

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**“Evaluación Analítico-Experimental de la imprimibilidad de pastas de
Cemento Portland Gris de Alto Desempeño para Aplicaciones en
Impresión 3D “**

**Por:
FRANCISCO DAVID ANGUIANO PEREZ**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de DOCTOR EN INGENIERIA
con Orientación en Ciencia de Materiales**

**Director de Tesis:
DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL**

**Co-Director de Tesis:
DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ**

**Co-Director Externo:
DR. JOSÉ BONILLA CRUZ**

Abril 2025

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo
Página

1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	0
	CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	3
	2.1 Impresión 3D: Orígenes y avances con el uso de concreto	3
	2.2 Tecnologías de impresión 3D aplicables a tintas a base de Cemento Portland	5
	2.2.1 Impresión mediante depositación por extrusión	5
	2.2.2 Impresión 3D mediante fusión de lecho de polvo	8
	2.3 Limitaciones para la Impresión 3D de concreto	10
	2.3.1 Desarrollo de materiales adecuados	10
	2.3.2 Control de calidad	12
	2.3.3 Diseño y digitalización	14
	2.3.4 Escala y dimensionamiento de las estructuras	15
	2.4 Defectos en las estructuras impresas de concreto	19
	2.5 Especificaciones para el desempeño del concreto impreso – Retos y Perspectiva	23
	CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	27
	3.1 Propiedades reológicas de pastas de cemento portland	27
	3.2 Influencia de la composición de los materiales en la hidratación y estructuración de pastas de cemento portland	31
	3.3 Requisitos Reológicos de pastas de Cemento Portland para impresión 3D	34
	3.4 Relación entre las propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla para impresión 3D	38

CAPÍTULO 4: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	41
CAPÍTULO 5: JUSTIFICACIÓN	43
CAPÍTULO 6: HIPÓTESIS	45
CAPÍTULO 7: OBJETIVOS	46
7.1 Objetivo General	46
7.2 Objetivos Específicos	46
CAPÍTULO 8: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	47
8.1 Materiales y Caracterización	48
8.1.1 Cemento Portland	48
8.1.2 Agregado Fino	49
8.1.3 Aditivos Químicos	49
8.1.4 Reómetros	49
8.1.5 Impresora 3D	50
8.2 Pruebas de impresión para determinar una mezcla de referencia	51
8.3 Análisis del bloqueo en las unidades de impresión utilizadas	57
8.4 Evaluación de pastas de alto desempeño a base de cemento portland gris para modelación	59
CAPITULO 9: RESULTADOS Y DISCUSION	64
9.1 Materiales y Caracterización	64
9.2 Pruebas de impresión para determinar una mezcla de referencia	65
9.2.1 Pruebas de impresión cualitativas preliminares	66
9.2.2 Caracterización de la mezcla de referencia	69
9.3 Análisis del bloqueo en las unidades de impresión utilizadas	73
9.4 Resultados de fluidez y esfuerzo de cedencia	80
9.5 Modelación preliminar de fluidez y esfuerzo de cedencia	81
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES	91

CAPÍTULO 10	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	93
CAPÍTULO 11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Una tecnología que recientemente se ha implementado en la construcción con mezclas a base de cemento portland es la impresión 3D, con una serie de potenciales ventajas como son: reducción del consumo de materia prima, menor desperdicio de materiales, procesos automatizados, entre otros. Sin embargo, para que pueda ejecutarse correctamente, la mezcla a base de cemento portland debe tener ciertas características reológicas, obligando así a llevar un preciso y adecuado control de las propiedades de la mezcla a utilizarse [1-3].

El pretender aplicar concreto mediante impresión 3D implica poder tener un comportamiento físico-mecánico muy específico del material, equilibrando numerosas variables reológicas que a menudo están inversamente correlacionadas, lo cual dificulta la adopción de esta tecnología sin un cierto nivel de comprensión y capacidad de medición del comportamiento reológico del material, además que el rango de propiedades afín para poder realizar la impresión puede llegar a ser muy estrecho en algunos casos, en comparación con métodos de construcción convencionales, con el uso de encofrado y compactación del material. [1, 4] **Debido a lo anterior, el concreto, mortero o**

pastas adecuadas para impresión 3D, caben dentro de la categoría de mezclas de "alto desempeño" por el ACI, al ser una mezcla con "requisitos que no pueden conseguirse rutinariamente utilizando materiales convencionales y prácticas normales" [5].

En general, el concreto que se considere adecuado para la impresión 3D, tiene principalmente dos etapas en su producción con requisitos reológicos muy característicos; la primera, cuando el material es mezclado y transportado, mediante bombeo a través de la unidad de impresión, debiendo tener una fluidez adecuada para ser transportado sin segregación y eficientemente; y la segunda etapa, al ser colocado, extruido por la boquilla de impresión, debiendo presentar un esfuerzo de cedencia alto y un comportamiento tixotrópico para asegurar la estabilidad de forma, manteniendo una adherencia adecuada entre capas para evitar la formación de juntas frías [1,4]. Estos dos comportamientos tan distintos, vuelve necesario llegar a una comprensión más profunda de cómo se interrelacionan las propiedades que exhibe el material en ambas etapas, para poder realizar ajustes oportunamente a la mezcla y poder tener un producto impreso de calidad. En la actualidad, aunque se han producido con éxito diversas estructuras impresas de concreto, no se dispone de una base teórica sólida de principios para su adecuado diseño de mezcla, de manera que un diseño de mezcla exitoso para impresión 3D puede no serlo al cambiar los parámetros de impresión o alguna característica de los materiales que lo constituyen.

Para este proyecto será necesario primero realizar diseños de mezcla a base de cemento portland gris con características de alto desempeño y

potencial para aplicarse mediante impresión 3D [1,4], para posteriormente evaluar sus propiedades reológicas necesarias para su aplicación en impresión 3D, tales como la tixotropía, el esfuerzo de cedencia, así como su desarrollo a través del tiempo, y evaluar sus propiedades relativas a **pastas** impresas, tales como su constructibilidad, adherencia entre capas, estabilidad de forma, entre otras [1,4,6]. El objetivo del proyecto será establecer la relación que exista entre los parámetros en estado fresco de las **pastas** a base de cemento Portland de alto desempeño, y las propiedades necesarias para impresión 3D, para servir como una herramienta para el diseño de mezclas que permita mejorar la aplicabilidad de **pastas** a base de cemento Portland para impresión 3D.

CAPÍTULO 2:

ANTECEDENTES

2.1 Impresión 3D: Orígenes y avances con el uso de concreto

La impresión 3D (también denominada “Fabricación Aditiva”) es una técnica relativamente reciente de construcción automatizada, con la primera patente relacionada al proceso datando de 1986 para un “Aparato para producción de objetos tridimensionales por estereolitografía” a nombre de Chuck Hull [7]. Este método básicamente implica la fabricación de objetos mediante un equipo automatizado y siguiendo un modelo digital del objeto, y considerando que al proceso se le llama “Impresión”, es común que al material a imprimir se le denomine “tinta”. Aunque es una tecnología que inicialmente se manejaba con polímeros termoplásticos y metales, su uso en cerámicos, particularmente **pastas** de cemento portland, implica mayores dificultades de procesamiento debido a que estos materiales hacen una transición más lenta entre un estado líquido y un estado sólido, a medida que se desarrollan fenómenos físico-químicos en su interior [6].

La impresión 3D con concreto es una tecnología de construcción que potencialmente tiene muchas ventajas tales como: el uso de estructuras más eficientes económica y energéticamente, con menores emisiones y un mínimo de consumo de materia prima y de personal, incrementando la productividad y permitiendo una construcción totalmente automatizada y digitalizada [6]. En las últimas dos décadas se han desarrollado numerosos proyectos de edificaciones

con esta tecnología [8-12], entre los que se cuentan proyectos de vivienda de bajo costo, como se muestra en la **Figura 1** [8]; mientras que, en países más desarrollados con una mayor experiencia en el uso de esta tecnología, ya se han construido con éxito proyectos a gran escala a base de concreto impreso, incluso desarrollando geometrías complejas, como se muestra en la **Figura 2** [9]



Figura 1. Vivienda de concreto impreso en localidad rural en Tabasco, México, como parte de un vecindario de 50 viviendas. [8]



Figura 2. Elemento estructural de concreto impreso en Francia. [9]

2.2 Tecnologías de impresión 3D aplicables a tintas a base de Cemento Portland

Considerando que las tintas a base de cemento Portland tienen un fraguado distinto a los materiales metálicos y polímeros, se fueron diseñando distintas metodologías y procesos para imprimir mezclas a base de cemento Portland, a menudo aprovechando metodologías, procesos y maquinarias ya existentes, adaptándolas a la impresión de tintas a base de cemento Portland [6].

A medida que avanzan la tecnología y el estado del arte se van diseñando nuevos procesos y maquinarias para tener alguna ventaja competitiva en términos de calidad, productividad o costo con respecto a la diversa gama de tecnologías de impresión de tintas de cemento Portland, ya que las distintas tecnologías tienen diversas ventajas y limitaciones; a continuación, se mencionan algunos de los procesos más comunes para la impresión de mezclas de cemento Portland y sus características:

2.2.1 Impresión mediante deposición por extrusión

Este proceso de impresión es uno de los más comunes entre las compañías que llevan a cabo procesos de impresión 3D. En este proceso, el elemento se va construyendo verticalmente como una superposición de capas bidimensionales de la tinta extruida, siguiendo una trayectoria definida digitalmente el número de veces necesaria, ajustando la altura de la impresión a medida que las capas impresas se superponen. El material es bombeado desde una unidad de mezclado cercana a la impresora, y extruido desde una boquilla

montada en un brazo robótico. Típicamente suele incluirse una unidad de mezclado en la boquilla para darle homogeneidad al material impreso, así como una unidad para adicionar un agente que promueva la tixotropía, reduciendo la fluidez a la salida para prevenir colapsos [12]. Un esquema básico de este tipo de impresoras se muestra en la **Figura 3**, y un esquema más completo se detalla en la **Figura 4**.

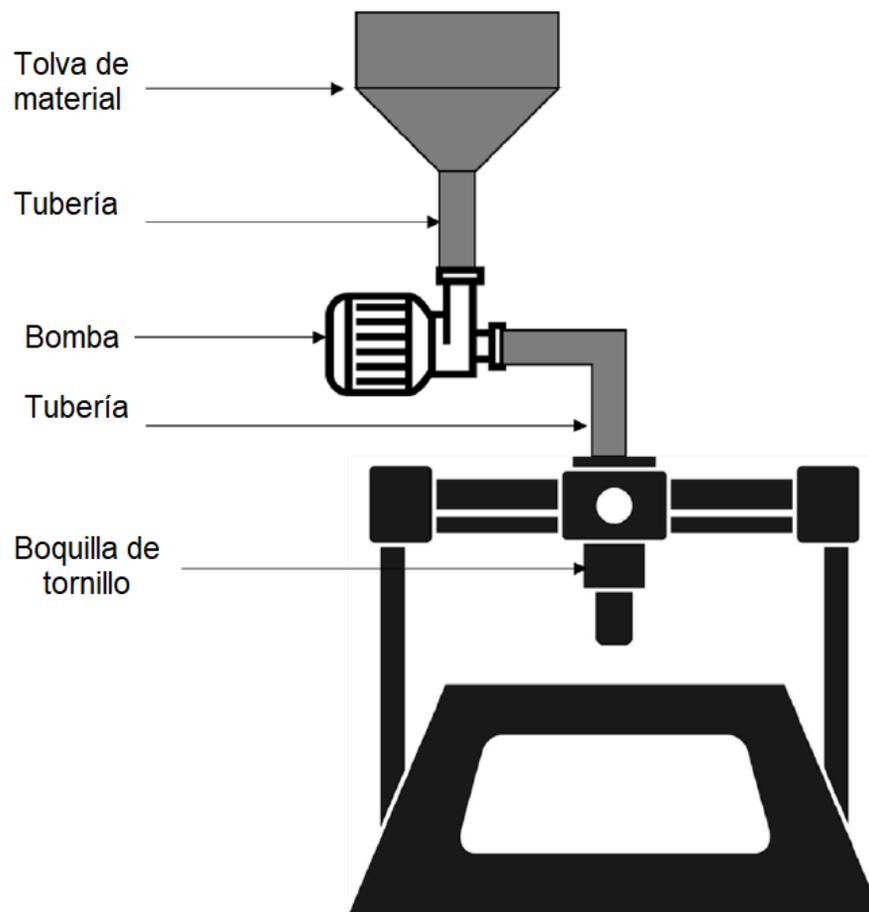


Figura 3. Esquema básico de una impresora para impresión 3D de tintas de cemento Portland mediante depositación por extrusión [13]

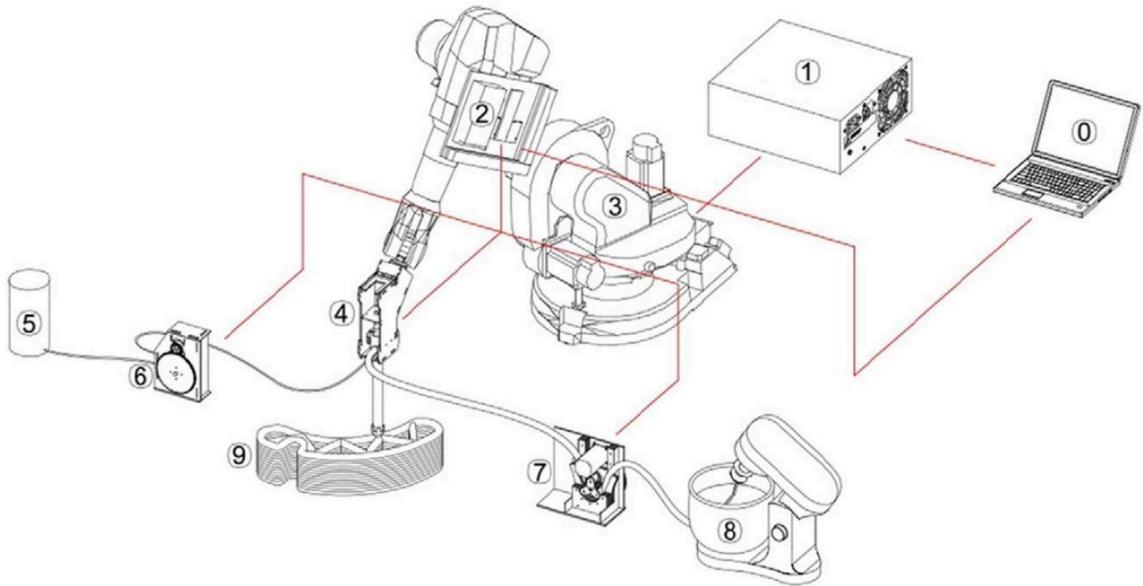


Figura 4. Diagrama esquemático del arreglo para impresión 3D por depositación de capas: 0. Comando del sistema; 1. Controlador del robot; 2. Controlador de la impresión; 3. Brazo robótico; 4. Cabezal de impresión; 5. Agente acelerante; 6. Bomba peristáltica para el agente acelerante; 7. Bomba peristáltica para el premezclado; 8. Revolvedora de premezclado; 9. Objeto impreso en 3D. [12]

Como se muestra en la **Figura 5**, este método es muy utilizado para la construcción de viviendas y elementos de infraestructura, particularmente en el caso de muros y columnas sin refuerzo, haciendo uso de piezas prefabricadas comúnmente para la losa de azotea, y los detalles de acabado tales como ventanas, puertas, instalaciones eléctricas y sanitarias [14]. De esta manera se aprovechan al máximo las ventajas de esta tecnología como son: eficiencia y rapidez en la construcción, reducción de desperdicios y emisiones, así como libertad en las geometrías y el diseño. Por otro lado, se minimizan los

problemas presentados por esta tecnología de construcción: la falta de la incorporación de refuerzo inmerso en el concreto, así como la calidad del acabado de las superficies por la falta de encofrado [4,5,13].



Figura 5. Vivienda de concreto impresa en Nueva York por SQ4D, de 1900 pies cuadrados de construcción. [14]

2.2.2 Impresión 3D mediante fusión de lecho de polvo

La metodología de impresión 3D mediante fusión de lecho de polvo (powder-bed fusión, en inglés) es un procedimiento de fabricación aditiva en el cual se coloca un sustrato granular, seco, en un molde, y de acuerdo con el modelo digital y al material con el cuál se está llevando a cabo la impresión, se le va aplicando selectivamente calor o algún fluido para llevar a cabo el proceso de cementación que constituirá la forma del elemento final. [15]

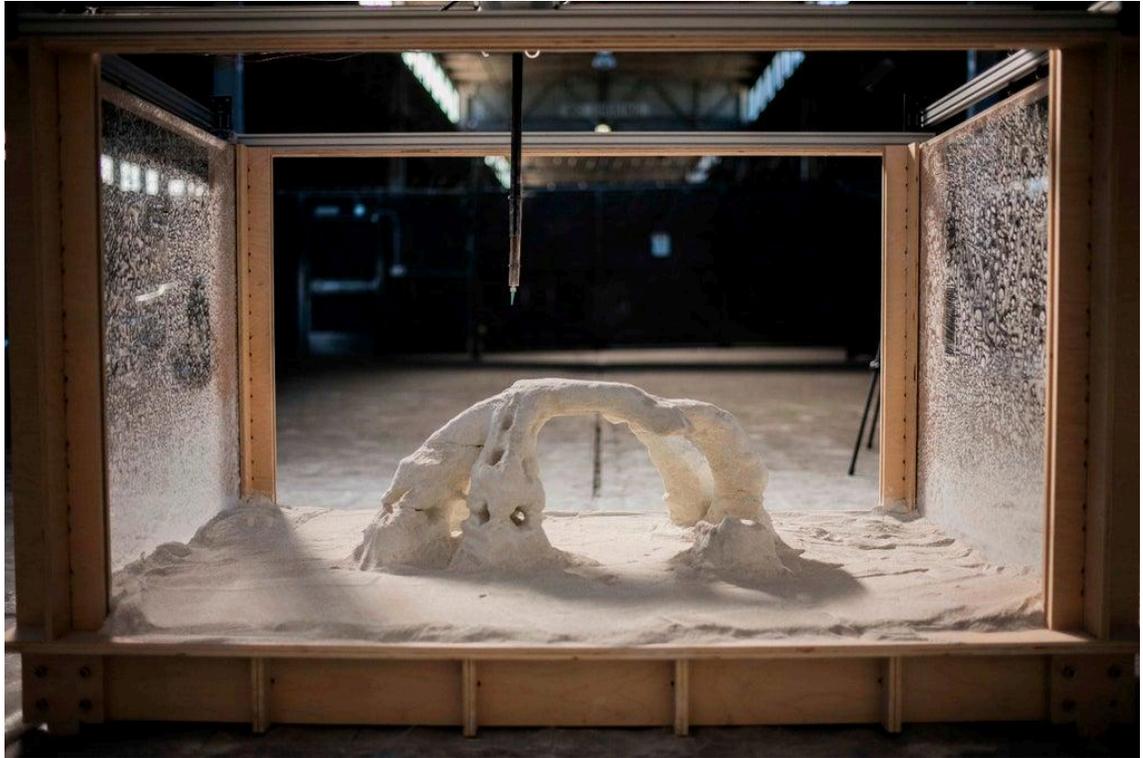


Figura 6. Escultura de concreto impresa en una cama de arena. [16]

Esta metodología se ha visto que es adecuada para la producción de pequeños especímenes, así como elementos constructivos, con una resistencia adecuada, libertad en su geometría y una precisión excelente en sus contornos y dimensiones finales. [17]

Además de las metodologías anteriormente mostradas, hay otras menos utilizadas que van surgiendo, con distintas limitantes, ventajas y campos de aplicación. Es importante mencionar que, por lo reciente de estos desarrollos, muchas de ellas no son de dominio público y constituyen información con protecciones de patente.

2.3 Limitaciones para la Impresión 3D de concreto

Si bien la impresión 3D es una tecnología muy prometedora, con un enorme potencial para revolucionar la construcción con concreto, que ha demostrado que es posible implementar innovaciones en el diseño de las geometrías, así como lograr reducir los costos y emisiones, incluso en proyectos de gran escala, conlleva varios puntos a considerar que es necesario tomar en cuenta ya que limita su aplicación más con respecto a otros métodos de construcción con concreto, algunos de los cuales se mencionan a continuación:

2.3.1 Desarrollo de materiales adecuados

Hay una gran cantidad de puntos a considerar en el diseño de mezclas a base de cemento, con el fin de reducir el riesgo de presentar problemas en la impresión. Otros puntos a tomar en cuenta en este sentido son los siguientes:

- **Materiales cementantes:** suele optarse por cementos de fraguado rápido para reducir defectos en los productos impresos, sin embargo, diversas investigaciones [4,18,19] han impreso con éxito suspensiones que incluyen cementantes suplementarios, los cuales se ha observado que mejoran la extrudabilidad de las tintas, además de que en el caso particular del metacaolín y cenizas vegetales, por su geometría de partícula, son cementantes suplementarios que promueven la tixotropía de la mezcla. [1,3,19]

- **Aditivos:** debido a la capacidad de los aditivos de modificar las propiedades de las mezclas de concreto su uso es indispensable para el uso de esta tecnología. Los que suelen utilizarse para impresión 3D son: reductor de agua, para incrementar la resistencia de la mezcla y evitar bloqueos; los retardantes/acelerantes: para ajustar el tiempo de fraguado según sea necesario; reductor de contracción, para evitar retracciones excesivas que impliquen defectos y fisuraciones en el producto impreso; así como modificadores de viscosidad, para hacer ajustes a la viscosidad y evitar fallas en la geometría del producto impreso [20].
- **Agregados:** como en otros concretos con requerimientos reológicos específicos (concreto lanzado, autocompactable, bombeable), el uso de agregados se ve reducido, tanto en cantidad como en tamaño máximo que puede imprimirse, ya que, aunque el agregado aumenta el esfuerzo de cedencia de la suspensión, depende de tener suficiente pasta, y de una viscosidad adecuada, para poder transportar a los agregados durante todo el proceso, ya sea durante el bombeo o la impresión [1,4].
- **Fibras:** si bien se han utilizado fibras como una alternativa de mitigar el problema de la falta de refuerzo en estos elementos, es importante considerar que no son tan eficientes como los elementos de acero de refuerzo. Otro punto para tomar en cuenta

es que las fibras no tengan un tamaño tal que provoque problemas durante la impresión y bombeo a través de la unidad de impresión [2,21].

