influencia de la geometría de la boquilla (relacionada con el ancho de la capa de impresión), y estableciéndose diferentes alturas de capa. Los distintos parámetros que han sido objeto de estudio en esta investigación se encuentran recogidos en la Tabla 2.

Se fabricaron amasadas diferentes para evaluar cada una de las boquillas. Tras finalizar el proceso de amasada, con un tiempo de 11 minutos desde que se produce el contacto agua/cemento, se introduce la mezcla en la tolva de la impresora, Figura 2. El inicio de las pruebas de impresión se establece a los 20 minutos, repitiendo la prueba cada 20 minutos hasta que la mezcla es apta para ser impresa (tiempos de 20, 40, 60, 80, 100 min desde el contacto agua-cemento). Para cada uno de los tiempos, se imprimieron 15 especímenes de 350 mm de longitud a cada una de las diferentes velocidades objeto de estudio, como se aprecia en la Figura 3 y para cada una de las diferentes alturas de capa. El desarrollo de todas las pruebas implicó imprimir un total de 150 especímenes. El flujo de material varía en función de las dimensiones

de la pieza y de la velocidad de impresión, quienes condicionan la cantidad de material a ser extruido.

Tabla 2. Parámetros de impresión estudiados en el plan de ensayos.

Parámetros de impresión	
Altura Capa (mm)	15, 25 y 35
Velocidad (mm/s)	10, 40, 70, 100 y 130
Diámetro boquilla (mm)	25 y 35
Tiempo (min)	20, 40, 60, 80 y 100



Figura 2. Tolva de la impresora 3D.

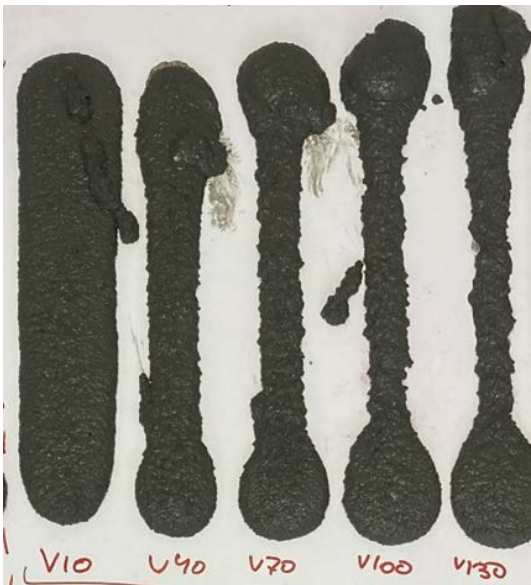


Figura 3. Prueba de impresión con boquilla de 25 mm y altura de capa 15 mm.

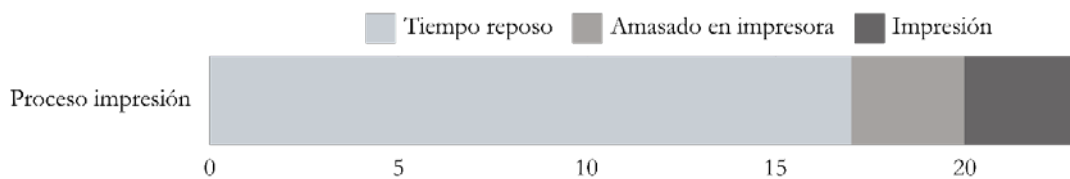


Figura 4. Procedimiento de impresión para mantener la fluidez de la mezcla

Para garantizar que la mezcla se mantuviese fluida, se diseñó un proceso de pre-amasado previo a la impresión [5], donde en la propia tolva de la impresora, los 3 minutos previos a la impresión, como se muestra en la Figura 4, se hizo girar el tornillo sin fin en el sentido contrario al de impresión para evitar la posible influencia del comportamiento tixotrópico del hormigón.

3.2 Mini Slump

Existen varias características en estado fresco del hormigón impreso que son claves para conseguir un resultado óptimo, en especial la consistencia, que en este estudio se controló a través del ensayo del mini slump a diferentes tiempos.

