

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DISEÑO EFICIENTE DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND
CON FIBRAS DE BASALTO PARA DISTINTOS SISTEMAS DE
EXTRUSIÓN DE IMPRESIÓN 3D**

Por:

JOSÉ RAÚL ZAPATA PADILLA

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de
Construcción**

Noviembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “DISEÑO EFICIENTE DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND CON FIBRAS DE BASALTO PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTRUSIÓN DE IMPRESIÓN 3D” realizada por M.C. JOSÉ RAÚL ZAPATA PADILLA, sea aceptada para su defensa como opción al grado de DOCTOR EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción

El Comité de Tesis:

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Asesor de Tesis

Dra. Tania Ernestina Lara Ceniceros
Co-Asesora de Tesis

Dr. César Antonio Juárez
Revisor

Dr. Alejandro Durán Herrera
Revisor

Dr. José Bonilla Cruz
Revisor

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

Instituto de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N.L, enero del 2025

Prólogo

El presente prólogo acompaña la culminación de la investigación titulada “DISEÑO EFICIENTE DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND CON FIBRAS DE BASALTO PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTRUSIÓN DE IMPRESIÓN 3D”. Esta obra se desarrolló con el propósito de explorar y avanzar en el campo de la construcción sostenible, abordando tanto los retos técnicos como las oportunidades en la construcción de viviendas sustentables mediante tecnologías de Impresión 3D de Concreto (I3DC).

El objetivo central de este trabajo fue el desarrollo y evaluación de tintas de mortero con microfibras de basalto, diseñados para ser utilizados en tecnologías de Impresión 3D de Concreto (I3DC), buscando mejorar la accesibilidad a viviendas dignas y sostenibles en México. La investigación se centró en la evaluación de la fluidez, proporciones de mezclas, reología, extrusión y pruebas de impresión en pequeña escala de morteros con microfibras de basalto. Estos estudios fueron cruciales para avanzar en la comprensión y aplicación de tecnologías de Impresión 3D de Concreto (I3DC), demostrando la viabilidad y eficacia de los materiales desarrollados en la construcción de estructuras sostenibles y eficientes.

Entre las dificultades encontradas, destaca la falta de una impresora de concreto al inicio del proyecto. No obstante, la cooperación con ingenieros mecánicos y los hallazgos preliminares nos permitieron diseñar y construir una impresora en la que se evaluaron los sistemas de bombeo, extrusión e impresión 3D de la tinta desarrollada.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Dr. José Manuel Mendoza Rangel, cuya orientación y conocimientos fueron fundamentales para la realización de este trabajo. Además, agradezco sinceramente al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), al Instituto de Ingeniería Civil y sus laboratorios, y a mi equipo de trabajo de tesis por su colaboración y contribuciones que enriquecieron este estudio. Este trabajo no habría sido posible sin el respaldo financiero proporcionado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) mediante la beca brindada con CVU: 946425 y por proyectos de investigación de mi asesor, el Dr. José Manuel Mendoza Rangel. Sus recursos fueron cruciales para la adquisición de equipos y materiales esenciales para llevar a cabo las pruebas experimentales necesarias. Finalmente, deseo destacar la importancia de la colaboración y el apoyo recibido, elementos esenciales que han fortalecido este proyecto desde su concepción hasta su conclusión.

Dedicatoria

A mi amada familia,

A mis padres, quienes con su amor incondicional y apoyo constante han sido mi mayor inspiración y fortaleza.

A mis queridos hermanos, por compartir conmigo cada paso del camino y ser mis cómplices en esta travesía llamada vida.

A mis tías, primos y abuelos, por su cariño, sabiduría y alegría que han iluminado mi camino y enriquecido mi alma.

Gracias por creer en mí, por alentarme en cada desafío y celebrar cada logro conmigo. Esta tesis es el fruto de nuestro amor y dedicación compartida.

Con infinito amor y gratitud,

José Raúl Zapata Padilla

Tabla de contenido

PRÓLOGO	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
RESUMEN	XIII
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción al Concreto Impreso en 3D	1
1.2 Planteamiento del Problema.	4
1.3 Antecedentes	6
1.3.1 Fibras de basalto en materiales cementantes	6
1.3.2 Fibras de basalto y resistencia a compresión	10
1.3.3 Fibras de basalto y contracción por secado	11
1.3.4 Fibras de basalto y permeabilidad iones cloruro	13
1.3.5 Concreto Impreso en 3D	14
1.3.6 Comparativa de investigaciones de materiales fibroreforzados para uso en 3DCP	20
1.3.7 Fibras utilizadas para disminuir los agrietamientos en 3DCP	24
1.4 Justificación	27

1.5	Hipótesis	28
1.6	Objetivos	28
1.6.1	Objetivo general.	28
1.6.2	Objetivos específicos	28
CAPÍTULO 2		30
2	MARCO TEÓRICO	30
2.1	Impresión 3D por extrusión	30
2.2	Funcionamiento de impresión 3D por extrusión	30
2.2.1	Lenguaje triangular estándar (STL)	31
2.2.2	Mallado STL	31
2.3	Impresión de cementantes en 3D	32
2.4	Reología en materiales cementantes	33
2.5	Fibras con recubrimientos	34
2.6	Comparativa de investigaciones de materiales fibroreforzados para uso en 3DCP	36
2.7	Fibras utilizadas para disminuir los agrietamientos en 3DCP	38
CAPÍTULO 3		40
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	40
3.1	Descripción de Materiales	40
3.1.1	Cemento Portland	40
3.1.2	Agregado fino	41

3.1.3	Fibras de basalto	41
3.1.4	Aditivo Superfluidificante (ASP)	43
3.1.5	Aditivo reductor de contracción (ARC)	44
3.2	Caracterización	45
3.2.1	Caracterización del Cemento	45
3.2.2	Caracterización del Agregado Fino	46
3.3	Equipo de Impresión 3D	47
3.4	Pruebas de extrusión en 3D	48
3.4.1	Extrudabilidad	48
3.4.2	Calidad de extrusión	49
3.4.3	Edificabilidad	50
3.4.4	Tiempo abierto	51
3.5	Métodos y ensayos	52
3.5.1	Fluidez de mezclas	52
3.5.2	Compresión en cubos moldeados	52
3.5.3	Tratamiento de fibras de basalto	52
3.5.4	Preparación de la pasta de cemento	52
3.5.5	Técnica de inyección con boquilla	53
3.5.6	Sistema de impresión 3D y preparación de muestras	53
3.5.7	Mediciones de resistencia a la flexión	54
3.5.8	Mediciones de resistencia a la compresión	54
3.5.9	Preparación de secciones delgadas	55
3.5.10	Mediciones de densidad de muestras y porosidad con helio	55
3.5.11	Mediciones de reología	56
3.6	Modelo estadístico de flujo	58

3.7	Sistemas de extrusión	59
3.8	Diseño de impresora manual	60
3.9	Ensayos de Reología	61
3.9.1	Equipo	61
3.9.2	Seleccionar el contenedor y el tamaño de la paleta.	62
3.9.3	Ingresar geometrías	63
3.9.4	Realizar una prueba	63
3.9.5	Tipos de pruebas	64
3.9.6	Prueba de crecimiento de esfuerzo	64
3.9.7	Prueba de curva de flujo	65
3.10	Mezclas	70
3.10.1	Densidad de sólidos en ASP	70
3.10.2	Pastas y morteros	70
3.11	Caracterización de la velocidad de impresión y la precisión del moldeo.	71
3.12	Programa experimental para optimizar la impresión 3D	72
	CAPÍTULO 4	74
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1	Caracterización de materiales	74
4.1.1	Distribución de tamaños de partícula (DTP)	74
4.1.2	Picnometría de Desplazamiento de Gas	74
4.1.3	Granulometría del agregado fino	74
4.1.4	Módulo de finura	75
4.1.5	Absorción y densidad del agregado fino	76

4.2	Pruebas de fluidez	76
4.2.1	Fluidez en pastas	76
4.2.2	Fluidez en morteros	77
4.2.3	Fluidez en morteros con fibras de basalto	79
4.3	Pastas preliminares para impresión 3D	80
4.3.1	Calidad de impresión	80
4.3.2	Edificabilidad	80
4.3.3	Pruebas de extrusión manuales	81
4.3.4	Ensayos a Compresión	85
4.4	Extrusión con émbolo	86
4.4.1	Jeringa 30 ml	86
4.4.2	Calafateadora	89
4.5	Extrusión con Tornillo Helicoidal	92
4.5.1	Extrusora de tornillo horizontal (ETH)	92
4.5.2	Extrusora de tornillo vertical (ETV)	93
4.6	Comparación de los métodos de extrusión	95
4.6.1	Jeringa Simple con Émbolo	95
4.6.2	Jeringa con Tornillo sin Fin	96
4.6.3	Cilindro con Tornillo sin Fin y Tolva de Alimentación	96
4.6.4	Reología en las Jeringas	96
4.7	Impresora 3D de Laboratorio	98
4.7.1	Sistema de bombeo	98
4.7.2	Relevancia en el Fenómeno Observado	98
4.7.3	Impresión 3D	100

4.8	Impacto del tiempo de sedimentación en las propiedades reológicas de los materiales.	104
5	CONCLUSIONES	106
6	RECOMENDACIONES	109
7	BIBLIOGRAFÍA	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fibras de basalto	6
Figura 2. Curvas contracción por secado de morteros de reparación con fibras de polipropileno y fibras de basalto. Tomada de Jiang et al. 2016.....	13
Figura 3. Número acumulado de publicaciones y número de citas de 2008 a 2021	15
Figura 4. Orientación de capas y cargas para los especímenes de Impresión 3D.....	17
Figura 5. Imágenes de geometría de las fibras de basalto (a) cámara (b) SEM.....	18
Figura 6. Impresión 3D por extrusión.....	31
Figura 7. Calidad del mallado STL en la representación de un modelo 3D	32
Figura 8. Materiales. (1) cemento portland. (2) Agregado fino. (3) Fibras de basalto. ...	42
Figura 9. Fibras de basalto aglomeradas de fábrica (sin dispersión).	42
Figura 10. Aditivos químicos. (1) Aditivo superplastificante (ASP). (2) Aditivo reductor de la constracción (ARC).....	43
Figura 11. Impresora 3D utilizada, Hyrel 3D Hydra 16A.....	48
Figura 12. Esquema del ensayo de extrudabilidad.....	49
Figura 13. Esquema de ensayo de calidad de extrusión (a) en planta, (b) frontal	50
Figura 14. Esquema de ensayo de edificabilidad	51
Figura 15. Gráfico de resistencia al corte vs tiempo.....	51
Figura 16. Distribución de Tamaño de partícula de CPO 40	75
Figura 17. Granulometría del agregado fino	76
Figura 18. Influencia de la relación agua-cemento (a/c) y del aditivo superplastificante (SPA) en el flujo de pastas de cemento.....	77
Figura 19. Superficie 3D de fluidez respecto a relación agua/cemento y cantidad de arena.	78
Figura 20. Superficie 3D de fluidez respecto a la cantidad de arena y fibra de basalto. .	79
Figura 21. Calidad de filamento de M-0.33.	80
Figura 22. Impresión de cubo solido de 25 mm con M-0.33.	81
Figura 23. Problemas de edificabilidad de M-0.33.	81
Figura 24. Procedimiento de tanteos para mejorar la edificabilidad o constructibilidad.	82
Figura 25. Fluidez y extrudabilidad de pastas de cemento	84

Figura 26. Resultados de resistencia a la compresión con promedio de 3 cubos, o de dos cubos si el rango no cumple con la tolerancia de la norma.....85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Revisión bibliográfica de materiales con fibras de basalto.....	7
Tabla 2. Contracción de mortero con FB. Adaptada de Jiang et al. 2010.....	12
Tabla 3. Estudios de refuerzos con fibra en 3DCP.	22
Tabla 4. Composición química y densidad del cemento.....	40
Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de basalto.....	41
Tabla 6. Pastas de cemento	53
Tabla 7. Diseño de experimentos para morteros reforzados con basalto-microfibra.....	58
Tabla 8. Proporciones de mezclas de pastas y mortero.....	71
Tabla 9. Pastas de prueba para mejorar la edificabilidad.....	83

RESUMEN

José Raúl Zapata Padilla

Fecha de Graduación: Enero, 2025

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título del Estudio: DISEÑO EFICIENTE DE MEZCLAS DE CEMENTO PORTLAND CON FIBRAS DE BASALTO PARA DISTINTOS SISTEMAS DE EXTRUSIÓN DE IMPRESIÓN 3D

Número de páginas: 134

Candidato para el grado de Doctor en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción

Área de Estudio: Ingeniería Civil

Propósito y Método del Estudio: Como parte de un macroproyecto para diseñar impresoras de concreto de diferentes tamaños, se desarrolló una tinta de mortero de cemento Portland con microfibras de basalto. Se evaluaron distintos métodos de extrusión de pastas de cemento y morteros para obtener un diseño eficiente de mezcla y obtener parámetros reológicos eficientes para la impresión 3D. Se realizaron pruebas de flujo en el plato de flujo y pruebas reológicas para obtener la viscosidad y el esfuerzo de cedencia estático y dinámico. Los métodos de extrusión evaluados incluyeron una jeringa de émbolo, una calafateadora de émbolo y una extrusora de tornillo helicoidal en configuración vertical y horizontal, probados tanto en impresoras comerciales como en una impresora de 1x1x1 metros diseñada por el equipo de investigación.

Contribuciones y Conclusiones: Las contribuciones principales incluyen la creación de una nueva tinta de mortero con mejores propiedades reológicas y la evaluación de métodos de extrusión, lo cual es crucial para optimizar la impresión 3D de concreto (I3DC). Se confirma la viabilidad de la I3DC para la construcción de viviendas sostenibles, proporcionando un marco de referencia para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la industria de la construcción. Las conclusiones destacan que la adición de microfibras de basalto mejora la reología del mortero, los métodos de extrusión probados son eficientes, y la tecnología de I3DC puede reducir costos y contaminación ambiental, facilitando el acceso a viviendas dignas y sostenibles.

Dr. José Manuel Mendoza Rangel

Asesor de Tesis

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción al Concreto Impreso en 3D

El concreto ha sido ampliamente utilizado e investigado para la construcción debido a cinco factores principales: bajo costo, abundancia de sus materias primas, buena resistencia a la compresión, durabilidad aceptable a largo plazo y la capacidad de permanecer fluido antes del endurecimiento (F. Bos et al., 2016). La tecnología de impresión 3D está ganando terreno de manera exponencial (Buswell et al., 2018), posicionándose como una alternativa a los procesos de fabricación tradicionales para casos en los que las geometrías pueden ser intrincadas, la mano de obra es cara o un alto grado de automatización es rentable. Se reporta que la impresión 3D reduce los tiempos de diseño y ejecución, reduce el costo asociado con el encofrado (Lloret et al., 2015), mejora la comunicación, permite la digitalización, mejora los procesos de colaboración y reduce la brecha existente entre ingeniería y diseño (Labonnote et al., 2016).

La construcción aditiva por extrusión (ACE, por ejemplo, impresión 3D de concreto) es un campo emergente con numerosas oportunidades y desafíos (F. Bos et al., 2016; Gosselin et al., 2016; Hager et al., 2016; Hambach & Volkmer, 2017; Jianchao et al., 2017; Kazemian et al., 2017; Le et al., 2012; Lim et al., 2012; G. Ma & Wang, 2018; Perrot et al., 2016; Rushing et al., 2017; Wangler et al., 2016). En comparación con la construcción de concreto convencional, ACE ofrece ahorros potenciales tanto de tiempo como de dinero. Sin embargo, hasta la fecha, las aplicaciones de campo de esta tecnología

han sido bastante limitadas, ya que este nuevo paradigma para la construcción exige un control preciso de la reología y fraguado del material compuesto. En este sentido, Lim et al. (Lim et al., 2012) han definido cuatro características críticas de los materiales empleados en una operación ACE, a saber:

1. Capacidad de bombeo: la facilidad y confiabilidad con la que se mueve el material
2. Imprimibilidad: La facilidad y confiabilidad de depositar material a través de un dispositivo de deposición
3. Constructibilidad: La resistencia del material húmedo depositado a la deformación bajo carga.
4. Tiempo abierto: El período en el que estas tres propiedades son consistentes dentro de tolerancias aceptables. Por supuesto, estas cuatro características están controladas por la reología y las propiedades de hidratación de los materiales y los requisitos impuestos por el equipo real que se emplea en una operación ACE.

Por otro lado, la inversión laboral en la industria de la construcción ha sufrido un notable descenso durante las últimas décadas, lo que coloca a la tecnología de impresión 3D en un lugar ventajoso. Desde su concepción (Khoshnevis & Dutton, 1998), las técnicas de impresión 3D por extrusión en capas se han basado en la construcción secuencial de una geometría apilando una capa sobre la anterior. Se ha realizado un trabajo relevante para diseñar nuevos materiales cementosos para este propósito y para caracterizar las propiedades frescas y endurecidas del concreto imprimible en 3D (Le et al., 2012; Lim et al., 2012).

La naturaleza del proceso basado en extrusión, la formación de capas y la falta de compactación favorece la presencia de juntas en las interfaces de impresión, que deben exhibir una fuerza de unión mínima para garantizar un diseño estructural seguro. Además, el hecho de que los materiales a base de cemento estén sujetos a hidratación y cambios coloidales a lo largo del tiempo hace que las propiedades en estado fresco sean variables durante el proceso de extrusión. A medida que la tecnología de impresión 3D se expande, existe una necesidad creciente de predecir cómo el proceso de fabricación afecta las propiedades mecánicas endurecidas del concreto impreso en 3D. Los estudios de investigación informaron sobre algunos de los factores de impresión que pueden influir potencialmente en las propiedades mecánicas endurecidas del concreto impreso en 3D. La interfaz de impresión entre capas se ha demostrado como un elemento crítico con el potencial de afectar el rendimiento estructural. Las propiedades mecánicas del concreto impreso en 3D en esta interfaz pueden ser débiles, induciendo un comportamiento anisotrópico, generado por los planos o vías predeterminados para que se propaguen las grietas. En esta investigación se analizará la adición de microfibras de basalto mezclas para impresión 3D y se comprobará el rendimiento de las fibras para reducir las contracciones por secado y la permeabilidad en estado endurecido. También se controlará la tasa y velocidad de extrusión y la acumulación vertical entre capas.

1.2 Planteamiento del Problema.

La impresión 3D de concreto promete una revolución en la construcción de estructuras como puentes, viviendas, complejos residenciales y hasta instalaciones militares en zonas de conflicto. En contraste con los métodos tradicionales, la impresión en 3D de concreto (3DCP) ofrece una serie de ventajas notables. En primer lugar, permite a los constructores dar rienda suelta a su creatividad al facilitar la construcción precisa de diseños complejos y asimétricos. Además, es esencial destacar que la industria de la construcción se ubica como el noveno campo laboral más peligroso en los Estados Unidos, representando el 21% de las muertes anuales (Estadísticas Comunes | Administración de Seguridad y Salud Ocupacional, s. f.) (Commonly Used Statistics | Occupational Safety and Health Administration, s. f.). La tecnología 3DCP reduce significativamente la dependencia de mano de obra, lo que tiene un impacto directo en la reducción de riesgos laborales.

La tecnología 3DCP también se destaca por su contribución a la sostenibilidad. Elimina la necesidad de utilizar encofrados, reduciendo así el desperdicio excesivo de materias primas. Además, las impresoras empleadas en 3DCP depositan con precisión y en cantidades específicas el cemento, lo que disminuye las emisiones de CO₂ y, en última instancia, nuestra huella de carbono.

Si bien las técnicas de impresión 3D están siendo ampliamente investigadas en el sector de la construcción, el desafío radica en el desarrollo de materiales cementantes que sean adecuados para la impresión y que mantengan una resistencia mecánica suficiente, en términos de alta resistencia y ductilidad. En comparación con el concreto convencional, se ha observado un rendimiento mecánico inferior en el concreto impreso en 3D. Por lo

tanto, la incorporación de refuerzos en las estructuras de concreto impreso en 3D se convierte en uno de los principales desafíos. Una posible solución a este desafío es la sustitución de las barras de acero por fibras cortas. Para ampliar la aplicación del concreto impreso en 3D en el diseño de estructuras de alto rendimiento, se requiere con urgencia el desarrollo de materiales a base de cemento reforzados con fibra. Sin embargo, se ha realizado una cantidad limitada de estudios sobre la creación de materiales a base de cemento reforzados con fibra que sean adecuados para la impresión 3D.

En esta investigación, se analizará la incorporación de microfibras de basalto en las mezclas utilizadas en la impresión 3D. Estas fibras variarán en longitud y tienen un diámetro de 12 a 15 micras. El estudio se centrará en la evaluación del desempeño de las fibras en la reducción de las contracciones por secado y la permeabilidad en el estado endurecido del concreto impreso en 3D. Además, se controlarán aspectos como la tasa y la velocidad de extrusión, así como la acumulación vertical entre capas. Esta investigación busca contribuir al avance de la tecnología 3DCP y su aplicabilidad en estructuras de alta resistencia y durabilidad.

1.3 Antecedentes

1.3.1 Fibras de basalto en materiales cementantes

1.3.1.1 Sadrmomtazi et al., 2018

Efectos del humo de sílice sobre la resistencia mecánica y la microestructura de compuestos cementantes reforzados con fibra de basalto (BFRCC), (Sadrmomtazi et al., 2018). Estudiaron la influencia de diferentes contenidos de humo de sílice (HS) (0%, 5%, 10%, 15% en masa de cementante) y la adición de la fibra de basalto (FB) (Figura 1) en contenidos de (0%, 1 % y 1.5% por volumen) en morteros de cemento Portland. La fluidez del mortero fue variable según la cantidad de fibra añadida, el valor de flujo más bajo registrado fue aproximadamente del 70% cuando se añadió la mayor cantidad de fibra (1.5%). El contenido de aditivo superplastificante (SP) se limitó a una cantidad tal que mantuviera la homogeneidad de la mezcla, ya que cantidades en exceso de SP provocó aglomeración de la fibra y separación de la matriz, este fenómeno se consideró una segregación en términos de compuestos cementantes. Las pruebas realizadas se muestran en la Tabla 1.



Figura 1. Fibras de basalto

Tabla 1. Revisión bibliográfica de materiales con fibras de basalto

Investigación	Materiales	Pruebas realizadas
(Sadrmomtazi et al., 2018)	<ul style="list-style-type: none"> • Cemento Portland. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidez.
<i>Estudio en Mortero.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Humo de sílice. • $A/C^2 = 0.39$ a 0.46 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión. • Resistencia a la flexión.
Cantidad de FB ¹ : 0.00, 1.00 y 1.50%	<ul style="list-style-type: none"> • SP³ • Agregado fino. 	<ul style="list-style-type: none"> • Deflexión del tramo medio. • <i>Absorción de agua.</i> • Resistividad eléctrica específica. • Morfología por microscopía SEM.
(Guo et al., 2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Cemento Portland. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Densidad aparente del concreto.</i>
<i>Estudio en Concreto.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ceniza volante. • Humo de sílice. 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia a la compresión.
Cantidad de FB ¹ : 0.00, 0.15, 0.30, 0.45 y 0.60%	<ul style="list-style-type: none"> • $A/C^2 = 0.32$ • SP⁵ • Agregado fino. • Agregado grueso. 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Permeabilidad del ion cloruro.</i> • Difusión del ion cloruro. • Morfología por microscopía SEM. • Tamaño y distribución de poros.

Investigación	Materiales	Pruebas realizadas
(Algin & Ozen, 2018)	• Cemento Portland.	• Diámetro de flujo, T500,
<i>Estudio en Concreto Autocompactable.</i>	• A/C ² = 0.40	embudo V
Cantidad de FB ¹	• SP ³	•
0.00, 0.10, 0.30 y 0.50%	• Agregado fino.	
	• Agregado grueso.	

¹Cemento Portland. ² Ceniza Volante. ³ Humo de sílice. ⁴ Relación agua-cementante. ⁵Superplastificante (aditivo). ⁶Fibra de basalto. ⁷Fibra de polipropileno. ⁸Concreto autocompactable

1.3.1.2 Jiang et al., 2010.

Influencia de la fibra de basalto en el rendimiento del mortero de cemento (C. Jiang et al., 2010). El objetivo principal de este estudio fue evaluar el rendimiento del mortero con fibras de basalto (BF) con diferentes niveles de contenido. Los resultados del estudio indican lo siguiente: es posible utilizar BF en el campo de cemento reforzado con fibras. La adición de BF redujo la contracción marcadamente seca del mortero, especialmente a edades tempranas. La adición de BF tenía una mayor resistencia a la compresión y a la flexión al comienzo del período de hidratación, pero tenía un poco menos de resistencia a la edad de 28 días que el mortero sin fibra. En comparación con el mortero sin fibra, la carga de fractura del mortero BF con contenido diferente aumentó, pero no fue muy notable. La adición de BF aumenta la deflexión del mortero a la misma carga en comparación con el mortero sin fibra. Con el aumento del contenido de fibra, la deflexión aumenta a la misma carga, lo que demuestra que la adición de BF puede aumentar la tenacidad, mejorando la propiedad de resistir la deformación y el

agrietamiento del mortero. Las imágenes SEM de microestructura mostraron que hay una buena unión entre la superficie BF y la matriz de cemento hidratado en edades tempranas. Un significado importante de estos hallazgos es que el nuevo BF puede usarse como un producto sustituto competitivo de otras fibras como la fibra de polipropileno (PP) en el campo de los compuestos de cemento reforzado.

1.3.1.3 Branston et al., 2016.

Influencia de las fibras de basalto en la contracción plástica libre y restringida (Branston et al., 2016). Mencionaron que el agrietamiento a edades tempranas debido a la contracción plástica a menudo causa la reducción de la durabilidad de las estructuras de concreto. El objetivo del trabajo fue evaluar el uso potencial de fibras de basalto picadas para prevenir dichos agrietamientos. Se realizaron pruebas para medir la magnitud de la deformación por contracción que se desarrolla en muestras no restringidas, y la gravedad de la fisuración que se produce cuando se restringe la contracción. Los resultados indicaron que las fibras de basalto son efectivas para prevenir las grietas al reducir la magnitud de la contracción libre y al restringir el crecimiento de las grietas si ocurren. El último mecanismo es más prominente cuando disminuye la relación agua-cemento.

1.3.1.4 Bertelsen et al. 2020.

Influencia de las características de la fibra en el agrietamiento por contracción plástica en materiales a base de cemento: una revisión (Bertelsen et al., 2020). Presentaron una revisión detallada de la investigación existente relacionada con el agrietamiento por contracción plástica que incluye comparaciones de métodos de evaluación a escala de laboratorio, técnicas de medición de grietas y la influencia de varios tipos de fibras. Mencionaron que de fibras distribuidas aleatoriamente para controlar el agrietamiento por contracción plástica ha mostrado buenos resultados y se han presentado

en la literatura varias fibras de diferentes materiales, propiedades mecánicas, geometrías, formas y fracciones de volumen. Las características de la fibra se analizaron con datos de estudios anteriores mediante estadística descriptiva. A partir de este análisis, se descubrieron que muchas características relevantes de la fibra tienen una influencia positiva en el control de la formación de grietas. Estos efectos positivos se encontraron para fibras con un diámetro de fibra más fino, una relación de aspecto más alta, un aumento en el número de fibras por unidad de volumen y superficie específica de la fibra, así como la influencia de los enlaces de fibra a matriz interfaciales químicas y mecánicas. También encontraron que el aumento en la fracción de volumen de fibra tiene un efecto positivo cuando se agrega a la mezcla en un límite superior. Observaron que no hay una correlación clara entre la influencia de la fibra sobre el grado de agrietamiento de la superficie y la longitud de la fibra o el módulo de la fibra.

1.3.2 Fibras de basalto y resistencia a compresión

1.3.2.1 Dias y Thaumaturgo, 2005.

(Dias & Thaumaturgo, 2005) informaron que para el concreto de cemento Portland, la adición de fibra de basalto en una fracción de volumen del 1.0% y 0.5% provocaron una reducción del 26.4% y 3.9%, respectivamente, en la resistencia a la compresión a los 28 días. Esto debido a que a medida se aumenta el porcentaje de fibra, mayor es la probabilidad de dejar huecos en la matriz o que las fibras absorban demasiada agua, dejando al cemento a su alrededor sin la suficiente agua para hidratarse.

1.3.2.2 Jiang et al., 2014.

(C. Jiang et al., 2014) reportaron que la adición de fibra de basalto en fracción de volumen de 0.05%, 0.1%, 0.3% y 0.5%, puede mejorar la resistencia a la compresión del

concreto entre 3.74% a 6.49% a edades de 7 días, respecto a la mezcla de control sin fibra. Sin embargo, el aumento de la resistencia a la compresión a una edad avanzada es menor que a una edad temprana. A los 28 días el cambio en la resistencia a la compresión varió entre -0.18% a 4.68%, incluso la reducción de la resistencia a la compresión fue más evidente a los 90 días.

1.3.3 Fibras de basalto y contracción por secado

1.3.3.1 Jiang et al. 2010.

(C. Jiang et al., 2010), demostraron que se puede reducir la contracción por secado del mortero de cemento reforzándolo con fibras de basalto. El refuerzo de fibra no solo aumenta la tenacidad del mortero, sino que también aumenta la resistencia a los golpes y al agrietamiento por contracción plástica. En la Tabla 2 se muestran las mezclas que realizaron. La adición de fibras se hizo en fracciones de 0.9, 1.2 y 1.5 kg/m³. Los resultados demostraron que las muestras con FB exhibieron una contracción menor en comparación de la mezcla de referencia en diferentes edades, especialmente a edades tempranas. La contracción por secado de la mezcla de mortero con 0.9 kg/m³ de fibra curada durante 1 día y 3 días fue menor que la del mortero de mezcla de referencia en un 60% y 30.6% respectivamente. También mencionaron que entre mayor es el contenido de fibra en la mezcla, menor es la contracción por secado exhibida por la mezcla. Con el aumento de las edades de curado, disminuyó el efecto de BF sobre los comportamientos de contracción de la mezcla. A los 28 días, la influencia de BF en la contracción del mortero no fue muy efectiva.

