



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y
COMUNICACIÓN
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Tesis de Grado

PROPUESTA DE DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO DE 35 MPA
APLICABLE EN IMPRESORAS 3D DE CONCRETO

Autor

Esteban Ramírez Ramírez

Tutor

Ing. Minor Eduardo Murillo Chacón

Lectora

Ing. Yéssica Hernández Delgado

Heredia, mayo 2023



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: "**Propuesta de diseño de mezcla de concreto hidráulico de 35 MPa aplicable en impresoras 3D de concreto**", por el (la) estudiante: Ramírez Ramírez Esteban., fue aprobada por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede Heredia, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

Firmado digitalmente por Minor
Murillo Chacón
Fecha: 2023.05.10 12:58:59 -06'00'

Minor Murillo Chacón

Tutor

YESSICA
HERNANDEZ

Firmado digitalmente por
YESSICA HERNANDEZ
DELGADO (FIRMA)

DELGADO (FIRMA)

Fecha: 2023.05.10 14:26:29
-06'00'

Yéssica Hernández Delgado

Lector

José María
Ulate
Zárate

Firmado
digitalmente por
José María Ulate
Zárate
Fecha: 2023.05.10
11:11:27 -06'00'

José Ulate Zárate

Representante

CARTA DE APROBACIÓN DEL FILÓLOGO

San José, viernes 5 de mayo de 2023

Señores

Miembros del Comité de Trabajos Finales de Graduación

Escuela de Ingeniería Civil

Facultad de Ingenierías, Tecnologías de la Información y Comunicación

Universidad Latina de Costa Rica

Estimados señores:

Yo, **Edin Mauricio Buzano Barrantes**, en mi condición de filólogo graduado en la Universidad de Costa Rica, certifico que leí y corregí el Trabajo Final de Graduación denominado: **“PROPUESTA DE DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO DE 35 MPA APLICABLE EN IMPRESORAS 3D DE CONCRETO”**, el cual fue elaborado por el estudiante **Esteban Ramírez Ramírez**, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Civil**.

Se hizo la corrección del trabajo en aspectos tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, concordancia, coherencia, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, por lo tanto, desde ese punto de vista, considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Dado lo anterior, certifico que el documento contiene las observaciones y correcciones solicitadas, quedando de conformidad con lo pactado.

Suscribe de ustedes cordialmente,

**EDIN MAURICIO
BUZANO
BARRANTES
(FIRMA)**

Firmado digitalmente por
EDIN MAURICIO BUZANO
BARRANTES (FIRMA)
Fecha: 2023.05.05
10:25:30 -06'00'

Lic. Edin Mauricio Buzano Barrantes
No. de adscripción a COLYPRO **024561**

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Esteban Ramírez Ramírez estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Proyecto de Graduación/Tesis/Práctica Profesional titulado:

Propuesta de diseño de mezcla de concreto hidráulico de 35 MPa aplicable en impresoras 3D de concreto.

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Heredia, 8 de mayo de 2023.



Esteban Ramírez Ramírez

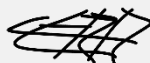
Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)
Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros):	Esteban Ramírez Ramírez
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil Licenciatura
Modalidad de TFG:	Tesis
Titulado:	Propuesta de diseño de concreto hidráulico de 35 MPa aplicable en impresoras 3D de concreto.

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD** **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 8 de mayo de 2023 a las 20:14

Firma del estudiante(s):



Resumen

El sector de la construcción es un área amplia que evoluciona día tras día al igual que otras tecnologías. En este caso, se explora la creación de un diseño de mezcla de concreto hidráulico fino, el cual pueda ser aplicado en la metodología de construcción con impresoras 3D de concreto.

Esta metodología propone amplias ventajas y avances para la construcción. Aunque también tiene sus contras, es una tecnología reciente que combina distintas disciplinas de la ingeniería, como mecánica, robótica, informática e ingeniería civil.

Asimismo, dicha metodología funciona utilizando un complejo sistema de rieles, sensores, bombas hidráulicas, mangueras, entre muchos otros elementos que permiten utilizar mezclas de concreto bombeables para ser colocadas a través de un dispositivo extrusor con una forma específica.

No solo es importante la forma de la impresión, sino también el ancho y espesor de las capas extruidas, ya que éstas pueden variar si es para un elemento estructural o para un elemento prefabricado u ornamental. No obstante, más importante aún es conocer las propiedades físicas y mecánicas del concreto que se va a utilizar.

Al respecto, se seleccionaron aspectos como temperatura, asentamiento, densidad, contenido de aire y consistencia como propiedades que definen la caracterización de las mezclas de concreto diseñadas en esta tesis. Además, la trabajabilidad se utilizó como referencia primordial para seleccionar la mezcla más apropiada y con mejores características para ser extruida.

En ese sentido, la resistencia a compresión fue de los parámetros más críticos para definir si existió éxito en las pruebas de laboratorio, ya que la propuesta de alcanzar una resistencia definida previamente supuso un reto.

Por ello, se utilizaron diversas normas ASTM y ACI para el desarrollo metodológico de la tesis para cumplir de la manera más estándar posible con los procesos aceptados internacionalmente.

Abstract

The construction sector is a broad area that evolves day by day like other technologies, in this case we explore the creation of a fine hydraulic concrete mix design, which can be applied in the construction methodology with 3D concrete printers.

This methodology proposes wide advantages and advances for construction, although it also has its cons, it is a recent technology that combines different engineering disciplines such as mechanics, robotics, computer science and civil engineering.

This methodology works using a complex system of rails, sensors, hydraulic pumps, hoses and many other elements that allow the use of pumpable concrete mixtures to be placed through an extruder device with a specific shape.

Not only the shape of the impression is important, but also the width and thickness of the extruded layers, since these can vary if it is for a structural element or for a prefabricated or ornamental element, but even more important is to know the physical and mechanical properties of the concrete to be used.

Temperature, slump, density, air content and consistency were selected as properties that define the characterization of the concrete mixes designed in this thesis; in addition, workability was used as a primary reference to select the most appropriate mix with the best characteristics to be extruded.

Compressive strength was one of the most critical parameters to define if there was success in the laboratory tests, since the proposal to reach a previously defined strength was a challenge.

Several ASTM and ACI standards were used for the methodological development of the thesis, in order to comply as standard as possible with internationally accepted processes.

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes	1
2.	Planteamiento del problema.....	2
2.1.	Formulación del problema	2
3.	Hipótesis	3
4.	Objetivo general.....	5
5.	Objetivos específicos	5
6.	Justificación	6
7.	Alcances.....	8
8.	Limitaciones.....	8
9.	Impacto	9
10.	Marco teórico	12
10.1.	Conceptualización básica.....	12
10.1.1.	Mezcla de concreto	12
10.1.2.	Cemento	12
10.1.3.	Agua	14
10.1.4.	Agregados	17
10.1.5.	Aditivos.....	18
10.2.	Tecnología en impresión 3D.....	19
10.3.	Desarrollo de la impresión en 3D aplicada en construcción.....	20
10.4.	Beneficios de la construcción con impresoras 3D de mortero.....	24
10.4.1.	Tiempo	24
10.4.2.	Costos.....	25

10.4.3. Sustentabilidad.....	26
10.5. Desventajas de la construcción con impresoras 3D de mortero	27
10.5.1. Desempleo.....	27
10.5.2. Inversión	27
10.6. Extrusión de capas de concreto.....	28
10.7. Metodología de construcción propia de las impresoras 3D de concreto	30
11. Marco metodológico.....	35
11.1. Paradigma de la investigación	35
11.2. Enfoque metodológico.....	35
11.3. Sujetos y fuentes de información.....	36
11.4. Normas aplicadas.....	37
11.5. Métodos de investigación	38
11.6. Población y muestra.....	38
11.6.1. Población.....	38
11.6.2. Muestra	40
11.7. Definición de variables	40
11.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	44
11.9. Procedimiento metodológico	44
11.9.1. Etapa de investigación	44
11.9.2. Etapa exploratoria	45
11.9.3. Etapa pruebas finales	48
12. Análisis de resultados	50
12.1. Temperatura	50
12.2. Asentamiento	52
12.3. Densidad	54

12.4.	Contenido de aire	56
12.5.	Consistencia	57
12.6.	Ajuste por humedad	59
12.7.	Resistencia a compresión	62
12.8.	Impresión 3D	66
13.	Conclusiones	68
14.	Recomendaciones	69
15.	Bibliografía	70
16.	Anexos	75
16.1.	Anexo 1	75
16.2.	Anexo 2	75
16.3.	Anexo 3	76
17.	Glosario	77

Índice de figuras

Figura 1	21
Figura 2	22
Figura 3	31
Figura 4	31
Figura 5	33
Figura 6	39

Figura 7	39
Figura 8	41
Figura 9	41
Figura 10	42
Figura 11	42
Figura 12	43
Figura 13	43
Figura 14	46
Figura 15	46
Figura 16	54
Figura 17	57
Figura 18	59
Figura 19	65
Figura 20	65
Figura 21	66
Figura 22	67
Figura 23	67
Figura 24	75
Figura 25	75
Figura 26	76

Índice de tablas

Tabla 1	15
Tabla 2	16
Tabla 3	36
Tabla 4	40
Tabla 5	45
Tabla 6	48
Tabla 7	49
Tabla 8	50
Tabla 9	52
Tabla 10	55
Tabla 11	57
Tabla 12	60
Tabla 13	60
Tabla 14	63

Índice de gráficos

Gráfico 1	51
-----------------	----

Gráfico 2	53
Gráfico 3	55
Gráfico 4	56
Gráfico 5	58
Gráfico 6	62
Gráfico 7	64

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.....	16
-----------------	----

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Es necesario aclarar que no se tienen registros de antecedentes nacionales con respecto a la temática tratada en este trabajo investigativo.