Se realizó una prueba de mini slump en cada uno de los tiempos de impresión, y se midieron los diámetros transversales al retirar el molde, Figura 5. Este ensayo permite identificar cuándo la fluidez de la mezcla es la adecuada para que ésta pueda retener la forma deseada, y estimar a partir de que tiempo la pérdida de la misma impide que la mezcla pueda ser extruida correctamente.

3.3 Resistencias

El hormigón impreso, aparte de necesitar ciertas características en estado fresco, como son el tiempo abierto de impresión o la capacidad de retención de forma, analizados a través de las pruebas de impresión diseñadas, o la consistencia y la fluidez, estudiados a través del mini slump, también necesita del análisis de las características en estado endurecido. Entre estas

características son clave las resistencias a flexión y a compresión, que se obtendrán, para cada una de las amasadas, a partir de la rotura de probetas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ a 7 días.



Figura 5. Mini slump tras medir los diámetros

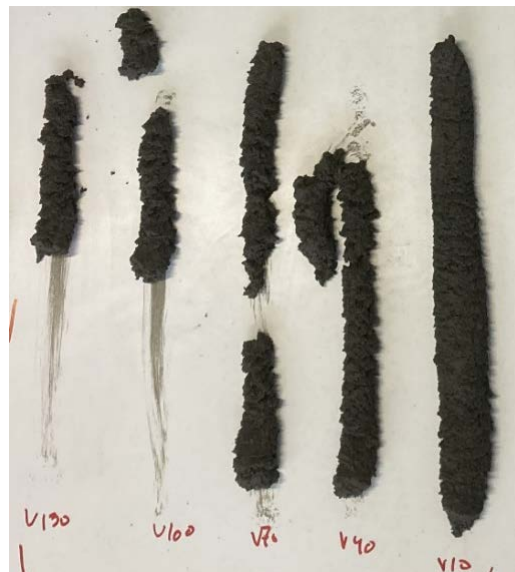


Figura 6. Discontinuidades producidas en los filamentos impresos a los 100min con la boquilla de 25 mm, altura de capa 35 mm,

4. Resultados y análisis

4.1 Parámetros de impresión

Tras la impresión los especímenes programados en el plan de ensayos, y una vez transcurridas 24 horas, se midió su ancho y alto para poder estudiar la geometría del objeto impreso obtenida, comparándola con la geometría objetivo y relacionándola con la velocidad utilizada y el tiempo de impresión. También se realizó una inspección visual para evaluar continuidad, rugosidad y ausencia de imperfecciones de la mezcla

Como se puede apreciar en la Figura 6, a partir de los 100 minutos, cuando la mezcla empieza a presentar discontinuidades, es la velocidad más lenta la única capaz de imprimir de manera continua y con unas dimensiones más próximas al diseño objetivo. Por otro lado, en la Figura 7, correspondiente al empleo de boquilla de 25 mm de diámetro, se aprecia que las velocidades más rápidas son las que más se aproximan al ancho preestablecido, mientras que la velocidad más lenta proporciona un ancho muy superior al deseado. La Figura 8 muestra que el alto de la pieza actúa de forma inversa al ancho, así al pasar el tiempo y disminuir el ancho de la pieza, la altura de esta aumenta, aproximándose a lo estipulado.

Las Figuras 9 y 10 muestran que, cuando se utiliza la boquilla de diámetro 35 mm, el comportamiento es semejante, el ancho tiende a disminuir con el tiempo y con la velocidad, y a la par que este disminuye, el alto aumenta, siendo las velocidades de 70, 100 y 130 mm/s las que consiguen un ancho más próximo al de diseño.

Difiere el comportamiento de las boquillas en cuanto al tiempo abierto, ya que, para tiempos más prolongados, es más fácil el bloqueo del orificio de salida cuanto más pequeño sea. Es por esto, que, para los 100 minutos, todas las velocidades son capaces de imprimir con la boquilla de 35 mm, mientras que, con la boquilla de 25 mm, únicamente la velocidad de 10 mm/s

y en algún caso la de 40 mm/s son capaces de imprimir.

En cuanto la inspección visual se observó que, a pesar de que no hay grandes diferencias en lo que se refiere a la geometría de la pieza para las velocidades de 70, 100 y 130 mm/s, sí las hay en la calidad de impresión, donde a partir de los 100 mm/s, la pieza pasa a ser rugosa, con salientes punzantes. Con la velocidad de 40 mm/s, pese a tener una geometría que difiere algo más de los parámetros objetivo, la pieza presenta mayor calidad de acabado en la impresión al tener mayor continuidad y ausencia de rugosidad, la Figura 11.