1.3.3.2 Jiang et al., 2016.

(C. Jiang et al., 2016), en este otro artículo estudiaron el comportamiento del mortero con respecto a la adición de fibras de polipropileno (PP) y fibras basalto (BF) para aplicaciones de reparación. Se utilizaron un total de siete mezclas de mortero, incluyendo una mezcla de mortero control y seis mezclas de mortero con fibra de PP y BF de 0.6, 1.6 y 2,6 kg/m³. Los valores de contracción por secado de las muestras de mortero fueron medidos en los períodos de curado de 1, 3, 7, 14, 21, 28 y 56 días, que se muestran en la Figura 2. Observaron que la contracción por secado aumenta con el tiempo de curado para todas las muestras, aumentando más rápidamente en las primeras etapas y disminuyendo en etapas posteriores. Por otro lado, tanto la fibra de PP como la BF reducen la contracción por secado del mortero de manera efectiva, en comparación con el mortero de control. La disminución del valor de contracción por secado del mortero es más evidente con el aumento del contenido de fibra. También comentaron que, a un determinado contenido de fibra, la utilización de fibra de PP en el mortero puede mitigar más eficazmente la contracción por secado que la incorporación de BF al mortero.

Tabla 2. Contracción de mortero con FB. Adaptada de Jiang et al. 2010

No.	Cont. de fibra Kg/m ³	Contracción por secado (%)									
		1 d		3 d		7 d		14 d		28 d	
		Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)	Med (%)	SE (%)
1	0	0.025	--	0.049	--	0.069	--	0.078	--	0.088	--
2	0.9	0.010	-60.00	0.034	-30.61	0.051	-26.09	0.063	-19.23	0.078	-11.36
3	1.2	0.009	-64.00	0.031	-36.73	0.048	-30.43	0.06	-23.08	0.07	-20.45
4	1.5	0.009	-64.00	0.032	-34.69	0.05	-27.54	0.061	-21.79	0.065	-26.14

Notas: SE (%) = [(resistencia del mortero - resistencia mortero de control) / resistencia mortero de control]

100%.

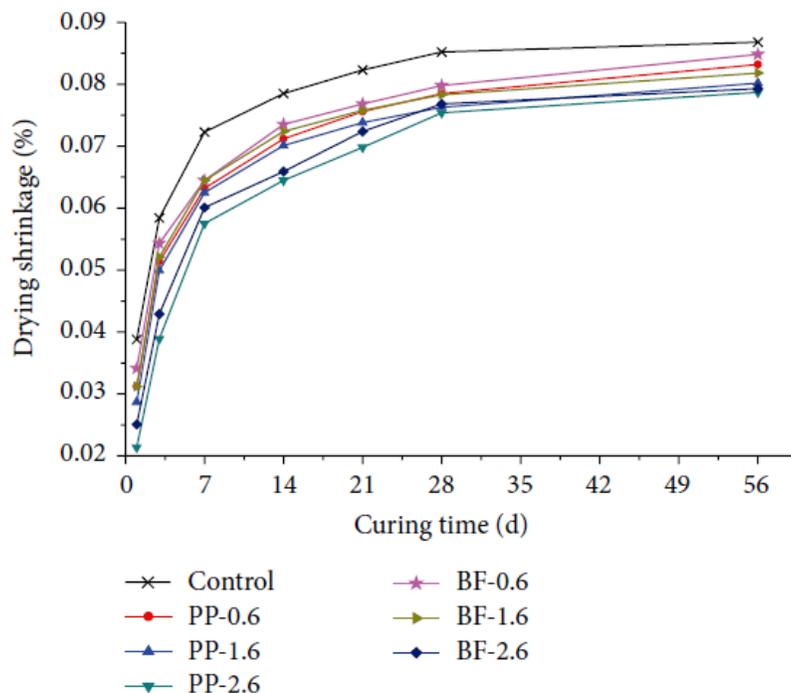


Figura 2. Curvas contracción por secado de morteros de reparación con fibras de polipropileno y fibras de basalto. Tomada de Jiang et al. 2016.

1.3.4 Fibras de basalto y permeabilidad iones cloruro

1.3.4.1 Algin y Ozen, 2018.

(Algin & Ozen, 2018) informaron el efecto de las fibras de basalto en la PRCl en el concreto autocompactable (CAC). Analizaron tanto el efecto de la longitud de la fibra como la cantidad. Las longitudes de las fibras fueron de 3, 6, 12 y 24 mm de longitud y se incorporan a las mezclas de CAC como 0%, 0.1%, 0.3% y 0.5% del volumen de concreto. La mezcla de control del CAC sin fibra obtuvo una permeabilidad al cloruro de 2,500 Coulombs, y la incorporación de la fibra en 0.10% del volumen de concreto, de basalto redujo la permeabilidad al cloruro en un rango de 1850-2500 Coulombs, es decir 2,175 Coulombs en promedio, que corresponde a una efectividad respecto a la mezcla de control de 13.0% en reducción de permeabilidad al cloruro por incorporación de fibra.

1.3.4.2 Niu et al., 2019

(Niu et al., 2019) reportaron el efecto de la incorporación híbrida de fibra basalto (FB) y fibra polipropileno (FP) en concreto de los grados de resistencia C30, C40 y C50. Los materiales cementantes utilizados en este estudio incluyeron cemento Portland (OPC) P.O 42.5R, escoria de alto horno granulada (GFS), humo de sílice (SF) y cenizas volantes (FA). Los resultados de PRCl indican que la indican que cuando la fracción volumétrica de la fibra es baja, la permeabilidad al cloruro es menor que el del concreto de referencia, debido a que las fibras se distribuyen en la matriz del concreto para formar un sistema de soporte tridimensional que restringe la producción y desarrollo de microgrietas, y las fibras aprietan los poros capilares del mortero. La reducción máxima de la permeabilidad al cloruro fue por la mezcla con FB=5% y FP=10% (FB5FP10) para el concreto grado C50. La mezcla de control sin fibras (FB0FP0) obtuvo una permeabilidad de 450 Coulombs y mezcla de FB5FP10 obtuvo una permeabilidad de 300 Coulombs, esto corresponde a una efectividad de 33.33% en reducción de permeabilidad al cloruro por uso de fibras híbridas de basalto-polipropileno.

1.3.5 Concreto Impreso en 3D

1.3.5.1 Revisión cuantitativa de las tendencias en las propiedades mecánicas de la fabricación aditiva y la impresión 3D (García-León et al., 2021)

En esta investigación se implementó un análisis bibliométrico, también llamado ciencia cuantitativa. Las tendencias y temas trascendentales se determinaron utilizando el paquete Bibliometrix para R y VOSviewer. Los datos se exportaron directamente de la base de datos Scopus con una ecuación de búsqueda. Un total de 1,271 documentos se

consideraron en los criterios de búsqueda para el análisis bibliométrico. La Figura 3 presenta el número acumulado de publicaciones en el período de 2008 a 2021, así como el total de citas. Desde 2014 se observa un crecimiento significativo en el número de documentos con un pequeño cambio en la pendiente de las publicaciones acumuladas. Los cambios más significativos en la pendiente de las publicaciones acumuladas se observan en los períodos 2008-2017 y 2018-2019. Cabe señalar que no existe una tendencia aplanada en los últimos años, lo que demuestra la relevancia existente en el estudio de la fabricación aditiva y las propiedades mecánicas de los materiales impresos en 3D en los últimos años. El crecimiento anual de publicaciones se estima en 20.81%; adicionalmente, existe un promedio de citas de 16.01 por documento. Hay 4,620 autores con una media de 3.63 autores por documento y un índice de colaboración de 3.77.

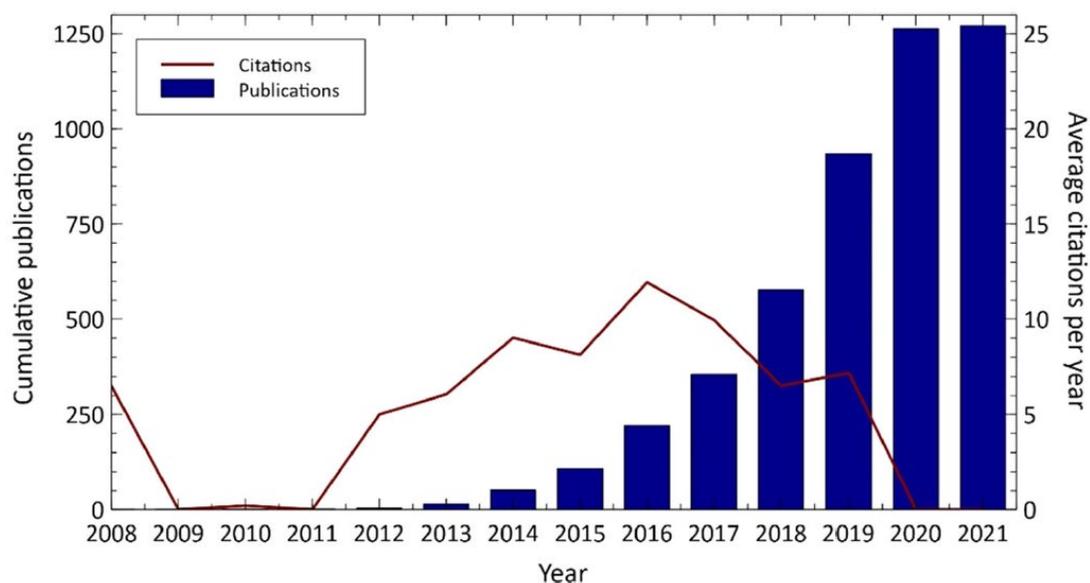


Figura 3. Número acumulado de publicaciones y número de citas de 2008 a 2021

1.3.5.2 Comportamiento anisotrópico en la flexión de concreto impreso en 3D reforzado con fibras (Ding et al., 2020)

Examinaron cuidadosamente el comportamiento del material a base de cemento reforzado con fibra para la impresión 3D bajo flexión. Con la adición de fibras de polietileno (PE), la falla de la muestra ya no estaba dominada por la interferencia débil. La cara y las resistencias a la flexión en las tres direcciones (ver Figura 4) mejoraron significativamente el rendimiento posterior al pico. La diferencia estaba directamente relacionada con el contenido de fibras y debería seleccionarse una longitud de fibra adecuada. El análisis de microestructura mostró que las fibras de orientación uniformes y alineadas eran factores clave que conducían al aumento de la fuerza última y el comportamiento posterior al pico. Sin embargo, las muestras impresas en 3D todavía mostraron un claro comportamiento anisotrópico. Las resistencias a la flexión en las direcciones paralelas y perpendiculares a la impresión dentro del plano de impresión fueron más altas y se desempeñaron de manera similar, mientras que la fuerza en la dirección ortogonal al plano de impresión (a través de las capas) fue el más bajo. Se cree que los hallazgos pueden ayudar para comprender el papel de las fibras de PE en el concreto de impresión 3D basado en extrusión.

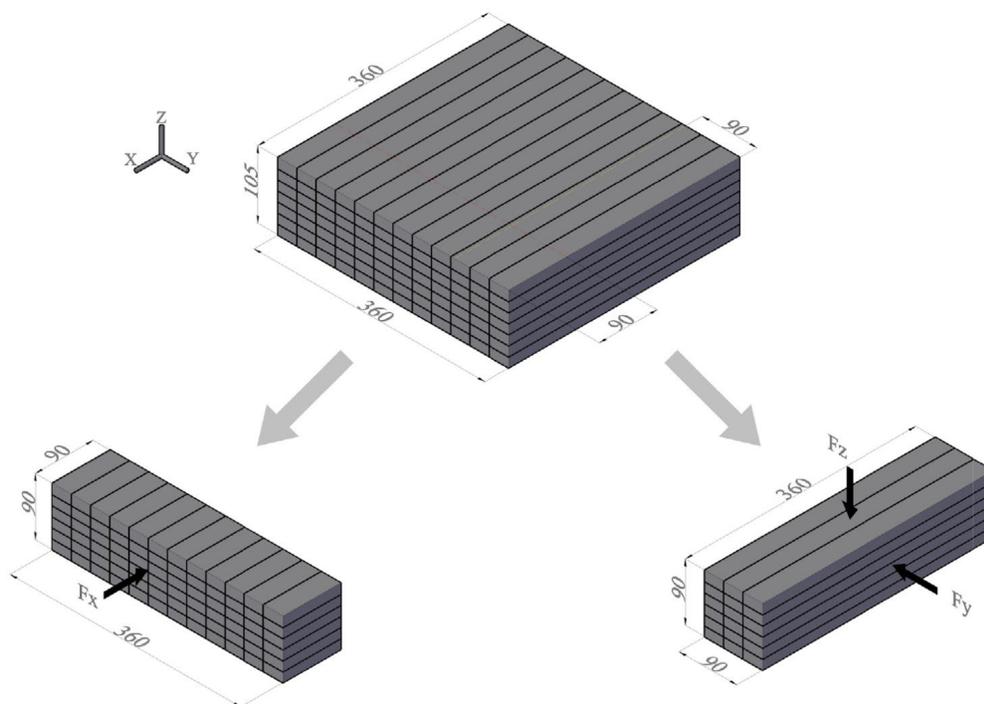


Figura 4. Orientación de capas y cargas para los especímenes de Impresión 3D

1.3.5.3 Anisotropía mecánica de compuestos reforzados con fibras alineadas para impresión 3D basada en extrusión (G. Ma, Li, Wang, Wang, et al., 2019)

En este estudio se adicionaron fibras de basalto, estas se muestran en la Figura 5. Se determinó un contenido óptimo de fibra de basalto basándose en primer lugar en la capacidad de impresión adecuada y luego en el rendimiento mecánico. Se utilizó una impresora 3D de desarrollo propio para la extrusión del material cementante y también para la mejora mecánica de la alineación de la fibra a lo largo de la dirección de impresión manteniendo el diámetro de la boquilla más pequeño que la longitud de la fibra de basalto. El proceso de impresión deposita filamentos direccionales, lo que intrínsecamente da como resultado estructuras laminadas y anisotropía mecánica. Los rendimientos anisotrópicos del material impreso se evaluaron mediante pruebas de rendimiento

mecánico basadas en la dirección y se confirmaron mediante pruebas de velocidad de pulso ultrasónico. Se investigaron experimentalmente los comportamientos mecánicos de las muestras impresas en 3D expuestas a cargas de compresión, tracción, flexión y cizallamiento. Las estructuras de mesoescala de las muestras impresas se detectaron mediante la técnica de exploración por TC avanzada. Se propusieron índices tanto mecánicos como acústicos para evaluar las propiedades anisotrópicas de los materiales impresos. En particular, se establecieron relaciones empíricas entre las propiedades mecánicas anisotrópicas y las señales ultrasónicas. En el nivel microestructural, la mejora mecánica de la alineación de la fibra, la extracción de la fibra y la fractura de la fibra se probaron a través de imágenes de microscopio electrónico de barrido (SEM).

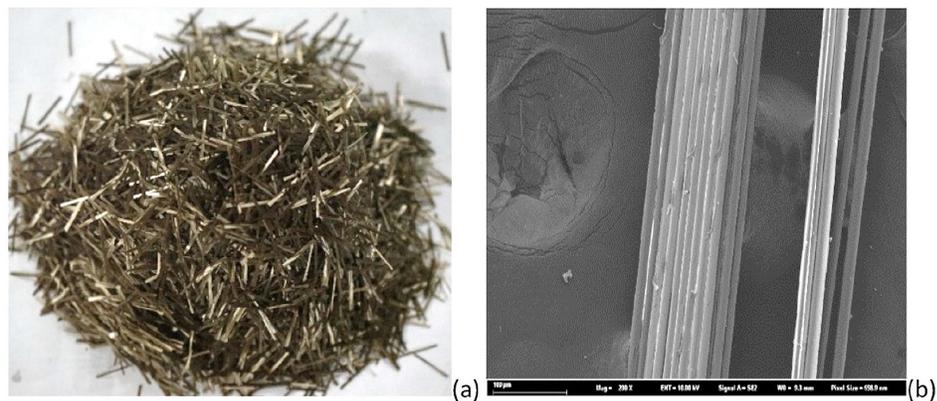


Figura 5. Imágenes de geometría de las fibras de basalto (a) cámara (b) SEM

1.3.5.4 Concreto impreso en 3D reforzado con fibras de acero: influencia de los tamaños de las fibras en el rendimiento mecánico (Pham et al., 2020)

En este estudio investigaron las propiedades mecánicas del concreto de impresión de alto rendimiento reforzado con fibras de acero con diferentes longitudes (3 y 6 mm) a diferentes contenidos de volumen de fibra (0.25%, 0.5%, 0.75% y 1%). Los resultados

experimentales corroboran que la longitud crítica y la fracción de volumen de las fibras, particularmente 0.75% y 1% de fibras de acero de 6 mm de longitud, junto con la alineación de las fibras, son de gran importancia para generar un mecanismo de puenteo de fibras para mejorar el rendimiento de flexión. Como resultado, se puede lograr una capacidad de carga mejorada, un comportamiento de endurecimiento por deflexión y menos fallas frágiles en muestras impresas probadas en una dirección específica. Las resistencias a la compresión y a la flexión del concreto impreso se encuentran en un rango de 70-111 MPa y 6-15 MPa en comparación con el control y la de fundición de 90-113 MPa y 11-14 MPa, respectivamente. Los resultados del escaneo de microtomografía computarizada en concreto endurecido sin fibras revelan que el concreto impreso de alta calidad tiene un contenido de poros más bajo, que es del 8.8% en comparación con el 9.8% y el 11.4% en el molde y las muestras impresas de baja calidad, respectivamente. También muestra que más del 90% de las fibras extruidas se alinean entre 0 y 30 desde la orientación del filamento.

1.3.5.5 Examinando la importancia del patrón de impresión de relleno en la anisotropía del concreto impreso en 3D (Heras Murcia et al., 2020)

Esta investigación examinó la importancia de los patrones de impresión de relleno en las propiedades anisotrópicas del concreto impreso en 3D. Se caracterizaron las propiedades reológicas, la resistencia a la compresión y la resistencia de la unión entre capas y entre filamentos del concreto impreso en 3D. Mostraron que existe una dependencia direccional de todos los patrones de relleno. Las probetas muestran menor resistencia a la compresión y módulo de elasticidad en la dirección Z (extrusión) en comparación con las direcciones X e Y, pero una diferencia insignificante de resistencia y módulo entre las direcciones X e Y. Sin embargo, no se encontró dependencia

direccional para la deformación en el momento de la falla. Por otro lado, no se observaron diferencias significativas en las propiedades mecánicas del concreto impreso en 3D o se pueden atribuir a los patrones de impresión de relleno. Los resultados también muestran que el concreto impreso en 3D muestra una mayor resistencia a la compresión, para dos de las tres direcciones de prueba (X e Y) que el concreto colado convencionalmente. Esto se debe a la compactación asociada con el proceso de impresión que depende en gran medida de los parámetros de impresión.

1.3.6 Comparativa de investigaciones de materiales fibroreforzados para uso en

3DCP

El concreto reforzado con fibra se usa ampliamente en la industria de la construcción y tiene muchas aplicaciones, incluidos túneles, fachadas y puentes. Las fibras aumentan la resistencia a la flexión y a la tracción del concreto. Hambach y Volkmer (Hambach et al., 2019; Hambach & Volkmer, 2017), probaron el impacto de fibras de refuerzo hechas de vidrio, basalto y fibra de carbono. Su estudio encontró que los materiales con fibras tienen resistencia a la compresión menores. Sin embargo, notaron que agregar fibra de carbono aumenta significativamente la resistencia a la flexión, de 10 MPa a 30 MPa en comparación con la muestra sin fibras. Mientras que las fibras de vidrio y basalto no mostraron el mismo nivel de mejora. Esto se debió a los bajos valores del módulo de Young de los materiales de vidrio y basalto. Shakor et al. (Shakor et al., 2019), investigaron el impacto de agregar fibras de polipropileno (PP) en la resistencia mecánica de 3DCP. Informaron un aumento del 30% en la resistencia a la compresión para especímenes con refuerzo de PP en un porcentaje del 1% por volumen. Sin embargo, Nematollahi et al. (Nematollahi et al., 2018), informaron que agregar fibra de PP provoca

una disminución en la unión entre capas, aunque aumenta la resistencia a la flexión. El estudio mostró que agregar refuerzo de fibra paralelo al filamento de concreto aumenta la resistencia a la compresión solo en la dirección de extrusión.

Panda et al. (Panda et al., 2017), probaron el impacto de la longitud variable de la fibra de vidrio corta y su porcentaje en la mezcla sobre el rendimiento mecánico. Su estudio encontró que la adición de fibras de vidrio no mostró una mejora significativa en la resistencia a la compresión, pero sí una mejora notable en la resistencia a la flexión. Otro estudio de Bos et al. (F. P. Bos et al., 2019), investigó el uso de fibras cortas de acero como refuerzo. Su estudio también informó un aumento significativo, hasta un 500%, en la resistencia a la flexión mediante el uso de fibras de acero. El comportamiento posterior al pico de los filamentos impresos reforzados se caracterizó por un fuerte ablandamiento por deformación en comparación con las muestras sin fibras. La Tabla 3 resume algunos estudios de investigación sobre 3DCP reforzado con fibra y destaca las pruebas y el tipo de fibra. Esta tabla también muestra las propiedades del material obtenido en el 3DCP reforzado con fibra.

Tabla 3. Estudios de refuerzos con fibra en 3DCP.

Referencia	Tipo de refuerzo	Parámetros en el estudio	Propiedades mecánicas probadas		
			Resistencia a compresión	Resistencia a la flexión	Resistencia a la tracción
Shakor et al. (Shakor et al., 2019)	Fibra de polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje en volumen de fibra (0%, 1%) • Método de entrega del material (boquilla circular o rectangular) • Método de curado (agua vs aire) • Número de capas impresas 	2.37 MPa (sin refuerzo) 3.06 MPa (con refuerzo)	2.23 – 9.21 Mpa	–
Nematollahi et al. (Nematollahi et al., 2018)	Fibra de polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> • Dirección de carga • Porcentaje en volumen de fibra (0%-1%) 	Dirección perpendicular: 18–36MPa Dirección longitudinal: 15–23MPa Dirección lateral: 13–24MPa	Dirección perpendicular: 6.1–7.8 MPa Directo lateral: 6.5–7.8 Mpa	Tensión uniaxial entre capas: 1.7–3.1 MPa
Panda et al. (Panda et al., 2017)	Fibra de vidrio (GF)	<ul style="list-style-type: none"> • Longitudes de fibra (3 mm, 6 mm, 8 mm) • Porcentaje en volumen de fibra (0.25% a 1%) • Dirección de carga 	19 – 26.5 Mpa	2.4 – 7 Mpa	0.6 – 1.5 Mpa
Hambach et al. (Hambach et al., 2019)	Fibra de Carbón, Vidrio, y basalto	<ul style="list-style-type: none"> • Material de fibra de refuerzo • Ruta de impresión 	20.6 – 85.0 Mpa	10.6 – 29.1 Mpa	–
Bos et al. (F. P. Bos et al., 2019)	Fibra de acero	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de escala • Efecto de la impresión 	23.2 MPa (sin fibra)	1.14 MPa (sin fibras) 5.96 MPa (con fibras)	1.49 MPa (sin fibra)
Ma et al. (G. Ma, Li, Wang, & Bai, 2019)	Cable continuo de microaceero	<ul style="list-style-type: none"> • Ruta de impresión 	–	3 MPa (sin fibra) 29 MPa (con fibra)	–

La aplicación de fibras en el 3DCP se limita al 1-3 % para evitar problemas relacionados con el bombeo, la obstrucción, la segregación y la distribución no uniforme. Agregar fibras para aumentar la resistencia a la compresión de 3DCP crea mezclas de baja fluidez debido a la mayor proporción de fibras y, por lo tanto, crea una menor resistencia a la compresión (Kristombu Baduge et al., 2021). Esto sucede porque a medida se aumenta la cantidad de fibra, mayor es la probabilidad de dejar huecos o poros en la matriz (C. Jiang et al., 2014). La estructura de poros afecta el comportamiento del material a base de cemento quizás más que cualquier otra característica del material. Estos poros se clasifican en poros conectados y poros cerrados (Zhao et al., 2019). La permeabilidad se ve afectada por los poros interconectados, mientras que la resistencia a la compresión se ve afectada por todos los tipos de poros (Kondraivendhan & Bhattacharjee, 2010). Se ha encontrado que las fibras de basalto son efectivas para prevenir agrietamientos porque reduce la magnitud de la contracción libre y restringe el crecimiento de las grietas. Estos efectos podrían ser más prominentes en una mezcla con baja relación a/c debido a la autodesecación. Los agrietamientos son vías de acceso para la penetración de agua y cloruros lo que puede permitir riesgos de corrosión del acero de refuerzo (Branston et al., 2016).

En la revisión de la literatura se ha encontrado que las investigaciones de materiales fibroreforzados de 3DCP se orientan en evaluar la efectividad de las fibras para aumentar la ductilidad del material sometido a esfuerzos mecánicos, pero no se ha encontrado información de la evaluación de fibras para reducir las contracciones por secado y su influencia en los agrietamientos de la etapa plástica del material y la interconectividad de los poros. De igual manera hay poca información sobre la influencia de las fibras en la reología y la durabilidad. Estos argumentos sugieren llevar a cabo en

este estudio la determinación de la influencia de las fibras de basalto en mezclas de 3DCP para su óptimo diseño de mezcla, proceso de impresión, reología, contracciones y durabilidad.

1.3.7 Fibras utilizadas para disminuir los agrietamientos en 3DCP

Para 3DPC, la falta de encofrado durante el proceso de impresión 3D expone los filamentos de concreto recién depositados directamente al entorno ambiental. 3DPC es, por lo tanto, más vulnerable al medio ambiente que el concreto convencional que está protegido del medio ambiente por encofrado. Además, limitado por la impresora de concreto 3D y el sistema de bombeo, el tamaño de los agregados utilizados en el concreto imprimible en 3D es a menudo inferior a 5 mm, es decir, a menudo se utilizan morteros en lugar de concreto. Las fracciones de volumen de los agregados en mezclas de mortero imprimibles en 3D son del 40% al 50%, que son mucho más bajas que el concreto convencional, típicamente en el rango de 60% a 75% (Zhang et al., 2018). Además, a menudo se aplica una menor relación agua/cemento (a / c) para garantizar la imprimibilidad y las propiedades mecánicas del concreto, pero esto a menudo resulta en una mayor contracción autógena (Arunothayan et al., 2021; Hambach & Volkmer, 2017). Algunos investigadores intentaron desarrollar métodos para reforzar 3DPC (Liu et al., 2008; Tran et al., 2021). Sin embargo, los métodos propuestos aún están lejos de ser satisfactorios, desde la perspectiva de la interferencia del proceso de impresión 3D durante el diseño de refuerzo de acero y la perspectiva del efecto de fortalecimiento del acero limitado en el rendimiento estructural. Sin duda, las situaciones anteriores, incluidas cantidades relativamente altas de polvos finos, bajo agregado, baja relación a / c y falta de refuerzo de acero, pueden traer un grave riesgo de agrietamiento a 3DPC (Toutanji et al.,

1998). Sobre la base del material, es crucial cuantificar la contracción total de 3DPC en un entorno de secado, comprender sus parámetros de impacto y estudiar métodos para mitigarla.

Las fibras a menudo se agregan al concreto para mejorar sus propiedades. Las fibras con alto módulo elástico, por ejemplo, fibra de basalto, fibra de acero, fibra de carbono, pueden aumentar la rigidez, la resistencia a la tracción y al cizallamiento del concreto (L. Ma et al., 2022). Por otro lado, las fibras con bajo módulo elástico, por ejemplo, fibra de polipropileno (PP), fibra de alcohol polivinílico, tienen buena ductilidad y a menudo se usan para mejorar la resistencia al agrietamiento de los materiales a base de cemento. Hasta ahora, varios tipos de fibras, como fibra de PP, fibra de acero, fibra de alcohol polivinílico, fibra de basalto (BS), y fibra de carbono, se han utilizado en 3DPC.

Entre estas fibras, la fibra de BS ha atraído gran atención en múltiples industrias (C. Jiang et al., 2010; Sun et al., 2019; Zapata-Padilla et al., 2023) debido a su excelente desempeño. En comparación con el concreto reforzado con fibra de polietileno, el concreto reforzado con fibra de basalto no solo es adecuado para ahorrar costes (Sun et al., 2019), sino que también tiene un mejor rendimiento en la resistencia de la unión del cemento porque su propiedad química es más similar a la del cemento (Rybin et al., 2013; Sun et al., 2019; Wei et al., 2010). Estas características de la fibra la hacen atractiva para crear mezclas de 3DCP más resistentes a los agrietamientos por contracciones por secado.

Algunos autores reportan que la microfibras basálticas (BF) en su estado actual de desarrollo puede mejorar la durabilidad del concreto al prevenir microfisuras prematuras por retracción plástica, y este efecto se atribuye a la reducción de la magnitud de la contracción libre, ya que las microfibras basálticas tienen un efecto adhesivo con la matriz y restringen efectivamente el desarrollo de micro y macrofisuras con su efecto puente

(Branston et al., 2016; Guler & Akbulut, 2023; Z. Li et al., 2022; Mao et al., 2023). Se ha informado que el riesgo de agrietamiento es más prominente cuando se reduce la relación a/c en la mezcla (Branston et al., 2016), que es el caso de los 3DCP ya que estos tienen cantidades de agua controladas para garantizar la imprimibilidad. Otros estudios reportan que las fibras de basalto sin ningún revestimiento protector carecen de durabilidad a largo plazo en el entorno de concreto alcalino (Lee et al., 2014; Rabinovich et al., 2001). Hasta que se supere este problema, un uso efectivo de los BF es prevenir las microfisuras en la etapa plástica del concreto y en edades tempranas. La microfibra de basalto es una fibra compuesta de basalto natural, que es respetuosa con el medio ambiente, no tóxica y utiliza materias primas nacionales baratas y abundantes, lo que puede ahorrar costos de producción y energía (Choi, Yun-Wang et al., 2014).