En relación con los antecedentes internacionales, se cuenta con un punto de partida, el cual es la empresa COBOD fundada en el año 2015 y con sede en Dinamarca. Gracias al estado del arte, se consultaron sus primeras investigaciones en la impresión 3D para construcción.

En los años 2018 y 2019, dicha compañía lanza su producto BOD2, el cual es una impresora 3D para construcción que utiliza una mezcla de concreto diseñada por la empresa y reúne las características para poder ser un modelo comercial utilizado internacionalmente.

A partir de la ficha técnica de este modelo, la cual se encuentra en los anexos 1 y 2, se plantea el diseño de una mezcla de concreto que pueda ser extruida, de manera teórica, utilizando las especificaciones de esta impresora, además utilizando como referencia un ejemplo de un diseño de mezcla utilizado por la empresa en el año 2017, donde se especifican granulometrías de los agregados, porcentaje de cemento, agua y aditivo.

Asimismo, se planteó simular la capacidad de imprimir capas de concreto similares a las capas reales creadas por esta máquina, usando de referencia los rangos de alto y ancho de capa, así como el tamaño máximo de agregado.

2. Planteamiento del problema

¿Es posible desarrollar un diseño de mezcla de concreto hidráulico aplicable en impresoras 3D de concreto en Costa Rica?

2.1. Formulación del problema

En la actualidad, la impresión 3D de concreto se ha convertido en una técnica cada vez más popular en la construcción debido a sus numerosas ventajas, tales como la reducción de residuos y la aceleración del proceso de construcción. Sin embargo, para lograr la calidad y la precisión deseadas en las estructuras impresas en 3D, es crucial contar con una mezcla de concreto adecuada que sea compatible con el proceso de impresión 3D. En Costa Rica, el uso de la impresión 3D de concreto aún no se ha extendido e implementado, y mucho menos industrializado. En la actualidad, no existe una mezcla de concreto hidráulico diseñada específicamente para ser utilizada en este proceso.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es desarrollar un diseño de mezcla de concreto hidráulico aplicable en impresoras 3D de concreto en Costa Rica. Para ello, se llevarán a cabo diferentes pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, y se evaluará su comportamiento durante el proceso de impresión 3D. Además, se estudiarán diferentes materiales para mejorar la calidad de la mezcla y su compatibilidad con la impresión 3D.

En Costa Rica, se cuenta con amplia variedad de agregados finos y gruesos, que presentan distintas granulometrías. Sin embargo, no se cuenta con materiales tan finos, por ejemplo, arenas de 2 mm (agregado utilizado en la actualidad en países como Dinamarca) específicamente destinadas a la construcción. Por ello, se debe cuestionar si se cuenta en nuestro país con los agregados aptos para ser empleados en esta metodología.

Considerando lo anterior, este estudio es relevante porque les permitirá, a los ingenieros y arquitectos en Costa Rica, contar con una herramienta más para la construcción de estructuras de alta calidad y precisión, lo cual, a su vez, puede generar un impacto positivo en la reducción de costos y tiempos de construcción. Además, esta investigación también puede tener implicaciones para el desarrollo de la impresión 3D de concreto en otros países de la región.

3. Hipótesis

Se plantea un diseño de mezcla de concreto extruible hecho con materiales nacionales y que cumpla requerimientos constructivos para una eventual factibilidad y aplicabilidad en construcción en Costa Rica. Para llevar a cabo este diseño, se plantea seguir la guía elaborada por el ACI titulada “Guide to Selecting Proportions for Pumpable Concrete”, cuya traducción literal corresponde a “Guía para seleccionar proporciones para concretos bombeables”, la cual está basada en el ACI 211.9. Asimismo, para lograr un concreto extruible por impresión 3D, se referencia una ficha técnica de la impresora BOD2, que es un producto de la empresa COBOD de impresión 3D en concreto. En dicha ficha técnica, se plantean parámetros o especificaciones mediante las cuales se pueden tomar de referencia para aplicar en las variables del diseño del concreto. De la misma forma, también se extrae información relevante acerca de la impresión 3D con concreto.

En ese sentido, se plantea un escenario en el cual los agregados son extraídos de un quebrador de materiales ubicado en Guápiles, Limón. Dichos agregados han sido previamente caracterizados y se ha brindado una ficha técnica con información acerca del material, como descripción, granulometría, propiedades físicas y demás. También se ha determinado el cemento por utilizar en la mezcla, así como un aditivo superplastificante. Este último se utiliza con el objetivo de lograr una buena trabajabilidad, así como lograr que el concreto sea bombeable y cumplir la plasticidad y resistencia requerida.

Una vez obtenidos los materiales de la mezcla de concreto, a través de fundamentación teórica y práctica, se procederá a ejecutar matrices de ensayos las cuáles serán puestas a prueba en laboratorio. Se harán variaciones en las composiciones de los diseños de mezcla tales como cantidades de agregados, relaciones A/C, dosificaciones de aditivo entre otros.

Para comprobar la capacidad de extrusión de la mezcla, se fabrica un dispositivo que funcione como un emulador, el cual consiste en una cubeta de pintura que tiene la función de tolva donde se va a depositar el concreto. Dicha tolva posee dentro de sí un embudo para hacer que la mezcla baje por gravedad de manera cónica. Debajo de la cubeta, se encuentra conectada una manguera de 1 pulgada de diámetro interno que cumple la función de boquilla. Todo el sistema anterior está montado en una base de madera con ruedas para emular la extrusión a través de los ejes horizontales y verticales.

Se cumple el grado de hipótesis, ya que la mezcla de concreto alcanza la resistencia propuesta de 35 MPa, cuyos materiales son de origen nacional. Además, la capacidad de extrusión ha sido comprobada a través de un dispositivo emulador, donde se han creado capas de material tal y como lo realizan las impresoras industriales 3D de concreto.

4. Objetivo general

Proponer un diseño de mezcla de concreto hidráulico de 35MPa aplicable en impresoras 3D de concreto a través de un dispositivo emulador de extrusión.

5. Objetivos específicos

- Desarrollar un diseño de mezcla de concreto hidráulico que cumpla con una resistencia a la compresión mínima de 35 MPa, aplicando la norma ACI 211.9.
- Fabricar un dispositivo emulador mediante el cuál sea posible validar la extrusión y trabajabilidad del diseño de mezcla a través de una boquilla, simulando una impresión en 3D.
- Caracterizar parámetros del concreto hidráulico en estado fresco mediante las normas ASTM C1064, ASTM C143 y ASTM C138.
- Confirmar resistencia a compresión del diseño de mezcla de concreto hidráulico a través de la norma ASTM C109 a las edades de 7 y 28 días.

6. Justificación

La construcción es una disciplina que avanza constantemente, al igual que la tecnología. Cada día, se busca desarrollar equipos, materiales, programas de computación, herramientas, entre otros elementos que ayuden a desarrollar tareas que los seres humanos tenemos limitadas.

La tecnología en el área de construcción actualmente avanza a gran escala y a nivel mundial se presentan tendencias que cambian y mejoran la forma de construcción. Además, impacta la manera en que la sociedad vive y se desarrolla, ya que la infraestructura es parte fundamental de la sociedad.

Con respecto a la tendencia mundial de construcción referente a la impresión 3D con concreto, se debe considerar que:

Las técnicas y aplicaciones de impresión 3D para construcción se encuentran en una fase inicial de desarrollo. Especialmente en lo referente a materiales como a procedimientos constructivos, hay mucho espacio de desarrollo. Esto se debe diversos factores: la especificidad del sector, el coste de la maquinaria necesaria y la ausencia de un patrón procedimental característico (Nadal, et al., 2016, párr. 1).

Al hacer referencia al contexto específico de Costa Rica, se presenta un gran espacio para el desarrollo de la tecnología, así como en el resto del mundo. Esta tecnología se presenta como una metodología de construcción revolucionaria y aún cuenta con mucho potencial de crecimiento y la posibilidad de convertirse en una metodología del día a día y no algo experimental.

Una justificación para esta investigación radica en la necesidad de contar con una herramienta más para la construcción de estructuras de alta calidad y precisión en Costa Rica. La impresión 3D de concreto puede tener un impacto significativo en la reducción de costos y tiempos de construcción, lo que puede ser especialmente relevante en el contexto de un país en desarrollo como Costa Rica. Además, dicha impresión también puede tener implicaciones en la construcción de viviendas de bien social y otras estructuras de interés público en el país.

Generalmente, una máquina tiene la capacidad de trabajar de manera más precisa que un humano, por lo tanto, durante décadas, se han ido implementando en diversas áreas como fábricas, transporte, computación, construcción, etc. En el caso de las impresoras 3D, éstas tienen la ventaja de que aplican la cantidad indicada de material por capa, del ancho y alto que se indique en el

software, de manera que las cantidades de mezcla son justas a lo que se quiere construir, de modo contrario a como se construye manualmente, donde los constructores aplican la cantidad que consideren justa y se pueden presentar distintos escenarios en los cuales se manipule de mala manera el concreto y se generen desperdicios.

Otra justificación para esta investigación es la posibilidad de exportar la tecnología de impresión 3D de concreto y la mezcla de concreto hidráulico a otros países de la región. Costa Rica es conocida por su industria turística, pero también cuenta con una industria de la construcción en crecimiento. Por lo tanto, el desarrollo de una mezcla de concreto hidráulico para la impresión 3D de concreto en Costa Rica podría tener implicaciones para el desarrollo de la impresión 3D de concreto en otros países de la región.