4.2 Mini Slump

El ensayo del mini slump ayudó a corroborar que existe una relación directa entre la geometría de las piezas impresas y la fluidez de la mezcla. De esta manera, a medida que avanza el tiempo de impresión se reduce el diámetro del mini slump, lo que nos indica que disminuye la fluidez de la mezcla e implica una disminución en el ancho de la pieza. Este ensayo también ayudó en el análisis del comportamiento de boquillas con geometrías diferentes. Las Figuras 12 y 13 muestran que, para diámetros de mini slump entre 150-120 mm, con la boquilla de 25 mm, se pueden conseguir anchos próximos al ancho preestablecido de 25 mm, mientras que, para los mismos diámetros, con la boquilla de 35 mm, conseguimos anchos superiores a los 35 mm de diseño.

4.3 Resistencias

Para completar los resultados de la campaña experimental de este estudio, se han recogido los datos obtenidos de los ensayos de resistencia a flexión y compresión, Figura 14. Con estos valores conocemos el comportamiento mecánico de la mezcla diseñada para analizar los parámetros de impresión. Los resultados indican un valor medio en la resistencia a flexión de 9.49MPa y de 60.41MPa a compresión.

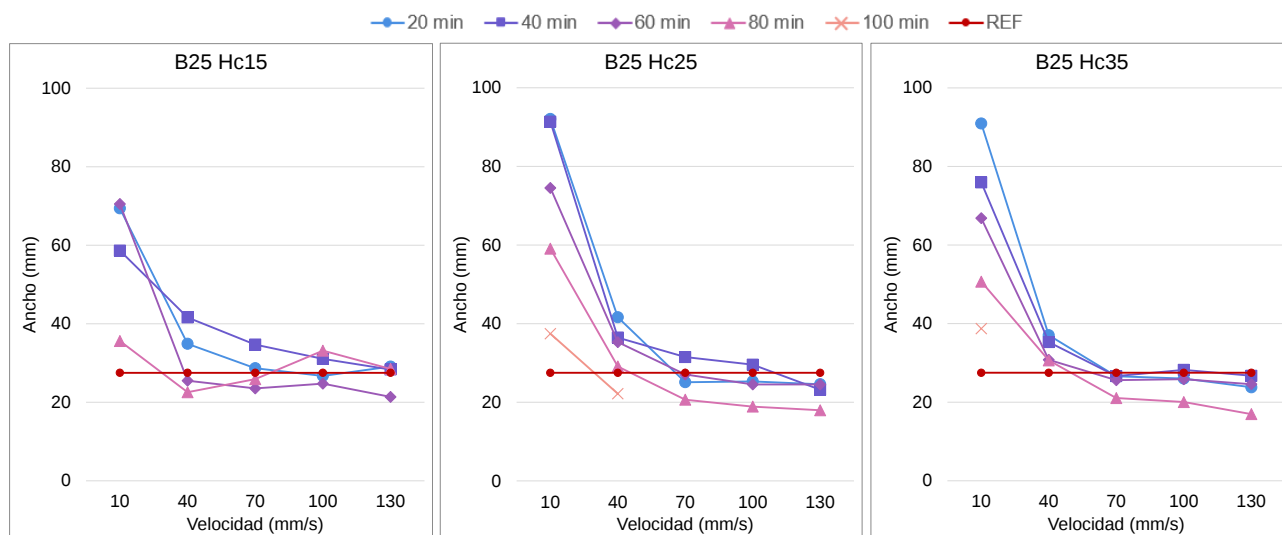


Figura 7. Relación Ancho (mm) - Velocidad (mm/s) para la boquilla de 25 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