1.4 Justificación

A pesar de algunos ejemplos de impresión 3D en la industria de la construcción para propósitos de exhibición, su adopción en la práctica diaria sigue siendo un desafío. Esto se debe a la naturaleza conservadora y aversa al riesgo de la industria de la construcción, así como a los desafíos técnicos, económicos y sociales que deben superarse para desbloquear todo el potencial de la impresión 3D en la construcción.

Uno de los principales obstáculos radica en el alto costo del equipo necesario para la impresión 3D, lo que hace que la fabricación de maquinaria automatizada sea una inversión significativa. Esto limita, por el momento, la viabilidad de proyectos de construcción a gran escala con esta tecnología, lo que la convierte en una opción más adecuada para proyectos más pequeños. Por ejemplo, la construcción de viviendas pequeñas de entre 200 y 400 pies cuadrados mediante métodos tradicionales puede costar alrededor de \$40,000 en promedio, mientras que una casa impresa en 3D de tamaño similar puede costar solo \$10,000. A medida que la tecnología continúa mejorando y los costos disminuyen, la impresión 3D tiene un enorme potencial en la industria de la vivienda residencial.

En el contexto de Latinoamérica, donde la demanda de viviendas sigue siendo un desafío clave, la promoción de la impresión 3D de viviendas puede ser altamente beneficiosa. Sin embargo, para aprovechar este potencial, es fundamental contar con una mezcla de concreto que posea propiedades reológicas adecuadas para el diseño y la extrusión de la mezcla durante el proceso de impresión 3D. Esta investigación busca abordar este componente crítico y contribuir al avance de la impresión 3D en la construcción de viviendas asequibles en la región.

1.5 Hipótesis

La incorporación de fibras de basalto en los materiales cementosos mejorará la calidad y estabilidad de los productos impresos en el proceso de impresión 3D. Además, las propiedades reológicas de los materiales y la velocidad de impresión influirán en la precisión de la formación de las tiras impresas, permitiendo la optimización del proceso.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general.

Evaluar y optimizar el proceso de impresión 3D de materiales cementosos con diferentes tiempos de asentamiento, considerando la influencia de las propiedades reológicas y la velocidad de impresión, y explorar el uso de fibras de basalto para mejorar la calidad y estabilidad de los productos impresos.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Obtener las características de los materiales para acotar los resultados con base a las materias primas.
2. Explorar el uso de fibras de basalto (FB) como un medio efectivo para mejorar la capacidad de extrusión y estabilidad de los productos impresos.
3. Analizar la efectividad de los sistemas de extrusión de émbolo y tornillo, para elegir un sistema óptimo.
4. Construir una impresora 3D semiautomática para que se adapte a diferentes tipos de extrusoras.

5. Clasificar materiales cementosos en grupos en función de su tiempo de asentamiento para investigar sus propiedades reológicas y su idoneidad para la impresión 3D.
6. Realizar pruebas reológicas siguiendo un protocolo establecido, para medir y evaluar la viscosidad y la capacidad de fluidez de los materiales en cada grupo.
7. Investigar cómo la velocidad de impresión afecta la precisión en la formación de las tiras impresas durante el proceso de impresión 3D, para elegir velocidades óptimas según sus dimensiones.
8. Relacionar los resultados de velocidades de impresión y precisión de impresión, con las propiedades reológicas, para optimizar el proceso de impresión 3D.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Impresión 3D por extrusión

La impresión 3D por extrusión, también llamada modelado por deposición fusionada (FDM) es un proceso de impresión 3D que utiliza bobinas de filamento de plástico o metal que se extruye a través de una boquilla calentada capa por capa para crear una pieza 3D. En el caso de compuestos cementosos o cementantes estos son bombeados en estado plástico y la deposición se hace por filamentos continuos unidos entre sí por capas, generalmente no se requiere aplicar calor como en el caso de plásticos.

2.2 Funcionamiento de impresión 3D por extrusión

Primero, el usuario crea un modelo usando software 3D y lo guarda como un archivo STL. Luego, el archivo STL se envía al software de interfaz de la impresora 3D, donde corta el modelo en secciones y determina cómo se imprimirá cada capa. Luego, el modelo se envía a la impresora 3D. El filamento de metal o plástico se extruye a través de una boquilla calentada capa por capa hasta que la pieza está completa (Ver Figura 6). Una cama de impresión calentada asegura un enfriamiento uniforme de la pieza y evita que la pieza se doble en los bordes y se deforme

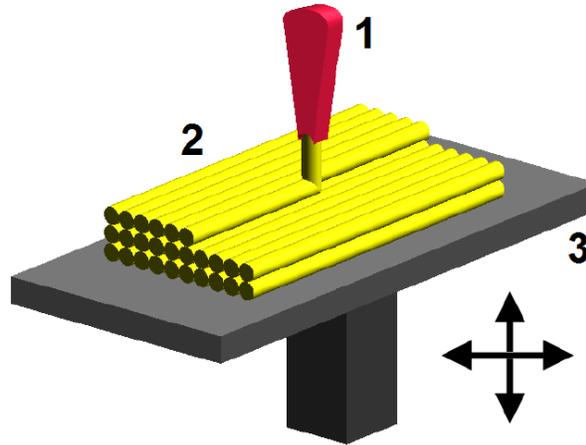


Figura 6. Impresión 3D por extrusión

2.2.1 Lenguaje triangular estándar (STL)

Los equipos de prototipado rápido trabajan con archivos de extensión STL, que es la abreviatura en inglés de Lenguaje Triangulas Estándar, el cual fue creado por la compañía 3D Systems en 1986. Este formato se ha extendido a múltiples áreas y campos de aplicación, de tal forma que la mayoría de los programas CAD han tenido que incorporar la extensión, ya sea para exportar o guardar en este tipo de formato (.stl). Este tipo de archivo es el utilizado en máquinas de impresión 3D de cemento portland.

2.2.2 Mallado STL

El mallado STL es una aproximación a la geometría del modelo 3D, que utiliza un algoritmo de teselación para crear una frontera de representación, de las caras del modelo, las cuales son cubiertas con figuras geométricas, en este caso triangulares. Se define por teselación a la forma de llenar una región con elementos que no se superponen, ni se salen de la superficie. La razón por la que figuras triangulares es utilizada para la representación,

es porque estas logran una mejor aproximación para cualquier tipo de superficie, ya sea regular o irregular.

La principal consecuencia de un mallado STL de mala calidad, será la desviación que presente respecto al modelo original, y que a su vez repercutirá en la precisión dimensional del modelo impreso. Es decir, al generar una desviación muy grande, el modelo impreso puede diferir dimensionalmente al modelo digital. La Figura 7 muestra la comparativa entre un modelo con diferente número de elementos en su mallado STL, notando una representación más exacta al aumentar la cantidad de facetas.

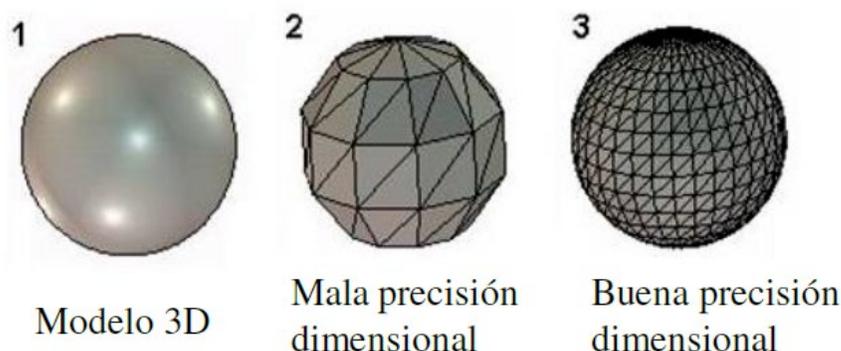


Figura 7. Calidad del mallado STL en la representación de un modelo 3D

2.3 Impresión de cementantes en 3D

La construcción con impresión de cementantes en 3D (3DCP) o la impresión de concreto en 3D es una forma de fabricación que se utiliza para fabricar edificios o componentes de construcción en formas completamente nuevas que antes no eran posibles con el encofrado de concreto tradicional.

El material típicamente utilizado en la 3DCP es un mortero con tamaños máximos de partículas de 2-3 mm, el cual es depositado en forma de un filamento continuo (6-50

mm de diámetro); con una forma de extrusión, que puede ser circular, ovular, rectangular o lineal dependiendo del tipo de boquilla, y con velocidades de extrusión lineales en el rango de 50-500 mm/s.

2.4 Reología en materiales cementantes

Los materiales cementosos (incluidos grouts, morteros y concretos) normalmente se consideran que se representan adecuadamente como fluidos de tipo Bingham. En términos de sus propiedades reológicas (G. Ma & Wang, 2018; Perrot et al., 2016). Con esta suposición, su rendimiento reológico se caracteriza únicamente por solo dos parámetros: un esfuerzo de fluencia (τ_0) y una viscosidad plástica (η , en lo sucesivo abreviada como viscosidad) que definen la relación entre la deformación aplicada (γ) y el esfuerzo resultante (τ):

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma} \quad (1.0)$$

Debido a las reacciones de hidratación (incluida la nucleación en la superficie de las partículas) y otros efectos tixotrópicos (floculación de partículas de cemento, etc.), estos parámetros se desarrollan con el tiempo después de la mezcla inicial de agua con cemento. Durante las primeras horas de curado, las reacciones de hidratación están relativamente inactivos (proceden a un ritmo lento en comparación con las últimas etapas de hidratación). Aun así, el aumento lento y constante generalmente observado en la viscosidad y el límite elástico debido a la hidratación en curso es principalmente irreversible y no se reduce fácilmente mediante una mezcla adicional. La floculación de partículas de cemento también hace que el esfuerzo de fluencia y la viscosidad aumenten con el tiempo (es decir, tixotropía). Sin embargo, los efectos de la floculación son al menos

parcialmente reversibles, porque un mezclado suficientemente fuerte puede destruir temporalmente la red de flóculos (S. P. Jiang et al., 1995; Roussel, 2006; Roussel et al., 2010, 2012). Las propiedades reológicas pueden modificarse aún más con retardadores o aceleradores químicos (Paglia et al., 2001).

de boquilla, y con velocidades de extrusión lineales en el rango de 50-500 mm/s.

2.5 Fibras con recubrimientos

Los productores de fibra crean sus propias formulaciones de recubrimientos (sizing) únicos para brindar los mejores atributos de rendimiento a la fibra. Estas formulaciones están compuestas por agua, agentes aglutinantes de silano (específicos para fibra de vidrio y basalto), formadores de película en forma disuelta, emulsionada o dispersa, y una serie de aditivos o modificadores como tensioactivos, plastificantes, antiestáticos, antiespumantes, y modificadores de reología. Estos ingredientes se mezclan cuidadosamente y se entregan a la fibra para que coincidan perfectamente con los requisitos de las aplicaciones específicas. Esta tecnología permite adaptar la química de la superficie de las fibras de refuerzo a la química de la resina matriz, optimizando así la adhesión interfacial entre los polímeros y las fibras. (*Sizing for Glass, Carbon and Natural Fibers*, s. f.).

Se ha reportado que la fibra de basalto con recubrimiento tiene una excelente adhesión fibra/resina sin embargo tanto la fibra como su recubrimiento puede verse afectadas en medios agresivos como el agua de mar. (Wei et al., 2011). Otros estudios han indicado que las fibras de basalto sin ningún recubrimiento protector carecen de durabilidad a largo plazo en el ambiente alcalino del concreto (Lee et al., 2014; Rabinovich et al., 2001). Sin embargo, un recubrimiento inadecuado en las fibras de

basalto utilizadas en matrices de cemento portland, pueden generar resultados inferiores que fibras de basalto sin recubrimientos. Li et al. (Y.-F. Li et al., 2022), encontraron que la resistencia a la flexión de los especímenes de BFRC con BF sin recubrimiento fue mayor que la resistencia a la flexión de los especímenes BFRC con BF original. Esto podría deberse a que el recubrimiento de la BF es dañado por el ambiente alcalino del cemento y se disminuye la adherencia y anclaje de la BF en la matriz.

En otros tipos de fibra con recubrimientos en su fabricación también se han encontrado los mismos resultados, Li et al., mostró que el espécimen de concreto reforzado con fibra de carbono (CFRC) sin adherente exhibió una mayor resistencia a la compresión en comparación con el espécimen de CFRC de fibra de carbono normal. Recientemente, los métodos populares de eliminación del adherente de la fibra son el tratamiento térmico y la extracción con solvente. Para el método de tratamiento térmico, los materiales orgánicos en la superficie de la fibra se eliminaron a altas temperaturas, pero la resistencia de la fibra podría disminuir. Para el método de extracción por solvente, la parte soluble del encolado puede eliminarse parcialmente según el solvente utilizado. El dimensionamiento de la fibra de carbono eliminada por el método de tratamiento térmico fue más eficaz que por el método de extracción con disolventes, como ácido y álcali.

Las fibras más populares en el concreto reforzado con fibra (FRC) utilizadas en las últimas décadas son las fibras de carbono, acero, vidrio, aramida y polipropileno. En general, la superficie de la fibra se recubre con una capa de adherente (sizing layer) en el proceso de fabricación, el adherente se utiliza para mantener unidos los filamentos de fibra y también puede ayudar a que la superficie de la fibra y la matriz se unan. Los

componentes principales del adherente son los formadores de película y los agentes aglutinantes (Hambach & Volkmer, 2017).

2.6 Comparativa de investigaciones de materiales fibroreforzados para uso en 3DCP

El concreto reforzado con fibra se utiliza ampliamente en la construcción para aplicaciones como túneles, fachadas y puentes. Las fibras mejoran la resistencia a la flexión y a la tracción del concreto. Varios estudios han investigado el impacto de diferentes tipos de fibras en el concreto impreso en 3D (3DCP). Hambach y Volkmer (Hambach et al., 2019; Hambach & Volkmer, 2017) examinaron fibras de vidrio, basalto y fibra de carbono, y encontraron que la fibra de carbono aumenta significativamente la resistencia a la flexión, mientras que las fibras de vidrio y basalto no mostraron la misma mejora debido a los bajos valores del módulo de Young de estos materiales. Shakor y su equipo (Shakor et al., 2019) investigaron las fibras de polipropileno (PP) y encontraron un aumento del 30% en la resistencia a la compresión con un 1% de refuerzo de PP por volumen, aunque observaron una disminución en la unión entre capas. Por otro lado, Nematollahi y su equipo (Nematollahi et al., 2018) informaron que la adición de fibra de PP aumenta la resistencia a la flexión pero disminuye la unión entre capas. Además, agregar refuerzo de fibra solo aumenta la resistencia a la compresión en la dirección de extrusión. Panda y su equipo (Panda et al., 2017) investigaron la longitud y el porcentaje de fibra de vidrio en la mezcla y encontraron que, si bien la adición de fibras de vidrio no mejoró significativamente la resistencia a la compresión, sí mejoró la resistencia a la

flexión. El estudio de Bos et al. (F. P. Bos et al., 2019) se centró en el uso de fibras cortas de acero como refuerzo y encontró un aumento significativo, de hasta un 500%, en la resistencia a la flexión, aunque las muestras impresas con fibras mostraron un ablandamiento por deformación más pronunciado después del punto máximo en comparación con las muestras sin fibras.

La aplicación de fibras en el 3DCP se limita al 1-3 % para evitar problemas relacionados con el bombeo, la obstrucción, la segregación y la distribución no uniforme. Agregar fibras para aumentar la resistencia a la compresión de 3DCP crea mezclas de baja fluidez debido a la mayor proporción de fibras y, por lo tanto, crea una menor resistencia a la compresión (Kristombu Baduge et al., 2021). Esto sucede porque a medida se aumenta la cantidad de fibra, mayor es la probabilidad de dejar huecos o poros en la matriz (C. Jiang et al., 2014). La estructura de poros afecta el comportamiento del material a base de cemento quizás más que cualquier otra característica del material. Estos poros se clasifican en poros conectados y poros cerrados (Zhao et al., 2019). La permeabilidad se ve afectada por los poros interconectados, mientras que la resistencia a la compresión se ve afectada por todos los tipos de poros (Kondraivendhan & Bhattacharjee, 2010). Se ha encontrado que las fibras de basalto son efectivas para prevenir agrietamientos porque reduce la magnitud de la contracción libre y restringe el crecimiento de las grietas. Estos efectos podrían ser más prominentes en una mezcla con baja relación a/c debido a la autodesecación. Los agrietamientos son vías de acceso para la penetración de agua y cloruros lo que puede permitir riesgos de corrosión del acero de refuerzo (Branston et al., 2016).

En la revisión de la literatura se ha encontrado que las investigaciones de materiales fibroreforzados de 3DCP se orientan en evaluar la efectividad de las fibras para

aumentar la ductilidad del material sometido a esfuerzos mecánicos, pero no se ha encontrado información de la evaluación de fibras para reducir las contracciones por secado y su influencia en los agrietamientos de la etapa plástica del material y la interconectividad de los poros. De igual manera hay poca información sobre la influencia de las fibras en la reología y la durabilidad. Estos argumentos sugieren llevar a cabo en este estudio la determinación de la influencia de las fibras de basalto en mezclas de 3DCP para su óptimo diseño de mezcla, proceso de impresión, reología, contracciones y durabilidad.

2.7 Fibras utilizadas para disminuir los agrietamientos en 3DCP

El concreto impreso en 3D (3DPC) se enfrenta a desafíos específicos debido a la falta de encofrado durante el proceso de impresión, lo que lo hace más vulnerable al entorno. Además, la utilización de agregados de tamaño reducido y una menor relación agua/cemento a menudo resulta en una mayor contracción autógena, lo que puede aumentar el riesgo de agrietamiento en el 3DPC. Por lo tanto, es esencial cuantificar y comprender estos efectos y buscar métodos para mitigarlos (Toutanji et al., 1998) (Zhang et al., 2018) (Arunothayan et al., 2021; Hambach & Volkmer, 2017) (Liu et al., 2008; Tran et al., 2021)

Para abordar estos desafíos, se han explorado diversas fibras para reforzar el concreto. Las fibras de alto módulo elástico, como la fibra de basalto, la de acero y la de carbono, pueden mejorar la rigidez y resistencia del concreto (L. Ma et al., 2022). Por otro lado, las fibras de bajo módulo elástico, como la fibra de polipropileno y la de alcohol polivinílico, se utilizan para mejorar la resistencia al agrietamiento. En particular, la fibra de basalto ha ganado atención debido a su excelente desempeño y su capacidad para

prevenir microfisuras prematuras debido a la contracción por secado. Esta fibra es atractiva para mejorar la durabilidad de las mezclas de 3DCP (Branston et al., 2016; Guler & Akbulut, 2023; Z. Li et al., 2022; Mao et al., 2023) (Rybin et al., 2013; Sun et al., 2019; Wei et al., 2010).

Aunque algunas investigaciones señalan que las fibras de basalto sin recubrimiento protector pueden tener problemas de durabilidad en ambientes de concreto alcalino, su uso efectivo radica en prevenir microfisuras en etapas tempranas del concreto y en su fase plástica. La microfibra de basalto es una opción respetuosa con el medio ambiente, no tóxica y económicamente eficiente (Choi, Yun-Wang et al., 2014). (C. Jiang et al., 2010; Sun et al., 2019; Zapata-Padilla et al., 2023) (Sun et al., 2019) (Branston et al., 2016; Guler & Akbulut, 2023; Z. Li et al., 2022; Mao et al., 2023) (Lee et al., 2014; Rabinovich et al., 2001).

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Descripción de Materiales

3.1.1 Cemento Portland

El cemento utilizado es CPO-40 (Cemento Portland Ordinario clase resistente 40 N/mm²), según como lo describe la norma NMX-C414 (NMX-C414-ONNCEE-2004, 2009). Este cemento fue proporcionado a granel. Se le realizaron pruebas de caracterización físicas y químicas para verificar el tipo de cemento y su reactividad, estos resultados se muestran en la Tabla 4. El CPO se muestra en la Figura 8.

Tabla 4. Composición química y densidad del cemento

Composición química	Unidad	Cantidad
CaO	%	66.77
SiO ₂	%	20.16
Al ₂ O ₃	%	1.72
Fe ₂ O ₃	%	4.85
MgO	%	0.37
SO ₃	%	3.63
K ₂ O	%	1.12
TiO ₂	%	0.36
Otros óxidos	%	1.02
Densidad	g/cm ³	3.05

3.1.2 Agregado fino

El agregado fino (AF) es de tipo calizo triturado. Este agregado fue utilizado sin ningún procesamiento posterior al de su fabricación, y se le realizaron pruebas de caracterización para conocer su distribución de tamaños de partícula, módulo de finura, peso seco suelto, peso seco varillado, densidad aparente, y porcentaje de absorción. El AF se muestra en la Figura 8.

3.1.3 Fibras de basalto

Las microfibras de basalto (FB) son de longitud y diámetros aproximadamente constantes. En la Tabla 5 se presentan las propiedades físicas y mecánicas especificadas según el fabricante. Las FB se muestran en la Figura 8, y con más detalle en la Figura 9.

Tabla 5. Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de basalto

Fibra	Diámetro (μm)	Longitud (mm)	Elongación (%)	Densidad (g/cm ³)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la Tensión (MPa)	Absorción de agua (%)
FB	13 a 15	24	3.1-3.2	2.70	93-110	2800-4800	<0.5



Figura 8. Materiales. (1) cemento portland. (2) Agregado fino. (3) Fibras de basalto.



Figura 9. Fibras de basalto aglomeradas de fábrica (sin dispersión).

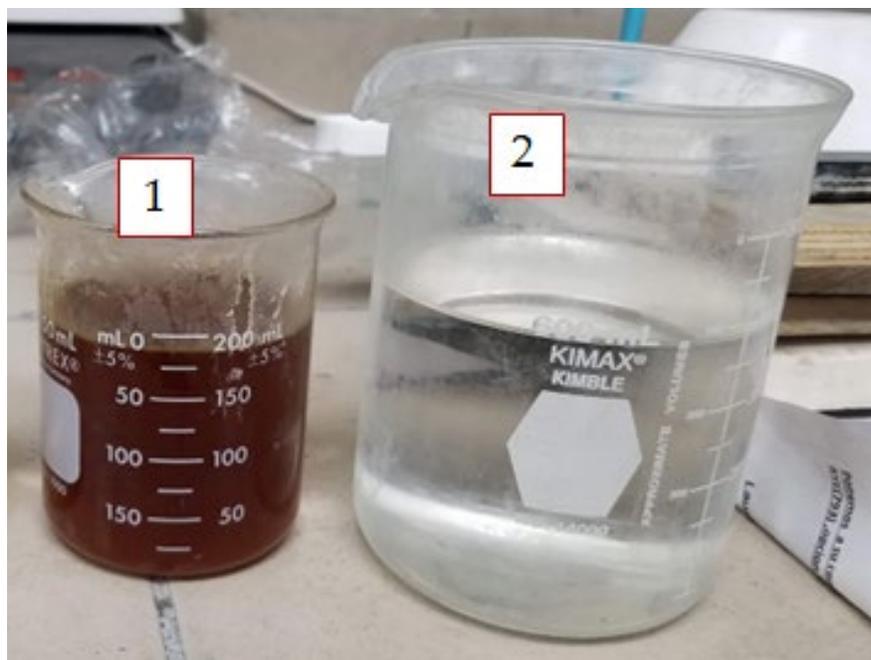


Figura 10. Aditivos químicos. (1) Aditivo superplastificante (ASP). (2) Aditivo reductor de la constracción (ARC).

3.1.4 Aditivo Superfluidificante (ASP)

El fabricante lo define como un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante, formulado con la más reciente tecnología en agentes dispersantes base policarboxilato. Está diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducción de agua. Cumple con la norma ASTM-494 tipo A y F como reductor de agua de alto rango. No contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto. El ASP se muestra en la Figura 10.

Información técnica

- Apariencia: Líquido color ámbar
- Densidad: 1.11 g/cm³

Instrucciones de uso

- Este aditivo es dosificado en un rango de 4 a 15 cm³/kg de cemento.

- Adicione a su diseño de mezcla toda el agua y homogenice materiales.
- Posteriormente adicione directamente el aditivo en la dosis establecida (4 a 7 cm³/kg de cemento dependiendo del diseño y aplicación) y proceda a mezclar durante 5 a 10 minutos.

3.1.5 Aditivo reductor de contracción (ARC)

El fabricante lo describe como un aditivo líquido listo para usar, específicamente diseñado para reducir la contracción por secado y el consecuente agrietamiento en el concreto o mortero. Este aditivo actúa directamente sobre los mecanismos causantes de la contracción, en el momento en que se produce la hidratación del cemento, reduciendo la tensión capilar del agua en el poro del concreto. Esta acción reduce substancialmente la contracción por secado. No contiene adición de cloruros y no promueve la corrosión del acero. El ARC se muestra en la Figura 10.

Información técnica

- Color: Líquido incoloro
- Densidad: 0.97 +/- 0.02 g/ml

Instrucciones de uso

Para reducir la contracción emplear una dosis del 1% al 2% respecto al peso del cemento. En muchos casos la dosis recomendada para optimizar el efecto del aditivo es del 2% del peso del cemento.

3.2 Caracterización

3.2.1 Caracterización del Cemento

Los siguientes métodos de ensayo se emplearon para determinar las características físicas y químicas del cemento y los grout comerciales utilizados en esta investigación.

3.2.1.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Esta técnica de caracterización fue utilizada para determinar la composición química del cemento y los grouts comerciales. Para verificar el tipo de cemento utilizado, se compararon sus porcentajes de óxidos con los descritos en la norma ASTM C150 (ASTM C150/C150M – 15, 2015). En esta técnica las muestras son bombardeadas con protones de alta energía en forma de rayos X, que desplazan los electrones de capas internas del átomo, haciendo que los electrones externos ocupen los sitios vacantes emitiendo una radiación característica del elemento. La intensidad de una línea fluorescente de un elemento depende de la concentración de este, y a través de esta se calcula en porcentaje los óxidos presentes en la muestra. El equipo utilizado en esta técnica fue uno del modelo Epsilon 3 de PANalytical.

3.2.1.2 Picnometría de Desplazamiento de Gas.

Este ensayo fue utilizado para determinar la densidad absoluta del cemento y de los grouts comerciales. La picnometría de gas es reconocida como una de las técnicas más confiables para obtener un volumen y densidad reales, absolutos y aparentes. Esta técnica no es destructiva, ya que utiliza el método de desplazamiento de gas para medir el volumen. Los gases inertes, como el helio o el nitrógeno, se utilizan como medio de desplazamiento. Los cálculos de densidad utilizando el método de desplazamiento de gas

son mucho más precisos y reproducibles que el método tradicional de desplazamiento de agua de Arquímedes. Por lo tanto se puede considerar más preciso que el método ASTM C188 (ASTM C188 – 09, 2009) donde se utiliza desplazamiento de Keroseno para calcular la densidad del cemento.

3.2.1.3 Distribución y tamaño de partícula (DTP).

Esta técnica se empleó para conocer el tamaño máximo y promedio de las partículas y la distribución de éstas, tanto del cemento como de los grouts comerciales. En la técnica un rayo láser incide en una suspensión de la muestra en alcohol isopropílico, detectando los tamaños de las partículas de la muestra. El equipo empleado fue del modelo Microtrac S3500.

3.2.2 Caracterización del Agregado Fino

3.2.2.1 Tamaño de Partícula por Tamizado.

A este se le realizó la caracterización de los tamaños de partículas por medio de tamizado según como lo describe el procedimiento de la norma NMX-C-077-1997-ONNCCE, con los datos obtenidos se procedió a calcular el módulo de finura (M.F) según como lo especifica la norma.

3.2.2.2 Densidad y Absorción.

Se determinó la densidad aparente de la arena y su porcentaje de absorción según los procedimientos de la norma NMX-C-165-ONNCCE-2014. También se calculó el peso suelto seco y el peso suelto varillado seco.

3.3 Equipo de Impresión 3D

Para ensayos preliminares de impresión de 3D de pastas de cemento portland se está utilizando la impresora modelo Hyrel 3D Hydra 16A (*Hyrel 3D Hydra 16A Review - Professional PEEK 3D Printer*, s. f.). La Hyrel 3D Hydra 16A es una impresora 3D de escritorio profesional fabricada por Hyrel 3D, un fabricante de EE. UU, ver Figura 11. Esta impresora 3D se puede personalizar en varios niveles: volumen de construcción, plataforma de impresión, extrusora y más. El Hydra 16A también se conoce como Hydra 340 o Hydra 630 (dependiendo del tamaño de construcción). Cuando está equipada con el cabezal extrusor MK1-450, la Hydra 16A puede imprimir en 3D materiales de alto rendimiento como PEEK o PEI (ULTEM). La cámara de construcción se puede calentar hasta 55 ° C. Esta impresora 3D también puede imprimir con arcillas, productos biológicos, flexibles, curables por UV, siliconas RTV, mezclas de 2 y 3 partes en proporciones programables, literalmente miles de materiales. Es altamente evolutivo y también ofrece opciones para los ejes 4 y 5, una herramienta de husillo trifásica, láseres de diodo o CO₂, y más.