En forma adicional, esta investigación también puede contribuir al avance de la tecnología de impresión 3D de concreto a nivel mundial. Actualmente, existen numerosas iniciativas de investigación en todo el mundo destinadas a mejorar la calidad y precisión de las estructuras impresas en 3D. El desarrollo de una mezcla de concreto hidráulico aplicable en impresoras 3D de concreto en Costa Rica podría aportar nuevas ideas y soluciones a este campo de investigación.

7. Alcances

- Se van a utilizar materiales de construcción nacionales. Los agregados cuentan con caracterización definida, por lo tanto, no se realizaron pruebas de laboratorio para dicha caracterización.
- Se va a realizar un diseño de mezcla de concreto hidráulico cuya resistencia a la compresión cumpla los 35 MPa como parámetro mínimo.
- El concreto se va a caracterizar mediante las normas ASTM planteadas en los objetivos. Además, se van a utilizar, como referencia de parámetros de diseño, fichas técnicas de impresoras 3D de concreto disponibles en el mercado.
- Se va a fabricar un dispositivo emulador de extrusión.
- Se determinará la resistencia a compresión del concreto a 2 distintas edades (7 días y 28 días) mediante los especímenes cúbicos.
- Se ejecutarán modelos de prueba con el emulador de extrusión para análisis de trabajabilidad.

8. Limitaciones

- No se cuenta con una impresora 3D de concreto real.
- No existe una normativa en el país enfocada solamente en esta metodología de construcción, por lo cual el diseño de mezcla se respalda mediante las normativas ASTM y ACI mencionadas en los objetivos.
- Las pruebas y los ensayos se van a realizar con agregados, cemento y aditivos específicos sin considerar otros orígenes de materiales o marcas comerciales aparte de las especificadas para los ensayos.
- Los ensayos en laboratorio están sujetos a la disponibilidad de los equipos de las instalaciones de la empresa Holcim en su planta ubicada en San Rafael de Alajuela.
- No se contempla, dentro de las pruebas y ensayos, el diseño o la implementación de elementos de acero.

9. Impacto

Los propósitos de la ingeniería son siempre avanzar, mejorar, crear, producir, lograr más eficiencia y demás objetivos, y la ingeniería civil no se queda atrás. El impacto que puede generar el desarrollo de infraestructura en países o zonas es impresionante. Asimismo, el desarrollo de bienes inmuebles crea movilidad, empleo, dinamismo económico, cultura, desarrollo, etc.

El hecho de proponer nuevos modelos constructivos impacta directamente en un sector que en Costa Rica necesita mayor dinamismo e inversión, pues la infraestructura del país puede mejorar en muchos aspectos. También, la adopción de metodologías más baratas de construcción en nuestro país puede producir un interés necesario de la inversión extranjera, pues, si bien es cierto, es necesario atraer empresas o inversiones que estén dispuestas a poner su dinero en el país a pesar de existir otros países que puedan ofrecer mejores condiciones económicas, el hecho de ofrecer una metodología con la cual se puedan ahorrar importantes costos puede influir de manera directa sobre este ámbito.

Esta nueva tecnología propone beneficios que impactan, de manera directa, nuestro sector de interés y hay distintas visiones. Entre ellas, la ambiental, la social y la económica se consideran más importantes:

- Ambiental: las impresoras 3D son más precisas que un constructor, lo cual es un hecho, pues las máquinas están hechas para hacer mejor algunos trabajos que los humanos. Disminuir la cantidad de concreto por obra significa que el cliente o inversionista se ahorre dinero en materiales de construcción. De la misma forma, en los sitios de construcción, quedarían menos desperdicios, los cuales son difíciles de reciclar, por lo tanto, generalmente, son mal manipulados y se genera contaminación.

Otro aspecto importante es la energía y las impresoras 3D de concreto funcionan con electricidad. De hecho, existen modelos que utilizan paneles solares para generar su propia energía, sin embargo, es importante destacar que, si esta maquinaria se independiza de la energía proveniente de combustibles fósiles, se disminuye el impacto de la construcción en la quema y emisión de gases de efecto invernadero, como los provocados por maquinaria pesada y ligera.

- Social: el principal punto del impacto social corresponde al trabajo, debido a que implementar una maquinaria tan compleja y completa como puede ser una impresora 3D

en construcción significaría el reemplazo de puestos de trabajo, debido a que, si se tiene un dispositivo que realice tareas que normalmente hacen las personas y las ejecuta de una manera más eficiente, no sería necesario contar con una cantidad importante de personal de construcción en las obras.

Lo anterior es algo que, sin duda, se debe tomar en cuenta a nivel país, ya que es un impacto directo a miles de familias costarricenses y a nivel mundial, las cuales trabajan y dependen del sector de la construcción. Sobre todo, se afectaría a los puestos más vulnerables correspondientes a los trabajos que necesiten menos especialización y menos preparación, es decir, los denominados peones, ayudantes de construcción, obreros, etc.

De acuerdo con la Cámara Costarricense de Construcción, “la construcción representa 154.000 puestos de trabajo directos y 117.000 indirectos, el 13% del total del país.” (Zumbado, 2018, párr. 1). Éste es un dato importante, ya que la construcción alimenta a muchas familias en el país y la eliminación o reemplazo de tantos puestos de trabajo en cuestión de pocos años puede impactar directamente sobre la bolsa de trabajo costarricense, además de generar pobreza y desempleo.

- Económica: la tecnología generalmente es considerada un avance para la sociedad. De igual manera, esta metodología es un avance para la ingeniería, pues propone brindar ventajas a nivel económico. Por ejemplo, el ahorro de material significa ahorro de dinero y, de la misma manera, la reducción del desperdicio hace que los materiales rindan de mejor manera y se requiera comprar menos.

Otro aspecto es la reducción de mano de obra, el cual es un rubro importante en el presupuesto de cualquier proyecto. Esta disminución representa un ahorro para el inversionista o cliente, debido a que los proyectos desarrollados con esta metodología requieren de poco personal para manipular la impresión, pues, gracias a la tecnología del software, funcionan de manera casi automática. Solo se requiere personal especializado con conocimiento de la metodología y esté capacitado para brindar apoyo en los momentos cuando el equipo lo requiera. Esto representa eliminar un porcentaje importante de peones, ya que no sería necesario armar formaleas, poner ladrillos, chorrear y vibrar concreto, etc., y de la misma manera, con armadores, ayudantes, carpinteros y demás puestos de trabajo.

Otra situación que es necesario destacar es el ahorro de tiempo debido a que una impresora 3D de concreto puede trabajar jornadas sin parar, ya que no es un elemento que cobre un salario. En ese sentido, tiene la capacidad de trabajar día y noche, y así terminar obras más rápido, lo cual representa una ventaja para los clientes.

Como aspecto importante es el costo de un equipo completo de impresión en 3D dedicado a construcción. En el mercado, existe gran variedad de productos y empresas que comercializan las impresoras, sin embargo, es necesario mencionar que se debe seleccionar el producto ajustado a las necesidades y materiales disponibles en el país para que se pueda aprovechar de la mejor manera.

10. Marco teórico

10.1. Conceptualización básica

Es importante especificar bien algunos conceptos que van a ser desarrollados en el transcurso del presente documento y es necesario también ligar los conceptos básicos descritos con el tema de esta tesis.

10.1.1. Mezcla de concreto

El concreto es la materia prima de la ingeniería civil, por tanto, es el material que más se utiliza para construir en el mundo y de los más consumidos. “El material de construcción más extensamente usado es el concreto, que se hace generalmente mezclando cemento Portland con arena, piedra triturada y agua” (Metha y Monteiro, 1985, p. 1). Además de ser el segundo material más utilizado por el ser humano solo después del agua, es el material utilizado para la metodología de construcción con impresoras 3D. Por ende, no se utilizan concretos que podrían ser llamados “normales”, ya que las dosificaciones de los materiales, además de las proporciones y tamaño de agregados cambian radicalmente.

10.1.2. Cemento

El cemento es de los componentes principales del concreto y el material mediante el cual todo se amarra en un solo compuesto.

El cemento es un polvo fino obtenido de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el clinker —principal ingrediente del cemento—, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento (CEMEX, s.f.)

El cemento debe ser capaz de brindar al concreto la habilidad de fraguar en un tiempo prudente, ya que así se pueden lograr construir las capas de mezcla una sobre otra, sin que se presenten grietas o una pérdida de agua (sangrado). Además, el concreto debe ser correctamente extruido en el proceso de impresión, ya que, al igual que la metodología de construcción tradicional, en caso de ejercer una mala colocación, se pueden presentar segregaciones de materiales u “hormigueros”.

A medida en que el mundo se industrializa cada vez más, y cada día se crean nuevos proyectos de construcción con distintos requerimientos o necesidades, surgen diferentes tipos de variaciones en los cementos. En los inicios de la industrialización, se utilizaba un solo tipo de cemento para cualquier tipo de obra, sin embargo, actualmente se cuenta con distintas categorías que satisfacen distintas necesidades. Algunos de los principales tipos de cemento son los siguientes:

10.1.2.1. Cemento Portland de uso general (cemento hidráulico Portland gris ordinario)

El cemento de uso general tiene como compuesto principal el clínker. Según su definición por la empresa CEMEX.

Es un producto en forma de gránulos o pequeñas bolas entre 0,5 y 25 mm, principalmente, que se forma a partir de la calcinación de caliza, y arcilla, y otros componentes minoritarios, a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450°C. Estos gránulos, triturados y mezclados con yeso y diferentes adiciones, permiten fabricar los distintos tipos de cemento y, posteriormente, hormigón (CEMEX, s.f.)