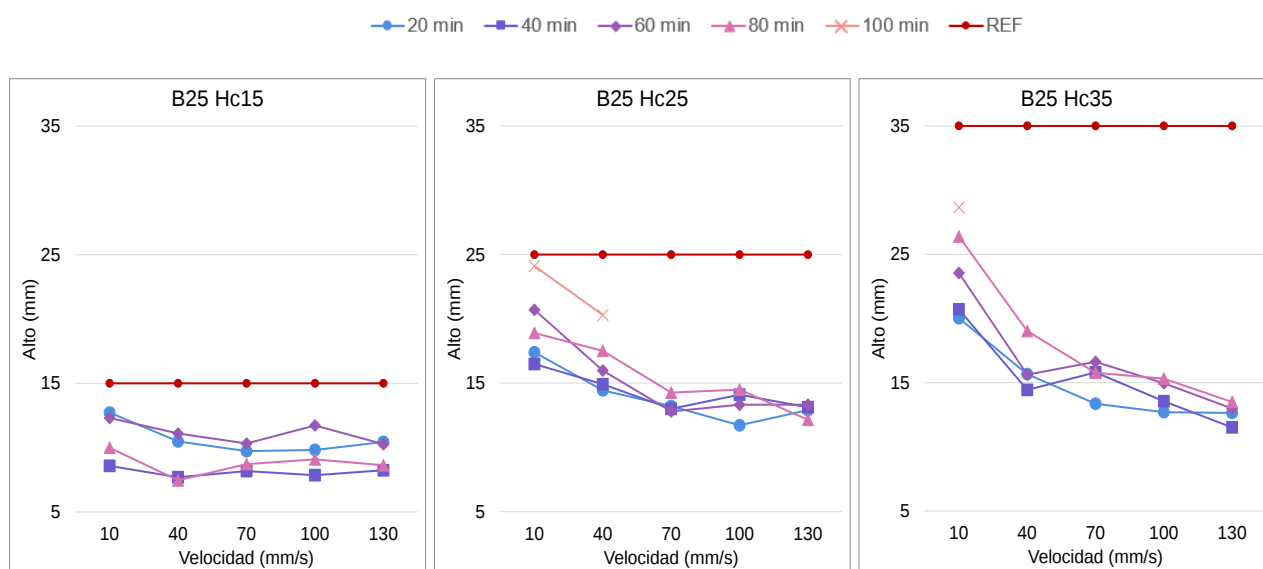


Figura 8. Relación Alto (mm) - Velocidad (mm/s) para la boquilla de 25 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

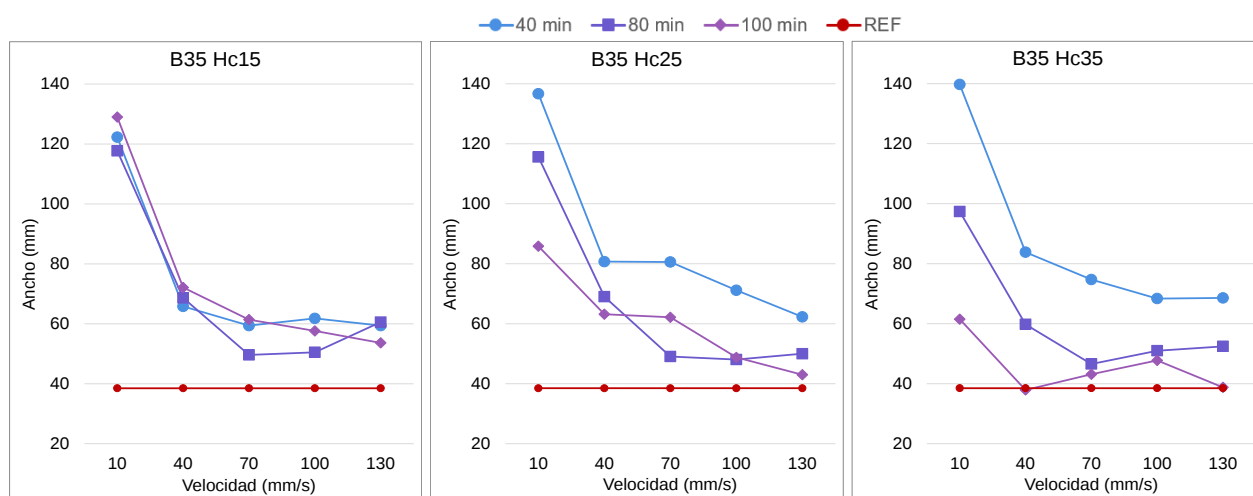


Figura 9. Relación Ancho (mm) - Velocidad (mm/s) para la boquilla de 35 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