Figura 11. Impresora 3D utilizada, Hyrel 3D Hydra 16A

3.4 Pruebas de extrusión en 3D

Antes de obtener parámetros de reológicos de las mezclas se realizaron pruebas preliminares en la impresora con pastas de cemento portland utilizando una jeringa de 30 ml, que es la utilizada por la impresora Hydra 16A. En estas pruebas se caracterizará la calidad de impresión y la facilidad de formar filamentos construibles y estables.

3.4.1 Extrudabilidad

El ensayo consiste en extruir una forma cuadrada de una sola capa (con velocidades de impresión, extrusión y dimensiones de capa establecidas previamente) tal como se muestra en la [Figura 12](#) y se evaluará con indicaciones muy prácticas de aceptación, en términos de bloqueo, obstrucción, cambio en la velocidad de flujo y extrusión incompleta de la forma cuadrada. Es decir, mezclas que produzcan alguno de los problemas

mencionados serán descartadas o modificadas hasta cumplir con la extrudabilidad. La forma elegida en el ensayo responde a la necesidad de conocer cómo se comporta la mezcla cuando se hacen cambios de trayectoria y además de representar formas típicas en la construcción de elementos impresos en 3D.

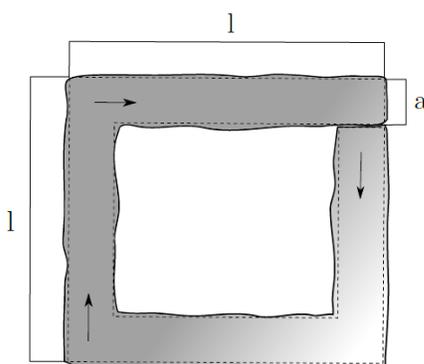


Figura 12. Esquema del ensayo de extrudabilidad

3.4.2 Calidad de extrusión

En primer lugar, se evalúa con indicaciones prácticas de aceptación la calidad superficial de la capa (agrietamiento, segregación, huecos, etc.) para aceptar o rechazar la impresión, por ejemplo, una capa con demasiadas grietas o fisuras indicarían un posible rechazo de la impresión. Luego, utilizando un software se miden el ancho y espesor de la capa para evaluar la conformidad y estabilidad dimensional. Para el ancho se utilizará la vista en planta, donde se elige un lado de la forma cuadrada impresa, la cual se divide en n partes para luego ser medidas y determinar si son aceptables o no a partir del error permitido, por ejemplo, si el ancho de capa de diseño es de 40 mm y el error permitido es del 10 %, entonces el rango aceptable de ancho es de 40-44 mm. En la Figura 13 (a) se muestra a modo de ejemplo una división de 4 partes del lado inferior de la forma cuadrada

impresa (a_1 , a_2 , a_3 y a_4). Finalmente, para el espesor se utilizará la vista frontal y se realizará el mismo procedimiento anterior, ver Figura 13 (b).

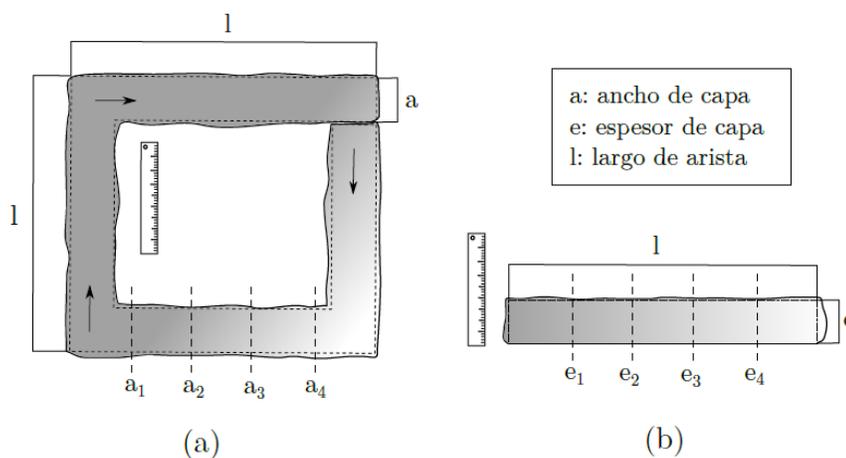


Figura 13. Esquema de ensayo de calidad de extrusión (a) en planta, (b) frontal

3.4.3 Edificabilidad

El ensayo consiste en extruir una capa lineal de largo l (ver Figura 14) que se encuentre en el rango aceptable de extrudabilidad y calidad de extrusión y luego de un intervalo de tiempo T , se extruye la siguiente capa y se registra la deformación de la primera en términos de espesor, debido a que es la que recibe la mayor carga, y así consecutivamente capa a capa hasta lograr el máximo número posible sin que se sobrepase la deformación máxima permitida (determinada a partir de una gran cantidad de ensayos) o que se genere el colapso.

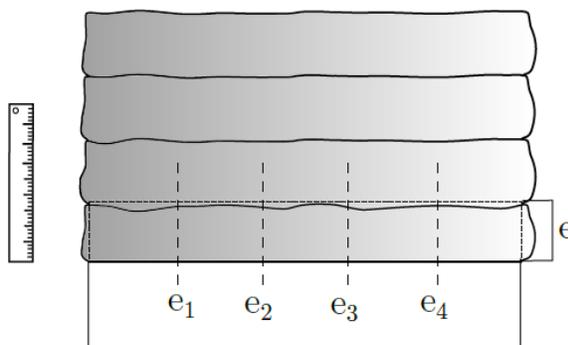


Figura 14. Esquema de ensayo de edificabilidad

3.4.4 Tiempo abierto

El tiempo abierto es el cambio de la trabajabilidad en el tiempo y por tal razón es importante para caracterizar la reología en diferentes momentos del proceso. Utilizando el reómetro se caracterizará la reología, midiendo la resistencia al corte en diferentes tiempos y obtener un gráfico de la resistencia al corte vs tiempo (ver la Figura 15), en el cual se puede determinar el tiempo abierto óptimo.

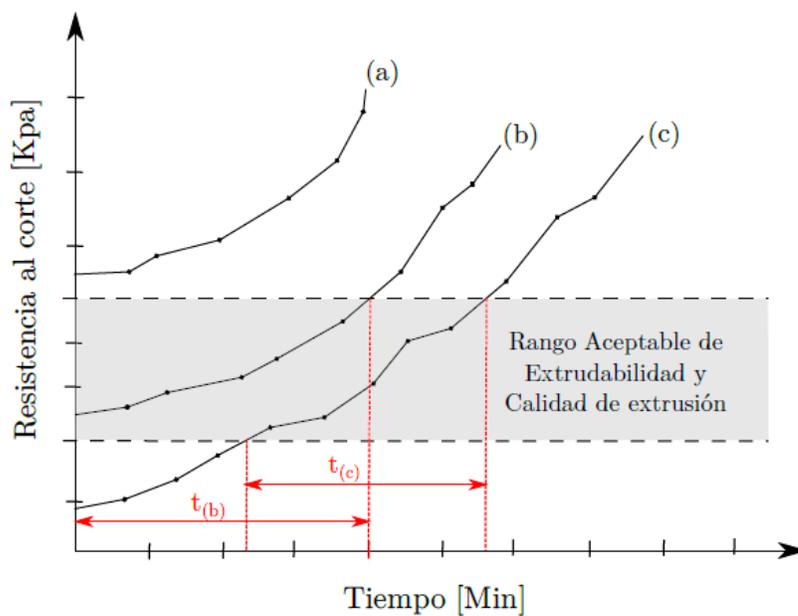


Figura 15. Gráfico de resistencia al corte vs tiempo

3.5 Métodos y ensayos

3.5.1 Fluidez de mezclas

La fluidez se determinó en la mesa de flujo con el método de ensayo ASTM C1437 (ASTM C1437, 2020), para obtener características físicas generales de las mezclas en estado fresco.

3.5.2 Compresión en cubos moldeados

Se utilizaron probetas cúbicas de 50 mm por lado según el método de ensayo ASTM C109. Estos cubos se ensayaron para encontrar el potencial de resistencia mecánica de las pastas de pruebas preliminares.

3.5.3 Tratamiento de fibras de basalto

Para proporcionar una buena dispersión de fibras y unión de fibras a la matriz cementante, las BF serán tratadas térmicamente para eliminar el recubrimiento de las fibras y asegurar una superficie de fibra hidrófila. Se utilizará un tratamiento térmico a 500 °C para garantizar la eliminación del recubrimiento de polímero.

3.5.4 Preparación de la pasta de cemento

Las proporciones de las pastas se presentan en la Tabla 6. Se realizaron tanteos con el contenido de ASP y a/c para lograr una consistencia tal que la mezcla pudiera ser extruida y formara un filamento continuo en la extrusión en una jeringa de 30 ml. El tiempo de mezclado fue 3 minutos y se utilizó la mezcladora estándar ASTM C305.

Tabla 6. Pastas de cemento

Mezclas	CPO (kg/m³)	Agua (kg/m³)	SPA (ml/m³)	A/C	Dosis (ml/kg)^a
Control	1520.0	501.6	--	0.33	--
M1	1894.4	378.8	7577.6	0.20	4
M2	1730.5	432.6	3460.9	0.25	2
M3	1701.0	442.2	1701.0	0.26	1
M4	1730.5	432.6	2595.7	0.25	1.5

^a Dosis de aditivo en cantidad de volumen por kilogramo de cemento

3.5.5 Técnica de inyección con boquilla

La pasta de cemento reforzada se extruye a mano a través de una jeringa desechable (Volumen: 20 ml, diámetro de la boquilla: 2 mm). Luego de inyectar la mezcla en moldes de 60 x 13 x 3 mm (probetas de resistencia a la flexión) o 60 x 50 x 15 mm (probetas de resistencia a la compresión) se densifica colocándola en una placa vibradora por 60 segundos. Los especímenes destinados a los ensayos de resistencia a la compresión se cortan en cubos de 15 x 15 x 15 mm con una sierra de baja velocidad después de 7 días de almacenamiento (Hambach & Volkmer, 2017).

3.5.6 Sistema de impresión 3D y preparación de muestras

Los objetos 3D que se ajustan a las dimensiones deseadas de la muestra, y se diseñan en un software CAD, y se utiliza un software de preparación de impresión 3D para crear códigos de rutas de impresión. Para la impresión 3D, se utiliza una impresora la impresora modelo Hyrel 3D Hydra 16A con una jeringa de 30 ml y boquilla de 2 mm de diámetro conectada a la impresora.

3.5.7 Mediciones de resistencia a la flexión

Las mediciones de resistencia a la flexión se llevan a cabo usando una configuración de prueba de flexión de 3 puntos. La máquina de prueba debe contar con una celda de carga de 500 N o 5 kN (dependiendo de las dimensiones del espécimen y la carga máxima esperada). Al medir la fuerza máxima (F), la resistencia a la flexión (f_s), se puede calcular mediante la ecuación 2.0:

$$f_s = \frac{3}{2} \times \frac{F \times l}{w \times h^2} \quad (2.0)$$

Donde l representa la distancia entre los soportes (500.1 mm para probetas de 60 mm de longitud y 1000.1 mm para probetas de 120 mm de longitud), w es el ancho de la probeta y h es la altura de la probeta. Las dimensiones de la muestra se determinan antes de la medición con una precisión de aproximadamente 0.1 mm.

3.5.8 Mediciones de resistencia a la compresión

Para las mediciones de resistencia a la compresión, se prueban al menos cinco especímenes para cada serie de pruebas. Se utiliza una máquina de ensayo con una celda de carga de 50 kN. Al medir la fuerza máxima, F , la resistencia a la compresión, c_s , se puede calcular mediante la siguiente ecuación 3.0:

$$c_s = \frac{F}{l \times w} \quad (3.0)$$

Donde l representa la longitud y w el ancho de la muestra. De nuevo, las dimensiones de la muestra se determinan antes de la medición con una precisión de 0.1 mm.

Debido a la alineación de fibra casi unidireccional, las muestras con orientación de fibra se pueden adaptar para soportar un tipo específico de carga. Las configuraciones típicas para la prueba de resistencia con las líneas grises que indican la alineación de la fibra. Las muestras se caracterizaron por su resistencia a la flexión ya la compresión. Para ilustrar la influencia de la fibra alineada, se incluyen en las pruebas pasta de cemento simple y una muestra moldeada con alineación aleatoria de fibras.

3.5.9 Preparación de secciones delgadas

Para cuantificar la alineación de fibras en cada muestra, se preparan secciones delgadas y se caracterizan por microscopía óptica. Se producen muestras de 0.5, 1.5 y 2.5 mm de espesor, y se pegan a un portaobjetos de microscopio por medio de una resina epoxi, y se pulen en húmedo hasta un espesor de 80-100 μm . Usando el software de análisis de imágenes de código abierto *imageJ/Fiji* con el complemento de direccionalidad, se puede dar un desglose semicuantitativo de la orientación de la fibra en las micrografías. El principio sobre cómo obtener un histograma de orientación es que se registran micrografías de secciones delgadas con un grosor de aproximadamente 80 μm y se sobreexponen intencionalmente. Esto deja las fibras de carbono como líneas oscuras fácilmente reconocibles, que contrastan con el fondo blanco translúcido. Como resultado, el mapeo de orientación automático se puede llevar a cabo

3.5.10 Mediciones de densidad de muestras y porosidad con helio

Las superficies de cada muestra se pulen para obtener bordes uniformes y paralelos necesarios para una medición precisa del volumen. Después se almacenan los especímenes durante 12 horas en un horno a una temperatura constante de 130 °C, se calcula la densidad del espécimen determinando el volumen del espécimen ($\text{vol}_{\text{spec}} = \text{largo} \times \text{ancho} \times \text{alto}$) con

una precisión de 0.01 mm, así como el peso de la muestra con una precisión de 0.1 mg. Luego, las muestras se trituran con un molino para medir el volumen aparente de la muestra (vol_{bulk}) mediante picnometría de helio. La porosidad p del helio se puede calcular mediante la ecuación (4.0):

$$p = \left(1 - \frac{vol_{bulk}}{vol_{spec}} \right) \times 100 \text{ (vol.\%)} \quad (4.0)$$

3.5.11 Mediciones de reología

El propósito de esta prueba es describir un método para formular un conjunto de mezclas robustas y sostenibles adecuadas para la impresión 3D de pasta de cemento a escala de laboratorio, visto como un primer paso hacia la impresión 3D de mortero (concreto) a mayor escala. Las variables de bombeabilidad, imprimibilidad y capacidad de construcción, en una aplicación de construcción aditiva por extrusión (ACE), pueden representarse cada una por su propia ventana de viabilidad en un gráfico de esfuerzo de fluencia vs viscosidad, con límites inferior y superior que definen el conjunto de valores aceptables para estos dos parámetros con respecto a cada una de las tres "operaciones" (bombeo, impresión y construcción). La ventana de tiempo abierta se define, por lo tanto, como la intersección de estas tres ventanas operativas. Para algunas combinaciones de materiales e impresoras 3D, esta intersección puede ser inexistente (conjunto vacío). La impresión 3D exitosa requiere operar dentro de la ventana de tiempo abierta, por lo que comprender cómo y cuándo se logran las propiedades reológicas adecuadas es fundamental para crear estructuras permanentes y duraderas. Por supuesto, además de

simplemente esperar el tiempo necesario para que una mezcla preparada entre en su ventana de tiempo abierto, se pueden emplear tanto aceleradores químicos como cementos alternativos para alterar el tiempo de la "condición abierta" en relación con lo que se espera de un sistema a base de cemento Portland ordinario, transformando de manera efectiva e inmediata una mezcla bombeable en una imprimible y construible, en la boquilla del cabezal de impresión.

Las mediciones de reología se realizarán utilizando una geometría de placas paralelas con un juego de dos placas de prueba dentadas de 35 mm de diámetro. Para este estudio, el espacio entre las placas se fijará en 0.600 ± 0.001 mm y la temperatura se controlará a $23.0 \pm 0,2$ °C. Con una jeringa de 3 ml de capacidad, se colocará aproximadamente 1.1 mL de pasta de cemento en la placa dentada inferior para cada medición. Para los experimentos de bucle de velocidad de corte empleados aquí, la velocidad de corte (deformación) primero se incrementará de 0.1 a 100 s^{-1} en treinta pasos iguales espaciados en una escala logarítmica, y posteriormente se disminuirán nuevamente a 0.1 s^{-1} , una vez más en treinta pasos. Luego se aplicará la ecuación (1.0) sobre un rango donde los datos se juzguen a simple vista como lineales para estimar los valores de τ_0 y η . Para la medición del crecimiento del esfuerzo, el material se cizallará a una velocidad muy baja de 0.1 s^{-1} y el esfuerzo resultante se registrará en el transcurso de 400 segundos. El primer valor pico máximo registrado se usará posteriormente como una aproximación del esfuerzo de fluencia estático (Amziane & Ferraris, 2007; Bentz & Ferraris, 2010). Generalmente, los parámetros reológicos determinados de acuerdo con la ecuación (1.0) o de un experimento de crecimiento del esfuerzo se considera que tienen una incertidumbre del orden del 10% (Bentz & Ferraris, 2010).

3.6 Modelo estadístico de flujo

En la Tabla 7 se muestran los diseños experimentales secuenciales utilizados (DOE-1, DOE-2 y DOE-3) para evaluar el flujo (variable de respuesta), así como los factores, niveles y variables de control. DOE-1 evaluó la influencia del contenido del agua (a/c) (niveles=0.20 a 0.23) con contenido de ASP= 4 ml/kg-cem como variable de control. DOE-2, evaluó el efecto del contenido de arena (s/c) (niveles = 2.90 a 4.65) y variables de control: SPA = 4 ml/kg-cem, a/c = 0.40. DOE-3 evaluó el efecto del contenido de la fibra de basalto (%BF) (niveles=0.25 a 1.0) y variables de control: SPA=4 ml/kg-cem, a/c=0.40 y s/c=3.05). Se seleccionaron variables de control para obtener un flujo cercano al 130%. Los resultados se presentaron mediante el valor medio \pm desviación estándar de tres muestras. El coeficiente de determinación (R^2) se utilizó para correlacionar los datos experimentales con los predichos obtenidos de las funciones de flujo equivalentes o el modelo multivariado de flujo.

Tabla 7. Diseño de experimentos para morteros reforzados con basalto-microfibra.

Mezcl a	DOE-1		DOE-2		DOE-3	
	Variables de control: ASP=4 ml/kg-cem		Variables de control: SPA=4 ml/kg-cem, w/c=0.40		Variables de control: SPA=4 ml/kg-cem, w/c=0.40, s/c=3.05	
	a/c	Flujo (%)	a/c	Flujo (%)	%BF	Flujo (%)
1	0.20	79.0	-	356*	-	129.5
2	0.21	102.5	2.90	137.15	0.25	75.5
3	0.22	118.5	3.03	135.25	0.50	50.75
4	0.23	135.25	3.87	72.00	0.75	37.25
5	--	--	4.65	23.25	1.00	26.75

*Flujo teórico no medible en el plato (>150%)

3.7 Sistemas de extrusión

La Fig. 1 muestra los tipos de extrusoras utilizadas, la Jeringa de 30 ml es la que utiliza el equipo de impresión Hydra 3D, la calafateadora de acero con gatillo se utilizó con dos tipos de boquillas, la extrusora de tornillo sinfin en horizontal se utilizó propulsada por la broca que se instaló en un taladro. Actualmente se propone diseñar una extrusora tipo embudo con tornillo sinfin vertical y una paleta revolvedora en la parte de la tolva que recibe el material, esta extrusora también sería propulsada por un taladro, el modelo se muestra en la Fig. 2.

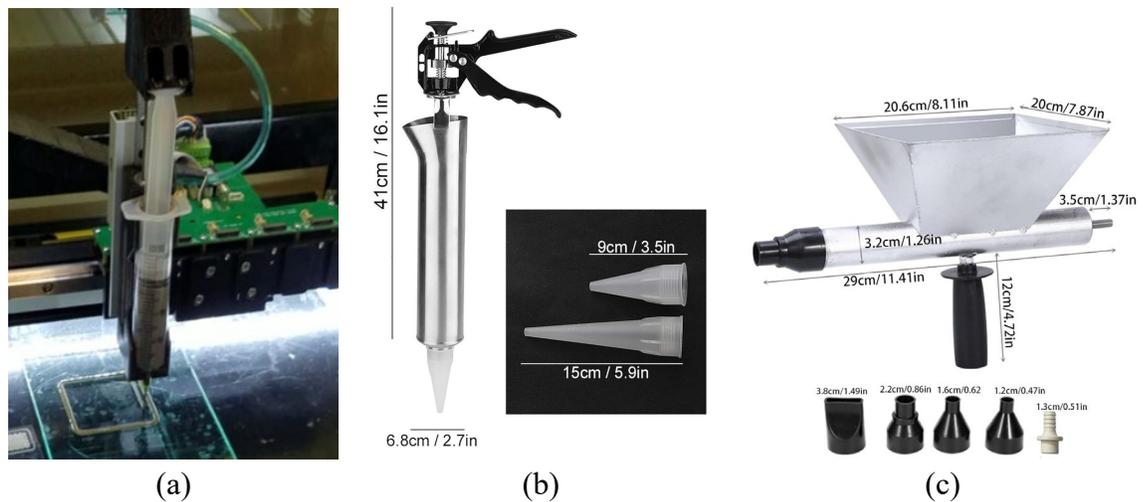


Fig. 1 (a) Jeringa 30 ml, (b) Calafateadora de acero, (c) Extrusora de tornillo horizontal

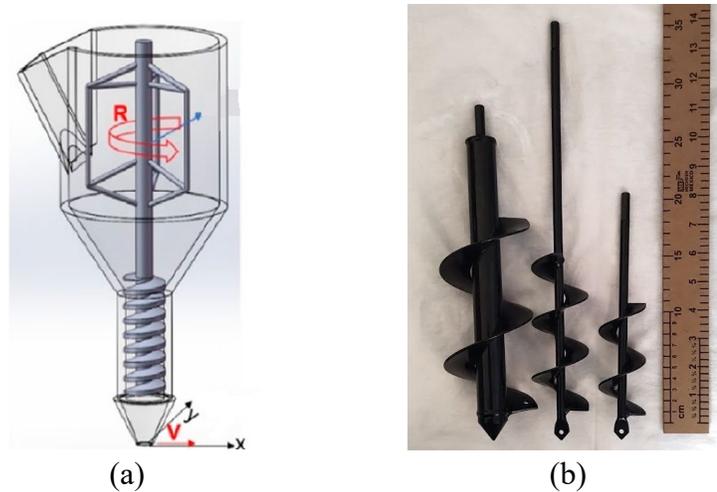


Fig. 2 (a) Modelo de extrusora tipo embudo con torillo vertical y tolva con paleta revolvedora (b) Tornillos propuestos para el desarrollo de la extrusora

3.8 Diseño de impresora manual

Se diseñó una impresora manual o semiautomática para poder utilizar otros tipos de extrusoras y otros tipos de mezclas (morteros). La idea del diseño se muestra en la Fig. 3, que consta de un único eje de velocidad controlada (x), y dos ejes de control manual (y & z), en la parte superior cuenta con un plato giratorio que permite la impresión de filamentos perpendiculares a la capa anterior, es decir si la primera capa cuenta con filamentos a lo largo del eje x y los siguientes van a lo largo del eje y, un giro de 90° basta para colocar el plato en la dirección deseada. En la Fig. 3 (b) se muestra el montaje para usar con extrusora de tornillo sinfín horizontal.

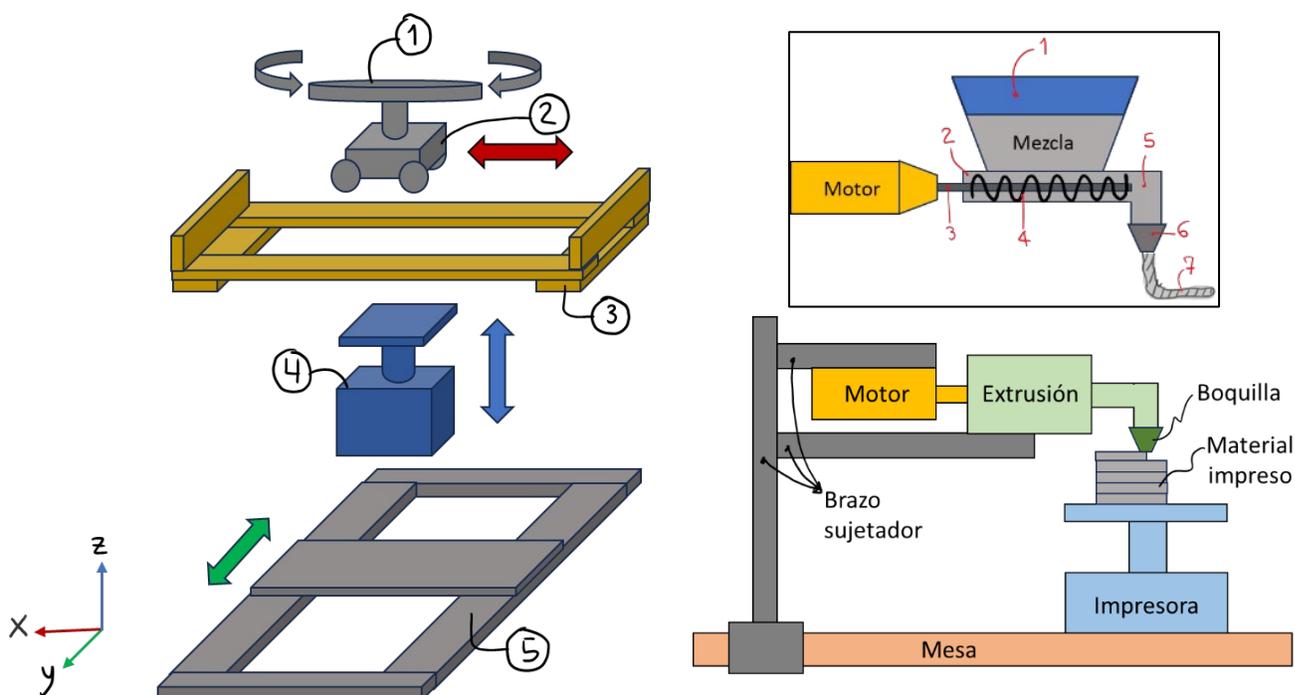


Fig. 3 Izquierda - Impresora: (1) Plato giratorio, (2) Tren rodante (3) Riel para longitud de filamento, (4) Plataforma elevadora manual, (5) Riel manual de separación de filamentos. Derecha – Extrusora y Montaje de Impresión: (1) Tolva de alimentación, (2) Tubo metal, (3) Broca de tornillo, (4) Rosca de tornillo, (5) Codo de metal (6) Boquilla, (7) Filamento extruido.

3.9 Ensayos de Reología

3.9.1 Equipo

Se utilizó el reómetro “ICAR PLUS Concrete Rheometer” de Germann Instruments, Inc. Para su uso se requieren los siguientes componentes: Motor lector, Fuente de alimentación de 48 V, Cable de alimentación de 220 v o 110 V, Marco de soporte, Paleta, Cable USB, Computadora con controladores, Recipientes. Parte de estos componentes se presentan en la *Fig. 4*

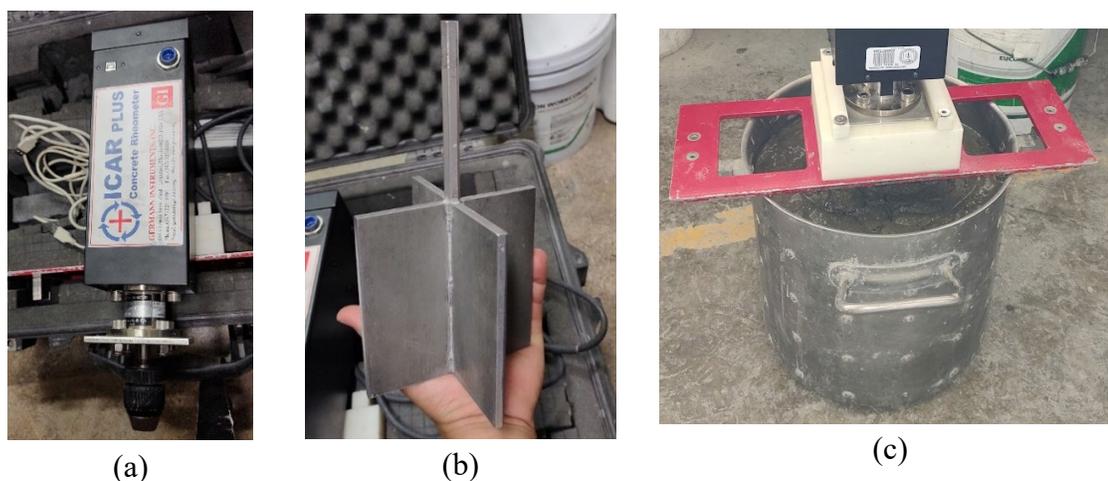


Fig. 4 (a) Motor lector (b) Paleta de 4 aspas (c) Marco de soporte y recipiente 10 L.

3.9.2 Seleccionar el contenedor y el tamaño de la paleta.

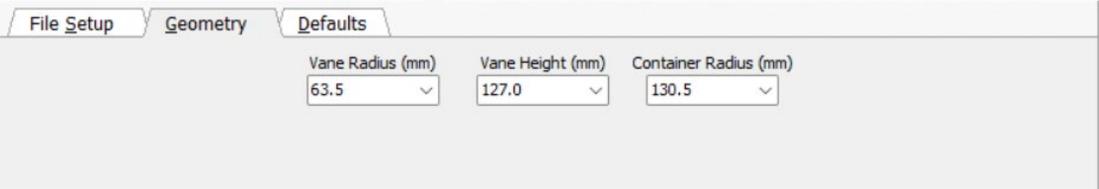
La selección del tamaño del contenedor se basa en el tamaño máximo de agregado. Los espacios entre la paleta y los bordes de la muestra de concreto deben ser al menos 4 veces el tamaño máximo de agregado. Este tamaño mínimo de espacio es necesario para asegurar un grado suficiente de homogeneidad en la muestra de concreto y evitar daños al reómetro debido al entrelazamiento de agregados. La paleta tiene 127 mm (5 pulgadas) de altura y diámetro y cuenta con cuatro aspas. Este mismo tamaño de paleta se utiliza para todos los tamaños máximos de agregado hasta 32 mm (1.25 pulgadas). Sin embargo, la longitud del eje variará según el tamaño del contenedor para garantizar que la paleta esté centrada verticalmente dentro de la muestra de concreto.