2.3.2 Control de calidad

Asegurar la calidad de los materiales de construcción es fundamental, sin embargo, en el caso de la impresión 3D de concreto, es importante destacar que los procesos de impresión son distintos a los métodos normalizados para concreto producido por otros medios, por lo que es necesario hacer adecuaciones a los métodos de prueba que nos permitan determinar el desempeño y propiedades en condiciones lo más similares a la realidad.

En lo que respecta al control de calidad, es importante hacer adecuaciones a las normas existentes para realizar pruebas en un material que no lleva una compactación por vibrado, no se encuentra en un encofrado, y que tiene una marcada anisotropía en sus propiedades dependiendo del sentido de aplicación de la carga.

En base a estudios previos, se puede destacar las siguientes consideraciones con respecto a las pruebas de control de calidad para el concreto que pretenda colocarse mediante impresión 3D [4,5,13,22-25]:

- Las pruebas generalmente más utilizadas para evaluar la fluidez son la mesa de fluidez y la prueba de mini-revenimiento, donde se ha observado que un factor clave para determinar la reología y fluidez es el tamaño de partícula del concreto.

- Para definir y medir la extrudabilidad, no existe un procedimiento estándar, y muchas veces se hace mediante una evaluación cualitativa, como la capacidad de desplazar la mezcla a través de diversas boquillas, considerándose como una extrudabilidad inadecuada cuando el material no fluye o se presentan bloqueos o taponamientos.
- Para evaluar la constructibilidad, suelen utilizarse enfoques directos, midiendo la deformación de las capas impresas y con factores de forma; e indirectos, midiendo la cantidad de capas que pueden apilarse, el tiempo crítico para apilar más capas o mediante el desarrollo de tixotropía.
- Suele hablarse del tiempo de trabajabilidad (“open-time”, en inglés), el cual suele definirse como el tiempo después del mezclado de la pasta durante el cual puede ser impresa con calidad. Además de las características de la mezcla, este tiempo depende del tipo de impresora y boquillas que se usen, ya que pueden favorecer la estructuración de la matriz, o aplicar esfuerzos de corte que impidan la estructuración hasta la extrusión.
- Las estructuras impresas presentan una notoria anisotropía debido a la depositación por capas utilizada para imprimir. Por lo tanto, debe evaluarse la resistencia del elemento impreso en distintos sentidos, como se muestra en la **Figura 7**, además que debe monitorearse que haya una buena adherencia entre capas. Se ha mostrado que tiempos mayores entre la impresión de capas

sucesivas conlleva a una menor adherencia y menor resistencia del elemento impreso.

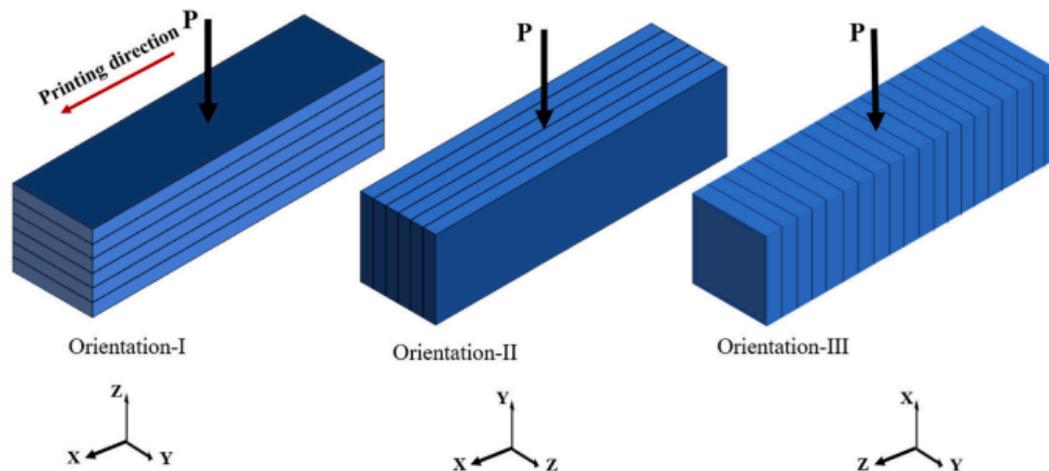


Figura 7. Ejemplo de tres distintas direcciones de aplicación de carga para ensayos a flexión en elementos impresos [13].

2.3.3 Diseño y digitalización

La implementación de la impresión 3D para la construcción con concreto implica ser capaz de llevar a cabo los diseños del elemento digitalmente, considerando la trayectoria de impresión para una calidad adecuada del elemento. Además, suele ser necesario un software especializado para realizar los modelos digitales tridimensionales a imprimir, lo que viene a cambiar ciertos paradigmas en las compañías que lo han implementado, cambiando la estructura de sus costos y el diseño de su organización para adaptarse a el uso de esta nueva tecnología. [5,26]

Otro punto para considerar es la logística durante el avance de la obra, ya que características como acabados, azoteas, o la cimentación de la estructura

no suelen hacerse mediante impresión 3D, por lo que es necesario tenerlo presente para incorporarlos a la estructura de manera oportuna.

2.3.4 Escala y dimensionamiento de las estructuras

La impresión 3D de concreto ha demostrado ser efectiva para estructuras de escala reducida, tales como viviendas unifamiliares, elementos prefabricados, almacenes, aulas, teniendo un ideal campo de aplicación en la impresión de vivienda de interés social, permitiendo ofrecer una alternativa de bajo costo, con características de sostenibilidad y durabilidad.

Sin embargo, el imprimir estructuras a gran escala o edificios multiniveles sigue siendo un desafío, debido entre otros a que la impresora suele estar montada en marcos fijos, lo que limita el tamaño de las estructuras a imprimirse, además que se vuelve complicado monitorear la calidad del producto impreso sin alterarlo a alturas más elevadas.

A pesar de lo anterior, la impresión 3D de concreto se encuentra en un constante desarrollo, y continuamente, en diversas partes del mundo, las escasas compañías que se dedican a la impresión 3D de edificaciones se encuentran constantemente superándose, como ejemplo, en la **Figura 8**, se muestra la estructura con el actual Récord Guinness de la “Mayor villa impresa en 3D”, en Dubai, Emiratos Árabes Unidos, el 22 de Septiembre de 2023, con 4 metros de altura y 375 m² de área, realizada por el grupo 3DXB, la municipalidad de Dubai y el Mohammed Bin Rashid Housing Establishment (MBRHE) [27, 28]. En la impresión de este elemento se utilizaron materiales

locales, y se incluyeron capas aislantes y características para asegurar la conservación de energía. Asimismo, cabe destacar que para este proyecto se utilizó una innovadora impresora 3D, la MaxiPrinter, que se muestra en la **Figura 9**, una impresora móvil compacta de brazo robótico diseñada para construcción en sitio, producida por Constructions 3D, una empresa manufacturera de impresoras 3D, alimentada por un sistema de bombeo automatizado. Puede ser operada por una sola persona y su armado toma únicamente alrededor de 15 minutos. [29]



Figura 8. El récord Guinness de la “Mayor villa impresa en 3D”, impresa en Emiratos Árabes Unidos en 2023 [27]



Figura 9. La impresora 3D MaxiPrinter, producida por Construccions 3D, móvil y compacta [29]

Es importante además destacar, que la Municipalidad de Dubai, en los Emiratos Árabes Unidos, se ha comprometido, mediante el decreto No. 24 de 2021, a regular el uso de la tecnología de impresión 3D en la ciudad, con la meta para 2030, de contar con al menos 25% de todas las edificaciones nuevas elaboradas utilizando tecnología de impresión 3D [30].

Además, en diversas partes del mundo se han llevado a cabo diversos proyectos exitosos de impresión 3D de materiales a base de cemento Portland, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- El Puente Striatu: elaborado en Venecia, Italia, por el Block Research Group (BRG) en ETH Zurich y el Grupo de Computación

y Diseño de Zaha Hadid Architects (ZHACODE) con tinta proveída por Holcim, elaborado sin refuerzo, aplicando el principio del arco en puentes de mampostería mediante un diseño computacional inteligente, como se muestra en la **Figura 10.a** [31]

- El proyecto Milestone: llevándose cabo en Eindhoven, Países Bajos, desde 2020, consiste en la construcción de cinco casas consecutivas impresas en 3D, con elementos en su diseño que ilustren el desarrollo continuo de la tecnología de impresión 3D y la arquitectura. Con la primera vivienda concluida en 2021, se espera que las cuatro restantes estén disponibles al mercado para mediados de 2025. La primera de estas viviendas, de una planta, con una superficie de 94 m², incluyendo características sustentables como materiales aislantes, se muestra en la **Figura 10.b** [32, 33].
- Viviendas residenciales: elaboradas por ICON, en Wimberley, Texas, EUA, en 2024, consisten en viviendas unifamiliares de 2900 a 4100 pies cuadrados (aproximadamente 270 a 380 m²), cuentan con características de alto desempeño térmico y eficiencia energética, materiales sustentables con bajas emisiones, y probadas para resistir velocidades de vientos hasta de 250 mph. En la **Figura 10.c** se muestra una de estas viviendas, que ya se encuentran a la venta. [34]
- El puente Zhaozhou: impreso en 2019 en la Hebei University of Technology en la Provincia Hebei, China. Impreso en módulos, sin

refuerzo, con una longitud total de 28.15 metros y un claro de 17.94 metros, actualmente mantiene desde Julio de 2020 el Récord Guinness al “Puente Impreso en 3D de Mayor Longitud”. En la **Figura 10.d** se muestra el puente, que atraviesa el río Jiaohei. [35,36]



Figura 10. Diversos proyectos impresos de concreto a gran escala: a) El puente Striatus, en Italia [31]; b) Una vivienda del Proyecto Milestone, en Países Bajos [32]; c) Una vivienda residencial en EUA [34] y d) El puente Zhaozhou, en China [35]

2.4 Defectos en las estructuras impresas de concreto

La impresión 3D de concreto puede presentar varios defectos en el material impreso que pueden afectar la calidad y la integridad de los elementos. Algunos de los defectos comunes más comunes se muestran en la **Tabla 1**, y se describen a continuación:

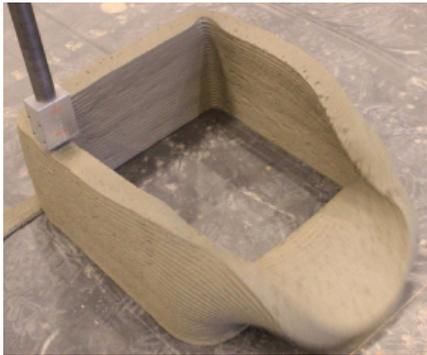
- **Acabado superficial deficiente:** Las diferencias en la viscosidad y la fluidez del concreto pueden causar variaciones en la extrusión durante la impresión. Independientemente de características estéticas, como una

distinta textura o coloración, esto puede resultar en capas con un espesor desigual o una falta de adherencia entre las capas, lo que debilita la estructura.

- **Fisuras y grietas:** Las fisuras y grietas pueden aparecer debido a la contracción por secado del concreto mientras se endurece o a la falta de cohesión entre las capas impresas. Estos defectos pueden comprometer la resistencia y la durabilidad de la estructura.
- **Falta de precisión en los detalles:** La precisión de los detalles arquitectónicos y geométricos puede ser un desafío en la impresión 3D de concreto. Pequeños defectos o inexactitudes pueden afectar la estética y la funcionalidad de los elementos impresos. Para reducir este riesgo es necesario comprender la reología de la tinta a imprimir, y controlar el tamaño máximo de partícula de esta.
- **Fallas locales o generales:** El elemento impreso puede llegar a fallar si no ha desarrollado la resistencia suficiente cuando se imprime; comúnmente se pueden definir dos tipos de falla, una falla plástica como un colapso de las capas recién impresas, o un escurrimiento de las mismas; y una falla elástica por pandeo, que suele presentarse cuando las capas inferiores ceden al peso de capas subsecuentes. Para evitar esto es necesario definir las capas que pueden apilarse y el tiempo para imprimir capas subsecuentes, evitando demorarlo demasiado como para presentar problemas de adherencia.
- **Bloqueos en las unidades de impresión:** A medida que el cemento se extruye, la capa de lubricación que facilita el flujo del material puede

agotarse, lo que provoca un aumento en el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica del material restante, resultando en la incapacidad del sistema para mantener una extrusión constante. Este fenómeno no solo detiene el proceso de impresión, sino que también puede alterar la calidad de la mezcla y la uniformidad del producto final, dado que la mezcla dentro de la boquilla se vuelve progresivamente más seca y difícil de manejar

Tabla 1. Defectos en los elementos de concretos impresos



Falla elástica por pandeo [37]



Falla plástica de colapso [37]



Bloqueo en la boquilla [13]



Grietas en la estructura [13]



Inestabilidad de capas impresas
[13]



Poros entre capas impresas [38]

Es importante destacar que muchos de estos defectos pueden mitigarse o eliminarse mediante el desarrollo de técnicas de impresión más avanzadas, el

uso de materiales de mejor calidad y la optimización de los procesos de construcción. Con el avance continuo de la tecnología, se espera que estos defectos se minimicen y se logren resultados cada vez más precisos y confiables en la impresión 3D de concreto.

2.5 Especificaciones para el desempeño del concreto impreso – Retos y Perspectiva

A pesar de que existen numerosas especificaciones y métodos de prueba, y de que se han hecho con éxito diversas estructuras impresas a base de cemento portland, no existe aún un conjunto de normas o especificaciones respecto al producto, que especifiquen su calidad, composición o desempeño, debido en parte a lo reciente de la tecnología, a la gran diversidad de métodos y técnicas para realizar la impresión, y a lo complejo del estudio de la transición entre estado fluido y sólido del material.

El proceso de normalización suele tomar varios años y requiere que diversos agentes involucrados (industria, agencias gubernamentales, investigadores) coordinen esfuerzos y colaboren con información para poder desarrollar los estándares que delimiten la calidad del producto y sus métodos de prueba. Actualmente, a menudo suele evaluarse al concreto impreso con pruebas diseñadas para concreto colocado convencionalmente, con desviaciones a las normas según se considere, pero al no haber especificaciones al respecto estas evaluaciones no pueden servir como un criterio de aceptación del producto, y el decidir implementar o contratar una

tecnología de impresión 3D con concreto puede verse limitado por la incertidumbre asociada a la calidad del producto. [39]

Recientemente, diversas agencias de normalización han iniciado grupos de trabajo enfocados al desarrollo de estándares para la evaluación y control del concreto impreso, como es el caso del International Building Code, que a cargo del International Code Council, desarrolló la especificación AC 509 para muros de concreto impresos, que aunque no marca requisitos respecto a los materiales o sus propiedades en estado fresco, marca ciertos requisitos en estado endurecido, como una resistencia mínima a la compresión de 2500 psi (17.2 MPa) a los 28 días, requisitos de durabilidad a ciclos de hielo/deshielo, cambios de volumen, y la determinación del tiempo de extrusión, con el fin de brindar confianza y certidumbre al desempeño de las estructuras impresas. [40]

En 2016, la American Society for the Testing of Materials (ASTM) y la International Organization for Standardization (ISO), mediante sus comités ASTM F42 e ISO TC261 desarrollaron un marco para el desarrollo de estándares relacionados a la impresión 3D, denominado “Additive Manufacturing Standards Development Structure”. A la fecha, han desarrollado alrededor de 13 estándares enfocados a la impresión de materiales metálicos y hay subcomités enfocados al desarrollo de estándares para la impresión 3D con concreto. [41]

A pesar de ser un tema aún muy complejo, hay ciertas variables y consideraciones que han sido reportados por otros autores, sin embargo, aún no existe como tal un consenso internacional en la forma de códigos o

normativas que guíen y orienten el diseño de tintas para impresión 3D a base de cemento Portland. Las características deseables de las tintas a base de cemento Portland se sintetizan en la **Tabla 2**, producto de la revisión bibliográfica de estudios previos. [1,4,6,22,26]

Tabla 2. Recomendaciones sobre requisitos reológico-físicos de las mezclas de cemento Portland para impresión 3D. [1,4,6,22,26]

Requisito de Impresión	Parámetros a controlar para la impresión	Recomendaciones sobre requisitos reológico-físicos
Bombeabilidad / extrudabilidad	Esfuerzo de cedencia Viscosidad plástica	<ul style="list-style-type: none"> Esfuerzo de cedencia entre 0.3 – 0.9 kPa, ó fluidez en morteros mínima de 192.5 mm Viscosidad plástica menor al máximo imprimible dependiendo del equipo de extrusión
Adherencia entre capas / Juntas frías	<i>Tixotropía</i> A_{thix}	<ul style="list-style-type: none"> Mantener el tiempo máximo entre capas impresas menor a un T_{max}, definido por: $T_{max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh_0)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h_0}\right)^2}}{A_{thix}}$
Estabilidad de capas individuales basadas en resistencia	Espesor de la capa h_0	<ul style="list-style-type: none"> El esfuerzo de cedencia inicial mayor que ρgh_0
Estabilidad colectiva de capas basadas en resistencia	Altura total H	<ul style="list-style-type: none"> El esfuerzo de cedencia en la capa inferior debe mantenerse mayor a $\rho gh_0 / \sqrt{3}$
Control de geometría de capas individuales	Espesor de la capa h_0	<ul style="list-style-type: none"> Módulo elástico de corte inicial mayor que $\rho gh_0 / \gamma_{tol}$ donde γ_{tol} es la deformación tolerable de la capa
Control de geometría colectiva	Altura total H	<ul style="list-style-type: none"> Mantener la deformación longitudinal y transversal en la capa inferior menor a la deformación crítica que cause una falla.

Falla por pandeo colectiva	Altura total H Ancho de capa δ	<ul style="list-style-type: none"> • El módulo elástico de Young en la capa inferior debe permanecer mayor a $3\rho gH^3/2\delta^2$
Agrietamiento plástico	Radio de curvatura y ancho de capa	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener un radio de curvatura mínimo, dependiendo del proceso de impresión y la geometría de las capas
Retracción por secado	Deformación máxima permisible	<ul style="list-style-type: none"> • Se consideran aceptables retracciones por secado de hasta 840×10^6 microdeformaciones

Aunque aún es algo limitado, el constante avance en la tecnología y digitalización a lo largo del mundo irá permitiendo una mayor adopción, así como mayor escala de proyectos impresos de concreto, como ya se ha visto en el ámbito de vivienda, infraestructura y comercial. Incluso, hay investigaciones que mencionan que la impresión 3D es una tecnología ideal para la edificación en entornos remotos, como pudieran ser hábitats extraterrestres (Marte o La Luna), aunque si bien reconocen que ello implicaría el desarrollo de tintas más especiales. [42,43]

CAPÍTULO 3:

MARCO TEÓRICO

3.1 Propiedades reológicas de **pastas** de cemento portland

A pesar de que históricamente hay numerosas pruebas al concreto en estado fresco para su caracterización y aceptación en obra, no es sino hasta alrededor de 1970 que los conceptos de reología comenzaron a aplicarse en la tecnología del concreto, con el desarrollo de reómetros para concreto que permitieran determinar parámetros como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad plástica mediante la medición directa del torque y la frecuencia rotacional de la mezcla [44].