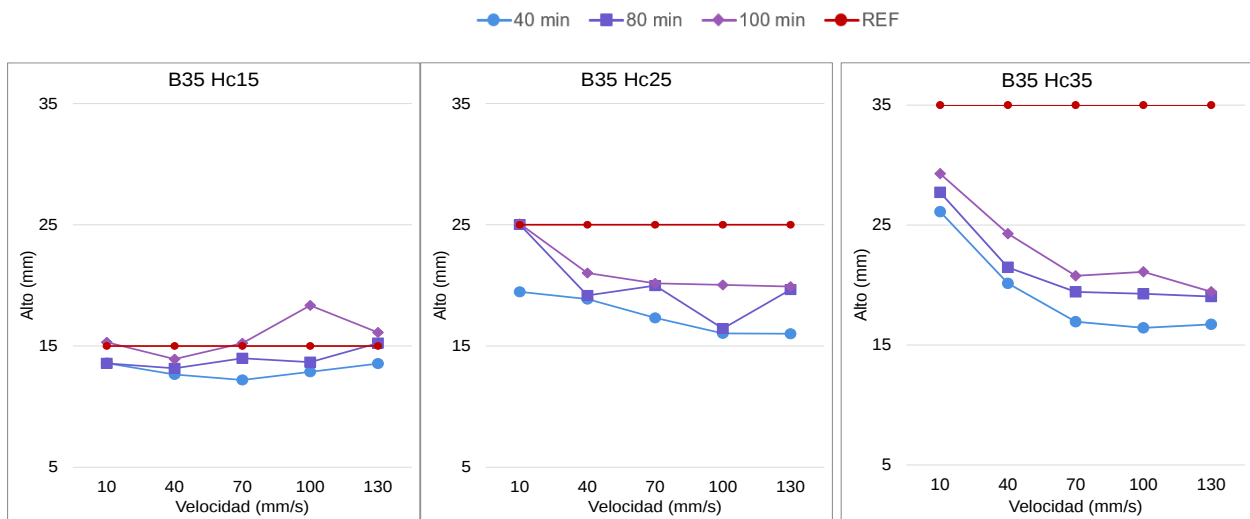


Figura 10. Relación Alto (mm) - Velocidad (mm/s) para la boquilla de 35 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

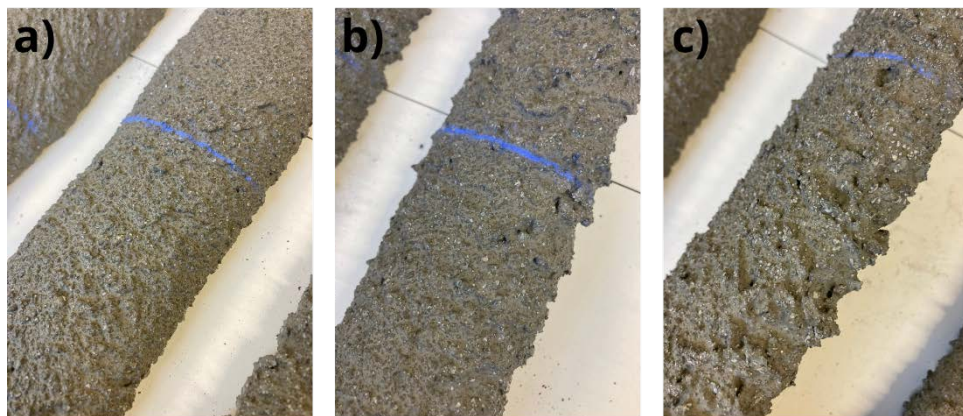


Figura 11. Inspección visual de continuidad y rugosidad a distintas velocidades a) 40 mm/s, b) 70 mm/s y c) 100 mm/s