3.9.3 Ingresar geometrías

Para este ensayo, en primer lugar, se definen las geometrías de los cilindros concéntricos, es decir el tamaño de la paleta y del recipiente. Estos tamaños dependen del tamaño máximo del agregado de la mezcla, en el caso de mezclas de impresión 3D no se utiliza agregado grueso, por lo tanto, se eligió el recipiente de menor tamaño, el de 10 L. Así que las dimensiones a ingresar son las siguientes:

- Diámetro de Paleta (D): 127 mm
- Radio de Paleta (Ri): 63.5 mm
- Altura de Paleta (h) ó (H): 127 mm
- Radio libre del contenedor de diez litros (Ro): 130.5 mm

Estos datos se ingresan o se verifican en el apartado “Geometry”, como se muestra en la Fig. 5.



Vane Radius (mm)	Vane Height (mm)	Container Radius (mm)
63.5	127.0	130.5

Fig. 5 Datos de geometrías en el software controlador

3.9.4 Realizar una prueba

Realizar una prueba consiste en decidir qué pruebas realizar, seleccionar las entradas del software, cargar concreto en el contenedor, posicionar el reómetro, realizar la prueba y tomar lecturas. Cada paso del proceso se describe en las siguientes secciones.

3.9.5 Tipos de pruebas

El reómetro de concreto ICAR Plus es capaz de realizar una prueba de crecimiento de esfuerzo y una prueba de curva de flujo. Se pueden utilizar las pruebas de crecimiento de esfuerzo o de curva de flujo para caracterizar la tixotropía. La prueba de crecimiento de esfuerzo se usa para determinar el esfuerzo de fluencia estático (τ) (material en reposo), mientras que la prueba de curva de flujo se usa para medir la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) y para calcular los parámetros de Bingham de esfuerzo de fluencia (τ_0) y viscosidad plástica (η). El esfuerzo de fluencia medido con la prueba de la curva de flujo es el esfuerzo de fluencia dinámico porque se mide después de la ruptura de los efectos de la tixotropía.

3.9.6 Prueba de crecimiento de esfuerzo

Una prueba de crecimiento de esfuerzo implica girar la paleta a una velocidad baja y constante mientras se monitorea la acumulación de torque. El torque máximo corresponde al esfuerzo de fluencia. La prueba de crecimiento de esfuerzo depende en gran medida del historial de corte de la muestra. En la Fig. 6 se muestra un gráfico típico de crecimiento de esfuerzo. El software del reómetro identifica el torque máximo y calcula el límite elástico. Esta prueba solo requiere una entrada: la velocidad de la prueba. La velocidad de prueba óptima depende del material que se está probando. Para el concreto, se ha encontrado que un valor de 0.025 rps es apropiado para muchos materiales de concreto. Se pueden realizar pruebas para determinar la velocidad óptima.

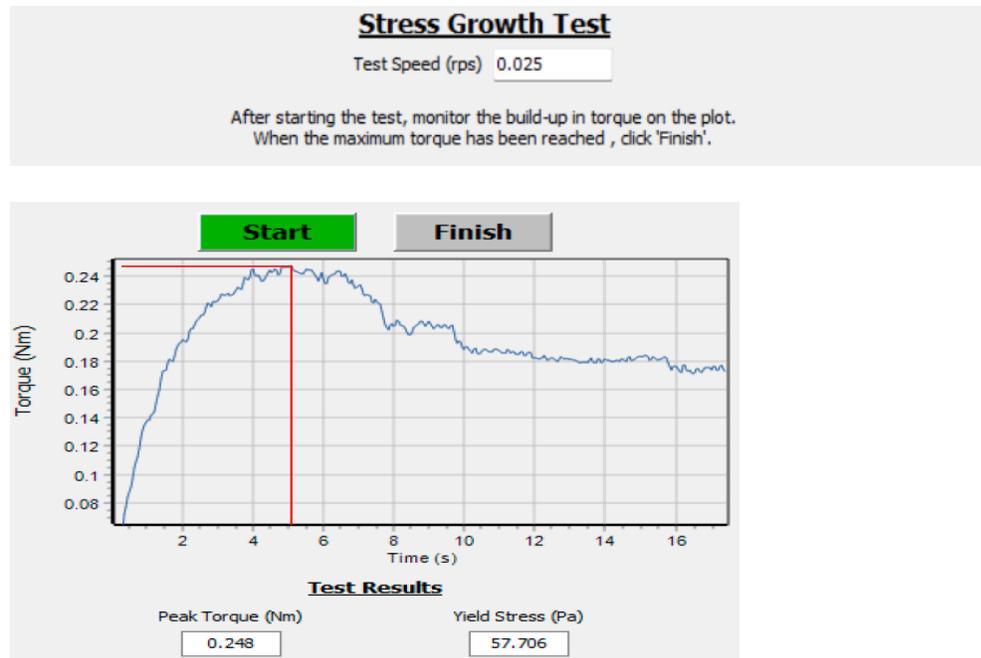


Fig. 6 Curva típica de la prueba de Crecimiento de Esfuerzo

La prueba de crecimiento de esfuerzo mostrará la acumulación de torque y una vez que se detenga la prueba, informará el torque máximo y calculará el esfuerzo de fluencia estático. Donde “Yield Stress (Pa)” se refiere al esfuerzo de fluencia estático, el equipo realiza los cálculos de manera automática, sin embargo, es posible calcular este esfuerzo a partir del Torque con la Eq. (1)

$$\tau_j = \frac{2T_m}{\pi D^3 \left(\frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right)} \quad (1)$$

Donde: τ_j - Esfuerzo de cedencia estático (Pa), T_m - Torque de fluencia (Nm); D - Diámetro de la paleta (m); H - Altura de la paleta (m).

3.9.7 Prueba de curva de flujo

Esta prueba es algo más compleja porque se requieren más datos de entrada e interpretación de resultados. Una prueba de curva de flujo consiste en un período de

ruptura o precorte, seguido de una serie de puntos de la curva de flujo (*Fig. 7*). El propósito del período previo al corte es minimizar los efectos de la tixotropía y proporcionar un historial de corte consistente. El período previo al corte consiste en una velocidad única y constante, típicamente igual a la velocidad máxima de prueba. No se realizan mediciones durante el período previo al corte. Después del período de precorte, la curva de flujo comienza inmediatamente. Una única prueba consta de un número específico de puntos en orden ascendente o descendente.

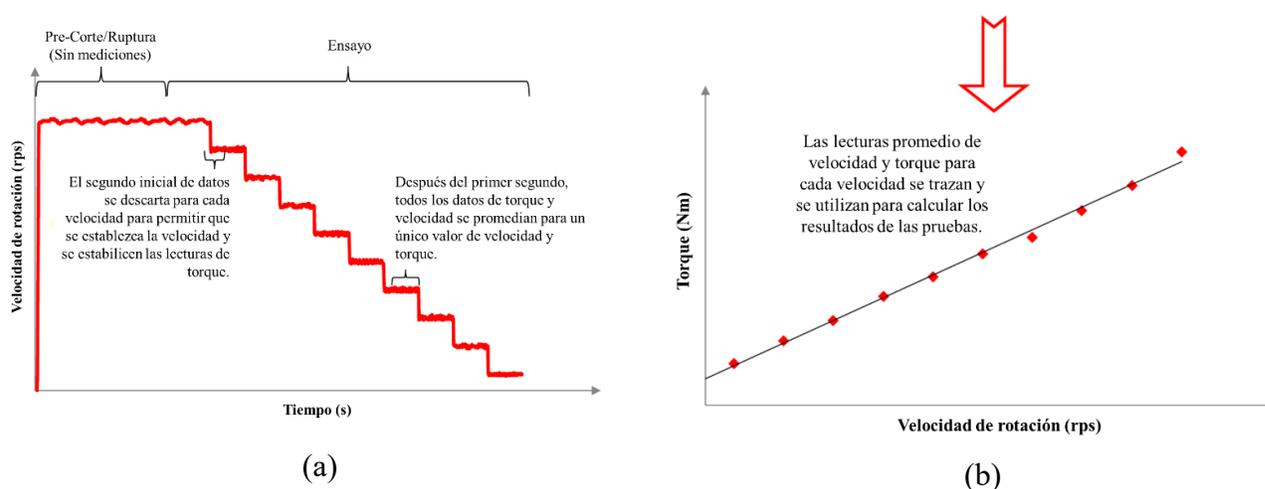


Fig. 7 (a) Definición de Velocidades vs Tiempos (b) Puntos de Velocidad y Torque promedios

La prueba de curva de flujo requiere las siguientes entradas: velocidad precorte y tiempo de precorte, número de puntos, tiempo por punto, velocidad inicial y velocidad final. Si las velocidades se van a imponer en orden descendente, que es lo más habitual, la velocidad inicial debe ser la velocidad máxima y la velocidad final, la velocidad mínima. El software divide equitativamente los puntos de velocidad entre los puntos de velocidad inicial y final. Para morteros extruidos se recomiendan las siguientes velocidades para esta prueba:

- Tiempo de Pre-corte (s)= 10.0

- Velocidad de Pre-corte (rps): 0.55
- Número de puntos: 7
- Tiempo por punto (s): 5.0
- Velocidad Inicial (rps): 0.550
- Velocidad Final (rps): 0.07 (0.08 r/s cada vez)

En el equipo se ingresaron estos datos, como se muestra en la Fig. 8.

Flow Curve Test					
Breakdown Time (s)	Breakdown Speed (rps)	Number of Points	Time per Point (s)	Initial Speed (rps)	Final Speed (rps)
10.0	0.550	7	5.0	0.550	0.070

Torque vs Time
 Torque vs Speed

Start

Fig. 8. Ingreso de datos para Prueba de Curva de Flujo

La prueba de curva de flujo mostrará el diagrama de Torque versus Tiempo Fig. 9 a mientras se realiza la prueba. Al final de la prueba, se promediarán el Torque y la velocidad de rotación de cada diagrama y se calculará la curva de flujo mediante una regresión lineal Fig. 9 b. Los parámetros de Bingham también se informarán corregidos para las zonas muertas.

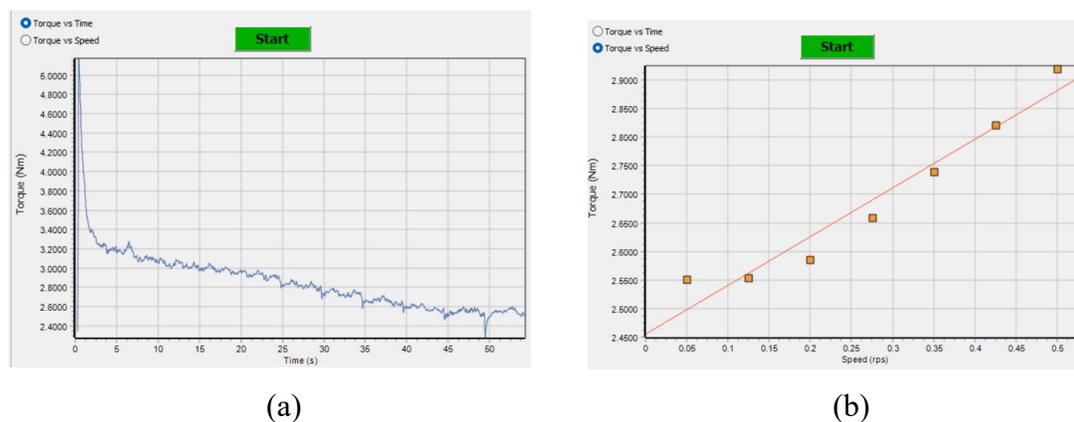


Fig. 9 (a) Torque vs Tiempo, (b) Puntos de Velocidad y Torque promedio en cada lapso

En el apartado Torque vs Time, se muestra la disminución del Torque debido a las disminuciones automáticas de la velocidad de rotación previamente programadas. En el

apartado Torque vs Speed, se muestran los promedios del Torque y la velocidad según la velocidad objetivo que se programó en ese rango de tiempo. La función de Torque vs Velocidad se puede calcular por regresión lineal de mínimos cuadrados en softwares matemáticos externos, para ese proceso los datos se toman del archivo de block de notas que genera el equipo (Fig. 10 a), se grafica la dispersión de puntos y se ajustan a una tendencia lineal con su respectivo R^2 . De manera directa estos datos se pueden observar en el gráfico que genera el equipo Fig. 9 b y los parámetros de la regresión lineal se presentan debajo del gráfico con el nombre “Relative Parameters” (Fig. 10 b), donde se muestra la función lineal $T= Y + V.N$, donde Y es una constante y sirve para estimar el esfuerzo de fluencia dinámico (τ_0), y V representa a la pendiente, y esta sirve para calcular la viscosidad plástica (η), el equipo también muestra el R^2 de la exactitud de la tendencia.

Flow Curve Points	
Speed (rev/s)	Torque (Nm)
0.500	1.651
0.425	1.356
0.350	1.111
0.275	0.881
0.200	0.669
0.125	0.464
0.050	0.262

(a)

Relative Parameters		
Y (Nm)	V (Nm·s)	R^2
2.455	0.855	0.94

(b)

Fig. 10 (a) Archivo de notas con tabulaciones de velocidad y torque, (b) Parámetros relativos de regresión lineal calculados por el software del reómetro

Con estos parámetros relativos de la función lineal es posible calcular los parámetros de reología de un fluido tipo plástico de Bingham. Las relaciones de estas funciones se basan en la ecuación de Reiner-Riwlin, que se deduce con base a un reómetro de cilindros concéntricos. En la Fig. 11 se observa que el esfuerzo de cedencia dinámico (τ_0) multiplicado por un factor de modificación según geometrías de los cilindros, corresponde al valor constante de la función lineal Y. También se observa que la

viscosidad plástica (η) multiplicada por un factor de modificación según geometrías de los cilindros, corresponde a la pendiente de la función lineal V.

$$\begin{array}{l}
 \text{Torque} = \text{Constante} + (\text{Pendiente}) \cdot (\text{Vel. Giro}) \\
 \text{Relativos:} \quad T = Y + V \cdot N \\
 \text{Reiner-Riwlin:} \quad T = \frac{4\pi h \tau_0}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)} \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right) + \frac{8\eta \pi^2 h}{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right)} V \\
 \text{Reológico:} \quad \tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \\
 \text{Esf. Corte} = \text{Esf. Cedencia} + (\text{Viscosidad}) \cdot (\text{Deformación})
 \end{array}
 \quad
 \left\{
 \begin{array}{l}
 \tau_0 = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right) Y}{4\pi h \ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)} \\
 \eta = \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right) V}{8\pi^2 h}
 \end{array}
 \right.$$

Fig. 11 Relación entre los parámetros relativos y los parámetros reológicos, estimados a partir de la ecuación de Reiner-Riwlin.

Para obtener los parámetros reológicos τ_0 y η basta con despejar para esas variables, como se observa a la derecha de la *Fig. 11* y encontrar los datos de manera manual o con softwares matemáticos externos. Sin embargo, el software del reómetro realiza estos cálculos automáticamente, esto se presenta en la *Fig. 12* (donde: T_0 - esfuerzo de fluencia, μ - viscosidad plástica, mse - velocidad de deformación). En la literatura, la viscosidad plástica es representada con la letra “ η ” o por “ μ ”, ambas letras griegas se refieren a lo mismo.

Bingham Parameters		
T_0 (Pa)	μ (Pa·s)	(mse)
684.34	4.46	0.079

Fig. 12 Cálculos de parámetros de Bingham en el software del reómetro

3.10 Mezclas

3.10.1 Densidad de sólidos en ASP

El aditivo superplastificante (ASP) se utilizó en forma de una solución, en la que el fabricante incorpora la masa activa en agua. Sin embargo, en el diseño de todas las mezclas, es esencial controlar la cantidad de agua. Por lo tanto, resulta necesario calcular el contenido de sólidos y agua presentes en el aditivo. Para determinar la cantidad de sólidos, se procede a secar una muestra en un horno hasta obtener una masa constante, y se expresa esta masa seca en porcentaje con respecto al peso de la solución. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: cantidad de sólidos = 81.73 %, cantidad de agua = 18.27 %. Además, se calculó la densidad de la solución utilizando un recipiente con un volumen y masa conocidos, resultando en una densidad de la solución de 1.11 kg/L. La densidad de los sólidos (ρ_s) se relaciona con la densidad de la solución (ρ_m) y el porcentaje de sólidos (s), como se muestra en la Ec. (2). Esto dio como resultado $\rho_s = 1.138$ kg/L.

$$\rho_s = \frac{s}{\frac{100}{\rho_m} - \frac{100-s}{\rho_w}} \quad (2)$$

3.10.2 Pastas y morteros

Las proporciones de las mezclas se detallan en la *Tabla 8*. Los apartados se dividen en función de la herramienta utilizada para la extrusión o el tipo de ensayo a realizar. En primer lugar, se prepararon pastas para extrusión en una jeringa de 30 ml. Debido a dificultades para lograr impresiones estables, se llevaron a cabo ajustes en las proporciones de ASP y a/c con el objetivo de aumentar el esfuerzo de fluencia estático de la mezcla y obtener filamentos continuos e impresiones capaces de soportar su propio peso y capas apiladas. El tiempo de mezclado fue de 3 minutos y se utilizó una mezcladora estándar según la norma ASTM C305. Dadas las limitaciones y problemas con este sistema de extrusión, se realizaron pruebas adicionales utilizando una calafateadora de acero, que permitía el uso de boquillas de mayor tamaño y un émbolo de mayor fuerza. En estas nuevas formulaciones de pasta, fue necesario aumentar la proporción de a/c. Como tercer método, se empleó una extrusora de tornillo sinfín horizontal. Con esta herramienta, fue posible extruir pastas reforzadas con fibras de basalto (FB). La adición de FB de basalto se realizó en porcentajes respecto al volumen del cemento. Para llevar a cabo caracterizaciones reológicas, se preparó un mortero también reforzado con FB, utilizando el mismo contenido de FB con relación al volumen de cemento.

Tabla 8. Proporciones de mezclas de pastas y mortero

Utilizado en:	Mez.	Materiales secos y agua Rx, y sus densidades absolutas					Relación en masa de sólidos secos y agua Rx a cemento			VI. FB VI. Cm. FB/C	Volumen (L)
		Cemento	Agua	ASP.s	Arena	BF	a/c	s/c	ASP.s/c		
		3.05	1.00	1.138	2.59	2.70					
<i>Jeringa 30 ml</i>	Cntl	1,520.06	501.62	-	-	-	0.33	-	-	-	1,000.0
	M-1	1,883.03	376.61	6.83	-	-	0.20	-	0.0036	-	1,000.0
	M-2	1,725.74	431.43	3.13	-	-	0.25	-	0.0018	-	1,000.0
	M-3	1,698.76	441.68	1.54	-	-	0.26	-	0.0009	-	1,000.0
	M-4	1,726.92	431.73	2.35	-	-	0.25	-	0.0013	-	1,000.0
<i>Calafateadora</i>	C-1	1,453.77	523.36	-	-	-	0.36	-	-	-	
<i>Extrusora de tornillo horizontal</i>	T-1	1,473.07	515.58	-	-	3.912	0.35	-	-	0.003	1,000.0
<i>Reómetro ICAR-PLUS</i>	R-1	811.89	284.16	11.37	1,136.6	4	0.35	1.4	0.014	0.003	1,000.0

3.11 Caracterización de la velocidad de impresión y la precisión del

moldeo.

Para llevar a cabo este experimento, se utilizó una impresora 3D de concreto debido a la necesidad de tener un control preciso de las velocidades. La velocidad de impresión en este experimento comprende tanto la velocidad de extrusión (velocidad de rotación) como la velocidad de alimentación (velocidad de desplazamiento). La velocidad de rotación se controló mediante un tacómetro láser y una cinta reflectante adherida al taladro, como se muestra en la *Fig. 13*. Por otro lado, la velocidad de desplazamiento se controló utilizando el Dolly de la impresora, el cual cuenta con un control remoto y tres ajustes de velocidad: 1.4 cm/s, 2.4 cm/s y 3 cm/s, como se ilustra en la *Fig. 14a*.

El tamaño del modelo impreso en forma de tira es de 280 mm x 15 mm x 8 mm, tal como se representa en la *Fig. 14b*. La anchura de las tiras impresas se comparó con la anchura del modelo, y se tomaron medidas en tres ubicaciones específicas, a saber, a 50 mm, 140 mm y 230 mm a lo largo de cada tira. Estos valores se registraron como anchura

izquierda, anchura central y anchura derecha, respectivamente, para asegurar la precisión de los resultados.

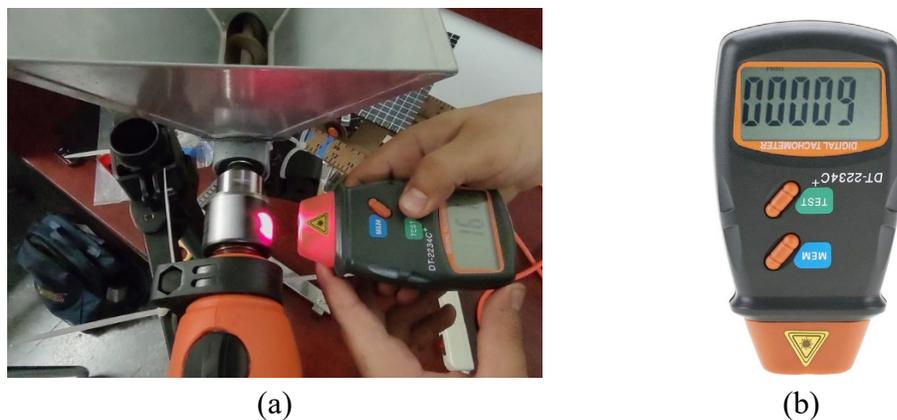


Fig. 13 (a) Velocidad de extrusión (velocidad de rotación), (b) Tacómetro láser Digital LCD

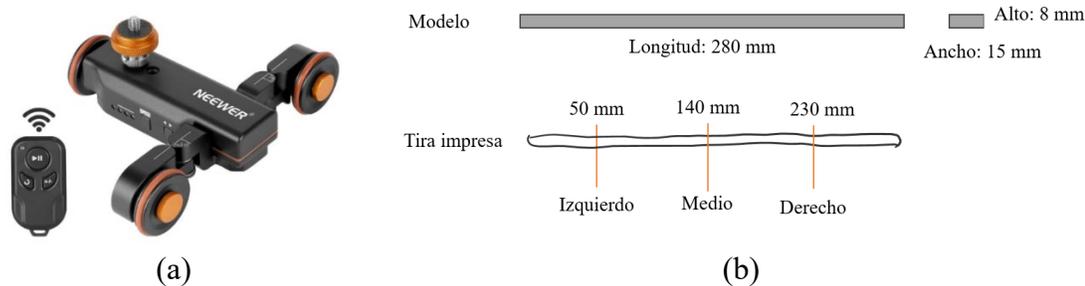


Fig. 14 (a) Dolly con velocidad de alimentación (desplazamiento), (b) Medida del ancho de las tiras de impresión.

3.12 Programa experimental para optimizar la impresión 3D

- *Clasificación de los materiales cementosos:* Los materiales cementosos se dividen en siete grupos según el tiempo de asentamiento. Esto significa que se agrupan en función de cuánto tiempo necesitan para estabilizarse o asentarse.

- *Subdivisión de grupos:* Cada grupo de materiales cementosos se subdivide en dos lotes: uno se utiliza para realizar pruebas reológicas (evaluación de la viscosidad y fluidez de los materiales) y el otro para la impresión 3D.
- *Pruebas reológicas:* Se realiza un protocolo de prueba reológica, que se describió anteriormente. Esto implica medir y evaluar la viscosidad y la capacidad de fluir de los materiales en cada grupo.
- *Experimento de impresión 3D:* El objetivo principal del experimento de impresión 3D es investigar cómo la velocidad de impresión afecta la precisión en la formación de las tiras impresas. Se busca encontrar la velocidad de impresión óptima para cada grupo de tiempo de asentamiento de los materiales.
- *Proceso de impresión 3D:* Se comienza midiendo el ancho de las tiras de impresión a una velocidad de impresión inicial y se compara con el ancho de un modelo de referencia (*Fig. 14b*). La velocidad de alimentación (desplazamiento) de la impresora se mantiene constante, pero la velocidad de extrusión (rotación) se ajusta. Si la tira es más ancha que el modelo, se reduce la velocidad de extrusión, y si es más estrecha, se aumenta la velocidad de extrusión. Esto se repite hasta que el ancho de la tira coincida con el del modelo.
- *Optimización de la velocidad de impresión:* La velocidad de impresión se registra como la mejor velocidad para esa tira cuando el ancho coincide. Luego, se cambia la velocidad de alimentación (desplazamiento) y se repiten los pasos anteriores hasta que se complete la impresión de una plancha entera. En este proceso, se registra la mejor velocidad de impresión para cada tira.
- *Selección de la mejor velocidad de impresión:* Después de obtener todas las mejores velocidades de impresión, se comparan los anchos de las tiras de impresión con estas velocidades. La velocidad de impresión correspondiente a la tira que mejor coincide con el ancho del modelo se registra como la mejor velocidad de impresión para ese tiempo de estabilización.

En resumen, este programa experimental se enfoca en encontrar la mejor velocidad de impresión para diferentes grupos de materiales cementosos según su tiempo de asentamiento, con el objetivo de lograr una impresión 3D precisa. Se ajusta la velocidad de extrusión (rotación) durante la impresión para que el ancho de las tiras coincida con un modelo de referencia, y se registra la mejor velocidad para cada caso.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de materiales

4.1.1 Distribución de tamaños de partícula (DTP)

La Figura 16 muestra la distribución del tamaño de las partículas para el cemento portland (CPO 40). Como era de esperarse, aproximadamente el 95% de las partículas del cemento (D_{95}) son menores que 55 micrómetros, con un promedio de partículas (D_{50}) de 15 micrómetros. La finura del cemento afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación. La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. Los efectos de un cemento muy fino no son deseables ya que provoca mayores contracciones y riesgos de agrietamientos.

4.1.2 Picnometría de Desplazamiento de Gas

Se obtuvo una densidad relativa del cemento portland de 3.05.

4.1.3 Granulometría del agregado fino

La granulometría del agregado fino se muestra en la Figura 17, también se presentan los límites recomendados para agregados fino según la norma NMX-C-111-2004 en masa acumulada en porcentaje que pasa. Como se puede observar para el tamiz 0.150 mm (No. 100) no se cumple con la tolerancia recomendada y se sobrepasa el límite superior. Para tales casos la norma recomienda que el agregado puede utilizarse siempre

y cuando se tenga antecedentes de comportamientos satisfactorios, y también recomienda hacer ajustes en los proporcionamiento de las mezclas para compensar las deficiencias en la granulometría. Se tiene conocimiento del uso satisfactorio de este material en el laboratorio en investigaciones anteriores, así que se espera que se considerará adecuado, y en caso de presentar algunas deficiencias se harán ajustes por tanteo en los proporcionamientos.

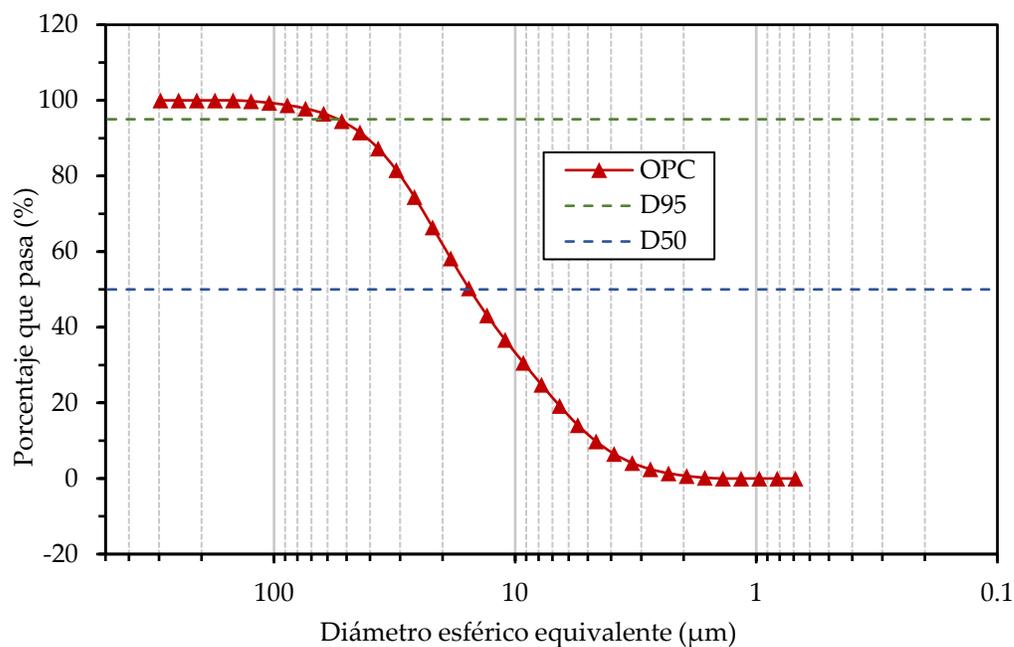


Figura 16. Distribución de Tamaño de partícula de CPO 40

4.1.4 Módulo de finura

Se calculó el módulo de finura y fue de 2.80, este parámetro cumple con la tolerancia de entre 2.30 y 3.10 recomendado en la norma NMX-C-111-2004.