Las **pastas** a base de cemento portland típicamente tienen un comportamiento reológico macroscópico como materiales viscoplásticos de Bingham, fluyendo al llegar a cierto esfuerzo, como se muestra en la **Figura 11** [45], con un comportamiento viscoso a determinadas tasas de corte [45-47], teniendo la siguiente ecuación constitutiva del modelo reológico de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante (Pa)

μ_p = Viscosidad plástica (Pa.s)

τ_0 = Esfuerzo de cedencia (Pa)

$\dot{\gamma}$ = Rapidez de deformación (s^{-1})

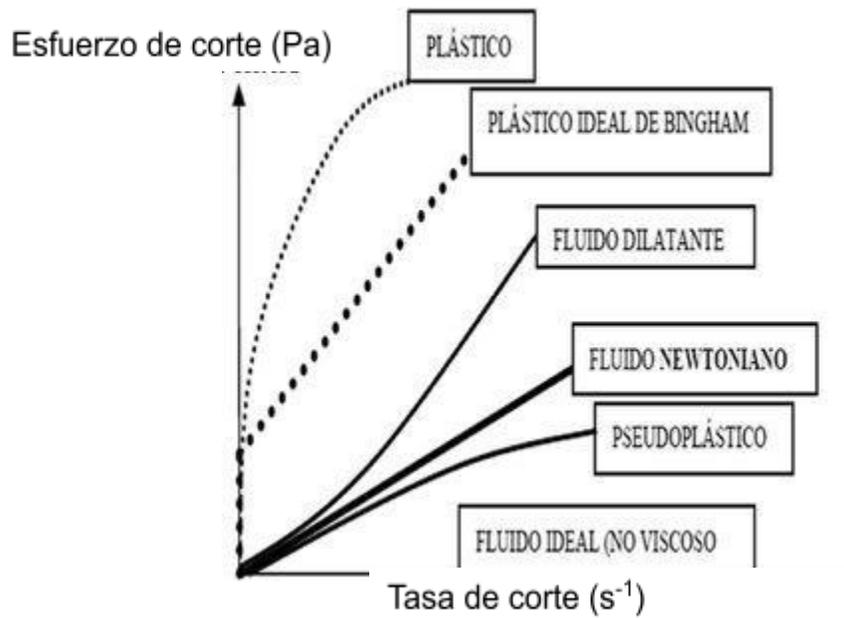


Figura 11. Algunos comportamientos reológicos típicos de fluidos al ser sometidos a esfuerzos de corte [45]

Los modelos reológicos tradicionales como el de Bingham, o el comportamiento de un fluido Newtoniano, implican una relación lineal entre la tasa de corte y el esfuerzo, lo cual, si bien es posible en algunos fluidos muy homogéneos y relativamente inertes, en el caso de mezclas a base de cemento Portland fresco, no es el caso, ya que a menudo se trabaja con suspensiones complejas, con una gran variedad de tamaños, así como interacciones continuas entre ellas que pueden facilitar o dificultar el flujo. Considerando lo anterior, a menudo es común que encontremos otros comportamientos reológicos no lineales en las suspensiones a base de cemento Portland, algunos de los cuales se muestran en la **Figura 12** [48]. De aquí es importante destacar comportamientos que pueden presentarse en suspensiones de cemento Portland, como el reoespesante, que puede presentarse en mezclas

de alto desempeño, ya que al tener mayores concentraciones de sólidos, éstos pueden aglomerarse con tasas altas de deformación del fluido, incrementando la viscosidad aparente del mismo; y el reodilatante, que puede presentarse en suspensiones con sólidos de geometría laminar, o con la presencia de agentes tixotrópicos, en los cuales, las aglomeraciones o microestructuraciones débiles pueden fallar al aumentar la tasa de corte, reduciendo la viscosidad aparente.

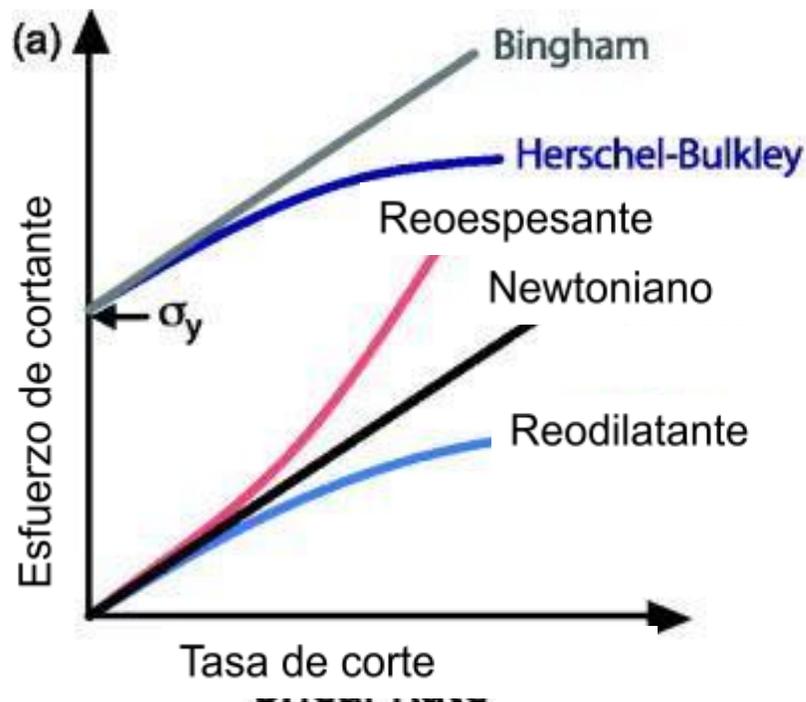


Figura 12. Diversos comportamientos reológicos de fluidos, incluyendo curvas de comportamientos no lineales. Adaptado de [48]

Como se puede observar en la **Figura 12**, existen fluidos que requieren que se exceda cierto esfuerzo para comenzar a fluir, este esfuerzo, ilustrado en la **Figura 12** con el símbolo de σ_y , es llamado el “esfuerzo de cedencia”. Este comportamiento es típico en fluidos a base de suspensiones, como las mezclas a base de Cemento Portland, ya que las partículas en reposo pueden formar

estructuras internas que es necesario colapsar para que el fluido pueda comenzar a deformarse. [49]

Como se muestra en la **Figura 13** [4], según su comportamiento a medida que se desarrollan las reacciones de hidratación en las suspensiones a base de cemento Portland es posible diferenciar cuatro fases principales:

- Al final de la **fase de mezcla**, las partículas de cemento se dispersan.
- **Fase de Floculación:** Debido a las fuerzas de atracción coloidales, las partículas de cemento se floculan y forman una red de partículas que interactúan y son capaces de resistir el esfuerzo (módulo elástico inicial G_0 y esfuerzo de cedencia inicial τ_{c0}). Esta floculación es resultado inmediato de la competencia entre fuerzas de atracción coloidales entre las partículas de cemento y la disipación viscosa en el agua intersticial.
- Simultáneamente, dentro de la red, la nucleación de los hidratos se lleva a cabo, aunque el material está todavía en el período de inactividad, aumentando el módulo elástico. Después de varias decenas de segundos, una trayectoria de **percolación** de partículas de cemento que interactúan puramente a través de puentes de hidratos aparece.
- **Fase de estructuración:** se muestra un mayor aumento del módulo elástico macroscópico y del esfuerzo de cedencia producto de un aumento del tamaño o número de puentes de hidratos (reacción irreversible) entre las partículas de cemento percoladas. Estos enlaces pueden ser lo suficientemente débiles para ser roto por remezclado mientras que los nuevos vínculos pueden espontáneamente aparecer de nuevo en reposo siempre que haya suficientes reservas de especies químicas.

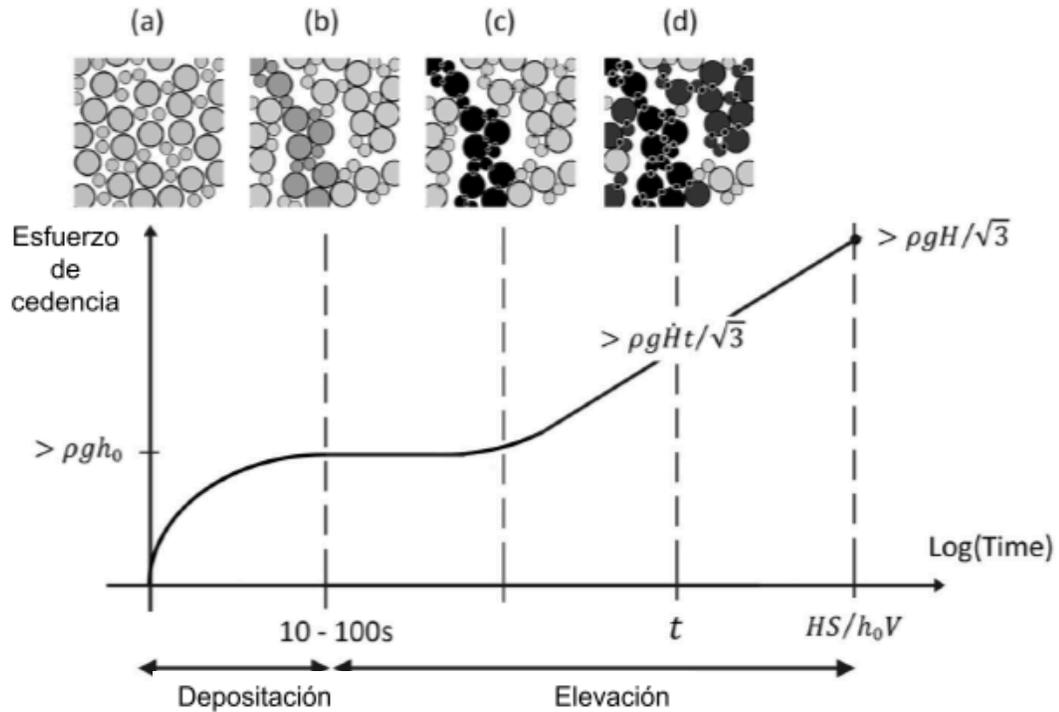


Figura 13. Red de partículas de cemento interactuando con la evolución del esfuerzo de cedencia y sus requisitos. h_0 es el espesor de la capa. H es la altura final del objeto. S es la longitud del contorno. V es la velocidad de la boquilla y ρ es la densidad del material. [4]

Comprender estas distintas etapas durante el fraguado de nuestro mortero nos puede ayudar a delimitar períodos o intervalos en los que podamos realizar ciertos procedimientos a nuestro material y tener el desempeño óptimo.

3.2 Influencia de la composición de los materiales en la hidratación y estructuración de **pastas** de cemento portland

El cemento Portland ordinario es un material compuesto por Clinker y una pequeña adición de sulfato de calcio (yeso) dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A su vez, el Clinker se compone de granos de silicato tricálcico (abreviado en la literatura como C_3S) y silicato dicálcico (abreviado como C_2S), inmersos en una fase intersticial compuesta de aluminato tricálcico (abreviado como C_3A) y aluminato tetracálcico (abreviado como C_4AF) [50].

Cómo se explicó en la sección 3.1, al hidratarse, las fases presentes llevan a cabo mecanismos de disolución y precipitación que terminan por generar la microestructura presente en el concreto, básicamente, los productos formados durante la hidratación consisten en un gel polimorfo de silicato de calcio hidratado como principal ligante (abreviado como C-S-H), fases cristalinas de hidróxido de calcio (conocido como portlandita y abreviada como CH), además de fases a base de sulfoaluminatos de calcio, de las cuales destaca la etringita [50].

Si deseamos estudiar a detalle cuándo se producen estas reacciones, y considerando que la reacción de hidratación del cemento es exotérmica, podemos utilizar el método de calorimetría isotérmica para estudiar la hidratación de una pasta de cemento en condiciones controladas, donde podríamos obtener una imagen cómo la que se muestra en la **Figura 14** [51]

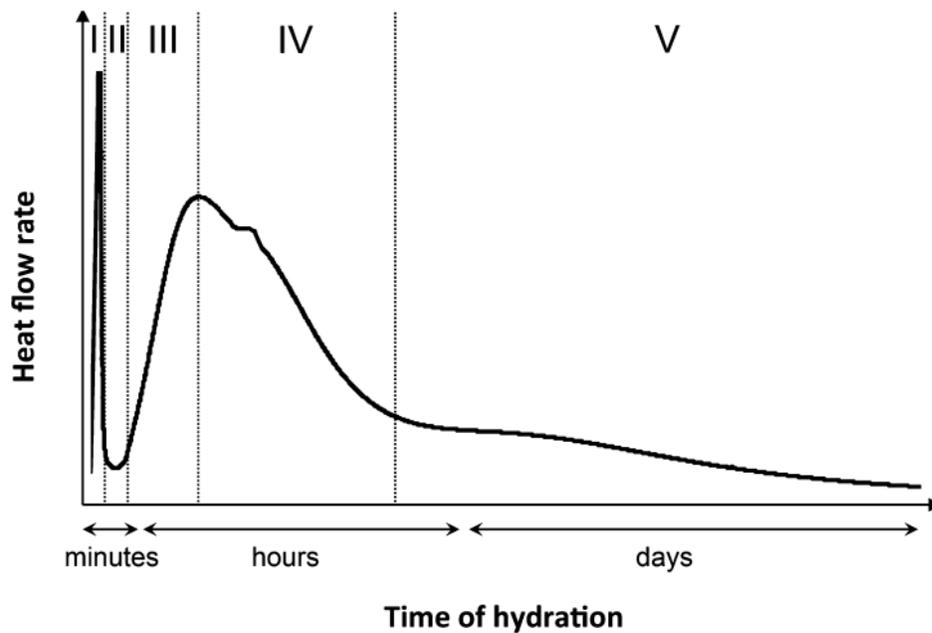


Figura 14. Representación esquemática de la liberación de calor y la ilustración de las diferentes etapas durante la hidratación de un cemento portland ordinario. [51]

De la **Figura 14**, podemos observar que se distinguen 5 áreas en la curva, con comportamientos que vienen explicados según los compuestos que están llevando a cabo la hidratación, de la siguiente forma [51]:

- En los primeros segundos después del contacto con el agua, durante la etapa I, hay un pico de calor debido al humedecimiento y disolución de la superficie de las partículas de cemento. Además, durante los primeros minutos, precipita la etringita a partir de la disolución del C_3S y los aluminatos, mayormente el C_3A .
- La etapa II es un período llamado durmiente o latente, durante el cual las reacciones se ralentizan momentáneamente y tenemos un período durante el cual el concreto es fluido y trabajable.
- Posteriormente, en la etapa III, tenemos el inicio del fraguado debido a una rápida formación de productos de hidratación a base de C-S-H y CH.
- Después, en la etapa IV, a medida que comienza el desarrollo de resistencia, vemos una desaceleración en la formación de productos de hidratación, con un pequeño incremento en el calor a medida que se consumen los sulfatos libres y se precipita más etringita.
- Finalmente, en la etapa V, se continúa la formación de productos de hidratación, principalmente C-S-H, y conduce a desarrollos de resistencia significativos a edades avanzadas, continuando por varios meses a medida que se consume el CH libre en la matriz cementante cambiando la relación Ca/Si de los productos hidratados.

En lo que respecta a las características del cemento portland, se ha observado que parámetros tales como la finura del cemento, cantidad de cemento y relación a/c afectan la reología de la suspensión, en particular los fenómenos de floculación y percolación, obteniendo mayor tixotropía a medida que se aumente el área de contacto de los productos anhidros. Además, en el cemento el contenido de sulfatos tiene una influencia considerable en los tiempos de fraguado debido a su efecto sobre la disolución del C_3A [51,52].

El uso de aditivos además modifica las propiedades reológicas de las suspensiones, en particular los aditivos enfocados a modificar sus características de fluidez o de desarrollo de resistencia. El uso de aditivos superplastificantes o reductores de agua de alto rango, que actúan como dispersantes, permite reducir el esfuerzo de cedencia y la viscosidad, manteniendo la relación de sólidos de la suspensión, lo cual favorece la extrudabilidad de la suspensión, y reduce el riesgo de bloqueos durante el transporte. Para mejorar la constructibilidad de las suspensiones a base de cemento Portland, se sugiere también adicionar elementos que potencien la tixotropía de la suspensión, como es el caso de materiales con partículas laminares, o bien, aditivos inclusores de aire. [18,51]

3.3 Requisitos Reológicos de **pastas de Cemento Portland para impresión 3D**

Para poder realizar una impresión 3D, la mezcla debe cumplir con ciertas características en términos de su bombeabilidad, extrudabilidad, esfuerzo de

cedencia, viscosidad, desarrollo de resistencia, tixotropía, estabilidad de forma, constructibilidad, adherencia entre capas y agrietamiento y la capacidad de poder construir proyectos a gran escala dependerá en primera instancia de las características del material. El poder equilibrar todas estas propiedades es una de las principales dificultades para poder seleccionar y controlar el material adecuado para impresión 3D, y en caso de ser adecuadas podría arrojarnos algunos problemas típicos en este método constructivo como pueden ser: colapso de las capas, agrietamiento, mal llenado debido a mala bombeabilidad, mala adherencia entre capas, deformaciones excesivas, entre otros. [1,4,6,26]

La bombeabilidad y la capacidad de extrusión del material dependen en gran medida de formar una “capa de lubricación” de finos y agua en la interfaz entre el material y la tubería, que facilitará la fluidez y transporte. Si la boquilla involucra una contracción, una bomba de tornillo o un tornillo de mezclado en la boquilla, el material se corta en la boquilla y la presión de bombeo se relaciona mayormente a la viscosidad plástica. Además, el que se corte el material hasta que salga por la boquilla facilita su análisis, ya que el desarrollo del esfuerzo de cedencia del material inicia a partir de que éste sale de la boquilla [1]. Se recomiendan valores de fluidez mayores a 192.5 mm para evitar congestiones o interrupciones de impresión, o bien un esfuerzo de cedencia entre 0.3 – 0.9 kPa. [22,26]

Para que una capa determinada sea estable después de la depositación y controlar su forma, un esfuerzo de cedencia adecuado τ_{c_0} ($> \rho gh_0$) debe alcanzarse lo suficientemente rápido después de la depositación. A medida que la altura del objeto impreso aumenta, los esfuerzos inducidos por gravedad

alcanzan un valor máximo local en la capa inferior. Además, los esfuerzos iniciales de corte generados por el proceso de deposición en una capa se convierten progresivamente en esfuerzos predominantemente extensionales en las capas subyacentes. Como consecuencia, las tensiones inducidas por la gravedad en la capa inferior están en el origen de la cedencia cuando $\rho gH/3$ llega al valor del esfuerzo de cedencia. [1,4] Debajo de cierta altura, la falla por resistencia será crítica, y arriba de esta altura, el pandeo será crítico. Para que la estructura sea estable, el módulo elástico debe mantenerse mayor a un valor crítico igual a

$$E_c = 3\rho gH^3/2\delta^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

E_c = Módulo elástico crítico (Pa) ρ = densidad del material (kg/m³)

H = la altura del objeto impreso (m) δ = ancho de la capa impresa (m)

g = gravedad (9.81 m/s²)

Para evitar agrietamientos durante la impresión de concreto, en estado fresco se debe mantener un mínimo radio de curvatura (se estima dependiendo del proceso de impresión y la geometría de las capas), y en estado endurecido se debe proveer el curado adecuado para mantener las retracciones por secado menores a 840×10^6 microdeformaciones [22].

Un comportamiento tixotrópico, que puede potenciarse con la inclusión de materiales finos en la matriz cementante [1,4,8,53,54], es de vital importancia en la impresión 3D, ya que contribuye a mantener la forma final del elemento y permite imprimir a mayores velocidades. Se ha observado que la dinámica de

pastas de cemento tiene dos comportamientos determinados por la evolución del tiempo de caída. El primer modo se asocia a la movilidad rápida y un lento reacomodo de las partículas de cemento, observándose un envejecimiento físico. El segundo modo se adscribe a la ganancia de resistencia debido a la precipitación de productos de hidratación, el incremento de la rigidez es puramente químico. Estos dos modos representan el desarrollo de tixotropía a edades tempranas y tardías, permitiendo así desarrollar mezclas que exhiban tixotropía rápida o lenta según se requiera [53,54].

Además de lo anterior, hay que considerar la velocidad de impresión, ya que entre mayor sea el tiempo de espera entre capas y la tixotropía, más débil será la interfaz entre capas, por el secado superficial. Se espera que surjan juntas frías entre capas sucesivas de concreto que tienen intermezclado limitado si un tiempo de descanso crítico entre las depositaciones sucesivas se supera, definiendo un tiempo máximo para una capa que se producirá como T_{max} . [1,4]:

$$T_{max} = \frac{\sqrt{\frac{(\rho gh_0)^2}{12} + \left(\frac{2\mu_p V}{h_0}\right)^2}}{A_{thix}}$$

Ecuación 3

En los procesos de impresión por extrusión, una limitación frecuente es el fenómeno de bloqueo en las boquillas. Durante la impresión, la pasta cementicia tiende a desarrollar una "capa de lubricación", compuesta principalmente por agua y finos, lo cual facilita el flujo del material a través de la boquilla. No obstante, en ciertos casos, algunos sistemas de extrusión pueden agotar dicha capa, lo que resulta en un aumento significativo en la viscosidad

del material restante y eventualmente provoca el bloqueo total del flujo. Este comportamiento puede explicarse por la tixotropía y la estructuración interna del cemento durante su hidratación, lo cual genera la necesidad de monitorear el comportamiento reológico durante toda la etapa de impresión. Por lo anterior se vuelve necesario el determinar y ser conscientes del tiempo durante el cuál es posible seguir imprimiendo con calidad la mezcla cementante (“tiempo de impresión”), que resulta ser mucho menor que los tiempos de fraguado de la tinta.