El cemento gris de uso general cumple con los requerimientos físicos y mecánicos básicos requeridos para construcciones en distintas áreas, desde casas, locales comerciales y elementos prefabricados hasta elementos artesanales, decoración o infraestructura vial. Además, tiene los componentes químicos necesarios para lograr mezclas con buenas características de trabajabilidad, plasticidad, resistencia y fácil colocación.

10.1.2.2. Cemento hidráulico Portland blanco

Este cemento presenta una característica importante, la cual es que, entre sus componentes, se encuentran materiales con poca concentración de hierro. Por esta variación, en su composición química que una vez mezclado con agua y agregados, presenta un color blanco mucho más claro que el gris común del concreto. Asimismo, requiere una caliza distinta con una calidad superior a la del cemento general, la cual aporta sus propiedades para un acabado mucho más arquitectónico o refinado. Puede ser utilizado en elementos estructurales como en elementos decorativos o acabados.

Para esta tesis, este tipo de cemento ha sido seleccionado como un cemento con las características apropiadas para ser extruible, ya que, además de las cualidades arquitectónicas y químicas que puede aportar a la mezcla de concreto, también tiene buenas características de cohesión, trabajabilidad y resistencia, además de tener un acabado natural estético.

10.1.2.3. Cemento hidráulico industrial

Es un cemento con excelentes cualidades de resistencia. Puede ser utilizado para elementos de concretos como fundaciones, losas y elementos de concreto pretensado y postensado, además de que tiene la cualidad de alcanzar resistencias altas en poco tiempo. Por lo tanto, permite desencofrar de manera rápida y eficiente para una construcción más acelerada.

Comenzando con el concepto de impresora 3D, es una herramienta que lleva muchos años en el mercado. Alrededor de 1987, se remonta el origen de estos dispositivos adjudicados a la empresa 3D Systems, la cual es la compañía estadounidense que desarrolló un sistema de impresión tridimensional. Esta tecnología tuvo como objetivo el modelado de sistemas o prototipos para posteriormente ser convertidos en objetos tangentes, o modelos sólidos. Desde el momento de esta conceptualización hasta la actualidad, estos complejos sistemas han tomado fuerza e importancia en el mercado internacional, hasta el punto de ampliar los usos y áreas en las que se pueden aplicar. No solo son herramientas utilizadas en computación o en el sector industrial, sino también en el sector médico, donde se están desarrollando sistemas para crear complejos instrumentos médicos. En el área de alimentación, se está implementado de manera que se imprimen alimentos artificiales como “carne” en base a filamentos de proteínas. En el sector de productos, se utiliza para crear modelos o prototipos de artículos. Por último, en el sector de interés de este documento, es decir, el sector construcción, se desarrollan elementos prefabricados o impresos *in situ* como columnas, paredes, vigas, puentes, entre otros.

10.1.3. Agua

El agua es el elemento encargado de la activación química del cemento. Trabaja de una manera en la cual, en el momento cuando el polvo de cemento hace contacto con el agua, se hace una reacción química que produce lo denominado pasta en estado fresco, o bien, en estado plástico. Ésta es la fase donde la pasta es más manejable, trabajable y en la que se debe contar con los agregados a mano para ser añadidos a la mezcla y convertir esa pasta en concreto en estado fresco.

En el momento cuando el agua es agregada a la mezcla y se produce la pasta, se crea una variable denominada relación agua/cemento (A/C). Éste es un factor que determina el nivel de trabajabilidad de la mezcla, además de que influye en aspectos como consistencia, resistencia a compresión, durabilidad, asentamiento, entre muchos otros factores.

La relación agua-cemento funciona de manera interesante e influye directamente en el comportamiento de la mezcla.

Conforme más agua se adicione, aumenta la fluidez de la mezcla y, por lo tanto, su trabajabilidad y plasticidad, lo cual presenta grandes beneficios para la mano de obra; no obstante, también comienza a disminuir la resistencia debido al mayor volumen de espacios creados por el agua libre (Guevara, et al., 2011, párr. 7).

La relación agua/cemento da como resultado un dato referente a que, en casi todos los casos, debe ser menor a 1 y suele rondar entre el 0,30 a 0,70. Fuera de ese rango, significan concretos con un desequilibrio o concretos con propiedades muy específicas y fuera de lo común.

Tabla 1

Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia del concreto.

A/C	f'c (kg/cm ²)
0.36	420
0.4	370
0.45	340
0.5	295
0.55	275
0.6	230
0.65	220
0.7	185
0.75	165
0.8	140

Nota: A la izquierda se presenta la relación agua/cemento y a la derecha. La nomenclatura f'c hace referencia a la resistencia del concreto una vez fraguado. Fuente: *Efecto de la variación agua/cemento en el concreto*, por Guevara, et al., 2011 (<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835626>)

En la realización de esta tesis, se ha propuesto alcanzar una resistencia de 35 MPa (350 kg/cm²), por lo tanto, intuitivamente y basado en el cuadro anterior, se podría deducir que realizando una interpolación entre los valores de 0.45 y 0.4 de relación agua/cemento y 340 kg/cm² y 370 kg/cm² de resistencia a compresión, aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$Y = Y1 + \left[\left(\frac{X-X1}{X2-X1} \right) * (Y2 - Y1) \right]$$

De esta manera, utilizando X1 como 0.4 (límite inferior) y X2 como 0.45 (límite superior) y siendo 340 kg/cm² Y1 y 370 kg/cm² Y2, aplicando un valor de 350 kg/cm² como Y, se obtiene que, para obtener la resistencia deseada, se debe utilizar una relación A/C de 0.43.

Sin embargo, la propuesta de diseño de mezcla de esta tesis propone un concreto bombeable, ya que, en el caso de ser aplicado en una impresora 3D de concreto, debe ser capaz de fluir a través de una manguera, mediante una bomba y, finalmente, ser extruido por una boquilla.

De acuerdo con la siguiente tabla 2, se pueden obtener parámetros de relación de agua/cemento para un concreto bombeable.

Tabla 2

Ejemplo de parámetros para mezcla bombeable

Criteria	Actual	Target	Status
w/cm (by weight)	0.42	0.40 to 0.60	OK
Mortar volume, ft ³ (m ³)	15.63 (0.44)	≥12.1 (0.34)	OK
Cementitious content, lb/yd ³ (kg/m ³)	555 (329)	≤400 (237)	OK

Nota: Se obtiene un rango de relación A/C (w/cm por sus siglas en inglés) para un concreto bombeable, en el que se brindan los parámetros entre 0,40 y 0,60, además de un volumen de mortero y contenido de cemento. Fuente: *Guide to Selecting Proportions for Pumpable Concrete*, por Knight, et al., 2019, ACI (<https://cecollection2.files.wordpress.com/2020/05/211.9r-18-guide-to-selecting-proportions-for-pumpable-concrete.pdf>)

10.1.4. Agregados

Los agregados son los componentes encargados de brindar consistencia, resistencia y costo a la mezcla de concreto hidráulico. A partir de los agregados, se puede reducir la cantidad de pasta de cemento y agua, lo cual significa reducción de costo por unidad de concreto preparado, ya que, en esta mezcla, en la mayoría de los casos, el material más caro es el cemento.

Son materiales procesados en canteras, quebradores o tajos, donde se extraen piedras de gran tamaño, que, posteriormente, son procesadas para formar piedras o arenas con partículas más trabajables para ser utilizadas en construcción de cualquier tipo de infraestructura.

Los agregados se destinan, tanto para concretos hidráulicos, como para concretos asfálticos. En los concretos hidráulicos, se utilizan piedras y arenas que son revueltas junto a la pasta para formar los concretos utilizados en estructuras y elementos prefabricados o cualquier construcción. En los concretos asfálticos, se utilizan mayormente piedras, ya que las arenas no influyen de manera muy significativa en los pavimentos. Por lo tanto, se busca mezclar el agregado grueso con la solución de asfalto para formar un concreto asfáltico y ser utilizado en carreteras, autopistas, espaldones, etc.

Los agregados, tanto finos, como gruesos influyen directamente en la calidad y en el comportamiento del concreto hidráulico, además de que alteran características como trabajabilidad, textura, asentamiento, entre otras. Se deben tener en cuenta las proporciones de los agregados en los diseños de mezcla para poder obtener los resultados propuestos. Asimismo, es importante destacar que no cualquier material pedroso o granular puede ser considerado un agregado, pues debe cumplir con ciertas normativas técnicas y con propiedades físicas y químicas para brindar un desempeño óptimo a la mezcla.

De acuerdo con Silva (2022), los agregados tienen la función de ayudar a controlar los cambios volumétricos (cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado, de curado y secado de la mezcla de concreto), y aportar a la resistencia final del material.

Es un material que tiene una participación entre el 65% y el 70% del total de la mezcla de concreto. Además de las utilidades de los agregados en el concreto, es importante mencionar las distintas clasificaciones, las cuales son por origen, tamaño de partícula, peso específico, etc. Para

un diseño de mezcla de concreto extruible, se debe trabajar con agregados muy específicos, debido a que no cualquier agregado puede pasar por un extrusor o por una boquilla de una impresora 3D.

Los agregados tomados en cuenta en esta tesis han sido seleccionados de manera cuidadosa y analizada. Basado en su tamaño máximo de partícula, se analiza el uso de agregados finos, con granulometría entre 3 mm y 4 mm, lo cual, por nombre, corresponde a arenas finas, además de un agregado grueso de tamaño no mayor a los 9.5 mm.