4.1.5 Absorción y densidad del agregado fino

La absorción del agregado fino en porcentaje de la masa seca fue de 1.42%. La densidad relativa aparente saturada y superficialmente seca (D_r sss) fue de 2.63 y la Densidad relativa aparente seca (D_r s) fue de 2.59.

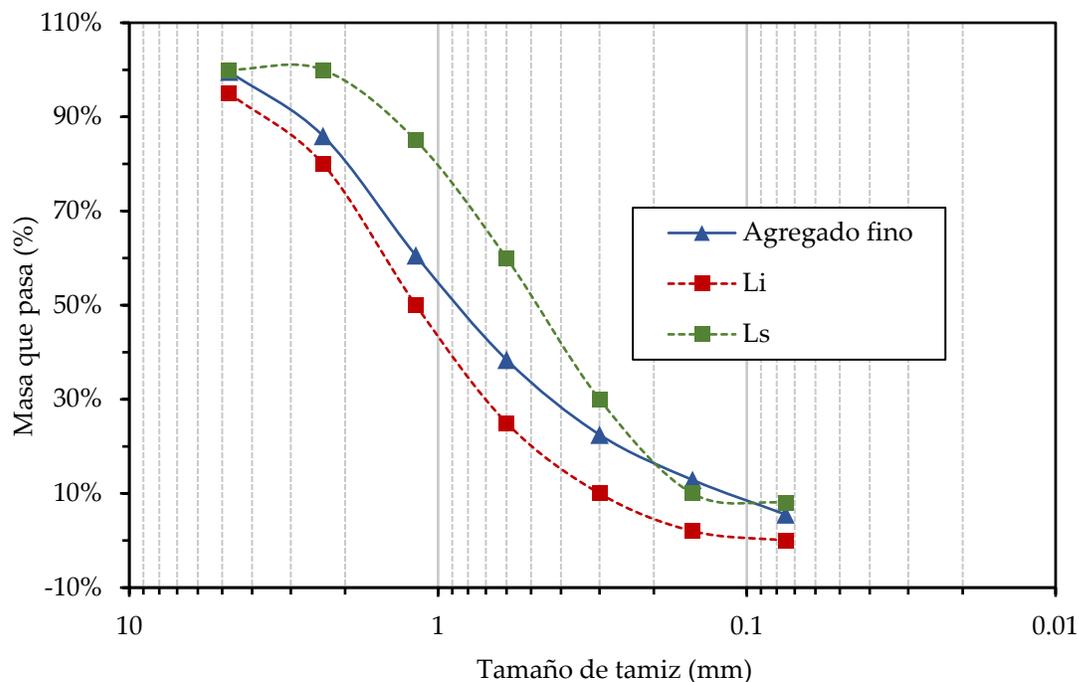


Figura 17. Granulometría del agregado fino

4.2 Pruebas de fluidez

4.2.1 Fluidez en pastas

Se realizaron pruebas preliminares para analizar la influencia de la relación a/c en la fluidez de la pasta de cemento y la eficacia del ASP como reductor de agua. El fabricante recomienda una dosis de 4 a 15 ml/kg de cemento. La Figura 18 muestra los resultados de dos series de pastas, la Pasta-1 se elaboró con cemento y cantidades variables

de agua, y la Pasta-2-SPA con cemento, cantidades variables de agua y una cantidad fija de ASP, a una dosis de 4 ml/kg. La fluidez se midió en la mesa de flujo según el procedimiento ASTM C1437. Se encontró que en ambas pastas la fluidez tiene una tendencia logarítmica en función de la relación a/c. La tasa de reducción de agua del SPA es variable según la relación a/c. Considerando una fluidez objetivo del 130%, se requiere una relación a/c de 0.40 para la Pasta-1 y una relación a/c de 0.23 para la Pasta-2-SPA, es decir, la tasa de reducción es de 0.17 litros de agua por kg de cemento.

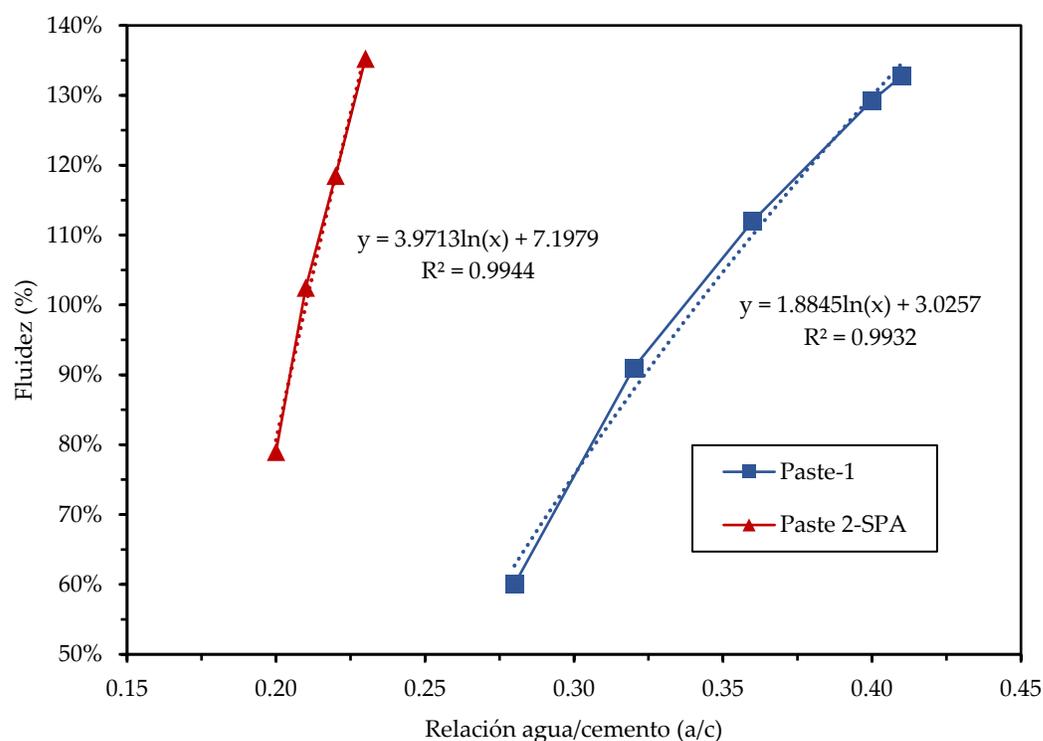


Figura 18. Influencia de la relación agua-cemento (a/c) y del aditivo superplastificante (SPA) en el flujo de pastas de cemento.

4.2.2 Fluidez en morteros

La arena en los morteros se analizó en términos de la relación en peso de arena respecto al peso del cemento (n). Se encontró que para morteros con una cantidad fija de

a/c y una cantidad variable de arena (n), la fluidez tiene un comportamiento inversamente proporcional a la cantidad de arena, y tiene una tendencia lineal definida por la ecuación

(1)

$$F(n) = -0.7217(n) + F(a/c) \quad (1)$$

$$R^2 = 0.9987$$

La Figura 19 muestra en conjunto a las dos variables principales a/c y n y como variable respuesta muestra a la Fluidez. De esta manera se puede observar la superficie 3D de la fluidez si se modifican estas cantidades de material.

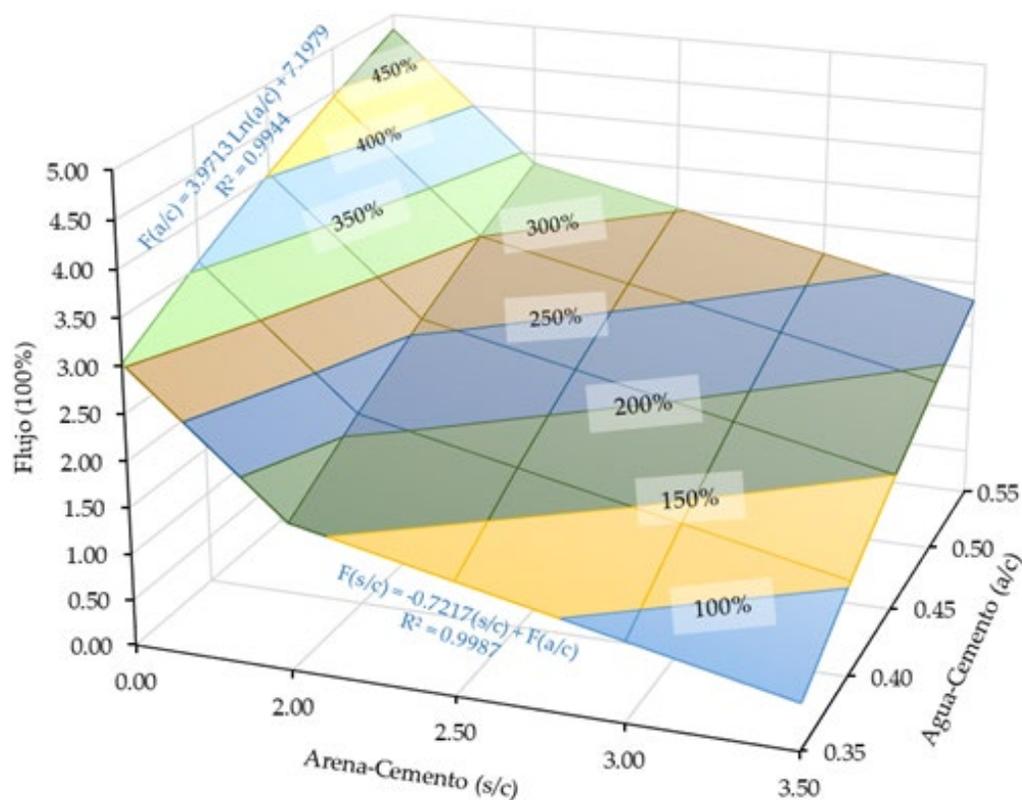


Figura 19. Superficie 3D de fluidez respecto a relación agua/cemento y cantidad de arena.

4.2.3 Fluidez en morteros con fibras de basalto

La fibra de basalto (FB) en los morteros se analizó en términos de la relación de volumen de FB respecto al volumen total de mezcla, expresada en porcentaje. Se encontró que, para morteros con una cantidad fija de arena, la fluidez tiene un comportamiento inversamente proporcional a la cantidad de fibra, y tiene una tendencia cuadrática definida por la (2)

$$F(\text{FB}) = 11,229(\text{FB})^2 - 209.79(\text{FB}) + F(n) \quad (2)$$

La Figura 20 muestra en conjunto a las dos variables principales arena (n) y fibra de basalto (FB) y como variable respuesta muestra a la Fluidez. De esta manera se puede observar la superficie 3D de la fluidez si se modifican estas cantidades de material.

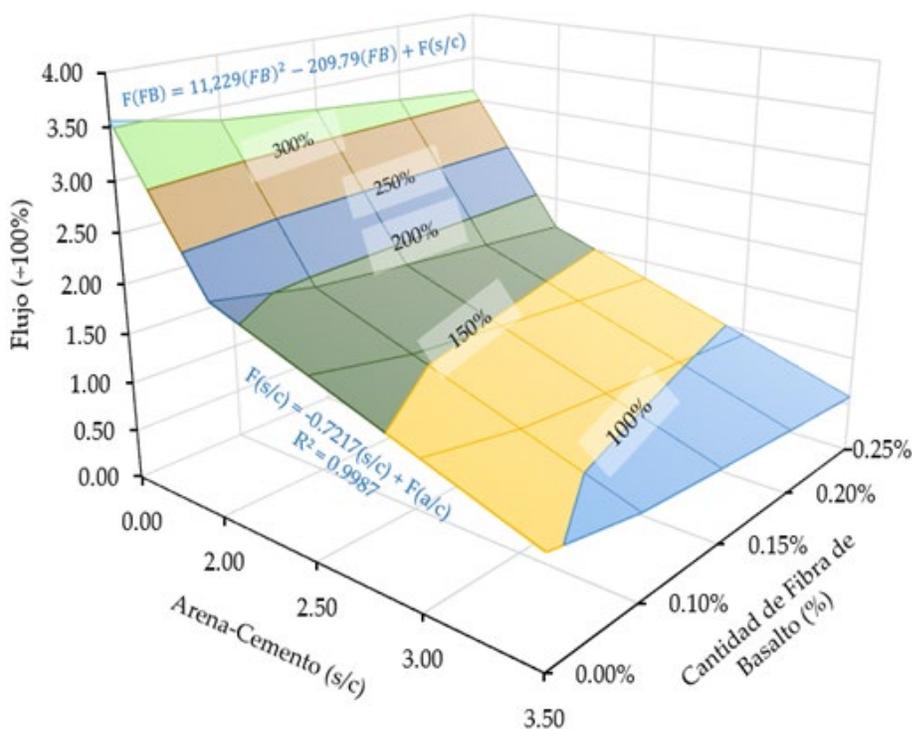


Figura 20. Superficie 3D de fluidez respecto a la cantidad de arena y fibra de basalto.

4.3 Pastas preliminares para impresión 3D

4.3.1 Calidad de impresión

La pasta M-0.33 fue inspeccionada visualmente y se encontró que también tiene una buena calidad de impresión y que el filamento era continuo y de tamaño uniforme. Estos resultados se muestran en la Figura 21



Figura 21. Calidad de filamento de M-0.33.

4.3.2 Edificabilidad

Con el equipo de impresión se realizó un cubo sólido de 25 mm por lado (ver Figura 22), y como se muestra en la Figura 23, con la acumulación multicapa se generó aplastamiento en las capas inferiores, es decir, la M-0.33 no obtuvo una buena edificabilidad. Esto genera la necesidad de modificar la viscosidad de la mezcla con el uso de aditivos.

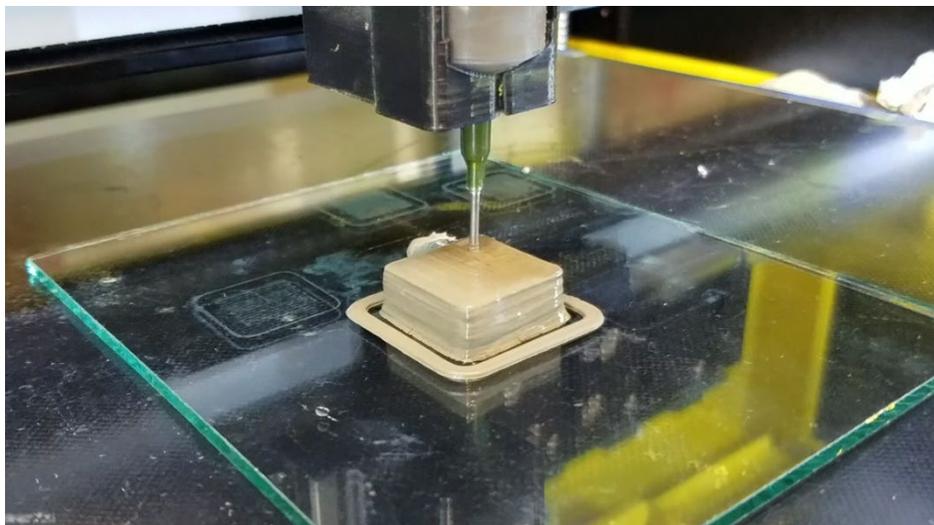


Figura 22. Impresión de cubo solido de 25 mm con M-0.33.

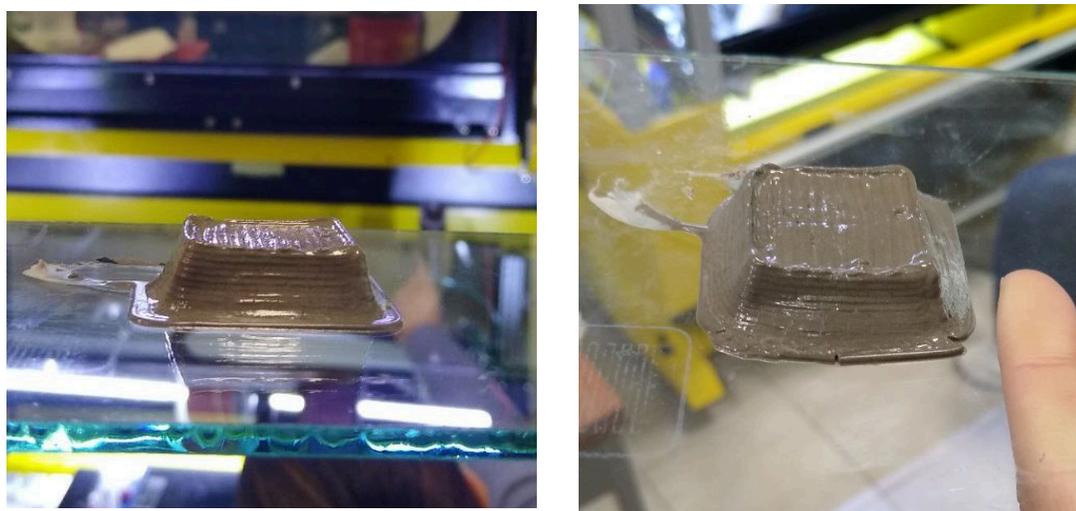


Figura 23. Problemas de edificabilidad de M-0.33.

4.3.3 Pruebas de extrusión manuales

Se realizaron mezclas de prueba extruyendo a mano en una jeringa ya que este método permite observar la extrudabilidad y edificabilidad como característica del material y su potencial para ser impreso con precisión en el equipo. Como se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 24, en esta etapa se realizaron modificaciones a la pasta

M-0.33, se hicieron tanteos disminuyendo la a/c y agregando aditivo superplastificante (ASP).

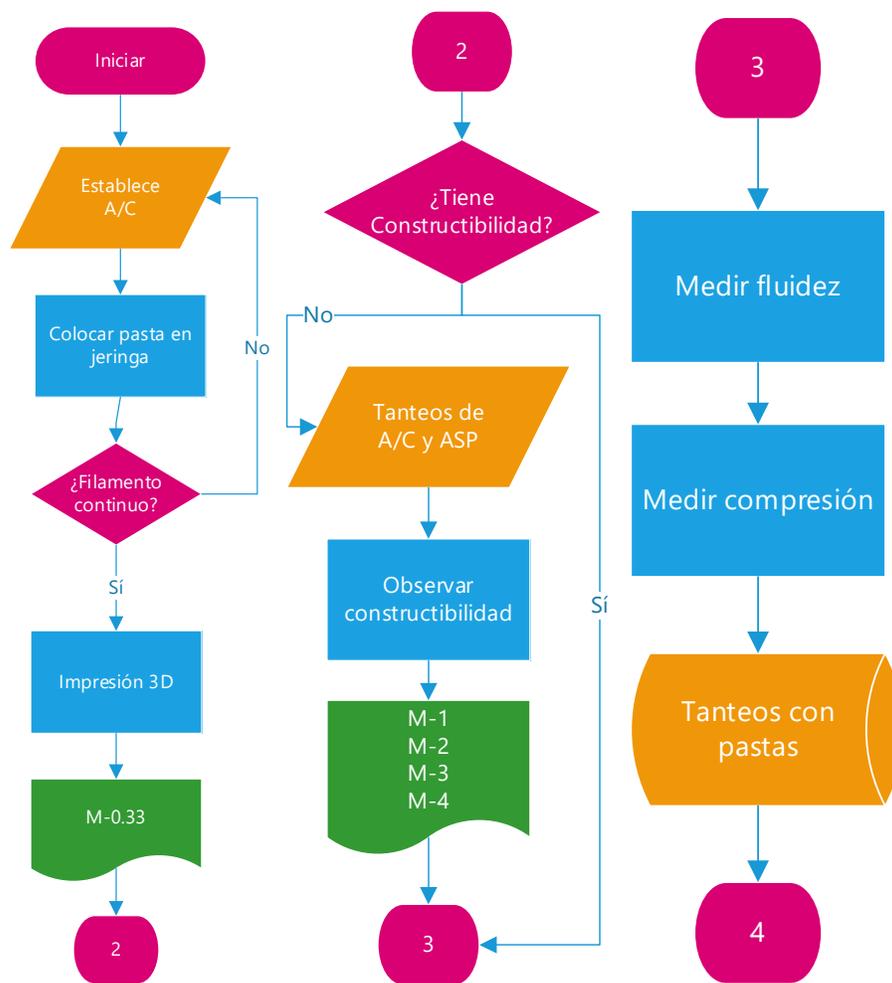


Figura 24. Procedimiento de tanteos para mejorar la edificabilidad o constructibilidad

En la se muestran las observaciones y resultados estas pastas. La pasta óptima fue la M-3, que tiene una $a/c=0.26$ y ASP en proporción de 1 ml por kg de cemento. La M-3 obtuvo un filamento mucho más continuo y uniforme, además que se pudo sostener sin cortarse desde una altura considerable. Se observó que, ante el flujo continuo, el filamento era autoconstruible y se acomodó en múltiples capas y en forma de elipse al tocar el suelo

(ver M-3 en Figura 25). Además, la acumulación de capas no generó aplastamiento en las capas inferiores, esto indica una buena edificabilidad.

Sin embargo, no fue posible vaciar al 100% la jeringa ya que después de extraer aproximadamente 30% del volumen se generó tapamiento y obstrucción de esta. Se observó que esto se debe a que los granos de cemento se acumulan en el fondo de la jeringa y tapan la boquilla de salida y se segregan del agua, de manera que se crea una especie de filtro que solo permite salir agua y no cemento o pasta, esto podría deberse al diámetro reducido de la jeringa, por lo cual se planea utilizar una jeringa de dimensiones más amplias.

Tabla 9. Pastas de prueba para mejorar la edificabilidad

Mezcla	Agua y aditivo	Diámetro (mm)	Fluidez (%)	Observación
M-0.33	a/c=0.33. ASP= 0.00	175.00	75.00	Consistencia plástica, pero no tiene filamento continuo para impresión y poca tixotropía
M-1	a/c=0.20 ASP= 4 ml/kg	--	--	Con 17 golpes se llenó el plato, antes de 15 s. Muy fluido, y muy tixotrópico/ poco trabajable, la jeringa se tapaba al instante. Requiere más agua
M-2	a/c=0.25 ASP= 2 ml/kg	--	--	Muy fluido, consistencia líquida. No es imprimible. Usar menos aditivo
M-3	a/c=0.26 ASP= 1 ml/kg	159.47	59.47%	Consistencia plástica, con filamento continuo y con buena

				tixotropía (resiste el peso multicapa)
M-4	a/c=0.25 ASP= 1.5 ml/kg	195.18	95.18%	Consistencia plástica, pero fluye más en la jeringa, en contraparte pierde tixotropía, no resiste su propio peso, y el filamento se corta, es más adecuada la M-3

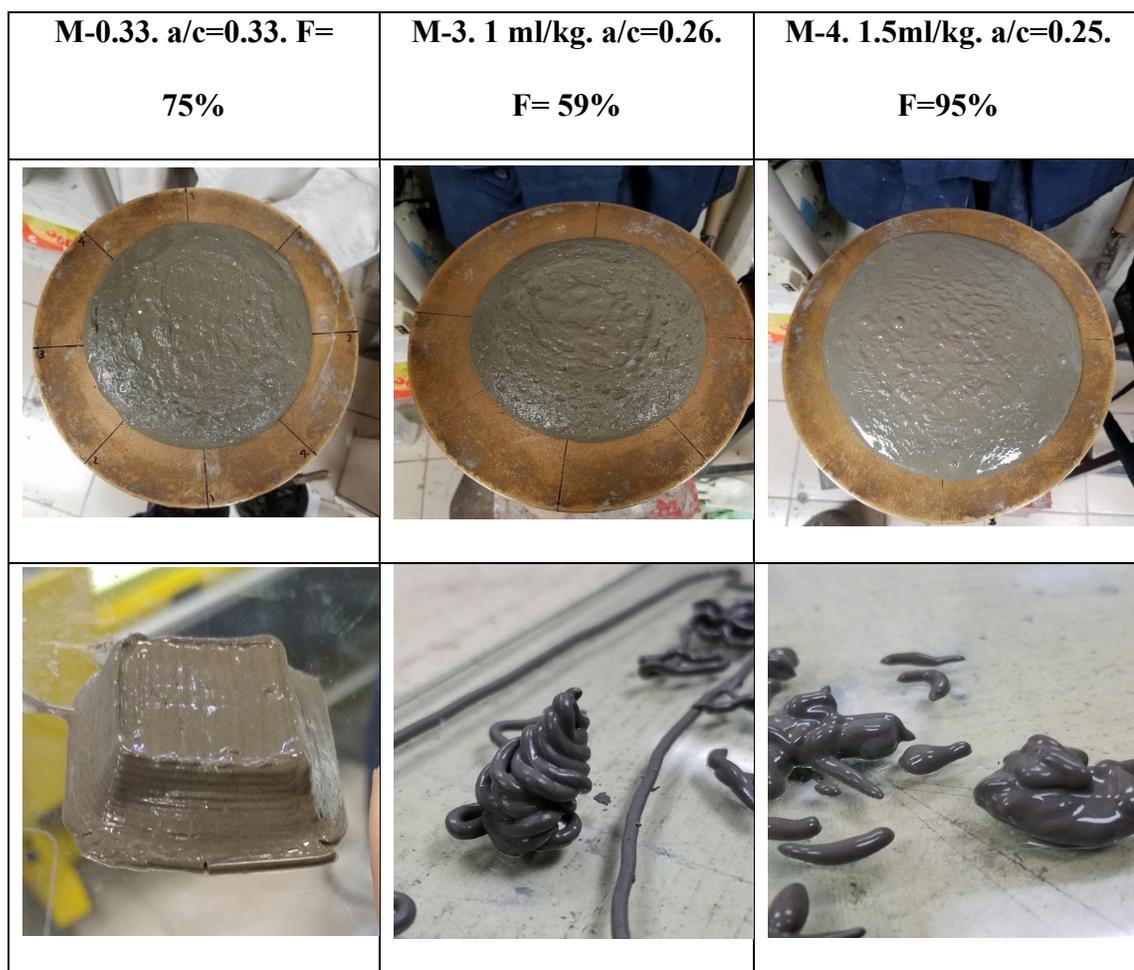


Figura 25. Fluidez y extrudabilidad de pastas de cemento

4.3.4 Ensayos a Compresión

Se realizaron cubos moldeados y compactados (sin extrusión) para encontrar la resistencia a la compresión potencial de estas pastas preliminares. Como se esperaba el aumento de relación a/c disminuyó la resistencia a la compresión. Los resultados se presentan en la Figura 26. Estas resistencias son lo suficientemente altas para tolerar la disminución de resistencia que se tendrá cuando sean impresas en 3D

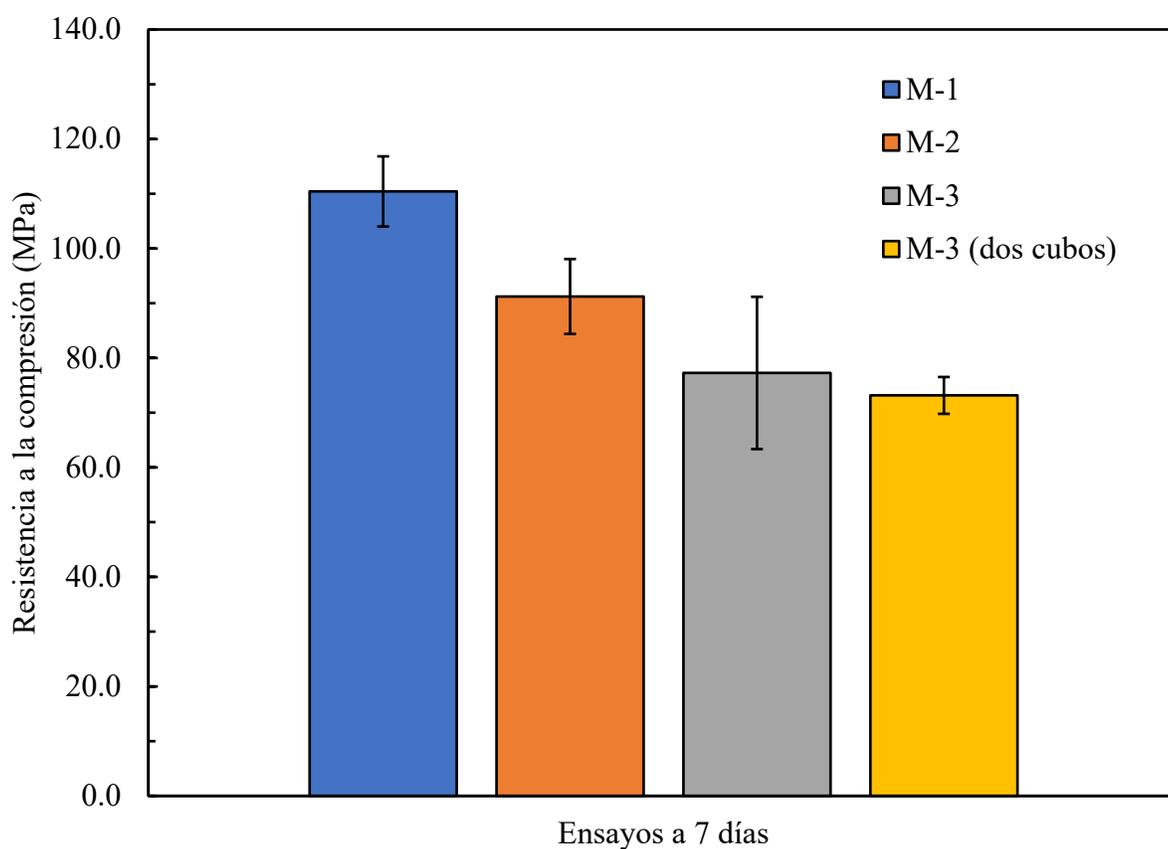


Figura 26. Resultados de resistencia a la compresión con promedio de 3 cubos, o de dos cubos si el rango no cumple con la tolerancia de la norma.