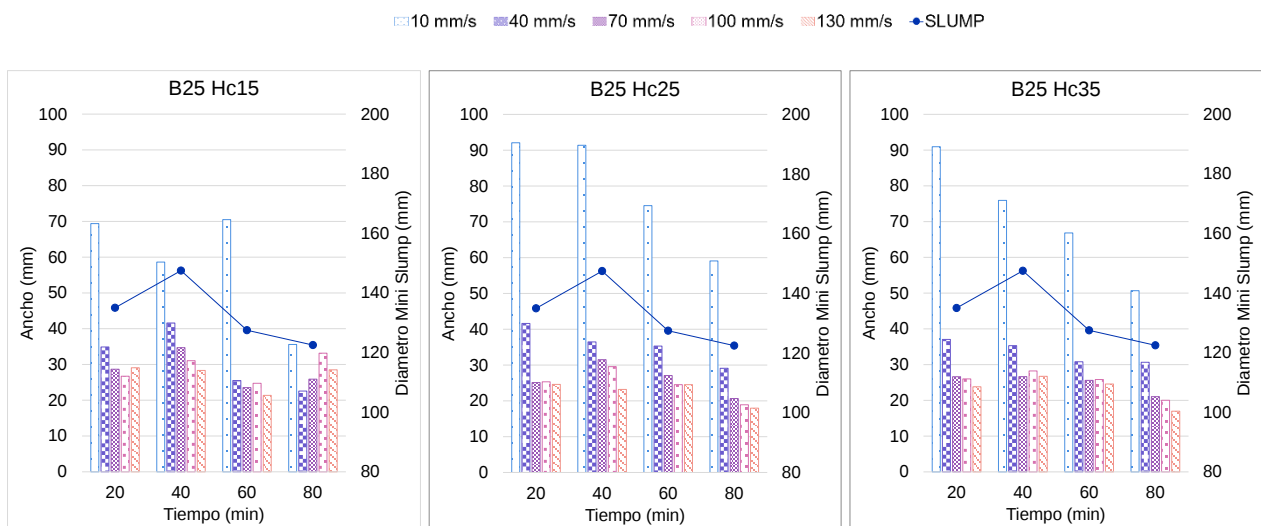


Figura 12. Relación Diámetro mini Slump (mm) - Ancho (mm) para la boquilla de 25 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

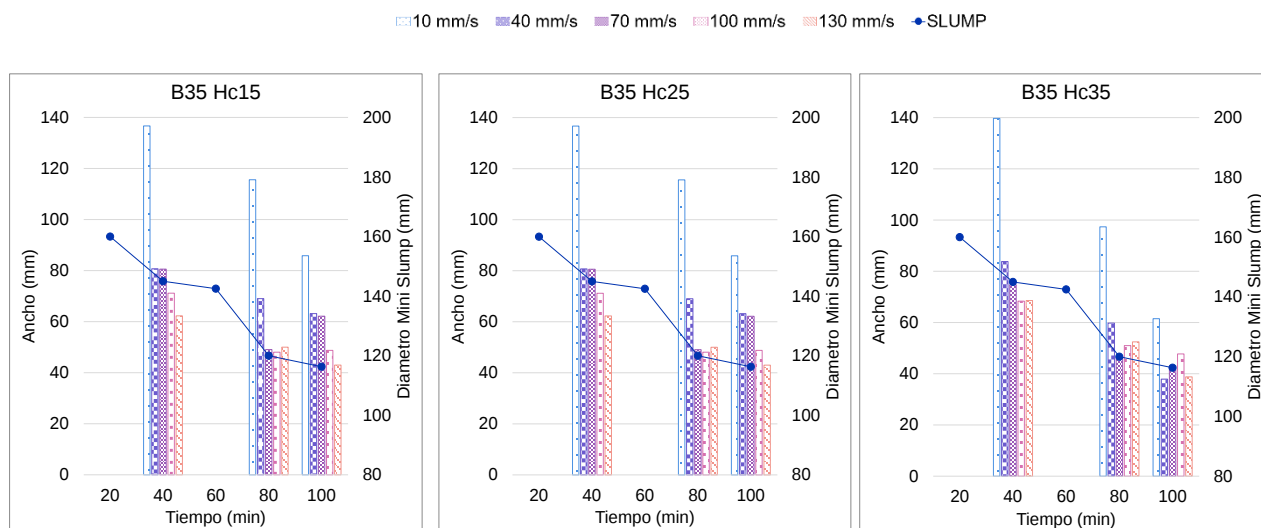


Figura 13. Relación Diámetro mini Slump (mm) - Ancho (mm) para la boquilla de 35 mm con alturas de capa 15 mm, 25 mm y 35 mm