10.1.5. Aditivos

Los aditivos son productos químicos utilizados de manera ocasional, es decir, no es un material 100% necesario para que un concreto sea definido como tal y son sustancias o fibras que presentan composiciones químicas que brindan una determinada mejoría o favorecen alguna propiedad del concreto.

Se utilizan de manera dosificada y se añaden al concreto de acuerdo a las indicaciones del fabricante. Los aditivos pueden modificar las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido. Se cuenta con distintos tipos de clasificaciones, desde tipo A, B, C,D, F, G y S, hasta algunos otros con características más específicas como incorporadores de aire, aditivos para shotcrete, entre otros.

Para seleccionar un aditivo, se deben tomar en consideración distintos factores, además del económico, que es de los más determinantes. También se debe contemplar la influencia en aspectos como trabajabilidad, desarrollo de resistencia, incorporación de aire y demás.

Entre toda la gama de productos que se encuentran en el mercado y con el fin de diseñar un concreto bombeable y extruible, para efectos de esta tesis, se contempla el uso de un aditivo, el cual pertenece a la categoría de los superplastificantes.

Los aditivos superplastificantes se utilizan para obtener dos principales beneficios: reducción del contenido de agua, por lo cual también son llamados “aditivos reductores de agua” y, con esto, se logra obtener mejora en la resistencia sin sacrificar trabajabilidad y mejora la consistencia sin agregar agua, obteniendo concretos con buena capacidad de fluidez.

Por los beneficios anteriormente descritos, además de diversos criterios profesionales con experiencia en el campo de los aditivos, se ha seleccionado el producto Plastol 5000 de la empresa

EUCLID CHEMICAL. Es un producto que presenta las características y beneficios buscados para el desarrollo de la mezcla.

10.2. Tecnología en impresión 3D

La metodología propuesta en este documento es una nueva forma de construcción de estructuras que aún se encuentra en desarrollo, su origen en el sector de la construcción viene a raíz de la necesidad de construir obras, más rápido y barato.

Según lo expresado por el canal de YouTube The B1M, en Alemania, ya se terminó la primera casa construida por impresoras 3D de concreto y reguladas por un ente gubernamental (The B1M, 2020). Éste es tan solo el primer paso para el avance de la construcción del presente y futuro. Es un sistema que funciona con máquinas, computadoras, softwares y conecta a la ingeniería civil con otras disciplinas como ingeniería mecánica e ingeniería en sistemas, lo cual hace que sea multidisciplinaria. Respecto de este último punto, se considera algo beneficioso, pues aporta un valor agregado a la metodología.

El hecho de hacer que varias áreas de la ingeniería colaboren entre sí para generar complejos sistemas y metodología demuestra que se sigue la tendencia de la evolución de la tecnología y el desarrollo de las industrias, como en los tiempos de antes, la ingeniería mecánica y la ingeniería civil colaboraron para implementar grúas y máquinas pesadas en procesos constructivos.

En el caso de las impresoras de tres dimensiones utilizadas en la construcción, la materia prima es el concreto hidráulico. Según la concepción de Trujillo (2011), “una masa formada por conglomerante, arena y agua, y que puede contener además algún aditivo. La mezcla origina una pasta fluida o plástica, que fragua y endurece por las transformaciones químicas que en la misma se dan lugar” (p. 7). Se utiliza el concreto fino porque el concreto común no ofrece practicidad para este tipo de sistemas, además es más complejo de manipular para la impresora. También las máquinas no están diseñadas para procesar agregados gruesos, lo que puede presentar un problema mecánico.

Cada fabricante pone a disposición una serie de parámetros con los cuales las impresoras pueden extruir. Dentro de estos parámetros, se brindan tiempo y velocidad de colocación de las

capas, tiempo de fraguado, cantidad de operarios necesarios, capacidad de extrusión, tamaño máximo de partícula, entre otros.

Para efectos constructivos, el concreto puede tener diversas propiedades. “Como material de agarre en la formación de fábrica de ladrillo o bloque, la cualidad que más nos interesa es la resistencia a compresión” (Trujillo, 2011, p. 25). Esta propiedad es sumamente importante para la impresión en tres dimensiones con concreto, pues se necesita alcanzar un nivel de resistencia a la compresión alto para que las estructuras sean funcionales y seguras, de lo contrario se pueden presentar problemas como desmoronamiento, grietas estructurales (no superficiales) e, incluso, el colapso de la estructura.

La aparición de grietas superficiales en elementos de concreto siempre es normal, siempre y cuando no sobrepasen una profundidad o longitud indeseada. Además, la forma o patrón de estas grietas puede brindar información del porqué se forman. En el caso de la impresión 3D, se suelen generar grietas superficiales que, generalmente, se crean por problemas de tensión. En algunos diseños de mezcla, se incorporan materiales como fibra de vidrio o algún otro aditivo que brinde más amarre a la mezcla.

Entre las principales ventajas presentadas, los materiales son relativamente fáciles de conseguir en casi cualquier parte del mundo. En Costa Rica, basta con tener ubicadas las canteras o depósitos de materiales de construcción para obtenerlos. Otra de sus ventajas es que, a nivel estructural, es casi perfecto porque si tomamos en cuenta la cantidad de dinero invertido en construir una estructura y la cantidad de años que ésta puede estar en periodo de servicio (asumiendo que no exista algún desastre o algún evento que dañe severamente la estructura), este tipo de obras resultan muy rentables. Una de las desventajas es que se requiere de mucha mano de obra, lo cual encarece los distintos procesos constructivos y, consecuentemente, las obras.

10.3. Desarrollo de la impresión en 3D aplicada en construcción

Para el desarrollo de nueva tecnología, se necesita de procesos o equipos revolucionarios, que cambien la forma en la que se hacen o hacían las cosas por propuestas nuevas que traigan beneficios a un determinado sector. El caso de la impresión 3D no es diferente, pues existen equipos de trabajo y maquinaria totalmente diferente a la que se usa actualmente en la construcción habitual. En el caso de las construcciones que implementan esta tecnología, pueden requerir de

una unidad móvil que se desplace al lugar de la construcción. Algunos equipos necesarios para desarrollar un proyecto de escala pequeña con metodología 3D son los siguientes:

- Brazo robótico
- Unidad de control (Incluyendo la unidad que usa el software de la máquina)
- Sistema de tubería y bombeo
- Almacenamiento de material
- Sistema de orugas (o estructura de metal tipo andamio)
- Operarios capacitados

Figura 1

Ilustración de unidad móvil de la empresa CyBe.



Nota: Modelo de impresora móvil. De *Impresoras 3D de concreto*, por CyBe, 2021, (<https://cybe.eu/technology/3d-printers/>)

Los proyectos que prefieran desarrollar una estructura con unidad móvil suelen resultar más caros. Sin embargo, dependiendo del caso, suele ser más eficiente, aunque hay gran cantidad de proyectos y cada uno tiene distintas características y especificaciones que requieren de soluciones específicas para cada caso. Las unidades fijas también son útiles para las empresas que desarrollan esta metodología, ya que aplican un proceso donde, con impresoras fijas, imprimen elementos estructurales para diversos proyectos al mismo tiempo, o bien, para un solo proyecto, y trabajan las piezas como si fuera un rompecabezas, se ensamblan los elementos prefabricados y así se ahorra tiempo, espacio y costos.

De acuerdo con las notas de especificaciones de la empresa CyBe (s.f.), es ideal para institutos de investigación, universidades o proveedores de concreto prefabricado que quieren hacer pruebas internas, prototipos o producción de prefabricado. Es sumamente ideal disponer de ambos métodos, ya sea el estático o el fijo, pues, de esta manera, se ajusta la metodología a las necesidades de los clientes y así se cubre un mayor mercado. Además, ingenierilmente, es necesario cubrir todas las necesidades posibles para que los costos y todos los factores que rodean la implementación de la metodología 3D sean factibles. Asimismo, sería de gran beneficio para los clientes el ofrecer la posibilidad de hacer pruebas en los materiales para así saber si cumplen con las normas y parámetros vigentes, para conocer la calidad del material, hacer investigaciones y conocer las propiedades de los concretos, verificar procesos de fabricación, conocer el acabado estético, entre muchos otros factores que pueden influir en la decisión de un cliente para elegir poner su inversión en manos de tecnología tradicional o métodos tradicionales como mampostería o construcción con acero.

Figura 2

Impresora fija de la empresa CyBe



Nota: Modelo de impresora 3D fija que, presenta diferentes funcionalidades y usos que la impresora 3D móvil. De *Impresoras 3D de concreto*, por CyBe, 2021, (<https://cybe.eu/technology/3d-printers/>).

El proceso de modelado y diseño es, sin duda, el proceso primordial de las obras civiles. En general, este proceso abarca mucho trabajo que encierra procedimientos como diseño arquitectónico, diseño estructural, cálculo, presupuesto, etc. La metodología con impresoras 3D propone un sistema integrador en el que se pueda ahorrar tiempo y esfuerzo haciendo que algunos

procesos sean más optimizados. Las máquinas utilizadas con esta forma de construcción necesitan de softwares especiales, pues, generalmente, son programas de computación provistos por las empresas que comercializan el producto. Esto se hace porque la forma como trabaja una impresora 3D a nivel computacional puede ser diferente a otra, por lo tanto, es mejor seguir las recomendaciones de los fabricantes para obtener buenos rendimientos y hacer un buen uso de los dispositivos.