En resumen, pueden estimarse valores del esfuerzo de cedencia inicial del material, así como su habilidad de aumentar con el tiempo de reposo, para prevenir fallas por pandeo, o el flujo de una capa impresa. Para controlar la geometría final, se requiere estabilidad al pandeo y agrietamiento superficial, lo que se relaciona al comportamiento elástico del material impreso, su módulo elástico y su deformación crítica. Finalmente, para una unión adecuada entre las capas depositadas, se requiere una adhesión adecuada en la interfaz entre capas pero el secado puede tener un efecto importante en su adherencia. [1, 4, 22]

3.4 Relación entre las propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla para impresión 3D

A pesar de que el concreto y su hidratación y resistencia lleva décadas de estudio, el estudio de sus propiedades para impresión 3D es mucho más reciente, y existe una menor cantidad de información disponible, lo que dificulta

tener robustez, reproducibilidad y confiabilidad de la calidad del producto impreso, dificultando la expansión de esta tecnología. [1,4,6,26]

En lo que respecta a los materiales y las características de la mezcla a imprimirse, se ha observado que la relación entre la fracción de volumen sólida y el tamaño medio de partícula (ϕ/d^2) tienen una buena correlación con: el esfuerzo de cedencia a cortante determinado utilizando platos paralelos, y la fuerza normal de adherencia de la prueba de virado. [55]

Debido a la naturaleza de la tixotropía, sus propiedades reológicas y su relación directa con el desarrollo de resistencia de la mezcla, es posible estimar su interrelación para así poder hacer estimaciones sobre el tiempo de trabajabilidad de la mezcla, la velocidad de impresión, y la constructibilidad como el número de capas apilables a cierto tiempo. [4,6]

Existe un gran potencial en un futuro para aprovechar herramientas computacionales para predecir el efecto de propiedades determinables durante el colado sobre propiedades en estado endurecido. [4,6,26,56] Esto será particularmente importante en concretos que requieren condiciones reológicas muy específicas para su colocación, como es el caso de los concretos autocompactables y los colocados mediante impresión 3D.

Otra de las dificultades que suelen presentarse para el monitoreo y control de las propiedades reológicas en la práctica es que suelen requerir reómetros, equipo computacional, y su interpretación suele requerir un análisis de los datos arrojados. Al respecto, diversos autores [10,11,23,24,57,58] han publicado estudios donde correlacionan parámetros reológicos, con valores que pueden

medirse directamente en campo o laboratorio, tales como valores de penetración con penetrómetros, o ya sea mediante la fluidez de una muestra en estado fresco.

Al ser la viscosidad una medición de la respuesta viscosa del material es difícil tener alguna correlación directa entre la misma y los resultados de alguna prueba empírica, si bien algunos autores han llevado a cabo algunas correlaciones para mezclas a base de cemento Portland de diversos rangos de fluidez [23,24]. Por otro lado, al ser el esfuerzo de cedencia una medición de la respuesta elástica del material, sí es posible correlacionarlo con otras pruebas, como el revenimiento, fluidez, o resistencia a la penetración [10,11,23,24,59,60].

Como ejemplo, Lootens et al. [57] han determinado correlaciones confiables (valores de $R^2 > 0.98$) entre el esfuerzo de cedencia y los resultados de pruebas de penetración, tales como el equipo Vicat, Vicat modificado o penetrómetros con indicadores de carga. Un ejemplo es la correlación entre resultados de la prueba Vicat y el esfuerzo de cedencia:

$$\tau_0 = \frac{3}{2\pi R h} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde se estima el valor del esfuerzo de cedencia τ_0 de una suspensión, al medir la profundidad de penetración h en mm, para una carga impuesta de 300 g, por una aguja o vástago de vicat con un radio R .

Existe mucho potencial de aplicación en la práctica en esta área, ya que una medición más directa y sencilla de las propiedades reológicas, facilitaría la

implementación y control en la obra de concretos con comportamientos reológicos muy específicos, como es el caso para la impresión 3D.

CAPÍTULO 4:

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar de las numerosas ventajas del uso de esta tecnología en mezclas a base de cemento portland, en México y muchos países en desarrollo aún no se ha implementado de manera regular en la industria de la construcción, debido en gran parte por un alto empirismo en la construcción, lo limitado de las aplicaciones de la robótica y digitalización en la construcción, imprescindibles para la impresión 3D, así como una escasa o nula comprensión científica y aplicación de las propiedades reológicas del concreto, lo cual dificulta tener una mezcla de concreto que exhiba las propiedades de alta fluidez durante el bombeo y alta resistencia inicial una vez colocado, sin la necesidad de encofrado. Incluso el intentar replicar un proceso de impresión 3D ya existente no asegura que se tenga una impresión 3D de calidad, ya que muchas variables reológicas, así como mecánicas, son sensibles a las condiciones de procesamiento, además de factores como la humedad y temperatura ambiental, incrementando la posibilidad de errores [1,4,6]. El no estar aprovechando esta tecnología en la construcción con concreto, limita la geometría, funcionalidad y valor agregado de los proyectos realizados, además

de aumentar los errores y retrasos en este sector productivo, al depender más de factores humanos.

Aunque ya se han hecho con éxito diversas estructuras con impresión 3D de concreto incluso a gran escala [27,28,31-36], no existen guías sólidas sobre el diseño de la mezcla y aún permanecen muchos desafíos técnicos y de procesamiento. Varios autores que han logrado imprimir con éxito mezclas a base de cemento Portland [1,4,6,9,55,56] coinciden en que la “ventana” de propiedades que permiten tener un concreto apto para impresión 3D es muy limitada en comparación con otros métodos de construcción con concreto, debido a dificultades en la comprensión y control de sus propiedades reológicas y de endurecimiento, y se requiere la habilidad para simular y modelar el proceso completo de la impresión 3D desde la dosificación hasta el curado para una manufactura exitosa [26]. Considerando lo anterior, el presente estudio pretende contribuir a la optimización de pastas de cemento Portland gris para impresión 3D, mediante la caracterización experimental de propiedades reológicas que inciden directamente en la imprimibilidad de la pasta, buscando establecer bases que permitan mejorar la aplicabilidad de esta tecnología de construcción.

CAPÍTULO 5:

JUSTIFICACIÓN

En este proyecto se buscará establecer la relación entre los parámetros en estado fresco de las **pastas** a base de cemento portland de alto desempeño, y las propiedades necesarias para impresión 3D con el fin de optimizar sus propiedades tixotrópicas, retención de forma, unión entre capas y constructibilidad, sentando así bases para predecir y controlar su comportamiento y así asegurar la calidad del producto impreso.

Para este fin primero se evaluará la reología de distintas **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland gris, evaluando el desarrollo de la fluidez, viscosidad y el esfuerzo de cedencia en estado fresco, así como la presencia de tixotropía, haciendo ajustes a los diseños de mezcla según sea necesario para maximizar las propiedades afines a la impresión 3D con concreto (bombeabilidad, tixotropía, retención de forma y constructibilidad).

A medida que se vayan venciendo los retos que implica la implementación de la impresión 3D en la construcción con concreto, se permitirá paulatinamente el desarrollo de estructuras más eficientes económica y energéticamente, con menores emisiones y un mínimo de consumo de materia prima y de personal, incrementando la productividad y permitiendo una construcción totalmente automatizada y digitalizada. [7]

El proyecto servirá como base para ir desarrollando paralelamente las herramientas tecnológicas y digitales necesarias, permitiendo así ampliar el potencial de la construcción mediante impresión 3D con concreto en México.

Este proyecto ayudará a adoptar la impresión 3D de mezclas de cemento Portland con miras de aproximarnos a una Economía Circular en la Construcción, orientado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Organización de las Naciones Unidas, particularmente al Objetivo 9, “Industria, Innovación e Infraestructura”, con la meta 9.b, “Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas”. [61]

CAPÍTULO 6:

HIPÓTESIS

Será posible determinar la relación causal entre los parámetros de diseño de **pastas** base cemento portland gris de alto desempeño y sus propiedades reológicas, para un óptimo desempeño para impresión 3D (tixotropía, bombeabilidad, retención de forma y constructibilidad).

CAPÍTULO 7:

OBJETIVOS

7.1 Objetivo General

Determinar la relación causal entre los parámetros de diseño de las **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland gris, con las propiedades necesarias para impresión 3D optimizando sus propiedades tixotrópicas, retención de forma y constructibilidad.

7.2 Objetivos Específicos

- Caracterización de los materiales a utilizar para la impresión 3D de **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland.
- Preparación de **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland aptas para impresión 3D.
- Evaluación de las propiedades reológicas de **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland aptas para impresión 3D.
- Evaluación de las propiedades en estado endurecido de especímenes impresos de **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland.
- Evaluación de la influencia de las propiedades reológicas de **pastas** de alto desempeño a base de cemento portland en su constructibilidad mediante impresión 3D.

CAPÍTULO 8:

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para este proyecto se realizó la metodología que se ilustra en el diagrama de la **Figura 15**, primero haciendo pruebas de imprimibilidad en pastas de cemento Portland para encontrar una dosificación cualitativamente óptima para impresión 3D, misma que se fue caracterizada en función de sus propiedades físicas y reológicas. Posteriormente, partiendo de esa mezcla con potencial óptimo para impresión, se hizo una matriz experimental variando sus parámetros de diseño, con el fin de realizar una modelación de la influencia de los parámetros de diseño en las propiedades reológicas de la mezcla. Además, debido a que durante las pruebas de impresión se observó un fenómeno de bloqueo en las unidades de impresión, se realizó una evaluación para caracterizar el bloqueo presentado en las unidades de impresión.

En las siguientes secciones se detalla más a fondo cómo se llevaron a cabo estas etapas de la metodología.

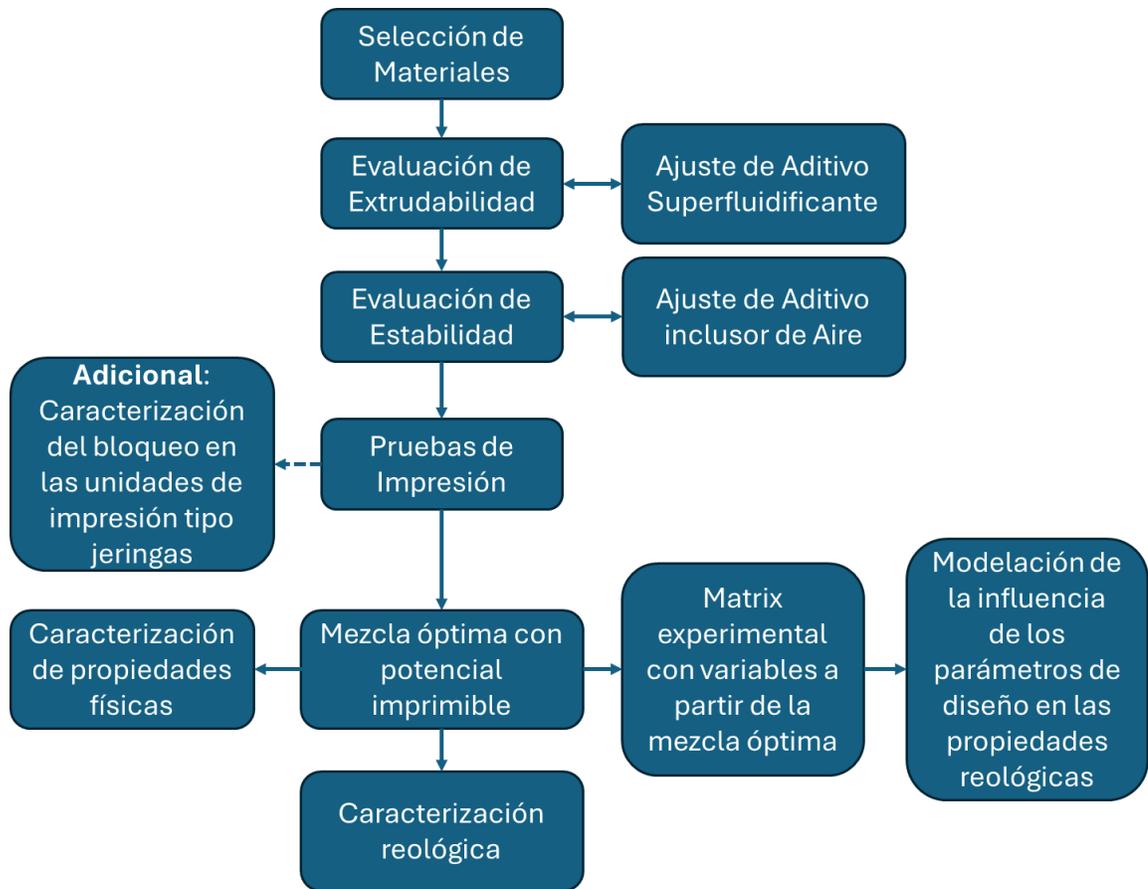


Figura 15. Síntesis de la metodología experimental llevada a cabo en el presente proyecto

8.1 Materiales y Caracterización

8.1.1 Cemento Portland

Se utilizará como cementante un cemento portland gris CPO 40 de la Marca CEMEX, de acuerdo a la norma NMX-C-414 [62]. Al cemento portland se le evaluará lo siguiente: Densidad, Distribución de Tamaño de Partícula, Tiempos de Fraguado, Composición Química mediante Fluorescencia de Rayos X.

El equipo utilizado para determinar la distribución de tamaño de partícula es un equipo de difracción de láser MICROTRAC S3500 [63], realizando la medición en una suspensión de alcohol isopropílico y cemento Portland, dispersa con ultrasonido para eliminar posibles grumos del material seco. Este equipo tiene coeficientes de correlación hasta de 0.9999 en sus mediciones. [64]

8.1.2 Agregado Fino

Se utilizará un agregado fino a base de caliza triturada de la región, de acuerdo a la norma ASTM C 125 [65]. Al agregado fino se le evaluará lo siguiente: densidad, absorción, granulometría y distribución de tamaño de partícula.

8.1.3 Aditivos Químicos

Se utilizará un aditivo reductor de agua de alto rango a base de policarboxilatos de la compañía BASF, que cumpla con la norma ASTM C-494 [66] como reductor de agua de alto grado tipos A y F. Además, con el fin de promover el comportamiento tixotrópico en las **pastas** se utilizará un aditivo inductor de aire FOAMX de la compañía CEMEX [67]. A los aditivos se les evaluará su densidad y contenido de sólidos.

8.1.4 Reómetros

Se utilizarán dos equipos para el monitoreo de las propiedades reológicas, un Reómetro ARES G2 de TA Instruments [68], con una geometría de platos

paralelos, y un reómetro MCR 301 Anton Paar con una geometría helicoidal [69]. Ambos equipos se muestran en la **Figura 16**.



Figura 16. Reómetro ARES G2 (Izquierda) [68] y Reómetro MCR 301 (Derecha) [69]

8.1.5 Impresora 3D

Se utilizará la impresora modelo Hyrel 3D Hydra 16A [70], y como boquilla de extrusión se utilizará una jeringa llena con la suspensión de cemento, como se muestra en la **Figura 17**.



Figura 17. Impresora 3D (izquierda) y aditamento utilizado como boquilla y reservorio (derecha) para impresión de la pasta

Cabe destacar que esta impresora no está diseñada como tal para trabajar con tintas a base de cemento Portland, por lo cual al implementarse las unidades de impresión de la **Figura 17**, el sistema presentó ciertas limitaciones debido a la reducción del área de extrusión en la transición reservorio-boquilla, lo que derivó en fenómenos de bloqueo durante la impresión. Para entender mejor este comportamiento, se llevaron a cabo pruebas en diferentes etapas del proceso de impresión, tal como se detalla más adelante.

8.2 Pruebas de impresión para determinar una mezcla de referencia

Siendo una de las problemáticas que atacará este estudio la falta de bases teóricas que sirvan para el diseño de mezclas imprimibles, por recomendación de personal con experiencia en impresión 3D se hizo primero una matriz experimental con las variables que se muestran en la **Tabla 3** para que una vez

obteniendo una mezcla que exhiba características de ser impresa (habilidad de extrusión, sin agrietamiento, retención de forma, adherencia entre capas), se caracterice dicha mezcla y posteriormente partiendo de dicha composición, se realice una matriz experimental para estudiar sus propiedades reológicas con el fin de modelar la influencia de los componentes de la tinta de cemento Portland en sus propiedades en estado fresco. A pesar de inicialmente pretenderse caracterizar sólo pastas a base de cemento y agua, para ajustar la imprimibilidad se consideró necesario el utilizar aditivos para poder conseguir una mezcla con características aptas para impresión 3D.

Tabla 3. Variables a controlar en diseños de mezclas preliminares para obtención de una mezcla con potencial imprimible

Variable a controlar	Rango	Justificación
Relación agua/cemento	0.27	Por las características de la boquilla, se iniciará trabajando en pastas, con esta relación agua/cemento por ser la necesaria para una consistencia normal, y se harán pruebas variando la relación agua/cemento para tener una pasta imprimible con características de alto desempeño.
Aditivo inclusor de aire	0 – 2.5 ml/kg cem	Para promover un comportamiento tixotrópico en la suspensión, necesario para la impresión 3D, reduciría la viscosidad, incrementaría el esfuerzo de cedencia y reduciría su peso, mejorando la estabilidad.
Aditivo reductor de agua de alto rango	0 – 2 ml/kg cem	A pesar de ser un agente que reduciría el esfuerzo de cedencia, reduciendo su estabilidad, se vuelve necesario ya que aumenta la capa de lubricación necesaria para extruir, además de permitirnos usar relaciones a/c bajas.

Las propiedades por evaluar de la pasta **con el óptimo comportamiento** en estado fresco para impresión 3D serán las siguientes:

- Viscosidad y esfuerzo de cedencia mediante reometrías, para estimar su bombeabilidad y extrudabilidad. Para esto se usó el procedimiento que se describe en la **Figura 18**.
- Reometría mediante barrido de frecuencia (*frequency sweep*) y un barrido de amplitud (*amplitude sweep*), con el objetivo de determinar el punto de cruce entre los módulos elástico (G') y viscoso (G'') como la transición del comportamiento viscoso (líquido) a elástico (sólido) de la pasta de cemento. Para esto se usó el procedimiento que se describe en la **Figura 19**, después de un preacondicionamiento de la muestra a una tasa de corte de 200 s^{-1} por 2 minutos.
- Presencia de tixotropía mediante reometrías después de tiempos de reposo crecientes para determinar el desarrollo de resistencia y el tiempo de trabajabilidad, así como mediante la observación de la estabilidad geométrica del producto impreso.
- Fluidez: medida como un porcentaje de extensión en una probeta de pasta con una base de 70 mm después de 25 caídas en la mesa de fluidez, basada en el procedimiento de la ASTM C1437 [71].
- Densidad y contenido de aire en estado fresco, basándose en el procedimiento de la ASTM C185 [72].
- Tiempo de fraguado Vicat en Pastas, según el procedimiento descrito en la ASTM C191 [73].

- Con el fin de determinar un esfuerzo de cedencia basado en la correlación de Lootens et. al [57], se tomará una lectura inicial de penetración con el vástago vicat durante 30 segundos en una probeta de pasta elaborada basada en el procedimiento descrito en la ASTM C-187 [74].

Settings | Control normal force | Advanced | General

Initial Temperature

Set temperature

Initial Temperature (°C) 22.0

Wait for correct temperature

Normal force

Wait for normal force

normal force (N) 0

Pre-shear

Perform pre-shear

shear rate (1/s) 200.0

Duration (h:mm:ss) 0:02:00

Equilibration

Perform equilibration

Duration (h:mm:ss) 0:10:00

Wait for zero velocity

Test | Step termination | Advanced | General

Test type Steady state flow

Test settings

Ramp shear rate (1/s)

From 200.0 to 0.01000

Mode log

Points per decade 5

Temperature (°C) 22.0 Wait

Sample period (h:mm:ss) 0:00:10

Steady state

Percentage tolerance 5.0

Consecutive within tolerance 3

Maximum point time (h:mm:ss) 0:00:05

Figura 18. Procedimiento de ensaye reológico, fluidez en estado estacionario, mostrando el procedimiento de preacondicionamiento (izquierda), y el procedimiento de la prueba (derecha).

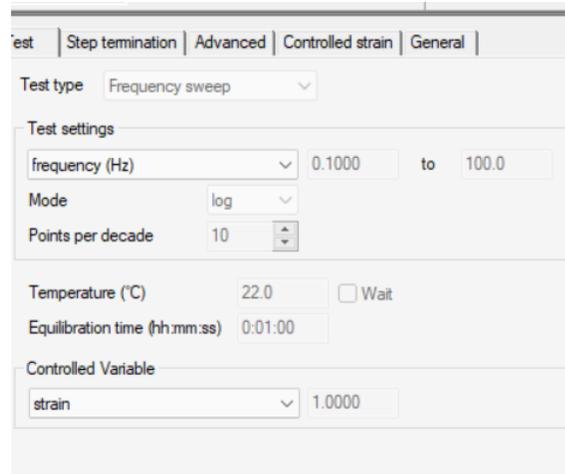
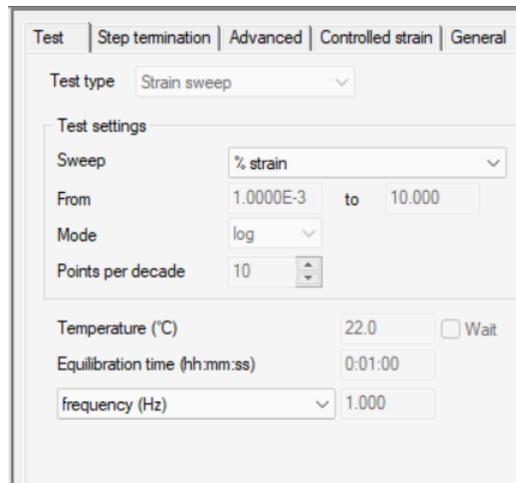


Figura 19. Procedimiento de ensaye reológico, fluidez en estado estacionario, mostrando el procedimiento de barrido de deformación (izquierda), y el procedimiento de barrido de frecuencia (derecha).