4.4 Extrusión con émbolo

4.4.1 Jeringa 30 ml

La mezcla Control demostró buenas propiedades de extrusión, pero presentó un bajo esfuerzo de cedencia estático, lo que resultó en una tendencia a aplanarse debido a la acumulación multicapa en el cubo impreso. En respuesta a esta limitación, se realizaron modificaciones en esta mezcla para observar su capacidad de extrusión y formación de filamentos continuos, así como su capacidad de acumulación multicapa. Los resultados de estas modificaciones se presentan en la Fig. 17 a. La estrategia consistió en reducir el contenido de agua a/c y agregar aditivo superplastificante (ASP) para mejorar la tixotropía.

En la Fig. 17 b, se muestran los resultados de fluidez para estas mismas mezclas. Inicialmente, se replicó la mezcla de control, que mostró una fluidez del 75%. La mezcla M-1 presentó un alto esfuerzo de cedencia, lo que impidió que el émbolo de la jeringa bajara, lo que requirió el uso de más agua y menos ASP. En el ensayo de flujo, superó el máximo medible. La mezcla M-2 resultó ser demasiado fluida o líquida, lo que significa que no fue posible formar un filamento en la jeringa. Fue necesario usar menos ASP, y el ensayo de flujo no se pudo realizar debido a la consistencia extremadamente líquida. La mezcla M-3 mostró una consistencia plástica, con un filamento continuo y un suficiente esfuerzo de cedencia estático que permitió la acumulación multicapa. Su flujo fue de 59%. La mezcla M-4 se diseñó para verificar si el uso de más aditivo y menos agua mantendría las propiedades de M-3. Esta mezcla también tuvo una consistencia plástica, pero su filamento fue más fluido en la extrusión con la jeringa. Sin embargo, perdió esfuerzo de

cedencia estático, resistió menos capas y el filamento se cortó. En consecuencia, se concluyó que la mezcla más adecuada era la M-3. Las características de extrusión de estas pastas se presentan en la Figura 25. Fluidez y extrudabilidad de pastas de cemento

A pesar de ser la mejor mezcla, durante la extrusión no fue posible vaciar completamente la jeringa, ya que después de vaciarse aproximadamente en un 30%, se produjo un bloqueo y obstrucción de la misma. Esto se debió a la acumulación de los granos de cemento en el fondo de la jeringa, obstruyendo la boquilla de salida y segregándose del agua, creando un filtro que solo permitía el paso del agua y no de cemento o pasta. Esto podría deberse al diámetro reducido de la jeringa. Ante esta dificultad, se optó por utilizar otra extrusora (calafateadora), ya que con una jeringa que posee un embolo y boquilla tan pequeños, resulta muy complicado la extrusión.

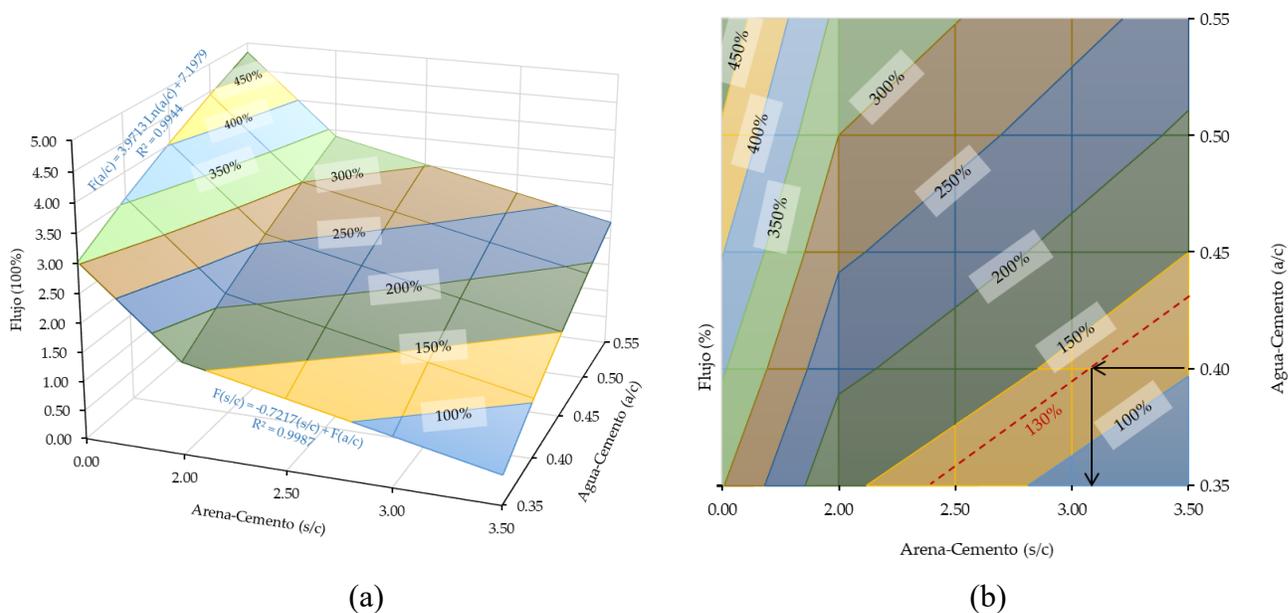


Fig. 15 (a) Influencia de s/c y a/c en el flujo, (b) Gráficos de contornos de s/c y a/c en el flujo

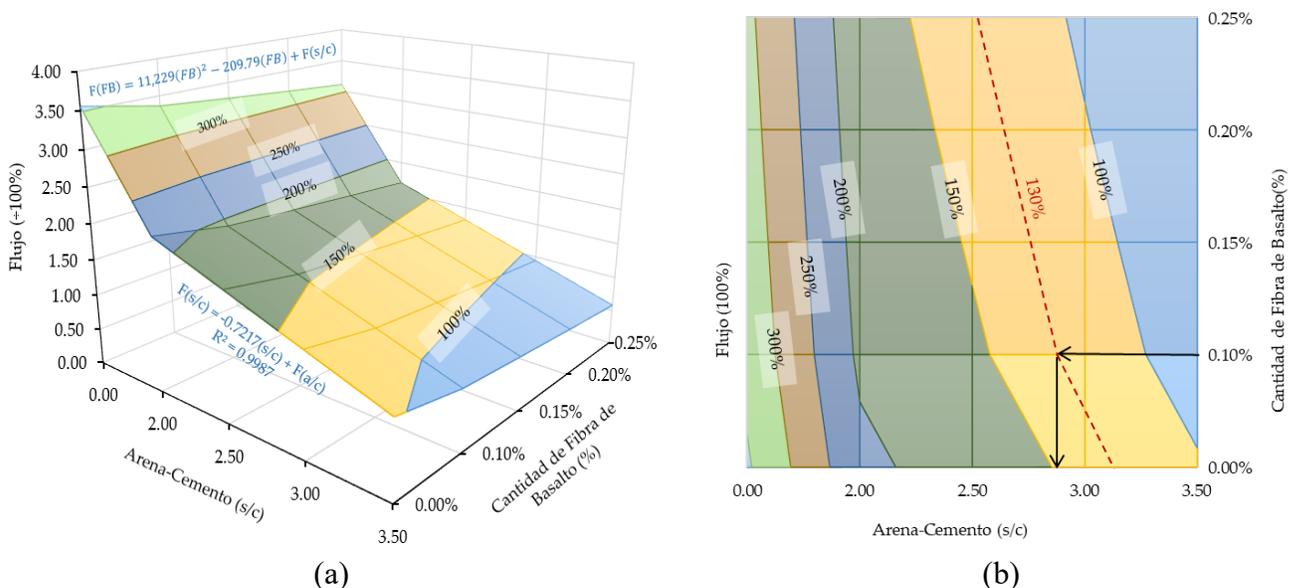


Fig. 16 (a) Influencia de s/c y %FB en el flujo, (b) Gráficos de contorno de s/c y a/c

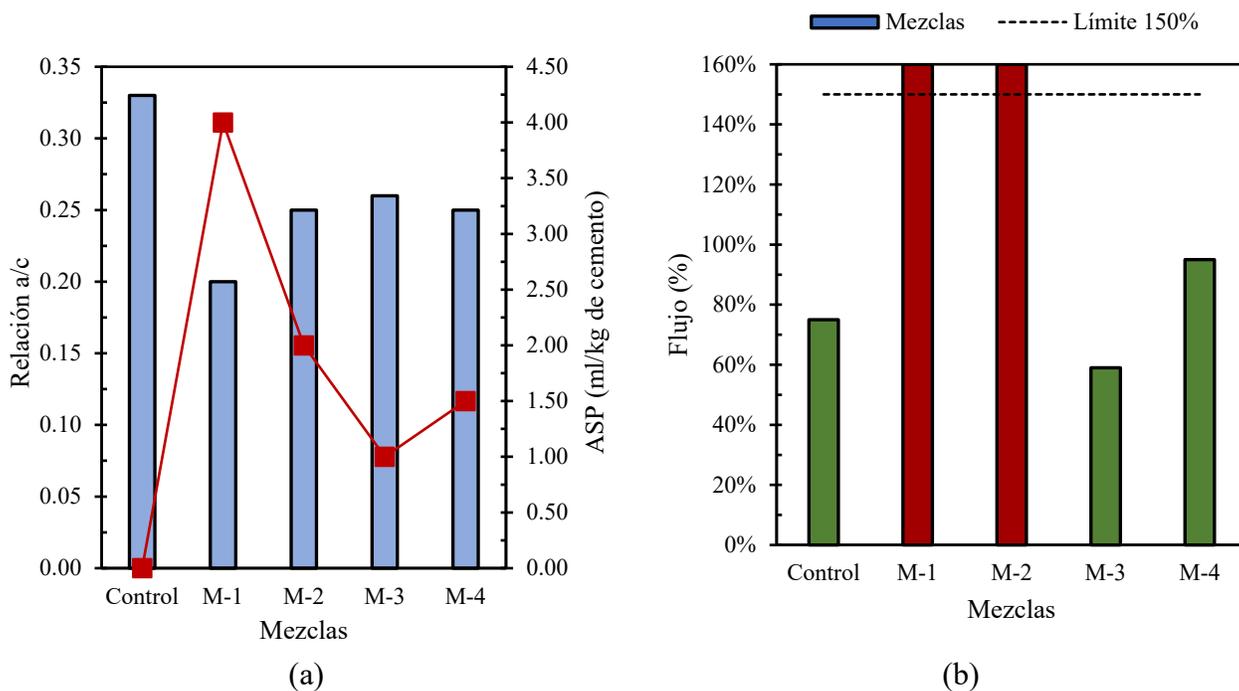


Fig. 17 (a) Mezclas de tanteos con a/c y ASP, (b) Fluidéz de las mezclas de tanteo

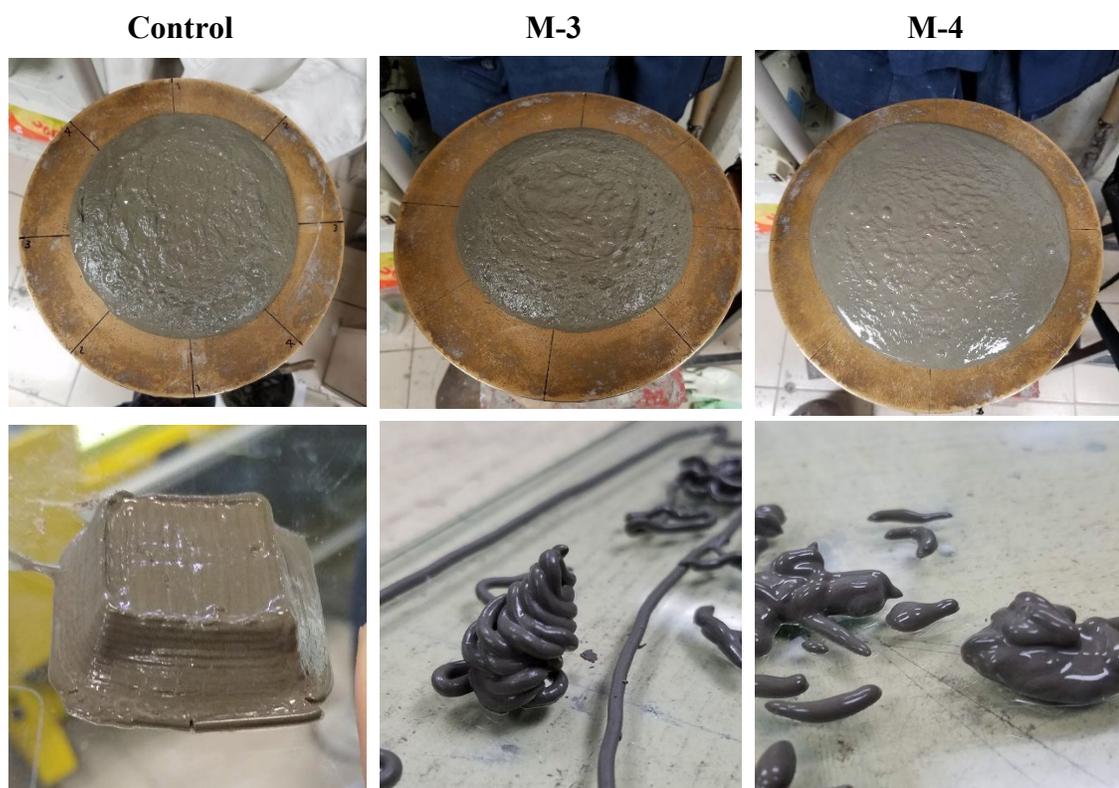


Fig. 18. Fluidéz y extrusión con jeringa e 30 ml.

4.4.2 Calafateadora

La calafateadora posee un gatillo que amplifica la fuerza de la mano, pero, por otro lado, el área del émbolo es significativamente mayor que el área del émbolo de una jeringa. Esto significa que, para bombear una mezcla desde la jeringa, se requiere aplicar la misma presión, es decir, más fuerza. Se intentó extruir la mezcla M-3 en la calafateadora, pero la demanda de fuerza resultó ser mayor que la generada por el gatillo, lo que provocó que la mezcla quedara obstruida en la boquilla, como se ilustra en la Fig. 19a. Como resultado, fue imposible replicar la mezcla, y se optó por probar una mezcla con mayor contenido de agua. La mezcla C-1, con una relación a/c de 0.36, mostró buenos resultados en la

calafateadora y demostró ser fácilmente construible, como se puede apreciar en las Fig. 19b y Fig. 19c.

Se descubrió entonces que la mezcla Control ($a/c=0.33$) en la jeringa debería ser adecuada para lograr una mejor constructibilidad. Sin embargo, el problema del escurrimiento de la pasta durante la extrusión dificultó el proceso, lo que significa que el producto impreso contenía más agua de la prevista originalmente. Esto resultó en modificaciones y una menor estabilidad, además de una disminución de la tixotropía. No obstante, la calafateadora también presenta obstrucciones después de un cierto tiempo de uso. De manera similar a la jeringa, también experimenta escurrimiento de agua, pero debido a las mayores dimensiones de su boquilla y la disminución menos abrupta entre el diámetro inicial y final de la boquilla, este proceso ocurre de manera más lenta y permite extruir mayores volúmenes de mezcla. Para abordar estos problemas, se propuso el uso de una extrusora con tornillo sinfín horizontal, la cual realiza un corte en la mezcla y debería reducir la separación entre la parte sólida y la parte líquida.

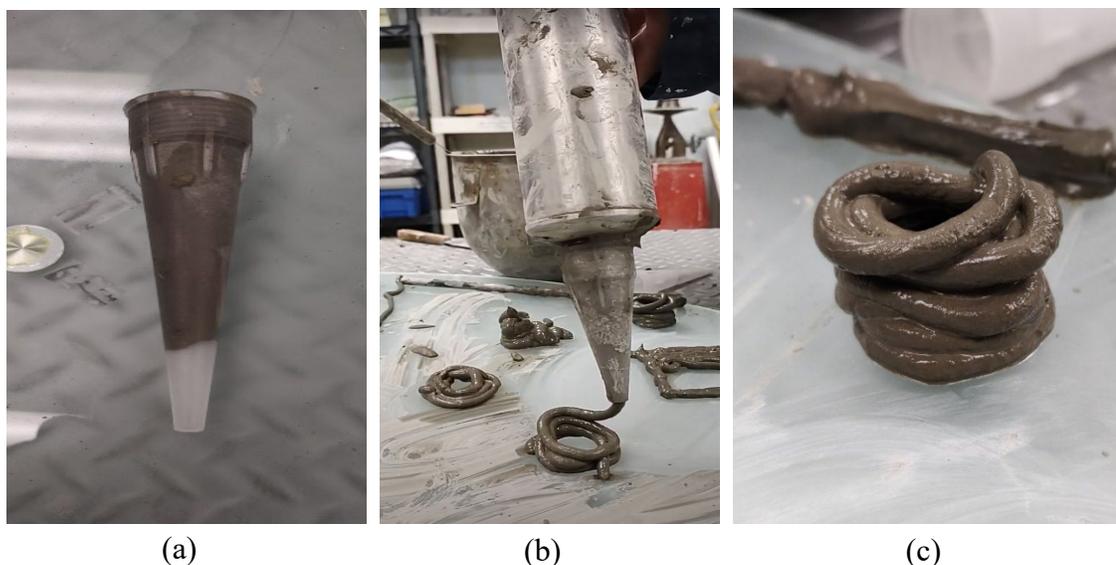


Fig. 19 (a) M-1 obstruyendo la boquilla, (b) Extrusión con calafateadora de acero, (c) Filamentos extruidos y cilindro con constructibilidad

En los productos impresos con la calafateadora, se observan agrietamientos y una gran fragilidad, es decir, se rompen con facilidad (ver Fig. 20). Estos problemas son evidentes desde que los productos están en estado fresco, ya que la superficie presenta irregularidades y el filamento es poco homogéneo. A medida que se secan, estas debilidades se vuelven aún más evidentes. Esto resalta la necesidad de utilizar fibras de basalto (FB) para producir un filamento de mejor calidad. Las FB modifican la viscosidad y cohesión de la mezcla, también reducen los agrietamientos desde la etapa de fraguado porque tienen la capacidad de absorber esfuerzos de tensión en la matriz cementante, contribuyendo así a la mejora de la resistencia y durabilidad del producto final. Para abordar estas posibles soluciones, las mezclas reforzadas se probaron en la extrusora con tornillo sinfín horizontal.



Fig. 20 (a) Filamentos de calafateadora frescos, (b) Filamentos secos.

4.5 Extrusión con Tornillo Helicoidal

4.5.1 Extrusora de tornillo horizontal (ETH)

En la extrusora utilizada se puso a prueba la pasta T-1, la cual contenía fibras de basalto (FB). Con esta mejora en la mezcla, se lograron obtener filamentos de mejor calidad, es decir, más uniformes, estables y con una mejor textura, y se eliminaron los agrietamientos (ver Fig. 21a). Las FB contribuyeron significativamente al rendimiento de la pasta. Respecto al sistema de extrusión, este presenta ciertas deficiencias; aunque el material en el centro se extruye, existe una zona muerta en las paredes de la tolva donde no hay flujo, lo que impide que el material descienda y sea extruido al exterior (ver Fig. 21b y c). Algunas posibles causas de estas deficiencias son las siguientes:

Viscosidad desigual: La viscosidad de la mezcla de pasta de cemento puede no ser uniforme en todo el volumen de la extrusora. Si la mezcla es más viscosa en el centro y menos viscosa en las paredes, el tornillo Arquímedes puede bombear el material en el centro con mayor facilidad, dejando que el material en las paredes se acumule.

Falta de agitación: Hace falta una herramienta de agitación para lograr una extrusión adecuada en materiales similares al concreto, por ejemplo, fluidos pseudo-plásticos no newtonianos con un comportamiento típico de adelgazamiento por cizallamiento. La agitación contribuye a la capacidad de bombeo de los materiales cementosos al reducir el esfuerzo cortante efectivo debido a la disminución de la fricción de las partículas internas.

Diseño del tornillo: El diseño del tornillo Arquímedes y su geometría pueden influir en la acumulación de material en las paredes. Un diseño inapropiado puede no

distribuir el material de manera uniforme, lo que puede causar la acumulación en las paredes.

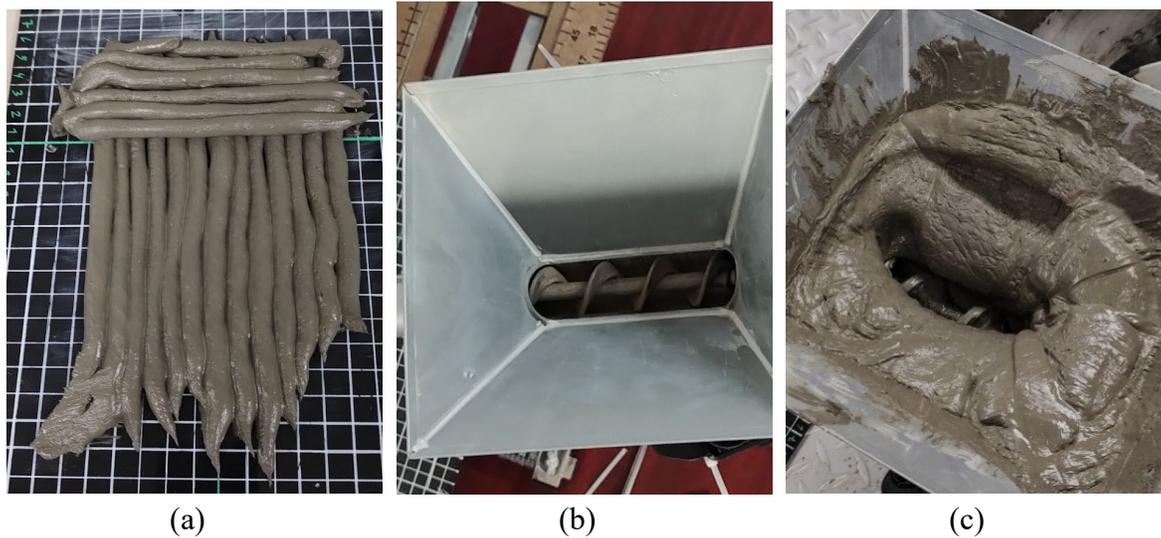


Fig. 21 (a) Filamentos impresos, (b) ETH sin material, (c) ETH con centro vacío y mezcla pegada en las paredes de la tolva

4.5.2 Extrusora de tornillo vertical (ETV)

La Fig. 22 muestra el diseño, montaje y pruebas de extrusión con el Tornillo Helicoidal en Vertical (THV). El uso de una jeringa con un tornillo sin fin para extruir la pasta de cemento con agua introduce una dinámica diferente en el comportamiento de la mezcla, comparada con la simple aplicación de presión en una jeringa convencional. En una jeringa con embolo sucede taponamiento, en contraste, en este sistema de tornillo parte del material queda adherido al tornillo, esto podría deberse a los siguientes motivos:

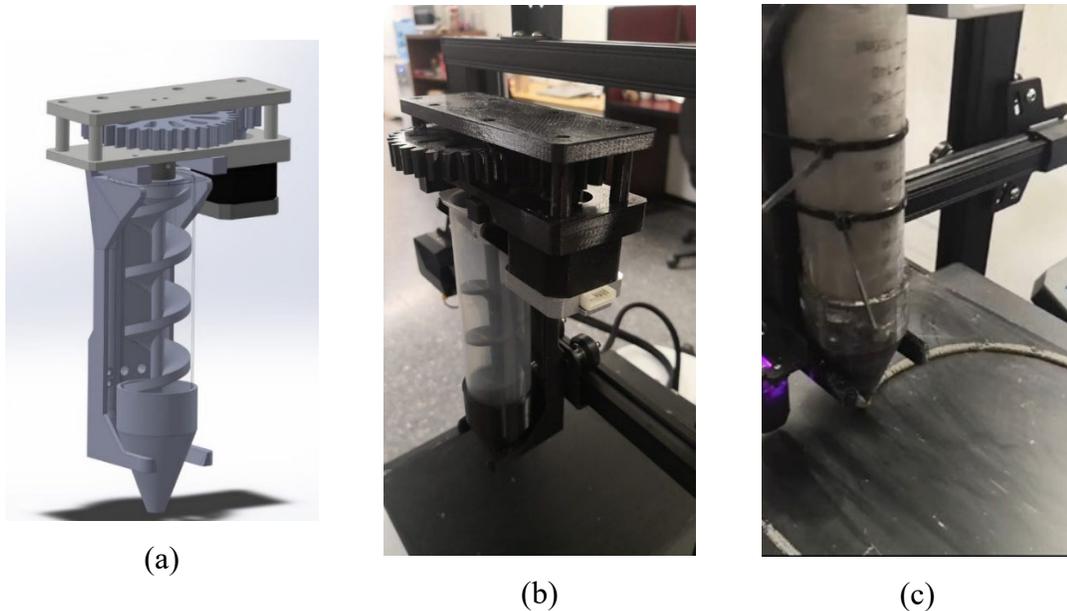


Fig. 22. (a) Diseño de extrusor, (b) Extrusor Construido, (c) Prueba de Impresión 3D

1. Tornillo sin Fin (Extrusión por Tornillo): El tornillo sin fin actúa no solo como un medio de aplicar presión, sino también como un mecanismo de transporte y mezcla continua. A medida que el tornillo gira, mueve la pasta hacia adelante, creando un flujo constante y homogéneo.

2. Prevención del Taponamiento: La acción del tornillo sin fin mantiene las partículas de cemento en movimiento constante y evita que se sedimenten y se compacten en un punto. Este movimiento continuo impide la formación de un tapón sólido en la jeringa, ya que las partículas no tienen la oportunidad de asentarse y bloquear el flujo.

3. Fenómeno de Adhesión y Rotación: Aunque el tornillo sin fin previene el taponamiento, introduce otro fenómeno: la adherencia del material al eje del tornillo. Las partículas de cemento y la pasta en general tienen propiedades adhesivas, especialmente cuando están en una mezcla densa y viscosa. Parte de la pasta tiende a adherirse a las superficies del tornillo y gira con él en lugar de ser empujada hacia la salida.

4. Viscosidad y Fricción: La viscosidad de la pasta de cemento contribuye a que una capa de material se adhiera al tornillo debido a la fricción entre el cemento y la superficie del tornillo. Este material adherido gira junto con el tornillo sin ser expulsado efectivamente.

5. Geometría del Tornillo y la Jeringa: La forma y el diseño del tornillo, junto con la geometría interna de la jeringa, afectan la eficiencia del transporte de la pasta. Si hay espacios donde la mezcla puede acumularse sin ser impulsada adecuadamente hacia la salida, es probable que se adhiera y permanezca en el sistema.

En resumen, el tornillo sin fin evita el taponamiento al mantener las partículas en movimiento constante, pero parte de la pasta de cemento se adhiere al tornillo y gira con él debido a la viscosidad y las propiedades adhesivas del material, así como a la fricción entre el tornillo y la pasta.

4.6 Comparación de los métodos de extrusión

La reología de la pasta de cemento en las jeringas mencionadas afecta directamente su comportamiento durante la extrusión. Aquí se analizan los diferentes aspectos reológicos que influyen en los fenómenos observados:

4.6.1 Jeringa Simple con Émbolo

1. Sedimentación y Compactación:

- Esfuerzo de Cedencia: La pasta de cemento tiene un esfuerzo de cedencia que debe superarse para que el material fluya. Sin un mecanismo para mantener las partículas en movimiento, estas tienden a sedimentarse y compactarse en el fondo, aumentando la viscosidad y formando un tapón.

- Separación de Fases: La separación de agua y partículas sólidas ocurre porque la presión aplicada separa el agua de las partículas que se compactan, impidiendo un flujo uniforme.

4.6.2 Jeringa con Tornillo sin Fin

2. Movimiento Constante:

- Reducción de Sedimentación: El tornillo sin fin mantiene las partículas en movimiento continuo, reduciendo la posibilidad de sedimentación y compactación, lo que evita el taponamiento.
- Adherencia al Tornillo: A pesar de evitar el taponamiento, la viscosidad y las propiedades adhesivas de la pasta hacen que parte del material se adhiera al tornillo y gire con él en lugar de ser extruido completamente.

4.6.3 Cilindro con Tornillo sin Fin y Tolva de Alimentación

3. Mejora en el Flujo:

- Constancia del Flujo: La combinación de un tornillo sin fin y una tolva mejora la constancia del flujo al mantener el material en movimiento y alimentando continuamente al tornillo.
- Adherencia en la Tolva: La adherencia del material a las paredes de la tolva está relacionada con el esfuerzo de cedencia. La falta de agitación suficiente en la tolva hace que el material permanezca adherido hasta que se aplique agitación manual para superar este esfuerzo y reiniciar el flujo.

4.6.4 Reología en las Jeringas

1. Viscosidad y Comportamiento Tixotrópico:

- La pasta de cemento puede exhibir comportamiento tixotrópico, donde su viscosidad disminuye bajo agitación o movimiento constante (como el proporcionado por el tornillo sin fin), y aumenta cuando está en reposo (como en la tolva).

2. Esfuerzo de Cedencia:

- En cada sistema, superar el esfuerzo de cedencia es crucial para mantener el flujo. El tornillo sin fin ayuda a mantener el material en movimiento, superando el esfuerzo de cedencia de manera continua.

3. Interacción Partícula-Fluido:

Las partículas de cemento interactúan con el agua y entre sí, afectando la reología global de la pasta. La presencia de partículas sólidas aumenta la viscosidad y requiere un esfuerzo adicional para mantener el flujo uniforme.

En resumen: En la jeringa simple, el esfuerzo de cedencia y la sedimentación de partículas conducen al taponamiento y separación de fases. El uso del tornillo sin fin en la jeringa mejora el flujo al mantener las partículas en movimiento constante, pero la viscosidad y adhesividad de la pasta resultan en material adherido al tornillo. En el cilindro con tolva y tornillo sin fin, el flujo es más constante, pero el esfuerzo de cedencia causa adherencia en las paredes de la tolva, requiriendo agitación manual para reiniciar el flujo. Estos comportamientos reológicos explican las diferencias observadas en cada configuración.