Utilizar los softwares es importante porque son herramientas útiles para los ingenieros, tal es el caso cuando apareció el programa SAP (Structural Analysis Program). Con ayuda de éste, se optimizaron procesos que se debían hacer a mano como cálculos matemáticos complejos y elaboración de diagramas, entre muchos otros beneficios y procesos. Los softwares propios de las impresoras 3D de concreto ayudan a diseñar los elementos estructurales y a calcular la cantidad exacta de material, además de minimizar el riesgo de producir fallos constructivos, o bien, que en el momento de la impresión, se generen defectos, aunque durante el proceso de impresión, las máquinas suelen ir acompañadas de operario que vigilan la impresión, para verificar si se cumplen parámetros de diseño establecidos, como grosor de las capas, espesor, asentamiento, tiempo de fragua, etc.

Algunos softwares que pueden ser útiles aparte de los propios de las impresoras son AutoCAD, que sirve para dibujar planos y hacer dimensionamientos, Revit que sirve para hacer renders de las obras e, incluso, calcular materiales y presupuestos, y SolidWorks, que es un software propio de modelado 3D.

En relación con lo mencionado por las instituciones respecto de este tema, el ACI (American Concrete Institute) afirmó, en el año 2018, que “el Instituto Americano del Concreto anuncia la formación de un nuevo comité cuya misión es desarrollar y reportar información con respecto a la impresión en tres dimensiones (3D) y la manufactura de aditivos con materiales cementantes inorgánicos” (Webb, 2018). Esto se puede considerar un logro importante para el desarrollo de esta tecnología, puesto que una sociedad tan importante como el ACI tome en consideración esta metodología implica que se puede entrar en un proceso de desarrollo y empezará a tomar importancia en el sector constructivo de la ingeniería civil.

En países como Estados Unidos, la impresión 3D para viviendas ya es una realidad y presenta una industria en crecimiento, aunque, por ser una tecnología tan nueva, también se

encuentra en desarrollo. La empresa SQ4D se define a sí misma como una empresa que ofrece viviendas a precios alcanzables y calidad sostenible.

Según la empresa SQ4D, su impresora llamada ARCS 3D tiene un consumo de energía tan bajo que es comparable con una secadora de pelo. Además, se define como una empresa que utiliza materiales sostenibles con el ambiente, además de que los desperdicios se reducen a 0 por la precisión de utilización de material que emplea la máquina. De la mano de estos factores mencionados, se explica que las construcciones son posibles en horas, con una velocidad bastante considerable, pues se imprimen entre 400-700 pulgadas de concreto por minuto, cada capa (SQ4D, 2021).

Respecto de los costos, únicamente son necesarios dos trabajadores capacitados que vigilen la maquinaria, lo cual disminuye significativamente la mano de obra necesaria. Esto supone un 40% más barato que la construcción tradicional de acuerdo con su sitio web.

Al llegar a este punto, es importante plantear la siguiente pregunta: ¿Cómo las empresas que actualmente aplican la metodología de construcción con impresoras 3D logran estos beneficios? Dichos beneficios hacen referencia específicamente a una construcción más rápida, menos costosa y más sustentable. En ese sentido, es necesario desarrollar cada uno para lograr entender estos puntos.

10.4. Beneficios de la construcción con impresoras 3D de mortero

10.4.1. Tiempo

El ahorro y la reducción de tiempo son de los factores más interesantes propuestos por esta tecnología de construcción, la cual, a pesar de estar en constante desarrollo, tiene bases sólidas y se perfila como la forma de construir del presente y futuro. El tiempo en la construcción es dinero, por lo cual, cuanto más se dure desarrollando un proyecto, generalmente, cuesta más. Consecuentemente, las empresas ajustan los contratos a tiempos o plazos específicos.

Gran parte de los procesos constructivos son manuales, sin embargo, desde que se implementaron equipos complejos mecánicos como grúas, backhoes, excavadoras, vagonetas, lanzadoras de vigas, etc., todas aquellas máquinas que, en determinado espacio de tiempo, ahorraron trabajo y esfuerzo a los trabajadores y hoy siguen siendo usadas, representan lo mismo

que las impresoras 3D probablemente representen en el futuro, dispositivos capaces de no solo trabajar por jornadas de ocho horas, sino que puedan construir día y noche (de hecho, actualmente así funcionan). De esta manera, se pueden cumplir con entregas de obras en cuestión de horas o días.

Asimismo, se reducen los procesos de construcción, por lo tanto, se requiere menos tiempo para concluir determinadas tareas. Por ejemplo, para construir una pared de concreto armado, es necesario tener la fundación previamente hecha, construir la armadura, realizar los anclajes, amarrar la armadura de la pared con la fundación, cortar y pegar la formaleta, chorrear el concreto, vibrarlo y dejarlo fraguar para posteriormente hidratarlo, sin embargo, con una impresora 3D de concreto, se puede reducir la cantidad de tareas para el mismo elemento estructural.

10.4.2. Costos

Sin lugar a dudas, los precios de las obras son uno de los factores más importantes en el momento cuando un cliente decide realizar una inversión. De los precios de las obras, se pueden obtener aspectos como posibilidad de rentabilidad, beneficio económico, viabilidad de un proyecto o, por ejemplo, si es una inversión para una vivienda, se puede considerar si se está pagando un precio justo por la obra.

Los presupuestos de las obras son de los apartados más complejos y, a la vez, completos, ya que se debe tener toda la información con un previo estudio y análisis de un proyecto para poder realizarlo. Dentro de los presupuestos, se incluyen costos de materiales, instalación, salarios, fletes, cargas sociales, subcontratos, imprevistos, acabados, obra gris, entre muchas otras consideraciones. La clave de los ahorros de los costos con la metodología con impresión 3D se encuentra en los pagos de salarios (que, por consiguiente, incluye cargas sociales) y materiales.

Sustituir mano de obra, que en obras suele ser un porcentaje importante del costo total, por mano de obra reducida y máquinas que puedan cubrir esa demanda produce una importante reducción de los costos totales de una obra.

También es importante destacar que no es necesario incluir, dentro de un presupuesto para esta metodología, una sección específica para formaleta o encofrado, ya que los procesos de impresión se realizan directamente donde van a estar localizados los elementos in situ como por ejemplo las paredes, vigas y columnas. Cuando la modalidad de impresión es fija, las máquinas

construyen y aplican las capas de mortero en forma directa en el suelo o sobre algún material aislante para poder ser transportadas y removidas posteriormente.

10.4.3. Sustentabilidad

La sustentabilidad es de las mejores ventajas propuestas por esta metodología constructiva, sobre todo por los importantes cambios climáticos experimentados en los últimos años, además del impacto generado por el sector de la construcción sobre el medio ambiente. La dificultad de los métodos actuales de construcción es que los materiales difícilmente son reciclados, reducidos o rechazados. Esta problemática es compleja de resolver, principalmente, por el hecho de que los materiales usados en construcción no todos son reciclables, o bien, en el caso de ser reciclables, muchas veces no se tiene la conciencia ambiental suficiente y las empresas prefieren evitar procesar los desechos de las construcciones y simplemente enviar la basura a botaderos.

Dentro de una construcción típica, se pueden encontrar varillas de acero, agregados finos, agregados gruesos, vidrios, solventes, pinturas, lijas, madera, clavos, alambres y demás elementos necesarios para construir. De los elementos mencionados con anterioridad, prácticamente los que pueden ser reciclados o los que tienen la posibilidad de brindarles un segundo uso son las varillas, los concretos y los vidrios. Estos elementos, por lo general, se convierten en materiales para decorar, se muelen y se convierten en otro material con otro destino diferente al de la construcción. Los elementos químicos como los solventes y las pinturas son difíciles de procesar y altamente contaminantes.

Además de lo mencionado anteriormente, los principales factores contaminantes no son en sí los materiales, puesto que, tanto en una vivienda tradicional, como en una vivienda impresa en 3D, se pueden requerir los mismos materiales de construcción y generar el mismo impacto ambiental, lo cual significaría que, en realidad, no hay un beneficio. Sin embargo, en la construcción tradicional, se maneja mucho desperdicio de material. Al respecto, es necesario cuestionarse por qué se desperdicia tanto material y cómo se resuelve esta problemática.

La respuesta está en que el desperdicio se da por calcular más material del que, en realidad, se necesita. Cuando se estiman las cantidades de materiales necesarios para una construcción, también es necesario incluir un porcentaje de desperdicio, que puede ocurrir dos escenarios: que

se cumpla ese desperdicio anticipado o también existe la posibilidad que sobre material, ese sobrante a fin de cuentas el cliente probablemente no lo necesite y tuvo que pagar por él.

Considerando lo anterior, la metodología de impresoras 3D de concreto utiliza las cantidades de materiales necesarios, es decir, la máquina calcula, con precisión, la cantidad de concreto, incluyendo el espesor de las capas y, de esta manera, se evita el desperdicio

10.5. Desventajas de la construcción con impresoras 3D de mortero

10.5.1. Desempleo

Un porcentaje importante de los empleados del sector de la construcción son obreros, ayudantes, carpinteros, soldadores, maestros de obra, peones y demás. En el pasado, había personas (probablemente cuadrillas enteras) dedicadas exclusivamente a ejecutar movimientos de tierras con herramientas más tradicionales y manuales como picos, palas y carretillos, para, posteriormente, ser reemplazados por maquinaria como backhoes y vagonetas, que tienen capacidad de ejecutar los mismos trabajos en menor tiempo, mayor cantidad y en forma más eficiente. Éste es solo un ejemplo de lo que ocurrió en el pasado y algo que probablemente podría ocurrir en el futuro.

Asimismo, el impacto de esta desventaja no es solo lo anteriormente mencionado, sino también los números que representa. De acuerdo con la Cámara Costarricense de la Construcción (2019), en un informe económico elaborado exclusivamente del sector construcción y algunas estadísticas en diciembre de 2019, “se contabilizaron 158004 trabajadores ocupados en la rama de la construcción, lo que equivale a un aumento de poco más de 14253 empleos, comparando con el mismo trimestre del año anterior (crecimiento de 9.92%)” (p. 11).