Es importante destacar que esta experimentación fue realizada en 2022, y durante la fase final de escritura se identificó que algunos autores han abordado enfoques similares semicualitativos, para diseñar mezclas con comportamientos óptimos para impresión 3D, cómo el que se muestra en [la Figura 17 \[75\]](#). Otros autores han reportado implementar otras estrategias, como modelaciones en

base a análisis estadísticos, o análisis de costo/beneficios con el fin de predecir u optimizar algún comportamiento reduciendo las iteraciones experimentales necesarias. [25, 42, 76-79].

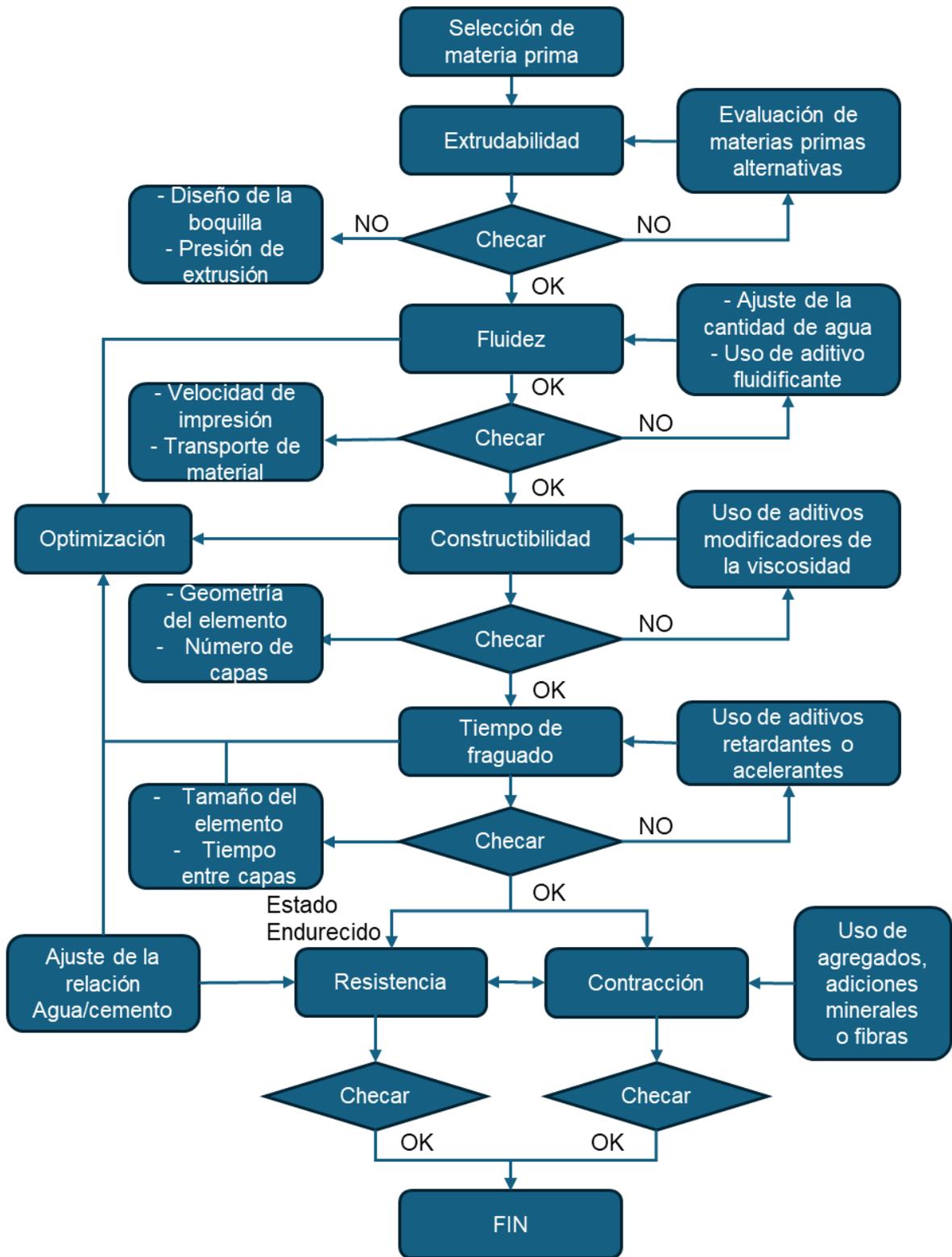


Figura 20. Metodología para el diseño y optimización de material cementante para impresión 3D. Adaptado de [75]

Como es posible observar, es complejo pretender abordar una única metodología de optimización de mezclas, ya que el comportamiento y desempeño esta influenciado por parámetros de diseño de la mezcla, así como parámetros de impresión independientes a la dosificación de la mezcla.

8.3 Análisis del bloqueo en las unidades de impresión utilizadas

Como se muestra en la **Figura 17**, durante las pruebas de impresión, se utilizó una unidad de impresión a base de una jeringa con una boquilla de reducción de área para extruir la mezcla cementicia. Sin embargo, se observó que la mezcla dejaba de extruirse al ir extruyendo el material, además de que el sistema reportaba que la fuerza necesaria para extruirse era mayor a la capacidad del equipo, lo que generaba bloqueos en el sistema de extrusión, primero como taponamientos y defectos hasta que finalmente debía suspenderse la impresión a pesar de aún tener material sin extruir.

Para evaluar el comportamiento de la mezcla durante su extrusión y tratar de comprender el taponamiento presentado en la unidad de impresión, se midió el incremento de la viscosidad con el tiempo para la mezcla óptima, con una tasa de deformación de 0.01 s^{-1} , hasta 25 minutos, a una temperatura de 22°C , con el reómetro ARES G2 de platos paralelos.

Para analizar este fenómeno, se tomaron mediciones de la tinta, antes de ser extruida, así como del material que quedaba sin poder imprimirse en la unidad de impresión: las mediciones realizadas para caracterizar este fenómeno fueron las siguientes: contenido de humedad, y reometrías para determinar su viscosidad y esfuerzo de cedencia.

Además, se realizó una medición de la fuerza necesaria para imprimir a medida que avanzaba el proceso de impresión, para determinar la presión máxima de extrusión, así como el porcentaje de material extruible por esta metodología antes de que se presenten bloqueos, se realizó llevando a cabo la extrusión de la suspensión en la jeringa, pero usando un sensor de carga de precisión, con apreciación de 0.01 kgf, para determinar la presión de extrusión a medida que se extruía el material, como se muestra en la **Figura 21.7**



Figura 21. Arreglo para determinar la presión de extrusión, utilizando un sensor de carga en un brazo mecánico montado sobre la unidad de impresión

8.4 Evaluación de **pastas de alto desempeño a base de cemento portland gris para modelación**

Una vez que se cuente con un diseño de mezcla óptimo a base de cemento Portland con características de alto desempeño y potencial imprimible, posteriormente se evaluarán sus propiedades reológicas para determinar su influencia en **las propiedades relevantes** para impresión 3D.

Para estudiar la influencia que tienen los componentes de la pasta en el esfuerzo de cedencia y en la viscosidad en estado fresco, se utilizará un diseño factorial de **2x3x3 [80]**, donde se evaluarán 3 factores en las **pastas** de cemento portland: 2 relaciones agua/cemento, 3 contenidos de aditivo inclusor de aire, y 3 contenidos de aditivo reductor de agua, como se muestra en la **Tabla 4**. Los niveles medios fueron determinados a partir de las pruebas para determinar una mezcla de referencia con un comportamiento óptimo para impresión que se describen en el **apartado 8.2** del presente documento.

Para las pastas, el procedimiento de mezclado fue el siguiente:

1. Cribado inicial del cemento Portland a través de una malla No. 200 (abertura de 0074 mm) para eliminar grumos en la muestra de cemento, ya que se observó que la presencia de los mismos afectaba los resultados medidos.

2. Disolución inicial de los aditivos en el agua de mezclado.
3. Añadir la solución de agua y aditivos al cemento Portland y 30 segundos de reposo para permitir la absorción del agua.
4. Inicio del mezclado mecánico a 140 revoluciones/minuto por 30 segundos.
5. Detener la mezcladora por 15 segundos y en este tiempo raspar la pasta adherida en las paredes de la olla de mezclado.
6. Mezclado a 285 revoluciones/minuto por 60 segundos.
7. Dentro de un minuto después de terminado el mezclado, llenar las probetas para las mediciones e iniciar las pruebas en estado fresco.

Tabla 4. Factores y niveles del diseño experimental para este estudio

Factores	Niveles		
Relación agua/cemento	0.26	0.27	
Aditivo inclusor de aire (ml/kg cem)	1.2	2.4	3.6
Aditivo reductor de agua (ml/kg cem)	0.5	1	1.5

Considerando las combinaciones de los factores y sus niveles que se muestran en la **Tabla 4**, se obtiene la matriz experimental detallada que se muestra en la **Tabla 5**, para evaluar las propiedades de la pasta, **con el fin de determinar la influencia de los factores en las propiedades a evaluar, además**

de si se presenta un efecto sinérgico o inhibitorio en sus combinaciones, y finalmente, determinar un modelo que nos permita describir el comportamiento de la pasta en función de dichos factores.

Tabla 5. Matriz experimental para este estudio

Corrida Experimental	Factores		
	Relación agua/cemento	Aditivo inductor de aire (ml/kg cem)	Aditivo reductor de agua (ml/kg cem)
1	0.26	1.2	0.5
2	0.26	1.2	1
3	0.26	1.2	1.5
4	0.26	2.4	0.5
5	0.26	2.4	1
6	0.26	2.4	1.5
7	0.26	3.6	0.5
8	0.26	3.6	1
9	0.26	3.6	1.5
10	0.27	1.2	0.5
11	0.27	1.2	1
12	0.27	1.2	1.5
13	0.27	2.4	0.5
14	0.27	2.4	1
15	0.27	2.4	1.5
16	0.27	3.6	0.5
17	0.27	3.6	1
18	0.27	3.6	1.5

Las propiedades por evaluar de las en estado fresco serán las siguientes:

- Viscosidad y esfuerzo de cedencia mediante reometrías, para estimar su bombeabilidad y extrudabilidad.
- Presencia de tixotropía mediante reometrías después de tiempos de reposo crecientes para determinar el desarrollo de resistencia y el tiempo de trabajabilidad.

Finalmente, se establecerá la correlación que exista entre los parámetros evaluados tanto en estado fresco como endurecido, con el fin de predecir y controlar la aplicación para impresión 3D de las pastas de cemento portland de alto desempeño. Para este fin se realizarán modelaciones a base de regresiones lineales multivariantes en Minitab y Excel, basados en los datos experimentales obtenidos durante las pruebas de impresión y las mediciones reológicas. En la modelación, podremos determinar si la combinación de ciertos factores presenta un efecto sinérgico o inhibitorio en función del signo que obtengamos para dicho factor en los análisis estadísticos. [80,81]

Equipamiento necesario:

- Equipo de dosificación y mezclado de **pastas** de cemento Portland.
- Reómetros de pastas y morteros.
- Impresora 3D.
- Equipo de caracterización de propiedades microestructurales de cemento portland (FRX, DTP).
- Equipo de caracterización de propiedades macroscópicas en estado fresco de morteros (densidad, fluidez, % aire, tiempo fraguado, resistencia mecánica).

CAPITULO 9:

RESULTADOS Y DISCUSION

9.1 Materiales y Caracterización

A continuación, en la **Tabla 6**, se muestra la caracterización química del cemento utilizado para el proyecto, según FRX, como podemos observar, corresponde a la composición típica de un cemento CPO según las especificaciones en la NMX C-414. [62]

Tabla 6. Caracterización de los compuestos en el cemento utilizado por FRX

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	Otros
% en Peso	18.7	4.7	2.4	63.7	1.2	4.1	0.7	0.7	0.1	0.1	3.8

En la **Tabla 7** se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales a utilizarse para las pastas:

Tabla 7. Caracterización de Materiales a Utilizarse

Material	Densidad	Contenido de Sólidos	Tamaño promedio de partícula
Cemento Portland	3.08 g/cm ³	N/A	15 micrómetros
Aditivo reductor de agua	1.12 g/cm ³	45%	N/A
Aditivo inclusor de aire	1.08 g/cm ³	12%	N/A

A continuación, en la **Figura 22**, se muestra la distribución de tamaño de partícula del cemento utilizado para el proyecto, llevado a cabo con el equipo de difracción de láser MICROTRAC [63]. En la imagen además se ilustra el tamaño de partícula para el 50% del material, con el fin de determinar su tamaño promedio de partícula.

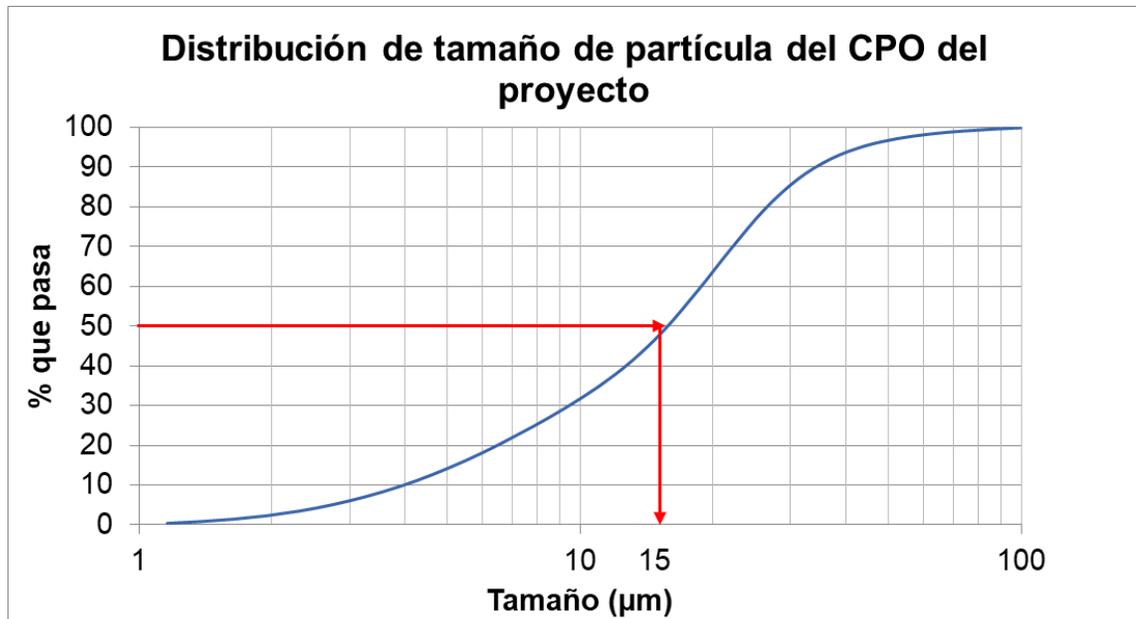


Figura 22. Distribución de tamaño de partícula del cemento utilizado en el proyecto.

9.2 Pruebas de impresión para determinar una mezcla de referencia

Una vez caracterizados los materiales a utilizar para el presente estudio, se hicieron pruebas en pastas con formulaciones iniciales y se evaluaron cualitativamente haciendo pruebas de impresión observando la calidad del material impreso, para determinar la dosificación de una mezcla de referencia con características óptimas de imprimibilidad. Finalmente, partiendo de la dosificación de la mezcla de referencia, se hizo una matriz experimental con

más valores y mediciones de fluidez y penetración, con el fin de estimar la influencia de los parámetros de diseño en estas propiedades, afines a la impresión 3D.

9.2.1 Pruebas de impresión cualitativas preliminares

Se realizaron diversas mezclas variando los materiales y contenidos de la **Tabla 3**, y se observó que algunas formulaciones dieron como resultado mezclas muy fluidas, que no mantenían su forma al imprimirse, mientras que otras resultaban en mezclas muy rígidas, que no podían ser extruidas a través de la unidad de impresión utilizada. En la **Figura 23** se muestra una síntesis de los resultados de estas pruebas para obtener una mezcla imprimible, mientras que en la **Tabla 8** se muestra una síntesis de las principales **pastas** que tuvieron comportamientos que nos permitieran obtener indicadores relevantes para la impresión.

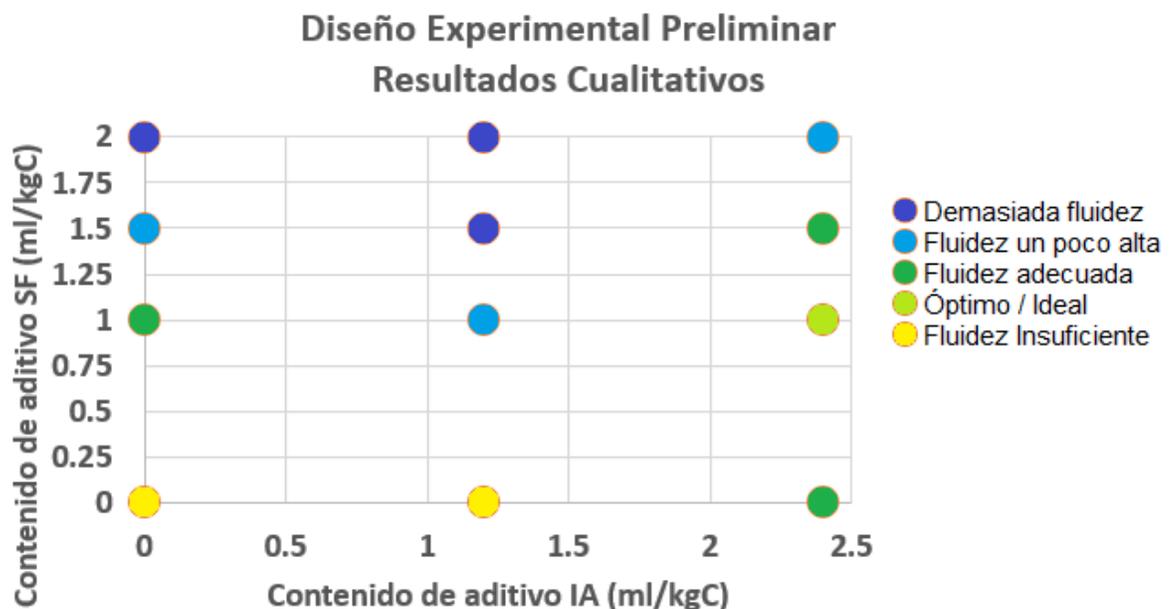
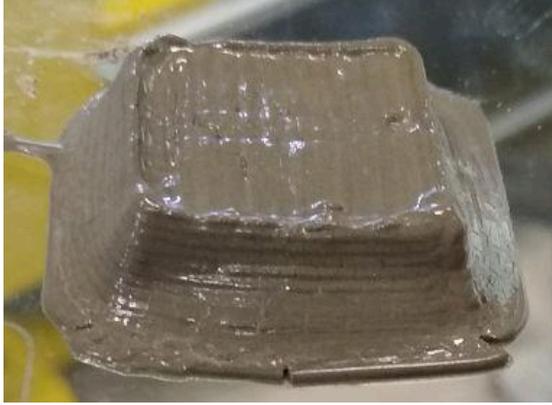
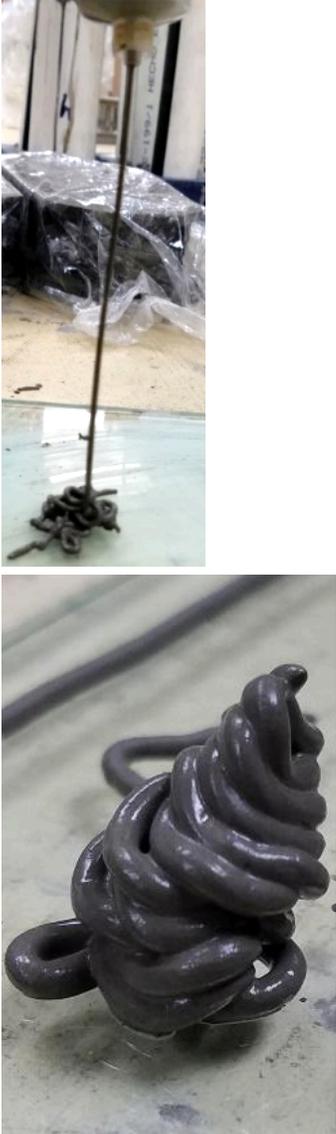


Figura 23. Resultados Cualitativos de las pruebas preliminares de imprimibilidad

Tabla 8. Síntesis de pruebas preliminares de impresión 3D para definir una mezcla óptima

Prueba	Evidencia fotográfica	Observaciones
Relación a/c = 0.28 Sin aditivos		Aunque el espécimen impreso se observa de calidad, al colar varias capas se observaba que su forma no se mantenía, y después de 12 minutos de impresión, tuvimos un taponamiento.
Relación a/c = 0.26 +1.5 ml/kg cem de aditivo reductor de agua de alto rango		El espécimen se imprime y se extruye bien, sin embargo, se observa que la forma no se mantiene, además se observa la formación de burbujas, se presentó taponamiento a los 20 minutos de impresión

<p>Relación a/c = 0.265 +1.2 ml/kg cem de aditivo inclusor de aire</p>		<p>Se observa una buena estabilidad, pudiendo lograr largos filamentos sin agrietamientos, y con buena adherencia, también se observa que el aire incluido mejoró la tixotropía, pero la presión necesaria para extruirlo fue muy alta, y rápidamente presentó taponamiento a los 10 minutos de impresión</p>
<p>Relación a/c = 0.265 +2.4 ml/kg cem de aditivo inclusor de aire +2 ml/kg cem de aditivo reductor de agua</p>		<p>Se observa una buena estabilidad de la mezcla, sin grietas, retención de forma y adherencia entre capas, sin embargo, sigue presentando taponamientos que limitan la impresión a 18 minutos. *Nota: esta mezcla se repitió adicionando un retardante a razón de 0.05% del peso del cemento, sin embargo, se observó que no incrementó el tiempo de impresión.</p>

<p>Mezcla de referencia, óptima</p> <p>Relación a/c = 0.27</p> <p>+2.4 ml/kg cem de aditivo inclusor de aire</p> <p>+1 ml/kg cem de aditivo reductor de agua</p>		<p>Es la mezcla óptima después de las pruebas de impresión, tiene un tiempo de impresión de 15-20 minutos y buena estabilidad, extrudabilidad y adherencia.</p>
---	--	---

Como podemos observar en la Tabla 8, la mezcla de pasta a base de cemento Portland cuyo comportamiento fue el óptimo para imprimir tiene una relación A/C de 0.27, e incluye un contenido de 2.4 ml/kg-cem de aditivo inclusor de aire, que contribuye principalmente a la tixotropía de la mezcla para los fines de este estudio, así como un contenido de 1 ml/kg-cem de aditivo reductor de agua de alto rango, que ayuda a la fluidez y a reducir los bloqueos por su efecto antifloculante.