4.7 Impresora 3D de Laboratorio

4.7.1 Sistema de bombeo

Se utilizó como sistema de bombeo de Tornillo sinfín horizontal, agregando al sistema una manguera y un motor de pasos Nema 23, esta configuración se presenta en la Fig. 23. Este sistema sumado a una agitación manual para evitar que el material quede adherido a las paredes fue exitoso.

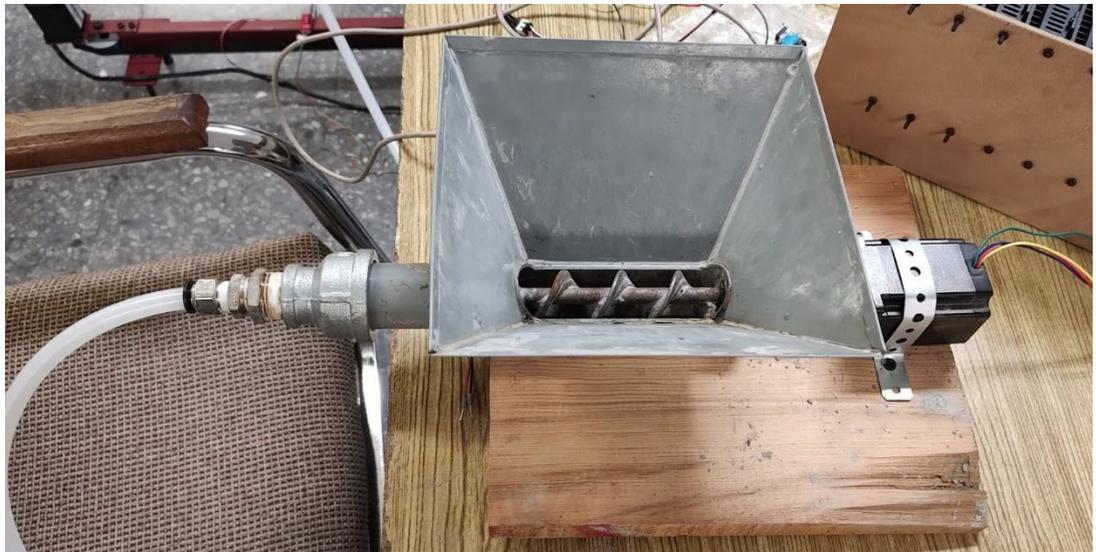


Fig. 23 Bomba de Tornillo helicoidal horizontal

4.7.2 Relevancia en el Fenómeno Observado

El esfuerzo de cedencia estático es la cantidad mínima de tensión que debe aplicarse a un material para que comience a fluir. En términos reológicos, es una propiedad que describe la resistencia inicial de un material a la deformación bajo una carga aplicada.

1. Adherencia a las Paredes de la Tolva:

- **Naturaleza del Material:** La pasta de cemento con agua es un material viscoplástico, lo que significa que tiene un esfuerzo de cedencia estático. Cuando el material está en reposo en la tolva, la tensión en las paredes de la tolva puede no ser suficiente para superar este esfuerzo de cedencia.
- **Adhesión:** Las partículas de cemento y el agua forman una mezcla cohesiva que tiende a adherirse a las superficies, especialmente cuando no hay suficiente flujo o agitación para mantenerlas en movimiento.

2. Flujo Constante con el Tornillo sin Fin:

- **Agitación y Movimiento:** El tornillo sin fin ayuda a mantener el material en movimiento constante, reduciendo la formación de zonas de material adherido dentro del cilindro.
- **Flujo Continuo:** Este movimiento continuo facilita un flujo más constante y menos interrumpido, ya que el material se mantiene por encima de su esfuerzo de cedencia debido a la agitación mecánica del tornillo.

3. Agitación Manual en la Tolva:

- **Necesidad de Superar el Esfuerzo de Cedencia:** En la tolva, sin la acción del tornillo, el material puede quedar adherido a las paredes porque la fuerza gravitacional y cualquier leve vibración no son suficientes para superar el esfuerzo de cedencia estático.
- **Agitación Manual:** Al agitar manualmente, se aplica fuerza suficiente para superar el esfuerzo de cedencia, haciendo que el material fluya nuevamente hacia el tornillo sin fin y continúe el proceso de extrusión.

En resumen: El esfuerzo de cedencia estático del material explica por qué la pasta de cemento se adhiere a las paredes de la tolva y requiere agitación manual. Este esfuerzo es la resistencia inicial del material al flujo. Sin suficiente agitación o fuerza para superar este esfuerzo, el material permanece adherido y no fluye de manera constante. El tornillo sin fin mantiene el material en movimiento constante dentro del cilindro, ayudando a superar el esfuerzo de cedencia y permitiendo un flujo continuo y estable.

4.7.3 Impresión 3D

Utilizando la impresora 3D diseñada y construida en el laboratorio, como se muestra en la Fig. 24, se pusieron a prueba el sistema de bombeo y las tintas descritas en las secciones anteriores. La impresora está equipada con dos rieles para el eje Y y un marco móvil que incorpora el eje X en sus elementos horizontales y el eje Z en sus elementos verticales.

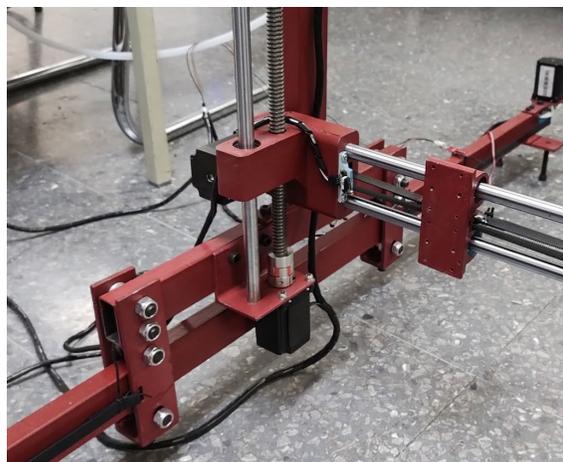


Fig. 24 Impresora 3D de 1x1x1 m³ construida en el laboratorio

Como se muestra en la Fig. 25, se realizaron impresiones en 3D de elementos de pasta de cemento con geometría rectangular y sin relleno central. Las impresiones constaron de diez capas, variando los grosores de capa para determinar la configuración óptima. Según se observa en la Fig. 26, se determinó que un grosor de capa de 5 mm era satisfactorio, manteniendo una buena precisión en el filamento y una adecuada edificabilidad. Además, como se indica en la Fig. 27, las capas iniciales no fueron aplastadas, lo que sugiere que la tinta presentó un rendimiento reológico adecuado.

La variación en el grosor de las capas se llevó a cabo para investigar su impacto en la estabilidad estructural y la calidad de la impresión. El grosor de 5 mm proporcionó un balance ideal entre estabilidad y precisión, lo que sugiere que este parámetro es crucial para optimizar el proceso de impresión en 3D con pasta de cemento. Además, la buena edificabilidad y la precisión del filamento son indicativos de una reología adecuada de la tinta, esencial para mantener la integridad estructural de las impresiones y evitar deformaciones en las capas iniciales.

La elección de diez capas permitió evaluar la consistencia del material y la repetibilidad del proceso de impresión. Esta configuración también ayudó a asegurar que las propiedades mecánicas del material impreso se mantuvieran uniformes a lo largo de toda la estructura. En resumen, los resultados obtenidos subrayan la importancia de un control preciso del grosor de las capas y de las propiedades reológicas de la tinta para lograr impresiones de alta calidad en aplicaciones de construcción con cemento impreso en 3D.



Fig. 25 Elementos de Impresión 3D a diferentes grosores de capa



Fig. 26 Elemento impreso con grosor de capa de 5 mm



Fig. 27 Estabilidad de capas (Edificabilidad)

4.8 Impacto del tiempo de sedimentación en las propiedades

reológicas de los materiales.

La Fig. 28 muestra la relación entre el torque y la velocidad de rotación de los materiales cementosos a diferentes tiempos de sedimentación. Durante el período de sedimentación que varía de 10 minutos a 100 minutos, se observa un rango de valores de viscosidad plástica de 10.1 Pa·s a 20.1 Pa·s. Además, los valores del límite elástico estático oscilan entre 367.1 Pa y 887.0 Pa, y los del límite elástico dinámico varían entre 186.8 Pa y 349.3 Pa.

El esfuerzo de fluencia estático se refiere a la fuerza mínima necesaria para que un material cementoso pase del estado de reposo al flujo, lo que indica su capacidad para mantenerse inmóvil. Por otro lado, el esfuerzo de fluencia dinámico se relaciona con la fuerza mínima requerida para mantener el flujo de materiales cementantes, lo que refleja la capacidad del material para mantenerse en movimiento. La viscosidad plástica se asocia con la capacidad del fluido para resistir la deformación por corte.

Los parámetros reológicos se calculan de acuerdo con la metodología del experimento reológico, como se muestra en la Fig. 29. Se observa que tanto el esfuerzo de fluencia como la viscosidad plástica de los materiales cementosos aumentan a medida que se prolonga el tiempo de sedimentación. Esto se debe al incremento en el grado de hidratación de los materiales cementosos recién mezclados con el paso del tiempo. La estructura de floculación del material se fortalece con el tiempo, lo que se traduce en un mayor límite elástico y viscosidad.

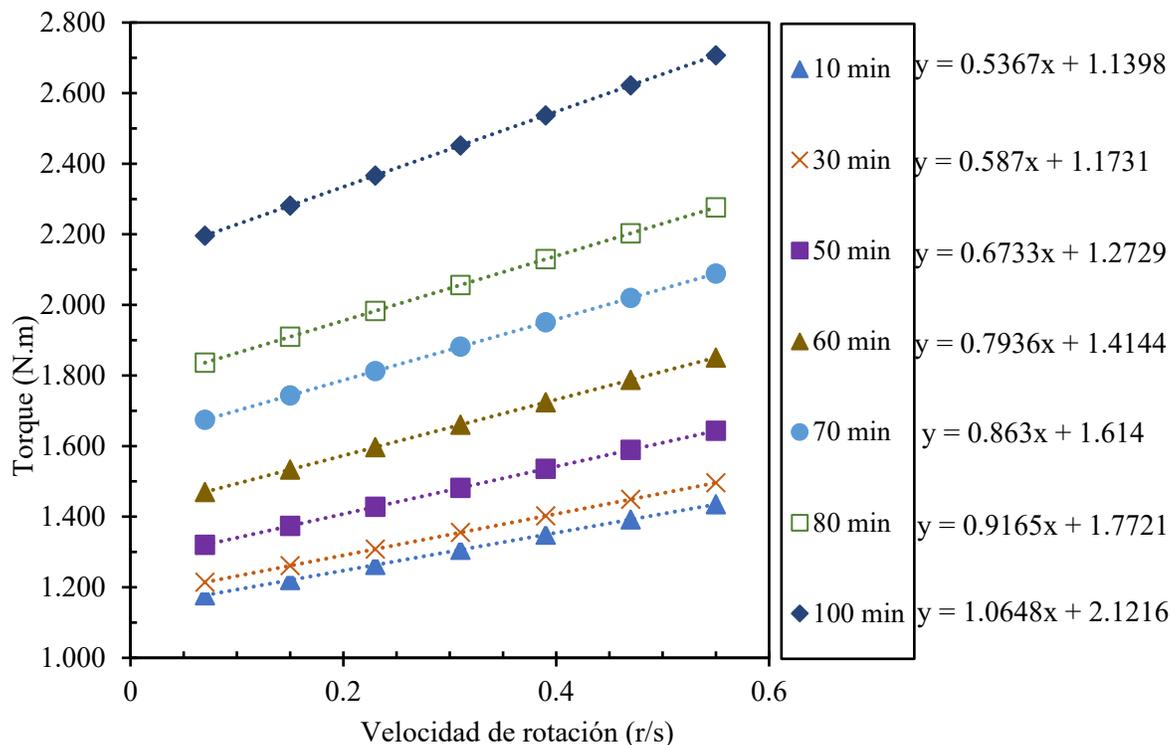


Fig. 28. Velocidad de rotación y torque de materiales cementantes en diferentes tiempos de asentamiento.

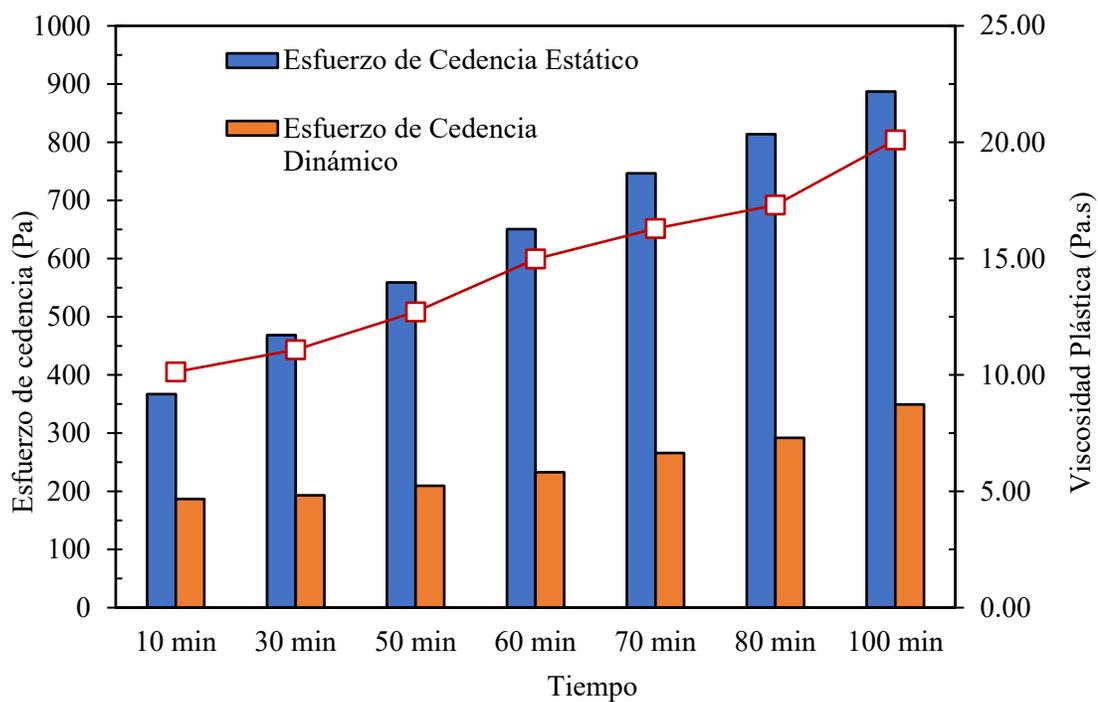


Fig. 29. Efecto del tiempo de sedimentación sobre las propiedades reológicas.

5 Conclusiones

1. En las proporciones de materiales, el a/c afecta el flujo de manera logarítmica, mientras que el contenido de arena s/c influye linealmente en el flujo. Por otro lado, la adición de fibra de basalto %FB disminuye la fluidez de manera cuadrática. Para lograr un flujo determinado, se requiere una cantidad específica de arena s/c, que varía según la presencia de fibra de basalto.
2. En la extrusión con jeringa, la variante M-3, demostraron ser la más adecuada para la extrusión de filamentos continuos con un esfuerzo de cedencia estático suficiente. Sin embargo, durante la extrusión con una jeringa, se observó un bloqueo debido a la acumulación de granos de cemento en la boquilla. Por lo tanto, es preferible utilizar una extrusora calafateadora como solución a esta dificultad, esto permite una extrusión más eficiente.
3. Se experimentó con diferentes mezclas y métodos de extrusión para mejorar la calidad de los productos impresos. A pesar de los esfuerzos, tanto la calafateadora como la jeringa presentaron desafíos significativos en términos de fuerza requerida y obstrucciones. Respecto a la calidad de impresión, los filamentos sin refuerzos presentaron agrietamientos y fragilidades.
4. Se descubrió que la introducción de fibras de basalto (FB) fue efectiva para mejorar la calidad y resistencia de los productos impresos, reduciendo los agrietamientos desde la etapa de fraguado. Estos resultados subrayan la

- importancia de considerar la elección de las mezclas y los métodos de extrusión al imprimir productos de cemento, así como la incorporación de fibras de basalto para mejorar la calidad y durabilidad del producto final.
5. Se encontró que el sistema de extrusión con tornillo sinfín en horizontal, presenta desafíos, como la acumulación de material en las paredes de la tolva, lo que impide que el material descienda y sea extruido al exterior. Estas deficiencias pueden ser atribuidas a la viscosidad desigual de la mezcla, la falta de agitación adecuada y el diseño del tornillo Arquímedes. La solución a estos problemas requerirá abordar estos aspectos del proceso de extrusión para lograr una mejora completa en la producción de filamentos de alta calidad.
 6. La falta de un raspador o una herramienta de agitación en la tolva al tratar de extruir materiales similares al hormigón o con un comportamiento pseudoplástico no newtoniano puede ocasionar problemas graves. Estos incluyen la segregación de partículas, bloqueos y obstrucciones en el equipo, falta de homogeneidad en la mezcla y una extrusión ineficiente que aumentaría los costos operativos y el desgaste del equipo. La agitación adecuada es esencial para mantener la consistencia y la calidad en el proceso de extrusión.
 7. En la reología, a medida que se prolonga el tiempo de sedimentación de 10 a 100 minutos, los valores de viscosidad plástica, límite elástico estático y límite elástico dinámico de los materiales cementosos aumentan, lo que está relacionado con un mayor grado de hidratación y el fortalecimiento de la estructura de floculación con el tiempo.

8. El aumento de la viscosidad plástica y del esfuerzo de cedencia estático con el tiempo se debe principalmente a la progresiva hidratación del cemento y la consiguiente formación de una estructura interna más rígida. Por otro lado, el esfuerzo de cedencia dinámico aumenta muy poco porque la estructura interna, una vez que comienza a fluir, no ofrece una resistencia significativamente mayor al flujo continuo. La presencia de microfibras de basalto contribuye a la cohesión y resistencia inicial, pero su impacto durante el flujo continuo es limitado.

6 Recomendaciones

1. Se necesita poner a prueba otros métodos de bombeo de la mezcla para impresión 3D, ya que el método de extrusión directa en un embolo o jeringa presenta segregación del material.
2. Se pondrá a prueba el método de bombeo por tornillo Arquímedes para producir un esfuerzo de corte en la mezcla y facilitar su bombeo y a la vez mantener sus propiedades tixotrópicas necesarias para facilitar la edificabilidad en la impresión 3D.
3. Poner a prueba otros aditivos como ser un modificador de la viscosidad para prevenir problemas de segregación.
4. Para el bombeo de mezclas con FB se requiere tamaño de boquillas mayores para no limitar demasiado la longitud de la fibra de basalto, ya que si la fibra es más larga que la boquilla de salida, se presentan problemas de obstrucción.

7 Bibliografía

- Algin, Z., & Ozen, M. (2018). The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 678-685.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.089>
- Amziane, S., & Ferraris, C. (2007). Cementitious paste setting using rheological and pressure measurements. *ACI Materials Journal*, 104, 137-145.
- Arunothayan, A., Nematollahi, B., Ranade, R., Bong, S. H., Sanjayan, J., & Khayat, K. (2021). Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. *Cement and Concrete Research*, 143, 106384.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106384>
- ASTM C150/C150M – 15. (2015). *Specification for Portland Cement*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-15
- ASTM C188 – 09. (2009). *Test Method for Density of Hydraulic Cement*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0188-09>
- ASTM C1437. (2020). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. <https://doi.org/10.1520/C1437-20>
- Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265-270.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.008>
- Bertelsen, I. M. G., Ottosen, L. M., & Fischer, G. (2020). Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 230, 116769.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>

- Bos, F. P., Bosco, E., & Salet, T. A. M. (2019). Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. *Virtual and Physical Prototyping*, *14*(2), 160-174. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1548069>
- Bos, F., Wolfs, R., Ahmed, Z., & Salet, T. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*, *11*(3), 209-225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., & Taylor, C. (2016). Influence of basalt fibres on free and restrained plastic shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, *74*, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.004>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, *112*, 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- Choi, Yun-Wang, Oh, Sung-Rok, Park, Man-Seok, & Choi, Byung-Keol. (2014). The Experimental Study on the Fluidity Properties of Mortar Using Basalt Fiber and High Volume Fly Ash. *Korean Recycled Construction Resources Institute*, *2*(4), 345-353. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2014.2.4.345>
- Dias, D. P., & Thaumaturgo, C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement and Concrete Composites*, *27*(1), 49-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.044>
- Ding, T., Xiao, J., Zou, S., & Zhou, X. (2020). Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Composite Structures*, *254*, 112808. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112808>

- García-León, R. A., Gómez-Camperos, J. A., & Jaramillo, H. Y. (2021). Scientometric Review of Trends on the Mechanical Properties of Additive Manufacturing and 3D Printing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 4724-4734. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05524-7>
- Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100, 102-109.
- Guler, S., & Akbulut, Z. F. (2023). The single and hybrid use of steel and basalt fibers on high-temperature resistance of sustainable ultra-high performance geopolymer cement mortars. *Structural Concrete*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/suco.202201026>
- Guo, Y., Hu, X., & Lv, J. (2019). Experimental study on the resistance of basalt fibre-reinforced concrete to chloride penetration. *Construction and Building Materials*, 223, 142-155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.211>
- Hager, I., Golonka, A., & Putanowicz, R. (2016). 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction? *Procedia Engineering*, 151, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
- Hambach, M., Rutzen, M., & Volkmer, D. (2019). Chapter 5—Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. En J. G. Sanjayan, A. Nazari, & B. Nematollahi (Eds.), *3D Concrete Printing Technology* (pp. 73-113). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00005-1>
- Hambach, M., & Volkmer, D. (2017). Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 79, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>

- Heras Murcia, D., Genedy, M., & Reda Taha, M. M. (2020). Examining the significance of infill printing pattern on the anisotropy of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 262, 120559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120559>
- Hyrel 3D Hydra 16A review—Professional PEEK 3D printer*. (s. f.). Aniwaa. Recuperado 1 de diciembre de 2021, de <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/hyrel-3d-hydra-16a/>
- Jianchao, Z., Zhang, T., Faried, M., & Wengang, C. (2017). 3D printing cement based ink, and it's application within the construction industry. *MATEC Web of Conferences*, 120, 02003. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712002003>
- Jiang, C., Fan, K., Wu, F., & Chen, D. (2014). Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fibre reinforced concrete. *Materials & Design*, 58, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.056>
- Jiang, C., Huang, S., Zhu, Y., Lin, Y., & Chen, D. (2016). Effect of Polypropylene and Basalt Fiber on the Behavior of Mortars for Repair Applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, e5927609. <https://doi.org/10.1155/2016/5927609>
- Jiang, C., McCarthy, T. J., Chen, D., & Dong, Q. Q. (2010). Influence of Basalt Fiber on Performance of Cement Mortar. *Key Engineering Materials*, 426-427, 93-96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.426-427.93>
- Jiang, S. P., Mutin, J. C., & Nonat, A. (1995). Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of the cement setting. I. The fundamental processes involved during the cement setting. *Cement and Concrete Research*, 25(4), 779-789. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00068-N](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00068-N)

- Kazemian, A., Yuan, X., Cochran, E., & Khoshnevis, B. (2017). Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, *145*, 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015>
- Khoshnevis, B., & Dutton, R. (1998). Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials. *Materials Technology*, *13*(2), 53-56. <https://doi.org/10.1080/10667857.1998.11752766>
- Kondraivendhan, B., & Bhattacharjee, B. (2010). Effect of age and water-cement ratio on size and dispersion of pores in ordinary portland cement paste. *ACI Materials Journal*, *107*(2), 147.
- Kristombu Baduge, S., Navaratnam, S., Abu-Zidan, Y., McCormack, T., Nguyen, K., Mendis, P., Zhang, G., & Aye, L. (2021). Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods. *Structures*, *29*, 1597-1609. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.061>
- Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüter, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, *72*, 347-366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, *45*(8), 1221-1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>

- Lee, J. J., Song, J., & Kim, H. (2014). Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution. *Fibers and Polymers*, 15(11), 2329-2334. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-2329-7>
- Li, Y.-F., Hung, J.-Y., Syu, J.-Y., Chang, S.-M., & Kuo, W.-S. (2022). Influence of sizing of basalt fiber on the mechanical behavior of basalt fiber reinforced concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.09.045>
- Li, Z., Shen, A., Zeng, G., Chen, Z., & Guo, Y. (2022). Research progress on properties of basalt fiber-reinforced cement concrete. *Materials Today Communications*, 33, 104824. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104824>
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Liu, X., Ye, G., De Schutter, G., Yuan, Y., & Taerwe, L. (2008). On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research*, 487-499. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.11.010>
- Lloret, E., Shahab, A. R., Linus, M., Flatt, R. J., Gramazio, F., Kohler, M., & Langenberg, S. (2015). Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.011>

- Ma, G., Li, Z., Wang, L., & Bai, G. (2019). Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing. *Materials Letters*, 235, 144-147. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.159>
- Ma, G., Li, Z., Wang, L., Wang, F., & Sanjayan, J. (2019). Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*, 202, 770-783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.008>
- Ma, G., & Wang, L. (2018). A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 12(3), 382-400. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0430-x>
- Ma, L., Zhang, Q., Lombois-Burger, H., Jia, Z., Zhang, Z., Niu, G., & Zhang, Y. (2022). Pore structure, internal relative humidity, and fiber orientation of 3D printed concrete with polypropylene fiber and their relation with shrinkage. *Journal of Building Engineering*, 61, 105250. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105250>
- Mao, J., Liang, N., Liu, X., Zhong, Z., & Zhou, C. (2023). Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests. *Journal of Building Engineering*, 106155. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106155>
- Nematollahi, B., Vijay, P., Sanjayan, J., Nazari, A., Xia, M., Naidu Nerella, V., & Mechtcherine, V. (2018). Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction. *Materials*, 11(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/ma11122352>

- Niu, D., Huang, D., & Fu, Q. (2019). Experimental investigation on compressive strength and chloride permeability of fiber-reinforced concrete with basalt-polypropylene fibers. *Advances in Structural Engineering*, 22(10), 2278-2288. <https://doi.org/10.1177/1369433219837387>
- NMX-C414-ONNCEE-2004. (2009). *Industria de la Construcción—Cementos Hidráulicos—Especificaciones y Métodos de Prueba*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- Paglia, C., Wombacher, F., & Böhni, H. (2001). The influence of alkali-free and alkaline shotcrete accelerators within cement systems: I. Characterization of the setting behavior. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 913-918. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00509-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00509-9)
- Panda, B., Chandra Paul, S., & Jen Tan, M. (2017). Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters*, 209, 146-149. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>
- Perrot, A., Rangeard, D., & Pierre, A. (2016). Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures*, 49(4), 1213-1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
- Pham, L., Tran, P., & Sanjayan, J. (2020). Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 250, 118785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118785>
- Rabinovich, F. N., Zueva, V. N., & Makeeva, L. V. (2001). Stability of Basalt Fibers in a Medium of Hydrating Cement. *Glass and Ceramics*, 58(11), 431-434. <https://doi.org/10.1023/A:1014930930475>

- Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1797-1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R. J., & Coussot, P. (2010). Steady state flow of cement suspensions: A micromechanical state of the art. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.026>
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S., & Brumaud, C. (2012). The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42(1), 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.004>
- Rushing, T. S., Al-Chaar, G., Eick, B. A., Burroughs, J., Shannon, J., Barna, L., & Case, M. (2017). Investigation of concrete mixtures for additive construction. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 74-80. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0124>
- Rybin, V. A., Utkin, A. V., & Baklanova, N. I. (2013). Alkali resistance, microstructural and mechanical performance of zirconia-coated basalt fibers. *Cement and Concrete Research*, 53, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.06.002>
- Sadrmomtazi, A., Tahmouresi, B., & Saradar, A. (2018). Effects of silica fume on mechanical strength and microstructure of basalt fiber reinforced cementitious composites (BFRCC). *Construction and Building Materials*, 162, 321-333. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.159>
- Shakor, P., Nejadi, S., & Paul, G. (2019). A Study into the Effect of Different Nozzles Shapes and Fibre-Reinforcement in 3D Printed Mortar. *Materials*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ma12101708>

- Sizing for Glass, Carbon and Natural Fibers*. (s. f.). Michelman. Recuperado 30 de marzo de 2023, de <https://www.michelman.com/markets/reinforced-plastic-composites/fiber-sizing/>
- Sun, X., Gao, Z., Cao, P., & Zhou, C. (2019). Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 202, 58-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018>
- Toutanji, H., McNeil, S., & Bayasi, Z. (1998). Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 961.
- Tran, M., Cu Thi, H. Y., Le, C., Ward, L., & District, T. (2021). Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 44, 103400. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103400>
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N., & Flatt, R. (2016). Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67-75. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.16>
- Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2010). Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment. *Materials & Design*, 31(9), 4244-4250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.009>
- Wei, B., Cao, H., & Song, S. (2011). Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater. *Corrosion Science*, 53(1), 426-431. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.053>

- Zapata-Padilla, J. R., Juárez-Alvarado, C. A., Durán-Herrera, A., Baltazar-Zamora, M. A., Terán-Torres, B. T., Vázquez-Leal, F. R., & Mendoza-Rangel, J. M. (2023). Portland Cement-Based Grouts Enhanced with Basalt Fibers for Post-Tensioned Concrete Duct Filling. *Materials*, *16*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/ma16072842>
- Zhang, K., Pan, L., Li, J., Lin, C., Cao, Y., Xu, N., & Pang, S. (2018). How adsorption behavior of polycarboxylate superplasticizer effect rheology and flowability of cement paste with polypropylene fiber? *Cement and Concrete Composites*, *95*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.003>