10.5.2. Inversión

Se sabe que uno de los aspectos más importantes para que una nueva tecnología tenga éxito es la inversión no solo de dinero, sino también de tiempo.

Desde el punto de vista de inversión financiera, anteriormente, en este mismo documento y en la sección denominada “Desarrollo de la impresión en 3D aplicada en construcción”, se revisaron algunos de los precios que pueden rondar las impresoras en el mercado. Por lo tanto, es

una inversión considerable, además del hecho de que Costa Rica no es un país donde se manufacture este tipo de dispositivos, lo cual, en la actualidad, encarece más la inversión.

Como fue presentado anteriormente, no solo existe un tipo de impresora, sino que la empresa vendedora de las máquinas expuestas comercializa dos tipos: la impresora fija y la impresora móvil. Cada una de estas máquinas tiene diferentes usos, por lo tanto, es probable que sea necesario adquirir ambas si una empresa desea expandir y desarrollarse en este mercado con fuerza. En forma adicional, otro punto débil es que las impresoras simplemente ejecutan la función para lo que fueron creadas. Por ello, de igual manera, se necesita otro tipo de maquinaria como vehículos pesados destinados a la función del movimiento de tierras, ya que el terreno de igual manera debe ser preparado y se debe contar con ciertas características para que los dispositivos puedan trabajar de manera eficiente.

De la misma forma, se debe invertir tiempo en realizar las pruebas necesarias una vez adquiridos los dispositivos, ya que, para ejecutar una obra con seguridad, se debe conocer el funcionamiento de la impresora. Además, se debe tener definido un diseño de mezcla de concreto que cumpla con las características apropiadas y tener el personal necesario y calificado para poder diseñar, proponer, calcular y ejecutar una obra. Cabe destacar que el personal calificado para poder trabajar con estas máquinas también requiere de una inversión monetaria y de tiempo, por lo tanto, es un factor importante por tener en cuenta.

Finalmente, en este apartado, también se deben contemplar los tiempos de instalación y tener todos los trabajos previos ejecutados para poner a trabajar las impresoras de manera correcta, lo cual, logísticamente, también representa un reto.

10.6. Extrusión de capas de concreto

En el desarrollo de esta tecnología, el concreto desempeña una función trascendental, debido a que es la materia prima utilizada por las impresoras 3D para construir y la forma como se imprimen los dispositivos es apilando capas de concreto una sobre otra.

Con la impresión de estas capas, se forman paredes, columnas, vigas y todos los elementos estructurales que, una vez terminado el proceso de impresión, componen la estructura.

Una de las ventajas del concreto y una de las tantas razones por las cuales es el material constructivo seleccionado e ideal para ser utilizado en esta metodología, es que les permite a los diseñadores libertad creativa, de manera tal que, con ayuda de las impresoras, se pueden generar formas y diseños completamente diferentes a los que se pueden generar con los métodos tradicionales.

Contrario a lo que ocurre, por ejemplo, con la mampostería, solo se pueden crear diseños con las formas existentes en el mercado y con los tamaños de elementos ofrecidos por las fábricas de elementos prefabricados, o bien, se debe contratar un diseñador que sepa trabajar y moldear el concreto para alcanzar una forma deseada. Algunas veces se tiene la posibilidad de generar formas o diseños fuera de lo común, sin embargo, no es lo usual y se requiere de material extra, por ejemplo, formaleta de madera, formaleta de metal, desmoldante o algún elemento que sirva para el desencofrado posterior, etc.

Una de las propiedades más importantes que debe cumplir el concreto es la resistencia a la compresión. Además, es importante que la adhesión entre las capas de mortero tenga la suficiente resistencia para que la impresión resulte exitosa y no existan problemas de rompimiento, desgarre o desmoronamiento de los elementos estructurales.

Otra propiedad necesaria es la fluidez. El concreto, además de tener la capacidad de ser bombeable con éxito, debe fluir para rellenar los vacíos necesarios. Las capas que hayan sido extruidas deben cumplir con un volumen específico. De lo contrario, sería lo equivalente a construir elementos estructurales con material segregado, que, en caso de ser lo suficientemente significativo, puede requerir una demolición.

Asimismo, es importante tomar en cuenta el mantenimiento de las impresoras. En caso de no manejar correctamente las dosificaciones de los concretos, se pueden presentar problemas en las bombas que inyectan el material constructivo en la boquilla, lo cual provocaría problemas de estancamiento de material o “taqueo”. Por consiguiente, después de cada uso, se recomienda hacer una limpieza de los ductos que transportan el material, así como manejar las dosificaciones correctas, utilizar una relación agua-cemento apropiada y conocer los distintos problemas que se pueden presentar.

10.7. Metodología de construcción propia de las impresoras 3D de concreto

Las impresoras 3D de concreto, como se mencionó anteriormente en este capítulo, pueden trabajar de dos distintas maneras. La primera es mediante una unidad móvil encargada de interpretar un modelo 3D realizado en un software previamente, imprimiendo las capas de concreto en la zona indicada con precisión, tanto de ubicación (lo que podría ser también llamado precisión topográfica), como de extrusión de material. En ese sentido, la máquina se mueve alrededor de un plano establecido y delimitado, y, de esta manera, los modelos generados por computadora se plasman en la realidad.

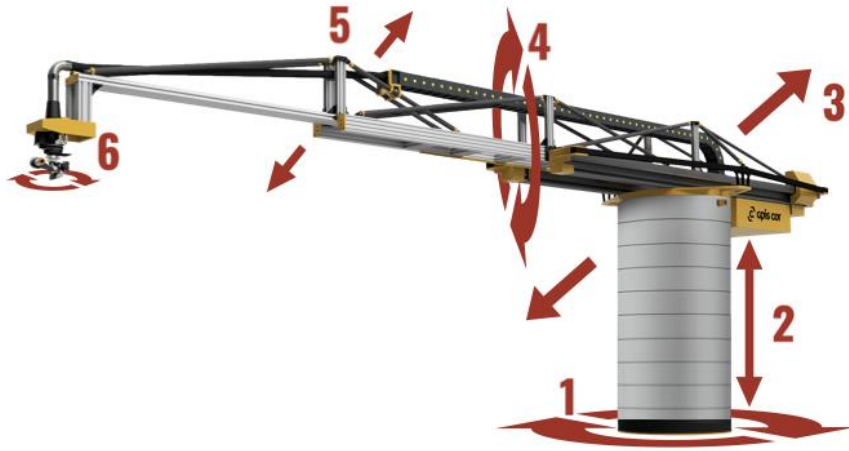
La segunda es la unidad fija, que tiene la función prácticamente igual que la unidad móvil, sin embargo, ésta se encuentra en un solo lugar e interpreta los modelos de manera fija. Por lo tanto, es más utilizada para modelos prefabricados y utilizada en talleres, y no se desplaza a la zona de construcción. Las impresoras 3D de modalidad fija tienen cierto grado de versatilidad mayor que las móviles, ya que éstas poseen 6 modalidades de movimiento a través de sus componentes mecánicos, esto tiene la ventaja de que permite otros movimientos como rotación, elevación o desplazamiento entre los distintos ejes, así se logra imprimir

La metodología utilizada por ambas impresoras 3D consiste en un plano cartesiano, que se podrían explicar de manera práctica como un plano 3D con los ejes X, Y y Z, el eje X puede aplicarse para el movimiento de las bases de la máquina, el eje Y correspondería al eje que mueve el brazo con la boquilla encargada de extruir el material y el Z sería el vertical, que es el encargado de modificar y regular la altura.

Para que las impresoras puedan moverse a través de los planos, necesitan ya sea de un brazo robótico, el cual tenga la suficiente capacidad de movilidad para alcanzar las dimensiones requeridas, o bien, se puede obtener esta movilidad por medio de un sistema de vigas, rieles y columnas móviles. Con este sistema, se tiene un mejor alcance y movilidad, aunque también este segundo tipo se pueden contemplar mayores costos y una mayor complejidad logística.

Figura 3

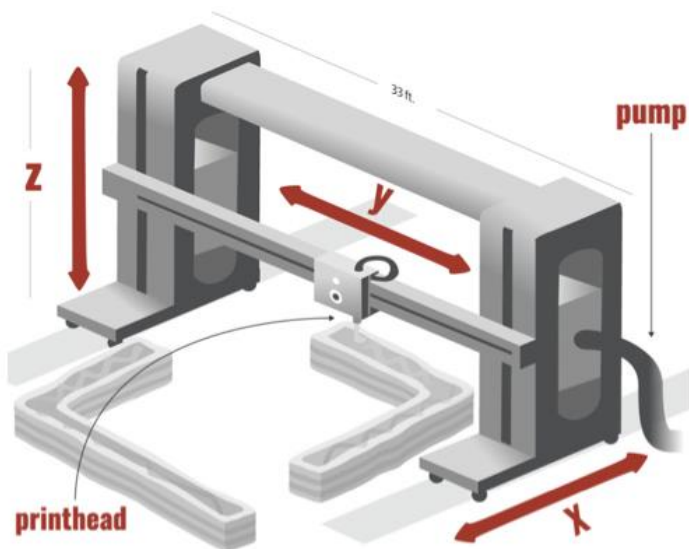
Tipos de movimientos realizables por la impresora



Nota: Impresora de la empresa Apis Cor, en modalidad de brazo robótico. De *3D Natives*, por Amelia, 2021, (<https://www.3dnatives.com/en/how-does-a-concrete-3d-printer-work-080120215/#!>).