9.2.2 Caracterización de la mezcla de referencia

A continuación, en la **Tabla 9**, se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la mezcla de referencia, para caracterizar el comportamiento de la mezcla de referencia en estado fresco, lo cual es relevante considerando que se trata de una tinta de cemento Portland con un comportamiento óptimo para impresión, sin añadir otros materiales:

Tabla 9. Caracterización de la mezcla de referencia con potencial imprimible.

Parámetro	Valor	Descripción
Densidad en estado fresco	2217 kg/m ³	Se midieron su peso y volumen inmediatamente al concluir el mezclado.
Contenido de aire	4.6%	Se realizó en base a la ASTM C185 [72]
Tiempo de fraguado en pastas	Inicial – 205 min Final – 268 min	Se realizó en base a la ASTM C191 [73]
Penetración con vástago Vicat / Consistencia	36 mm	Basado en ASTM C 187 [74]

Con relación a las pruebas reológicas realizadas, como se muestra en la **Figura 24**, la mezcla tiene un comportamiento dilatante o reoespesante al incrementar la tasa de corte, observándose un incremento significativo en el esfuerzo de corte medido a partir de 3 s^{-1} . De esta reometría también podemos obtener que la mezcla muestra un esfuerzo de cedencia de alrededor de 5 Pa.

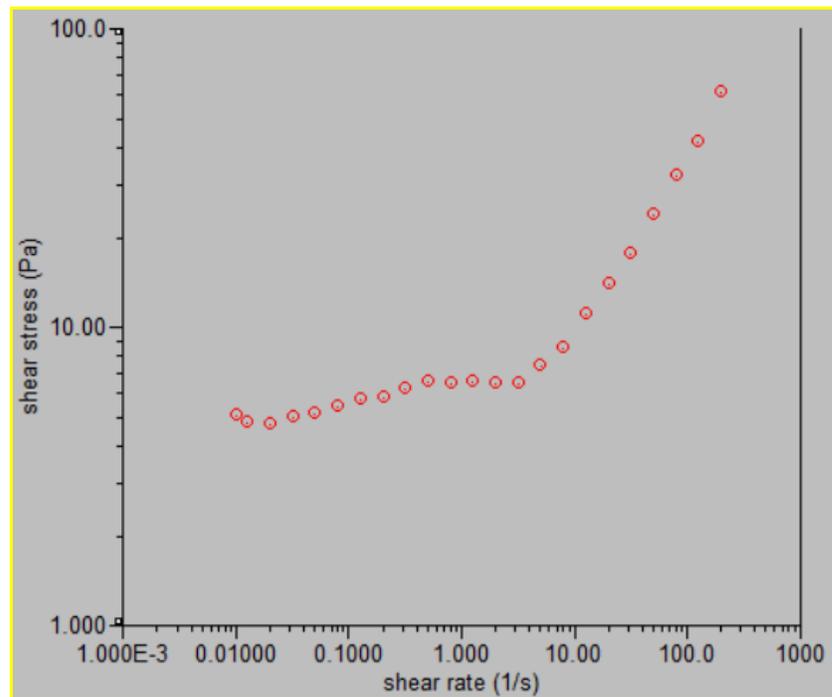


Figura 24. Comportamiento reológico de la pasta en la prueba de fluidez en estado estacionario.

A continuación, se muestra en la **Figura 25** los resultados de la prueba del barrido de deformación, donde podemos observar que en los valores medidos, podemos observar que la caída de la G'' es gradual y suave, lo que nos indica que en la pasta, al superar el esfuerzo de cedencia, la transición es suave, reduciendo las fracturas o agrietamientos en el producto impreso. Además, podemos observar que durante la prueba, el comportamiento como sólido (G' , módulo de almacenamiento) del material es mayor que su comportamiento como líquido (G'' , módulo de almacenamiento), hasta un 10% de deformación del material. Como en los procesos de impresión 3D nos interesa que el material impreso mantenga su estabilidad geométrica, es importante no exceder este valor de deformación en la mezcla para evitar que el material fluya y pueda presentar defectos en su geometría.

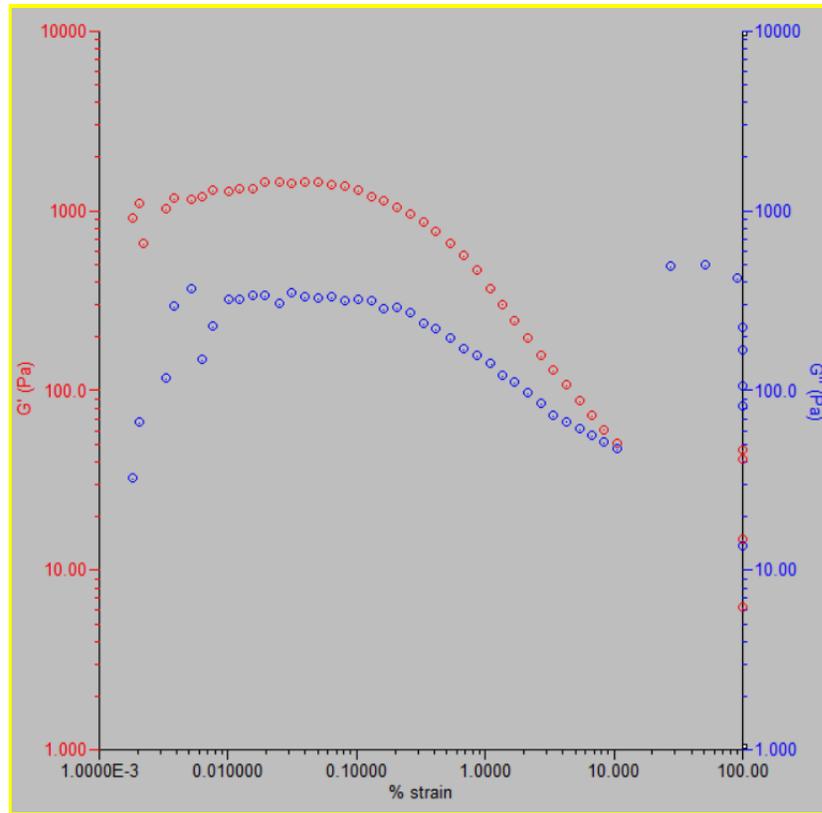


Figura 25. Resultados de la reometría de barrido de deformación.

Al observar los resultados de la reometría de barrido de frecuencia, en la **Figura 26**, podemos observar que a bajas frecuencias es mayor la respuesta viscosa del material que su respuesta elástica ($G'' > G'$), además que al incrementar la frecuencia la respuesta elástica se acerca a la respuesta viscosa, lo que nos indica que a bajas frecuencias, el material, como una suspensión, y gracias al contenido de aditivo superfluidificante adicionado, tiende a fluir, lo que facilitarí el bombeo del mismo. Esto nos confirma que nuestra muestra es un material tixotrópico cuya estructura interna tiende a presentar una respuesta compuesta de comportamientos elásticos y viscosos, dependiendo del estímulo aplicado y el tiempo.

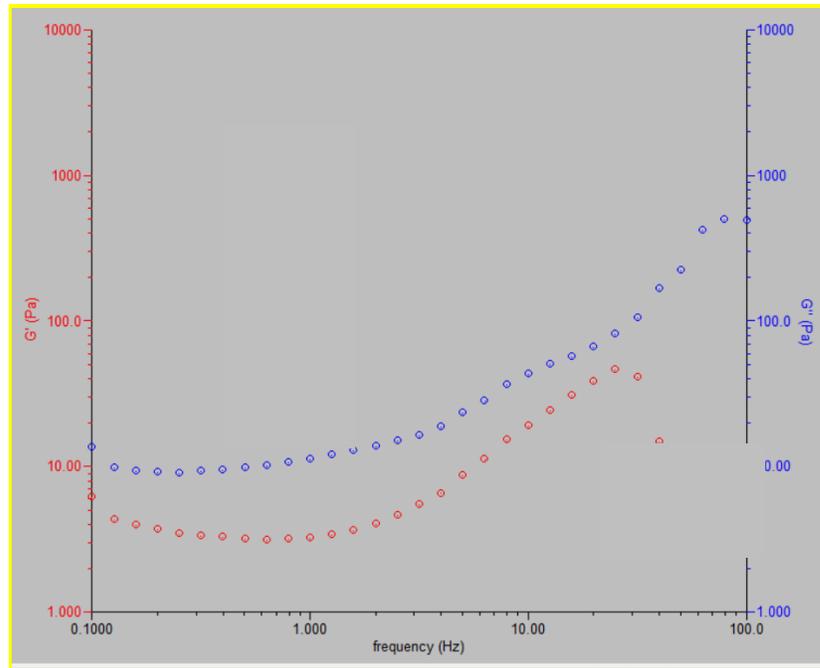


Figura 26. Resultados de la reometría de barrido de deformación.

De estos comportamientos observados, es importante destacar que el comportamiento $G'' > G'$ a bajas frecuencias nos indica que el material es apto para fluir bajo esfuerzos prolongados, como en un sistema de extrusión, lo que lo vuelve apto para bombear y extruir. Por otro lado, el comportamiento de $G' > G''$ observado a bajas deformaciones, nos asegura que el material presentará una estabilidad o resistencia al asentamiento al estar en reposo, lo que es óptimo para mantener una estabilidad geométrica en el producto impreso.

9.3 Análisis del bloqueo en las unidades de impresión utilizadas

Como se puede apreciar en la **Figura 17**, las unidades de impresión utilizadas durante esta primera etapa del proyecto consistían en jeringas, sin embargo, se observó que independientemente de la mezcla utilizada, durante la impresión llegaba un punto donde la viscosidad de la mezcla que aún quedaba en la unidad de impresión excedía la potencia del equipo, volviendo imposible el continuar imprimiendo hasta no cambiar la unidad de impresión. Este comportamiento fue atribuido a la falta de renovación de la capa de lubricación en la mezcla, lo que resultaba en un endurecimiento progresivo del material dentro de la jeringa.

A continuación, en la **Tabla 10**, se muestran los resultados de las mediciones de la presión de extrusión a través de la jeringa, para el cálculo del esfuerzo de extrusión, se dividió la fuerza registrada por el transductor entre el área del orificio de la jeringa por el cual se realizaba la extrusión. Además, en la **Figura 27**, se muestra el tiempo vs. Volumen extruido, con una tendencia lineal, que nos indica una velocidad de extrusión constante; por otro lado, en la **Figura 28** se muestra el volumen extruido en % vs. el esfuerzo necesario para continuar extruyendo. De aquí es importante destacar que esta última gráfica lleva una tendencia claramente cúbica, con un cambio de comportamiento, incrementándose mucho la fuerza necesaria para continuar extruyendo a partir del 50% del volumen extruido, lo que nos puede indicar: 1) la tendencia del material a presentar un comportamiento reoespesante, o bien, 2) que hay una alteración en la mezcla durante el proceso de extrusión.

Tabla 10. Medición de la fuerza necesaria para realizar la extrusión

Tiempo, s	Volumen extruido, cm ³	Carga, kg	Esfuerzo, kg/cm ²	% Vol extruido
0	20	0	0	0%
9	15	3.5	1.288	25%
22	12	4.5	1.656	40%
28	10	5.25	1.932	50%
34	9	6.75	2.484	55%
39	8	9.25	3.404	60%
44	7	13	4.784	65%
54	6	18.6	6.845	70%
58	5	20.5	7.544	75%

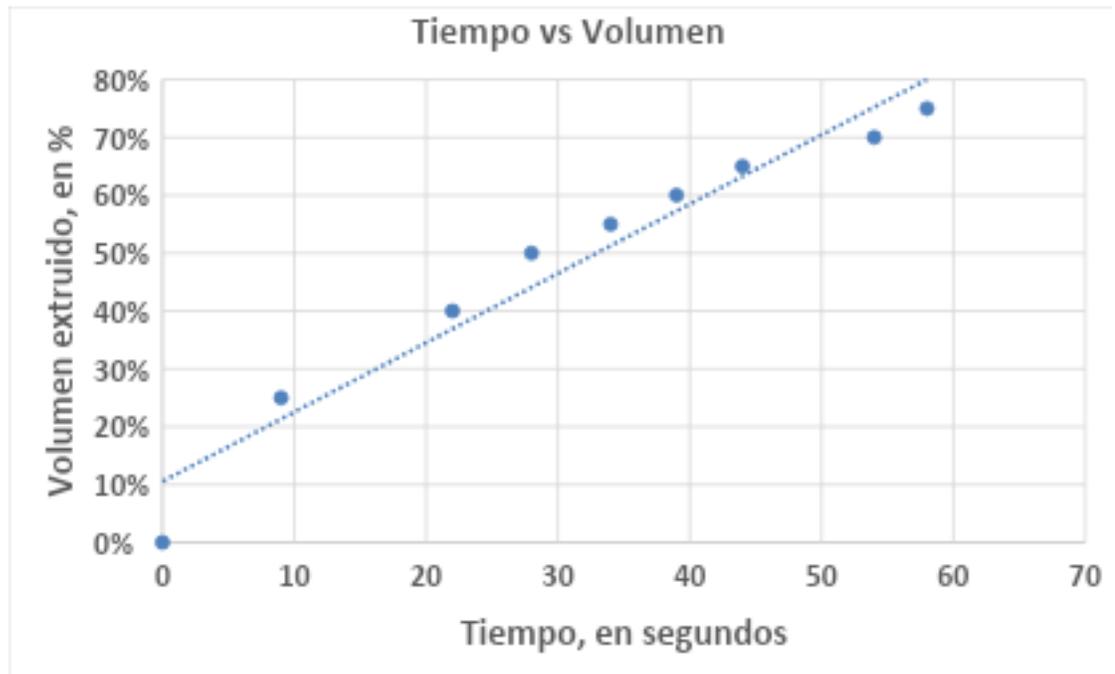


Figura 27. Tiempo de extrusión vs. volumen extruido durante la extrusión en una unidad de impresión tipo jeringa.

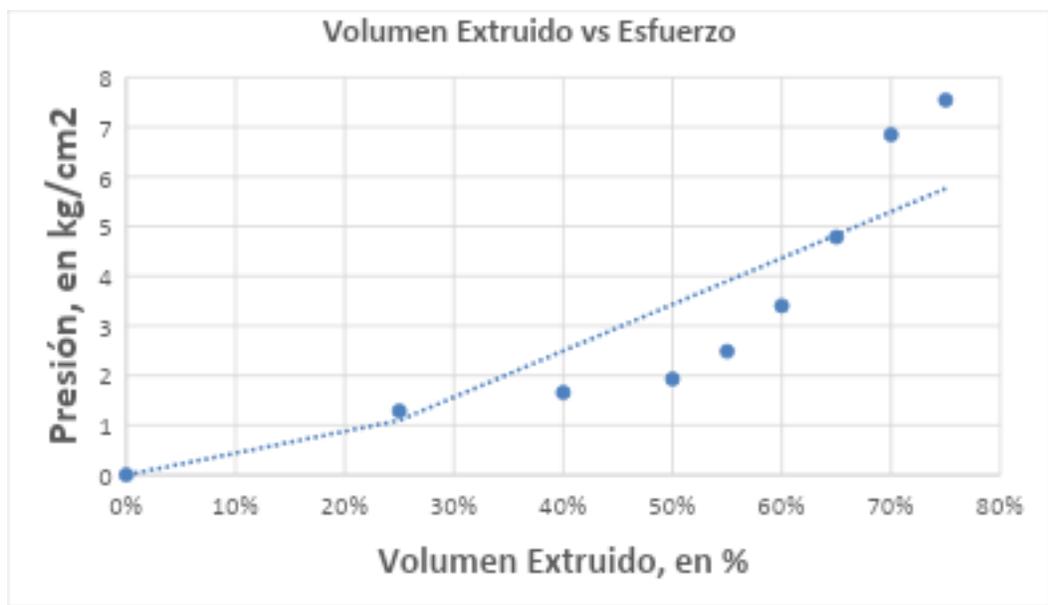


Figura 28. Volumen extruido, en % vs. Presión de extrusión, en kg/cm² durante la extrusión en una unidad de impresión tipo jeringa.

Al realizarle una reometría a la tinta inalterada, se puede observar el incremento de la viscosidad con el tiempo, llegando a triplicarse en un marco de 25 minutos, llegando a valores de 300 Pa.s en el lapso del tiempo que se presentaba el bloqueo en las unidades de impresión utilizadas, como se muestra en la **Figura 29**. Esto nos confirma que la tinta tiene la presencia de tixotropía, un comportamiento reoespesante, además que el desarrollo de la resistencia no es lineal, además de ilustrar cómo en procesos de impresión, en poco tiempo puede haber un incremento significativo en la viscosidad de la tinta.

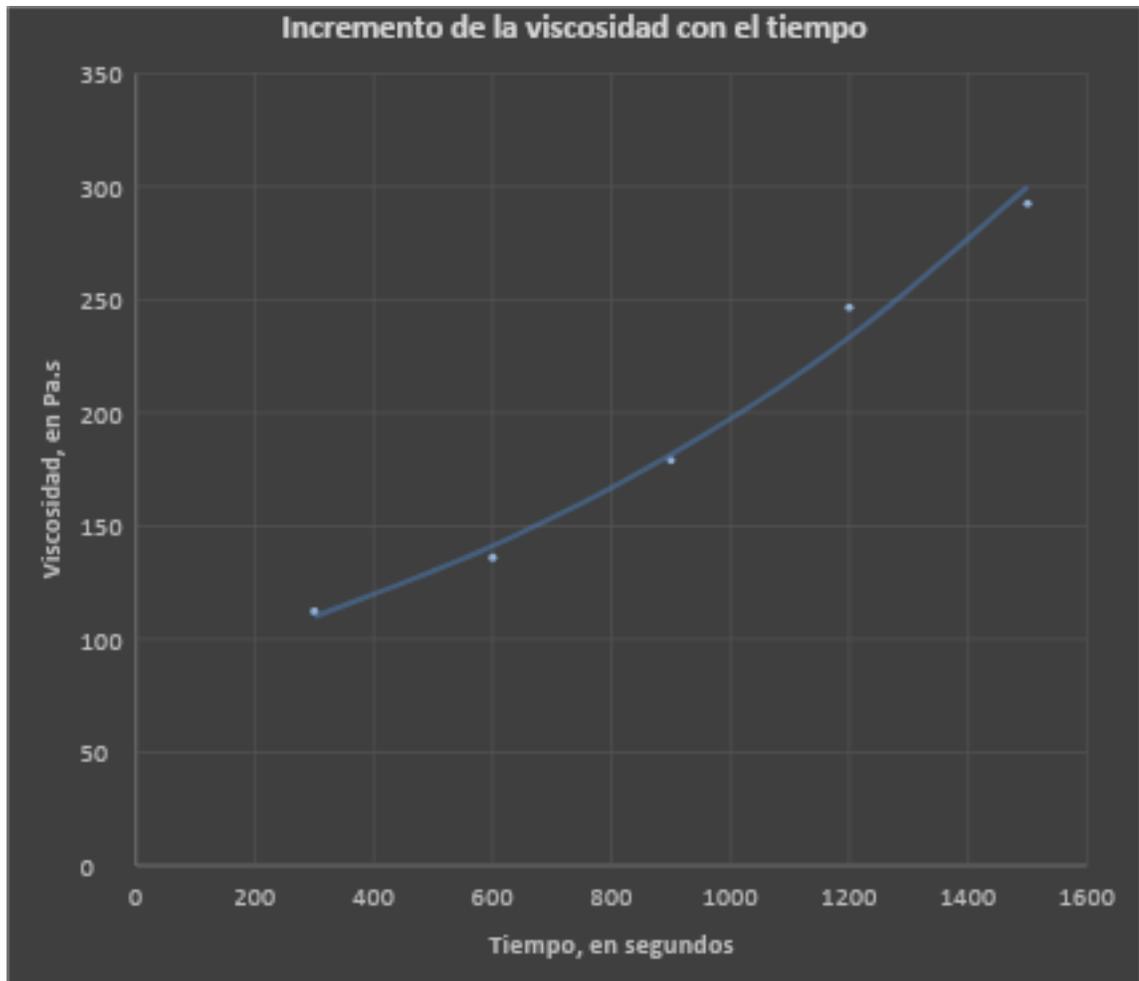


Figura 29. Evaluación Reológica de la mezcla de referencia óptima para observar el incremento de su viscosidad con el tiempo.