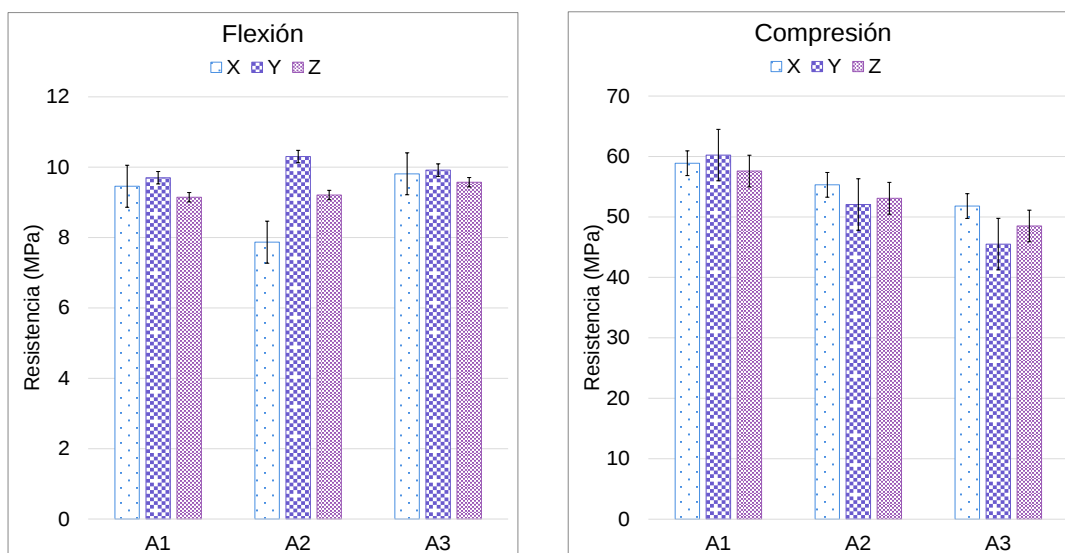


Figura 14. Resistencias a flexión y compresión a 7 días

5. Conclusiones

Tras realizar el estudio sobre los parámetros de impresión, se ha observado que el proceso es sensible a los cambios de velocidad, al paso del tiempo, y la geometría de la boquilla utilizada.

Centrándonos únicamente en la geometría de la pieza obtenida en relación con la geometría diseñada, las velocidades de 70, 100 y 130 mm/s, serían la mejor opción, pero en cuanto a calidad y ausencia de imperfecciones serían las

velocidades más bajas las que presentan un mejor resultado. Descartando la velocidad de 10 mm/s en los primeros tiempos por la gran diferencia de forma al diseño, las velocidades de 40 mm/s y 70 mm/s serían las recomendadas para obtener buenos resultados, con una mezcla de características similares a la estudiada.

Por otro lado, se observó que la velocidad de 10mm/s, descartada para primeros tiempos, resulta efectiva en etapas más avanzadas del proceso, cuando en las demás velocidades se producen bloqueos de la boquilla. Esto resulta

de utilidad para completar el proceso de impresión de piezas de gran tamaño, que requieren de un tiempo de impresión prolongado.

Por último, se comprobó que la geometría de la boquilla influye en el proceso. Con una boquilla de mayor diámetro, se necesita menor fluidez de la mezcla para obtener los resultados esperados, pero también permite prolongar los tiempos de impresión al tardar más en producirse el bloqueo de la boquilla.

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] G. De Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V.N. Nerella, G. Habert, I. Agusti-Juan, Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials, *Cem Concr Res* 112 (2018) 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- [2] J. Xiao, S. Zou, Y. Yu, Y. Wang, T. Ding, Y. Zhu, J. Yu, S. Li, Z. Duan, Y. Wu, L. Li, 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing, *Journal of Building Engineering* 32 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101779>.
- [3] Y.W.D. Tay, M.Y. Li, M.J. Tan, Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures, *J Mater Process Technol* 271 (2019) 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007>.
- [4] H. Zhang, J. Wang, Y. Liu, X. Zhang, Z. Zhao, Effect of processing parameters on the printing quality of 3D printed composite cement-based materials, *Mater Lett* 308 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131271>.
- [5] 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>.