Al observar el remanente en la unidad de impresión, se observó que era de una consistencia mucho más seca que la mezcla impresa, por lo que se considera que el bloqueo sucede debido a que realizamos una extrusión únicamente de la capa de lubricación, y al terminar de extruir esa capa de lubricación, sucede el taponamiento: Si observamos el material que queda después de la extrusión, como se muestra en la **Figura 30**, incluso es posible apreciar un conducto por el cual fluyó material, mientras alrededor se aprecia material depositado, más rígido y seco.



Figura 30. Residuo no extruible que queda en la unidad de impresión posterior al taponamiento

Para comprobar esto, en las etapas finales de la extrusión, cuando notamos que empezaban a producirse bloqueos, determinamos el contenido de agua de la mezcla que había sido impresa y la que aún quedaba dentro del reservorio de la jeringa, que no pudo extruirse porque su viscosidad excedía la capacidad del motor de la impresora, y pudimos confirmar el fenómeno descrito anteriormente, ya que a pesar de tratarse de la misma suspensión, el residuo no imprimible en la jeringa tenía un contenido de humedad 8% menor a lo extruido (equivalente a un cambio en la relación agua/cemento de 0.08), lo que es considerable si tomamos en cuenta que se trabaja en un nivel de humedad de la mezcla de 27% (relación agua/cemento de 0.27).

Para comprender mejor este fenómeno mediante el cual la mezcla es alterada durante su extrusión a través de las unidades de impresión tipo jeringas utilizadas, es importante destacar que existe una reducción de área considerable en la salida de estas unidades de impresión, debido a que el área de la boquilla de la jeringa corresponde a alrededor de un 20% con respecto al área del reservorio. Este fenómeno ha sido observado por otros autores, quienes lo han denominado como “sangrado forzado” (forced bleeding, en inglés) [82,83], que se presenta en unidades de bombeo, cuando a altas presiones, se separa la capa de lubricación, en contacto con la superficie del ducto mediante el cual se hace el bombeo, de la masa del concreto fresco, provocando taponamientos al aglomerarse las fracciones sólidas de la suspensión que comienzan a friccionar contra las paredes del ducto de

bombeo. En procesos de manufactura, para metales y materiales similares, se ha observado un fenómeno similar al realizar extrusiones a través de secciones con reducciones de área bruscas, como se muestra en la **Figura 31** [84]:

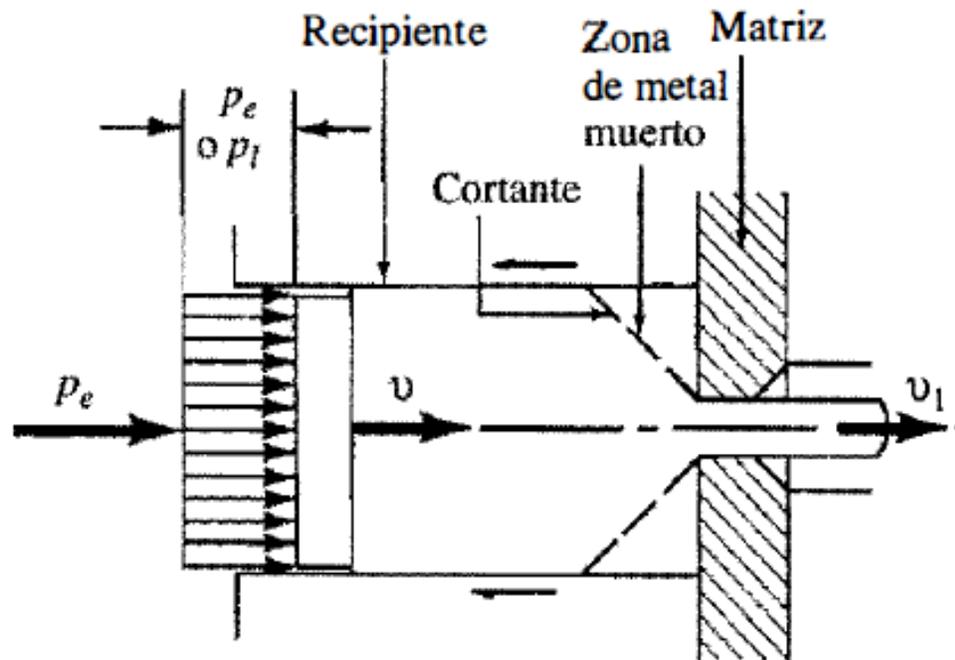


Figura 31. Al extruir a través de una reducción de área, se obtienen zonas “muertas”, las cuales no fluyen y eventualmente causan un taponamiento en la unidad de extrusión. [84]

Tomando en cuenta lo anterior, es posible concluir que en este tipo de unidades (jeringas), con un arreglo como el mostrado en la **Figura 17**, es posible extruir hasta alrededor del 75% del volumen antes de que se presenten bloqueos en la unidad de impresión por la reducción severa de área. Además, se determinó que la presión máxima de extrusión para estas unidades **corresponde a alrededor de 5.5 a 6.6 kg/cm², considerando un diámetro interno**

en el reservorio del material de la unidad de impresión (jeringa) de 18.6 mm, y una fuerza de extrusión máxima de 15-18 kgf.

Finalmente, para descartar que el problema presentado fuera debido a la mezcla, se probó a extruir manualmente la mezcla óptima de prueba a través de una unidad con una reducción de área gradual, con una geometría de cono truncado, donde pudo observarse que la totalidad de la mezcla pudo ser impresa sin presentar problemas de bloqueos, como se muestra en la **Figura 32**.



Figura 32. Extrusión manual de la mezcla óptima de prueba a través de una unidad con una reducción de área gradual.

9.4 Resultados de fluidez y esfuerzo de cedencia

A continuación, en la **Tabla 11** se muestran los resultados experimentales de las mezclas de pasta generadas a partir de la matriz experimental de la **Tabla 5**, a las cuales se les midió su % de extensión en la mesa de fluidez,

utilizando un molde de pasta con un diámetro en la base de 70 mm, a 25 compactaciones en la mesa de fluidez, basado en la ASTM C1437 [71], así como la penetración con el vástago del equipo de vicat en especímenes de pasta según la ASTM C187 [74]. Los valores de penetración del vástago de vicat fueron después utilizados para calcular el esfuerzo de cedencia estático τ_0 , según la ecuación 3.

Tabla 11. Resultados de la Matriz experimental para este estudio

Corrida	Factores			Fluidez, extensión en %	Penetración con vástago Vicat, mm	τ_0 estimado, en Pa
	Rel. a/c	Ad. inclusor de aire (ml/kg c)	Ad. reductor de agua (ml/kg cem)			
1	0.26	1.2	0.5	98.04	18	2580.9
2	0.26	1.2	1	109.07	28	3410.5
3	0.26	1.2	1.5	113.25	27	3536.8
4	0.26	2.4	0.5	100.68	15	6366.2
5	0.26	2.4	1	104.93	19	5025.9
6	0.26	2.4	1.5	129.11	35	2728.4
7	0.26	3.6	0.5	90.25	9	10610.3
8	0.26	3.6	1	96.50	20	4774.6
9	0.26	3.6	1.5	113.68	36	2652.6
10	0.27	1.2	0.5	104.04	16	5968.3
11	0.27	1.2	1	115.68	30	3183.1
12	0.27	1.2	1.5	117.50	33	2893.7
13	0.27	2.4	0.5	103.36	26.5	3603.5
14	0.27	2.4	1	130.89	38	2513.0
15	0.27	2.4	1.5	130.25	23	4151.9
16	0.27	3.6	0.5	114.86	22	4340.6
17	0.27	3.6	1	112.57	27.5	3472.5
18	0.27	3.6	1.5	122.36	38	2513.0

9.5 Modelación preliminar de fluidez y esfuerzo de cedencia

Una vez obtenidos los datos experimentales de la **Tabla 11**, se llevó a cabo el análisis de éstos con el fin de interrelacionar las variables independientes de la pasta: relación agua/cemento, contenido de aditivo reductor de agua y contenido de aditivo inclusor de aire, con las variables dependientes: fluidez, como una medición empírica de la viscosidad, y esfuerzo de cedencia, ambos de importancia fundamental para la extrusión e impresión de las **pastas**.

Para realizar la modelación en Excel se hizo uso de la herramienta de “Regresión en el menú de “Análisis de datos”, la cual nos permite llevar a cabo una regresión lineal multivariable. Ahora bien, tomando en cuenta que las propiedades estudiadas dependen de fenómenos de hidratación que se llevan a cabo sobre la interfaz superficial de las partículas, los cuales siguen una tendencia exponencial a medida que progresa la hidratación, además que otros autores han reportado relaciones exponenciales entre el esfuerzo de cedencia y la relación agua/cemento [50,85], se optó por aplicar logaritmo natural a las variables de la **Tabla 10** para posteriormente interrelacionarlas mediante un análisis de regresión lineal multivariable. En la **Tabla 12** se muestran los resultados de aplicar logaritmo natural a los valores de la **Tabla 11**:

Tabla 12. Logaritmo natural de los resultados de la Matriz experimental para este estudio

Corrida	Factores			Ln (Fluidez %)	Ln (τ_0 en Pa)
	Ln (Rel. a/c)	Ln (Ad. IA)	Ln (Ad RA)		
1	0.26	1.2	0.5	98.04	2580.9
2	0.26	1.2	1	109.07	3410.5
3	0.26	1.2	1.5	113.25	3536.8
4	0.26	2.4	0.5	100.68	6366.2
5	0.26	2.4	1	104.93	5025.9
6	0.26	2.4	1.5	129.11	2728.4
7	0.26	3.6	0.5	90.25	10610.3
8	0.26	3.6	1	96.50	4774.6
9	0.26	3.6	1.5	113.68	2652.6
10	0.27	1.2	0.5	104.04	5968.3
11	0.27	1.2	1	115.68	3183.1
12	0.27	1.2	1.5	117.50	2893.7
13	0.27	2.4	0.5	103.36	3603.5
14	0.27	2.4	1	130.89	2513.0
15	0.27	2.4	1.5	130.25	4151.9
16	0.27	3.6	0.5	114.86	4340.6
17	0.27	3.6	1	112.57	3472.5
18	0.27	3.6	1.5	122.36	2513.0

A continuación, en la **Figura 33**, se muestran los resultados de la regresión lineal multivariable para la variable dependiente Fluidez, en %, en función de las 3 variables independientes del estudio: relación agua/cemento, contenido de aditivo inclusor de aire y contenido de aditivo reductor de agua. De esta regresión cabe destacar lo siguiente:

- El valor de R^2 , si bien no es bajo, tampoco es considerablemente alto, lo que implicaría que el modelo no explica totalmente las variaciones en la fluidez.
- Las variables independientes influyen sobre la fluidez de la siguiente forma: en mayor medida influye el contenido de aditivo reductor de agua, seguido por la relación agua/cemento, y el contenido de aditivo inclusor de aire tiene la menor influencia sobre la fluidez.
- El valor estadístico F, excede los máximos para valores de α de 1 % (5.56), 2.5% (4.24) y 5% (3.34) [80] lo que implicaría que el modelo puede no ser el más adecuado para explicar la fluidez.
- Podría ser necesario realizar otro tipo de regresión o ajuste al modelo, para buscar que sea válido en función de su estadístico F, y que aumente su valor de R^2 . Esto también puede deberse a que haya otras variables no determinadas que puedan influenciar en el resultado, o que es necesario ampliar el rango de mediciones.

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.8271375
Coefficiente de determinación R ²	0.6841564
R ² ajustado	0.6164756
Error típico	0.065896
Observaciones	18

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	0.1316829	0.0438943	10.108579	0.00083784
Residuos	14	0.0607920	0.0043423		
Total	17	0.1924749			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	8.1669998	1.0936716	7.4675063	0.0000030	5.8213075	10.5126922
Ln (Relación a/C)	2.5906412	0.8230897	3.1474593	0.0071275	0.8252894	4.3559930
Ln (Adit. IA)	-0.0032984	0.0342410	-0.0963283	0.9246252	-0.0767380	0.0701413
Ln (Adit. RA)	0.1546919	0.0342410	4.5177383	0.0004825	0.0812523	0.2281316

Figura 33. Regresión lineal multivariable para la fluidez de la pasta, en excel

Tomando en cuenta los valores de la regresión de la **Figura 33**, es posible determinar la siguiente ecuación multivariable para la fluidez de la pasta:

Ec.6

De igual manera, en la **Figura 34**, se muestran los resultados de la regresión lineal multivariable para la variable dependiente Esfuerzo de cedencia, en Pa, en función de las 3 variables independientes del estudio:

relación agua/cemento, contenido de aditivo inductor de aire y contenido de aditivo reductor de agua. De esta regresión cabe destacar lo siguiente:

- El valor de R^2 , es bajo, lo que implicaría que el modelo no explica totalmente las variaciones en el esfuerzo de cedencia.
- Las variables independientes influyen sobre el esfuerzo de cedencia de la siguiente forma: en mayor medida influye el contenido de aditivo reductor de agua, seguido por la relación agua/cemento, y el contenido de aditivo inductor de aire tiene la menor influencia sobre la fluidez.
- El valor estadístico F, no excede los máximos para valores de α de 1 % (5.56), 2.5% (4.24) y 5% (3.34) [80] lo que implicaría que las variables del modelo sí explican el esfuerzo de cedencia.
- Podría ser necesario realizar otro tipo de regresión o ajuste al modelo, para buscar que sea válido en función de su estadístico F, y que aumente su valor de R^2 . Esto también puede deberse a que haya otras variables no determinadas que puedan influenciar en el resultado, o que es necesario ampliar el rango de mediciones.

<i>Estadísticas de la regresión</i>						
Coeficiente de correlación múltiple	0.6354853					
Coeficiente de determinación R ²	0.40384157					
R ² ajustado	0.27609334					
Error típico	0.32915184					
Observaciones	18					
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>	
Regresión	3	1.02747	0.34249	3.16123	0.05803	
Residuos	14	1.51677	0.10834			
Total	17	2.54424				
	<i>Coeficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	2.05052	5.46291	0.37535	0.71302	-9.66626	13.76730
Ln (Relación a/C)	-4.53409	4.11135	-1.10282	0.28870	-13.35205	4.28388
Ln (Adit. IA)	0.16441	0.17103	0.96126	0.35273	-0.20242	0.53124
Ln (Adit. RA)	-0.46348	0.17103	-2.70988	0.01693	-0.83032	-0.09665

Figura 34. Regresión lineal multivariable para el esfuerzo de cedencia de la pasta, en excel

Tomando en cuenta los valores de la regresión en la Figura 10, es posible determinar la siguiente ecuación multivariable para la fluidez de la pasta:

Ecuación 7

Tomando en cuenta que los valores de R² fueron bajos para ambas regresiones, se optó por llevar a cabo un análisis en Minitab, con los comandos “Estadísticas” -> “DOE” -> “Factorial” -> “Analizar Diseño Factorial”, utilizando los datos medidos y calculados en la Tabla 8, aprovechando que Minitab permite estimar la influencia de interacciones de las variables.

Al hacer el análisis en Minitab, con un enfoque de regresión, se pudo obtener los efectos y coeficientes que se muestran en la **Figura 35** para la Fluidez de la pasta, en %:

Efectos y coeficientes estimados para Fluidez, EN % (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef.	Coef. de EE	T	P
Constante		111.500	1.804	61.81	0.000
Relación A/C	10.667	5.333	1.804	2.96	0.013
Aditivo IA (ml/kg cem)	-1.226	-0.613	2.209	-0.28	0.787
Aditivo RA (ml/kg cem)	19.155	9.577	2.209	4.34	0.001
Relación A/C*Aditivo IA (ml/kg cem)	5.417	2.708	2.209	1.23	0.246
Aditivo IA (ml/kg cem)* Aditivo RA (ml/kg cem)	0.563	0.281	2.706	0.10	0.919
Relación A/C*Aditivo IA (ml/kg cem)* Aditivo RA (ml/kg cem)	-3.545	-1.772	2.706	-0.66	0.526

S = 7.65310 PRESS = 1669.04
R-cuad. = 72.88% R-cuad. (pred.) = 29.73% R-cuad. (ajustado) = 58.08%

Análisis de varianza para Fluidez, EN % (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC sec.	SC ajust.	MC ajust.	F
Efectos principales	3	1617.23	1617.23	539.08	9.20
2-Interacciones de (No.) factores	2	88.65	88.65	44.33	0.76
3-Interacciones de (No.) factores	1	25.13	25.13	25.13	0.43
Error residual	11	644.27	644.27	58.57	
Total	17	2375.28			

Figura 35. Coeficientes de la Regresión lineal multivariable para la fluidez de la pasta, en Minitab

De la **Figura 35**, cabe destacar lo siguiente:

- El R^2 obtenido se mantiene en un valor similar, incluso disminuye un poco (a 58%) , lo que nos confirma que para explicar la fluidez de la pasta será necesario otro tipo de modelos, o bien medir otras variables que puedan explicarlo mejor.
- Para la regresión, no se tomó en cuenta el efecto de la interacción (Relación A/C * Aditivo RA), ya que en un primer análisis se observó que no era significativa.

De manera similar, al hacer el análisis en Minitab, con un enfoque de regresión, pero ahora para el esfuerzo de cedencia de la pasta, se pudieron obtener los efectos y coeficientes que se muestran en la **Figura 36**:

```

Efectos y coeficientes estimados para ESFUERZO CEDENCIA REAL (unidades
codificadas)

Término                Efecto    Coef.
                    Coef de EE    T    P
Constante                4129    239.2  17.27  0.000
Relación A/C            -1005    -503   239.2  -2.10  0.059
Aditivo IA (ml/kg cem)    1132     566   292.9   1.93  0.080
Aditivo RA (ml/kg cem)  -2499   -1249   292.9  -4.27  0.001
Relación A/C*Aditivo IA (ml/kg cem) -1705    -852   292.9  -2.91  0.014
Aditivo IA (ml/kg cem)*
  Aditivo RA (ml/kg cem) -1917    -958   358.7  -2.67  0.022
Relación A/C*Aditivo IA (ml/kg cem)*
  Aditivo RA (ml/kg cem)  2540    1270   358.7   3.54  0.005

S = 1014.66      PRESS = 29472248
R-cuad. = 83.20%  R-cuad. (pred.) = 56.28%  R-cuad. (ajustado) = 74.04%

Análisis de varianza para ESFUERZO CEDENCIA REAL (unidades codificadas)

Fuente                GL    SC sec.  SC ajust.  MC ajust.  F
Efectos principales    3    27122888  27122888   9040963   8.78
2-Interacciones de (No.) factores  2    16065716  16065716   8032858   7.80
3-Interacciones de (No.) factores  1    12904664  12904664   12904664  12.53
Error residual         11    11324959  11324959   1029542
Total                  17    67418226

```

Figura 36. Coeficientes de la Regresión lineal multivariable para el esfuerzo de cedencia de la pasta, en Minitab

De la **Figura 36**, cabe destacar lo siguiente:

- El R^2 obtenido aumenta a un nivel considerable (a 74%) , lo que nos indica que este modelo en particular se puede considerar relativamente válido para predecir el esfuerzo de cedencia de la pasta en función de las variables independientes estudiadas: relación agua/cemento, contenido de aditivo inductor de aire y contenido de aditivo reductor de agua.

- Para la regresión, no se tomó en cuenta el efecto de la interacción (Relación A/C * Aditivo RA), ya que en un primer análisis se observó que no era significativa.

El software Minitab nos permite realizar una optimización numérica de la respuesta para buscar valores objetivo de la misma, con el fin de determinar un diseño de mezcla óptimo en función de algún valor deseado para la respuesta. Sin embargo, es posible utilizar los valores determinados en la regresión de Minitab, para expresar una ecuación para la variable dependiente; para el caso del esfuerzo de cedencia τ_0 , la ecuación de regresión ajustada en Minitab queda de la siguiente forma:

$$\tau_0 (Pa) = 4129 - 503\left(\frac{A}{C}\right) + 566(Ad IA) - 1249(Ad RA) - \left(852 * \left[\left(\frac{A}{C}\right) * (Ad IA)\right]\right) - (958 *$$

Ec. 8

Como podemos ver, la ecuación anterior se vuelve un poco impráctica para desarrollar a mano ya que involucra una gran cantidad de términos, por lo que lo recomendable para continuar con la experimentación es realizar estas corridas mediante software de análisis estadístico-matemático, con el fin de validar los modelos obtenidos.

CAPÍTULO 9:

CONCLUSIONES

De las pruebas realizadas en las diversas etapas del presente estudio se pueden destacar las siguientes conclusiones:

Materiales y caracterización:

- Los materiales utilizados en el presente estudio son adecuados para realizar una suspensión de cemento Portland para impresión 3D. Otros materiales laminares, como arcillas expandidas o fibras, podrían mejorar las propiedades del producto impreso al potenciar la tixotropía.

Pruebas de impresión para determinar una mezcla de referencia

- El uso de aditivos reductores de agua, aunque reduce la estabilidad de forma al reducir el esfuerzo de cedencia de la mezcla, mejora la calidad de la impresión porque facilita la extrusión y reduce la presencia de taponamientos por su efecto antifloculante, sin embargo, se recomienda utilizarlo en conjunto con otro agente que promueva la tixotropía.
- El uso de aditivos inclusores de aire mejora la estabilidad de la mezcla, reduciendo los agrietamientos, mejorando la extrudabilidad e incrementando el número de capas que pueden apilarse (constructibilidad).

- Mediante iteraciones fue posible llegar a una mezcla con un comportamiento óptimo para impresión 3D, se observó que hay tener especial atención a la extrudabilidad y estabilidad de forma durante este proceso para definir la formulación óptima.
- Es posible estimar mediante pruebas reométricas cantidades específicas de deformación o velocidades de corte límites en las cuales debemos mantenernos en las etapas de procesamiento de la tinta para un comportamiento específico deseable. En particular para la mezcla de referencia estudiada con potencial óptimo imprimible, se observó que a bajas deformaciones el material tiene un comportamiento más predominantemente elástico que viscoso ($G' > G''$), lo que nos es útil para aplicaciones de impresión 3D. Debe mantenerse la deformación menor a 10% para reducir el riesgo que la respuesta viscosa domine al material y éste fluya, perdiendo su estabilidad geométrica.
- El utilizar pruebas indirectas para el monitoreo de propiedades reológicas, como la mesa de fluidez y pruebas de consistencia como la penetración con el vástago Vicat, o equivalentes al revenimiento, es una alternativa que permite simplificar la metodología de ensaye y tiene una aplicación más directa en el campo de trabajo.

Análisis del bloqueo en las unidades de impresión utilizadas

- Debido a que el agente retardante utilizado no pareció aumentar el tiempo durante el cual era posible imprimir la mezcla, pero el uso de aditivo reductor de agua sí aumentó ese tiempo, es posible inferir que los fenómenos de endurecimiento que causan el taponamiento son debido a

un efecto físico por enlaces de puentes de hidrógeno débiles, en lugar de reacciones de hidratación y estructuración [4]. Esto último se vuelve más significativo si comparamos los tiempos de bloqueo para las unidades de impresión utilizadas (≈ 20 minutos), con los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta utilizada (205 minutos y 265 minutos, respectivamente).

- Si bien es útil contar con reducciones de área dentro de la unidad de impresión, que induzcan corte a la mezcla y eviten el desarrollo estructural antes de imprimirse, es importante considerar que estas reducciones de área sean hechas de forma gradual, para evitar que se presenten bloqueos en la unidad de impresión.
- En la medida de lo posible, debe optarse por no utilizar jeringas o sistemas con reducciones de área severas como cabezal de impresión, prefiriéndose aditamentos tipo tornillo que permita mantener a todo el material sujeto a corte, para prevenir la floculación del material

Modelación de fluidez y esfuerzo de cedencia:

- A pesar de que las variables (relación agua/cemento, contenido de aditivo inductor de aire, contenido de aditivo reductor de agua, y sus interacciones), sí explican los parámetros medidos como fluidez y esfuerzo de cedencia, en algunos modelos se observan R^2 bajas, lo que implica que puede ser necesario realizar análisis más profundos, con un mayor rango de mediciones, y más variables que permitan explicar y modelar el comportamiento del producto impreso.
- Los análisis con softwares que estimen la influencia de las interacciones entre las variables nos permiten estimar además si la combinación de

ciertos parámetros de diseño puede tener efectos sinérgicos o inhibitorios en determinada propiedad.

- Se pudo observar que se obtuvieron mejores correlaciones en los modelos para predecir el esfuerzo de cedencia o los resultados de consistencia mediante pruebas de penetración, con respecto a los modelos que pretenden predecir la fluidez, ya que la fluidez es un fenómeno más complejo que depende en parte de los estímulos aplicados.
- Es posible obtener modelos que puedan predecir el comportamiento de las **pastas** de cemento portland, en términos de propiedades de interés para la imprimibilidad. El modelo preliminar determinado constituye una herramienta útil para predecir y optimizar la formulación de pastas de cemento destinadas a impresión 3D, aunque se sugiere ampliar el análisis con mayor cantidad de datos para robustecer la predicción en un rango más amplio de condiciones.

CAPÍTULO 10

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Período	2020		2021			2022			2023	
Actividad	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 3	Sem. 4	Sem. 5	Sem. 6	Sem. 7	Sem. 8	Sem. 9	Sem. 10
Revisión del estado del arte										
Caracterización materia prima										
Desarrollo suspensión cemento gris alto desempeño										
Eval. y ajuste de propiedades reológicas para impresión										
Elaboración de especímenes para ensaye en estado endurecido										
Evaluación de parámetros de durabilidad, vida útil y huella CO ²										
Análisis de Resultados Experimentales										
Escritura de tesis										

CAPÍTULO 11

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Roussel, N., *Rheological requirements for printable concretes*. *Cement and Concrete Research* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- [2] Khayat, K. H., Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L. (2019). *Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview*. *Cement and Concrete Research*, 124, 105828.
- [3] Wu-Jian Long, Jie-Lin Tao, Can Lin, Yu-cun Gu, Liu Mei, Hua-Bo Duan, Feng Xing, *Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 239, 2019, 118054.
- [4] Wangler, Timothy; Roussel, Nicolas; Bos, Freek P.; Salet, Theo A.M.; Flatt, Robert J. (2019). *Digital Concrete: A Review*. *Cement and Concrete Research*, 123, 105780.
- [5] Russell, H.G. (1999), “*ACI Defines High-Performance Concrete*”, *Concrete International*, Vol. 21, No. 2, February 1999, pp. 56-57
- [6] Geert De Schutter, Karel Lesage, Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Guillaume Habert, Isolda Agusti-Juan, *Vision of 3D printing with*

concrete — Technical, economic and environmental potentials, Cement and Concrete Research, Volume 112, 2018, Pages 25-36.

- [7] Hull, C.W. (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. (Patente de Estados Unidos No. 4,575,330). UPV, Inc.
- [8] Young, R. y McMahon, S. (19 de abril del 2021) World's 1st 3D Printed Neighborhood Being Built In Mexico. Wbur. <https://www.wbur.org/hereandnow/2020/02/06/worlds-first-3d-printed-neighborhood-mexico>
- [9] Nadja Gaudillière, Romain Duballet, Charles Bouyssou, Alban Mallet, Philippe Roux, et al.. *Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design* 2018, Springer International Publishing, pp.459-472, 2018, 9783319922942.
- [10] Xu Z, Miao Y, Wu H, Yuan X, Liu C. Estimation of Viscosity and Yield Stress of Cement Grouts at True Ground Temperatures Based on the Flow Spread Test. *Materials (Basel)*. 2020 Jun 30;13(13):2939. doi: 10.3390/ma13132939. PMID: 32630088; PMCID: PMC7372412.
- [11] Moelich, Gerrit M.; Kruger, Jacques; Combrinck, Riaan (2020). Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete. *Composites Part B: Engineering*, 200(), 108313.
- [12] Jingchuan Zhang, Jialiang Wang, Sufen Dong, Xun Yu, Baoguo Han, (2019) A review of the current progress and application of 3D printed

concrete, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 125.

- [13] Jo, Jun Ho & Jo, Byung & Cho, Woohyun & Kim, Jung-Hoon. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. International Journal of Concrete Structures and Materials.
- [14] Essop, Anas, (10 de Mayo de 2023), SQ4D 3D prints 1,900 SQ FT home in 48 hours, <https://3dprintingindustry.com/news/sq4d-3d-prints-1900-sq-ft-home-in-48-hours-167141/>
- [15] Chun, Seung-Yeop & Kim, Su-jin & Kim, Woon-Gi & Lee, Geumyeon & Lee, Myeung-jin & Ye, Bora & Kim, Hong & Lee, Jeong & Kim, Taewook. (2022). Powder-bed-based 3D printing with cement for sustainable casting. Journal of Materials Research and Technology.
- [16] Autodesk Instructables (10 de Mayo de 2023), Concrete 3D Printer, <https://www.instructables.com/Concrete-3D-Printer/>
- [17] Lowke, Dirk & Enrico, Dini & Perrot, Arnaud & Weger, Daniel & Gehlen, Christoph & Dillenburger, Benjamin. (2018). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. Cement and Concrete Research.
- [18] Delphine Marchon, Shiho Kawashima, Hela Bessaies-Bey, Sara Mantellato, Serina Ng, Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry, Cement and Concrete Research, Volume 112, 2018, Pages 96-110

- [19] Dey, Dhruvman & Srinivas, Dodda & Panda, Biranchi & Suraneni, Prannoy & Sitharam, T.G.. (2022). Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review. *Journal of Cleaner Production*.
- [20] Tramontin Souza, Marcelo & Ferreira, Igor & Guzi de Moraes, Elisangela & Senff, L. & Oliveira, Antonio. (2020). 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. *Journal of Building Engineering*.
- [21] Ding, Tao & Xiao, Jianzhuang & Zou, Shuai & Zhou, Xinji. (2020). Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Composite Structures*.
- [22] Yu Zhang, Yunsheng Zhang, Wei She, Lin Yang, Guojian Liu, Yonggan Yang, *Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete, Construction and Building Materials*, Volume 201, 2019, Pages 278-285.
- [23] Choi, Myoung Sung; Lee, Jung Soo; Ryu, Keum Seong; Koh, Kyung-Taek; Kwon, Seung Hee (2016). Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. *Construction and Building Materials*, 106(), 632–639.
- [24] Moeini, M. A., Hosseinpoor, M., & Yahia, A. (2020). Effectiveness of the rheometric methods to evaluate the build-up of cementitious mortars used for 3D printing. *Construction and Building Materials*, 257, 119551

- [25] A.V. Rahul, M. Santhanam, H. Meena, Z. Ghani, (2019), 3D printable concrete: Mixture design and test methods, *Cement and Concrete Composites*.
- [26] R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger, *3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research*, *Cement and Concrete Research*, Volume 112, 2018, Páginas 37-49, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- [27] Pervez, M. (15 de Febrero de 2024). *3DXB creates world's largest 3D-printed villa*. FOCUS. <https://focus.hidubai.com/3dxb-creates-worlds-largest-3d-printed-villa/>
- [28] Guinness World Records. (22 de Septiembre 2024). *Largest 3D printed villa*. <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/754918-largest-3d-printed-villa>
- [29] Constructions 3D. (2024). *Maxiprinter*. <https://www.constructions-3d.com/en/maxiprinter>
- [30] UAE. (05 julio 2023). *Dubai 3D Printing Strategy*. <https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/strategies-plans-and-visions/industry-science-and-technology/dubai-3d-printing-strategy>
- [31] Striatus Project. (05 de Julio 2023). *3D Concrete Printed masonry*. <https://www.striatusbridge.com/>
- [32] 3D printed house. (2023). *Project Milestone*. <https://www.3dprintedhouse.nl/en/project-info/project-milestone/>

- [33] Wolfs, R.; Bos, D.; Salet, T.; (2023), *Lessons learned of project Milestone: The first 3D printed concrete house in the Netherlands*, Materials Today: Proceedings
- [34] Bauguess, B. (16 de julio de 2024). *New ICON homes coming to Wimberley, Texas and available for sale*. ICON Projects. <https://www.iconbuild.com/newsroom/new-icon-homes-coming-to-wimberley-texas-and-available-for-sale>
- [35] Tong, Z. (Octubre 22 de 2019). *3D printed Zhaozhou Bridge unveiled in Tianjin*. People's Daily Online. <http://en.people.cn/n3/2019/1022/c90000-9625284-2.html>
- [36] Guinness World Records. (30 de Julio 2020). *Longest 3D-printed bridge*. <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/597621-longest%C2%A03d-printed-bridge>
- [37] A.S.J. Suiker, R.J.M. Wolfs, S.M. Lucas, T.A.M. Salet, (2020), Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing, Cement and Concrete Research, Volume 135.
- [38] Kaliyavaradhan, Senthil Kumar & Ps, Ambily & Prem, Prabhat & Ghodke, Swapnil. (2022). Test methods for 3D printable concrete. Automation in Construction..
- [39] Van der Putten J, Nerella VN, Mechtcherine V, Sonebi M, D'Hondt M, Weger D, Wang Z, Menna C, Roussel N, Lowke D, Van Titelboom K, De Schutter G (2021) Chapter 5: Properties and testing of printed cement based materials in hardened state [submitted]. In: RILEM Technical

committee digital fabrication with cement-based materials (TC-DFC)
(Hrsg.): STAR - State of the Art Review

- [40] AC509, Acceptance Criteria for 3-D Automated Construction Technology for 3-D Concrete Walls. ICC Evaluation Service, Junio 2022, www.icc-es.org
- [41] ASTM, *ASTM International and ISO Unveil Framework for Global 3D Printing Standards*, Junio 2022, <https://sn.astm.org/?q=outreach/astm-international-and-iso-unveil-framework-global-3d-printing-standards-nd16.html>
- [42] Hoang, P.D.; Moon H.; Ahn Y.; (2024), *Earth and Space 2024: Engineering for Exreme Environments, Chapter: Optimizing 3D-Printed Concrete Mixtures for Extraterrestrial Habitats: A Machine Learning Framework. doi:10.1061/9780784485736.002*
- [43] Wu, Ch.; Yu, Z.; Shao, R.; Li, J.; (2024), A comprehensive review of extraterrestrial construction, from space concrete materials to habitat structures, *Engineering Structures*, Volume 318, 2024, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118723>
- [44] Wallevik, O. H., & Wallevik, J. E. (2011). Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1279-1288
- [45] Regalado, Alejandro & Ramos, Octavio. (2009). Comportamiento reológico de un fluido. *Ciencia y Mar*. XII. 35-42

- [46] ACI Committee 238 (2008). "Report on Measurements of Workability and Rheology of Fresh Concrete". ACI 238-08, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA
- [47] G.H. Tattersall, P.G.F. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman, London, 1983.
- [48] Cooke, Megan & Rosenzweig, Derek. (2021). The rheology of direct and suspended extrusion bioprinting. *APL Bioengineering*. 5.
- [49] P. Coussot, 1 - Introduction to the rheology of complex fluids, Editor(s): Nicolas Roussel, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, *Understanding the Rheology of Concrete*, Woodhead Publishing, 2012, Pages 3-22, ISBN 9780857090287
- [50] Kosmatka et. al, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Primera Edición, 2004.
- [51] Aïtcin, P.-C & Flatt, Robert. (2015). *Science and technology of concrete admixtures*.
- [52] Ahmed M. Mostafa, Ammar Yahia, Physico-chemical kinetics of structural build-up of neat cement-based suspensions, *Cement and Concrete Research*, Volume 97, 2017, pp. 11-27
- [53] Ojeda-Farías, O.; Hebraud, P.; Lootens, D.; Liard, M.; Mendoza-Rangel, J.M. (2019). *Thixotropy of reactive suspensions: The case of cementitious materials. Construction and Building Materials*, 212, 121–129
- [54] Ojeda-Farías, O., (2019). *Thixotropy of Reactive Suspensions: Application to White Portland Cement Suspensions* (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León.

- [55] Nair, Sooraj A.O.; Alghamdi, Hussam; Arora, Aashay; Mehdipour, Iman; Sant, Gaurav; Neithalath, Narayanan (2019). *Linking Fresh Paste Microstructure, Rheology and Extrusion Characteristics of Cementitious Binders for 3D Printing*. Journal of the American Ceramic Society, (), –. doi:10.1111/jace.16305
- [56] Jeong, H., Han, S. J., Choi, S. H., Lee, Y. J., Yi, S. T., & Kim, K. S. (2019). *Rheological Property Criteria for Buildable 3D Printing Concrete*. Materials (Basel, Switzerland), 12(4), 657. <https://doi.org/10.3390/ma12040657>
- [57] Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; Flatt, R.J. (2009). *Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests*. Cement and Concrete Research. 39. 401-408.
- [58] Myoung Sung C, Jung Soo L, Keum Seong R, Kyung-Taek K, Seung Hee K (2016) Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test. Constr Build Mater, 106:632–639. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.106>
- [59] Gosselin, C.; Duballet, R.; Roux, Ph.; Gaudillière, N.; Dirrenberger, J.; Morel, Ph. (2016). *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders*. Materials & Design, 100, 102–109.
- [60] Ma, G., Wang, L. *A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing*. Front. Struct. Civ. Eng. 12, 382–400 (2018).

- [61] Organización de las Naciones Unidas. (2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [62] NMX-C-414-ONNCCE-1999 (1999) “Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba”
- [63] MICROTRAC (2024) Particle size analyzer S3500.
<https://www.microtrac.com/products/particle-size-shape-analysis/laser-diffraction/s3500/>. Accesada el 24 Junio 2024.
- [64] MICROTRAC (2019) Accuracy and Precision of Microtrac Particle Analyzers S35500 / Bluewave / SYNC / Nanotrac.
<https://www.microtrac.com/files/100141/accuracy-and-precision-of-microtrac-particle-analyzers.pdf>. Accesada el 24 Junio 2024.
- [65] ASTM C125-09a. (2009). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [66] ASTM C494/C494M-10 (2010). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [67] CEMEX (2023). Ficha Técnica Aditivo FOAMX – Inclusor de Aire.
https://industriales.cemexmexico.com/documents/53024721/0/Copia%20de%20FT%20CEMEX%20INDUSTRIAL_ADITIVOS_2020_INCLUSOR%20DE%20AIRE_FOAMX.pdf/7d086acd-b7d9-f1c1-2eaf-b0ce724ddd1d
- [68] TA Instruments. (2023). ARES G-2 Rheometer.
<https://www.tainstruments.com/ares-g2/>

- [69] Anton Paar. (2023). Reómetro compacto modular MCR 102e/302e/502e. <https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/reometro-mcr-102-302-502/>
- [70] Hyrel 3D. (2023). The Hydra 16A – The Freestanding (Floor) Model. <https://www.hyrel3d.com/portfolio/hydra16a/>
- [71] ASTM C1437-07 (2007). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [72] ASTM C185-20 (2020). Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [73] ASTM C191-08 (2008). Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [74] ASTM C187-11 (2011). *Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [75] Robayo-Salazar, R., Mejía de Gutiérrez, R., Villaquirán-Caicedo, M. A., Delvasto Arjona, S., (2023), 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, Volume 146. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>.
- [76] Li, Haodao & Addai-Nimoh, Alfred & Kreiger, Eric & Khayat, Kamal. (2024). Methodology to design eco-friendly fiber-reinforced concrete for 3D printing. *Cement and Concrete Composites*. 147. 105415. [10.1016/j.cemconcomp.2023.105415](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105415).

- [77] Malik, Umair & Riaz, Raja & Ur Rehman, Saif & Usman, Muhammad & Riaz, Raja & Hamza, Raja. (2024). *Advancing Mix Design Prediction in 3D Printed Concrete: Predicting Anisotropic Compressive Strength and Slump Flow*. *Case Studies in Construction Materials*. 21. e03510. 10.1016/j.cscm.2024.e03510.
- [78] Şahin, Hatice Gizem & Mardani, Ali. (2022). *Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review*. *Construction and Building Materials*. 316. 125865. 10.1016/j.conbuildmat.2021.125865.
- [79] Wang, Xianggang & Jia, Lutao & Jia, Zijian & Zhang, Chao & Chen, Yuning & Ma, Lei & Wang, Zhibin & Deng, Zhicong & Banthia, Nemkumar & Zhang, Yamei. (2022). Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process. *Journal of Building Engineering*. 56. 104745. 10.1016/j.jobe.2022.104745.
- [80] Montgomery, D. C. (2005). *Diseño y Análisis de Experimentos (2a. ed.)*. Mexico: LIMUSA WILEY
- [81] Ritz C, Streibig JC, Kniss A (2021) How to use statistics to claim antagonism and synergism from binary mixture experiments. *Pest Manag Sci* 77:3890-3899. <https://doi.org/10.1002/ps.6348>
- [82] Vanhove, Y., & Khayat, K. H. (2016). Forced Bleeding Test to Assess Stability of Flowable Concrete. *ACI Materials Journal*, 113(6), 753+
- [83] Marc Jolin, Dennis Burns, Benoît Bissonnette, Frédéric Gagnon, and Louis-Samuel Bolduc, "UNDERSTANDING THE PUMPABILITY OF CONCRETE" in "Shotcrete for Underground Support XI", Felix Amberg,

M.o.S. ETHZ, SIA, Switzerland; Knut F Garshol, BASF Construction Chemicals, LLF, USA Eds, ECI Symposium Series, (2009).

- [84] Schey, J. A. (2002). Procesos de manufactura. Colombia: McGraw-Hill. 3a Edición. Capítulo 9. Pp 349-357.
- [85] Banfill, Phillip. (1991). Rheology of Fresh Cement and Concrete. Rheol Rev. 10.4324/9780203473290.