Figura 4

Impresora con ejes mostrados gráficamente



Nota: Impresora Vulcan II de la empresa ICON. De *3D Natives*, por Amelia, 2021, (<https://www.3dnatives.com/en/how-does-a-concrete-3d-printer-work-080120215/#!>).

El tema de los suelos también es importante, debido a que son los encargados de soportar el peso de la estructura que tienen encima y además determinan parte del comportamiento sísmico. Lo ideal sería desarrollar esta metodología sobre suelos que no presenten problemas de cambios de volumen debido a la humedad, como algunas arcillas, debido a que no solo puede comprender un problema para la estructura en sí, sino también para las impresoras, pues el suelo puede provocar problemas de construcción y de presentarse un cambio de volumen o algún cambio en la humedad del suelo que provoque un comportamiento inestable. Inclusive, puede generar grietas importantes durante el desarrollo de impresión o poner en peligro las máquinas.

En relación con la sismicidad, especialmente en nuestro país, es bien sabido que las estructuras de concreto necesitan de un refuerzo de acero para poder obtener un comportamiento sísmico óptimo. Además, los elementos estructurales utilizan el acero para soportar esfuerzos de tensión. El acero se añade durante el proceso de impresión mediante láminas y varillas ubicadas entre las capas de concreto con el objetivo de mejorar no solo el comportamiento sísmico, sino también reforzar las zonas que presentan mayor debilidad y que estén con dificultades para soportar esfuerzos a tensión.

En la metodología propuesta en este documento, se añade el acero mediante elementos capa por capa, durante el proceso de extrusión del concreto, con el objetivo de que se logre un proceso similar al de las metodologías tradicionales en las que el acero queda embebido y así se comporta como un elemento sismorresistente y capaz de soportar esfuerzos tanto a tensión como a compresión.

En esta metodología, se intentó hacer un cambio respecto a la colocación de refuerzo. Según lo mencionado por Khoshnevis (2004), citado en Assaad, et al (2020), se exploró la viabilidad de los elementos de acero post-instalados y montados paso a paso en la parte exterior de la estructura impresa, aunque este enfoque se consideró bastante elaborado y costoso. Esta posibilidad evidentemente se concluyó en que no puede ser viable, debido al principio básico de que el acero, de alguna manera, debe “colaborar” con el concreto para lograr la eficiencia estructural necesaria. La forma de lograr esta colaboración es construyendo como un solo elemento y no como elementos separados.

Las barras de acero deben cumplir ya sea con la norma ASTM A-706 o ASTM A 615 de grado cuarenta o grado sesenta, como se indica en el CSCR. El hecho de añadir las barras

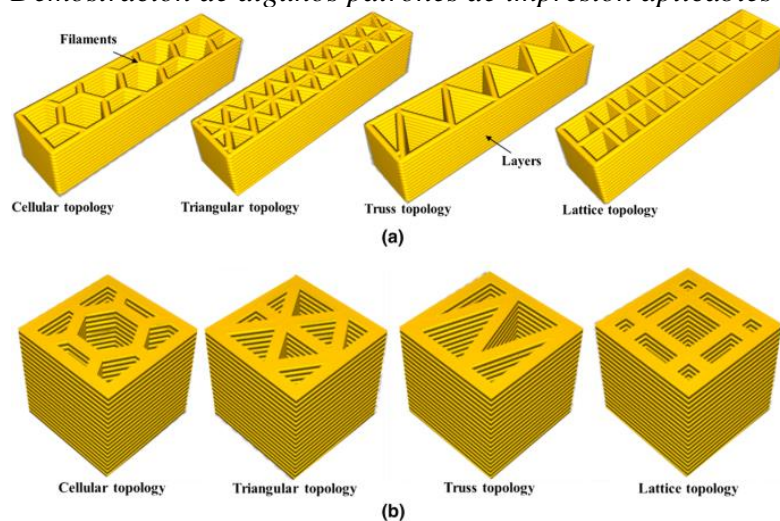
longitudinales en las capas de concreto provee la resistencia a tensión y compresión necesaria para que los elementos impresos puedan resistir las cargas y esfuerzos necesarios. También se pueden añadir láminas delgadas o placas de acero que ayudan a brindar resistencia en zonas críticas como pueden ser esquinas, zonas en las que se sabe que van a apoyarse otros elementos o donde se tiene pensado aplicar cargas puntuales.

De la misma forma, se puede contemplar el uso de aditivos retardantes en la mezcla para que los procesos de fraguado sean más lentos y uniformes. De este modo, se puede eliminar el problema de las juntas frías y un posible inconveniente con un proceso no uniforme de fraguado, lo cual, además de traer problemas para el concreto, puede también provocar inconvenientes en el momento de añadir el acero de refuerzo a las estructuras o al elemento estructural.

Uno de los principales problemas que se pueden generarse por construir estructuras con impresoras 3D de concreto es la altura, pues la interacción entre las capas y la forma como se comportan en conjunto se pueden ver comprometidas, además de que las capas inferiores pueden deformarse por el peso de las capas superiores. Sin embargo, se han desarrollado técnicas como patrones en forma de triángulos o picos transversales que se imprimen dentro de los elementos como paredes o columnas. Estos patrones sirven para disminuir ese efecto de aplastamiento, además de brindar las propiedades descritas anteriormente.

Figura 5

Demostración de algunos patrones de impresión aplicables en metodología de impresión 3D



Nota: Los patrones corresponden a material cementante ligero. De *SpringerLink*, por Wang. Li, et al, 2020 (<https://link.springer.com/article/10.1007/s43452-020-00017-1>).

Los patrones de impresión más comunes y usados en la impresión con concreto son los denominados “Triangular topology” y “Truss topology”. Las ventajas presentadas por estos patrones es que brindan la rigidez necesaria en los elementos estructurales, ya que, de construirse solo elementos capa por capa, presentarían problemas de estabilidad en las paredes de los elementos. Además, estructuralmente, también presentarían problemas sísmicos, ya que las cargas sísmicas, al ser aplicadas en forma horizontal, obligarían a las paredes a ceder ante poca fuerza, lo cual provocaría un posible fallo estructural.

11. Marco metodológico

11.1. Paradigma de la investigación

El concreto es un material fundamental en ámbito de la construcción. Está formado por materiales como cemento, agua, agregados finos, agregados gruesos y, en algunos casos, aditivos. Posee características físicas y mecánicas que lo hacen apto para desarrollar obras civiles.

El concreto puede ser diseñado dependiendo del fin constructivo requerido para así cumplir múltiples propósitos y satisfacer distintas necesidades.

Es importante destacar que las propiedades del diseño de mezcla se van a ver alteradas por factores como dosificaciones de agregados, relación A/C, tipo de cemento, aditivos, granulometría, calidad de los agregados y demás factores.

Este trabajo se basa en una metodología de diseño de concreto hidráulico fino de manera experimental, tomando en cuenta información teórica obtenida de una variedad considerable de recursos. Ello genera pruebas de laboratorio al poner en práctica ensayos normados y realizar pruebas aplicando conocimiento empírico.

11.2. Enfoque metodológico

Al seleccionar un enfoque metodológico cuantitativo, en esta investigación, se realizaron experimentos y pruebas de laboratorio basados en las normas ASTM y ACI.

Dichas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de la empresa Holcim ubicada en San Rafael de Alajuela, Costa Rica.

Se eligió el enfoque metodológico cuantitativo debido a que se propuso recopilar información medible mediante ensayos de laboratorio, relacionados con el diseño de mezcla de concreto extruible. Asimismo, se presenta un enfoque cualitativo debido a la descripción de los resultados de las pruebas de laboratorio.

11.3. Sujetos y fuentes de información

En esta tesis, se utilizó una metodología de investigación experimental de manera que se analizó la teoría disponible en artículos científicos, investigaciones, páginas de Internet, fichas técnicas, videos grabados por empresas que utilizan la metodología de construcción 3D, entre otras.

Entre las principales fuentes de información, se contó con la participación de distintos profesionales e ingenieros civiles especializados en el área de concretos. Con estos profesionales, se tuvieron entrevistas y reuniones para poder recopilar información y recibir recomendaciones con respecto al diseño de las mezclas del concreto hidráulico. Además, distintas empresas brindaron su aporte técnico, así como donación de materia prima para el desarrollo de esta tesis, tal como se evidencia en la tabla 3.

Para las pruebas prácticas, se contó con el apoyo técnico y las instalaciones de la empresa Holcim, la cual también aportó parte del material utilizado en las pruebas de laboratorio (arena de río, agua, desmoldante, camisas para los cubos y recipiente almacenador de agua para el curado de los especímenes).

Tabla 3

Matriz de sujetos de información

Nombre		Aporte	Empresa	Cargo
Ing. Minor Chacón	Murillo	Asesoramiento	Universidad Latina de Costa Rica	Profesor tutor
Ing. Yessica Delgado	Hernández	Asesoramiento	Universidad Latina de Costa Rica	Profesora tutora
Ing. Andrés Haug Mata		Donación de agregados	Agregados Guápiles	Gerente
Ing. Manfred Ramírez		Donación de aditivo y asesoramiento técnico	EUCLID Chemical	Ingeniero
Ing. Ronald F. Zúñiga	Vargas	Matriz de ensayos y asesoramiento técnico	Holcim	Ingeniero
Benito Dessard		Donación cemento	Concreto Coloreado	Dueño
Willia.m. Villalobos	Montero	Aporte técnico en laboratorio	Holcim	Técnico de laboratorio

Juan Ríos Bravo	Aporte técnico en Holcim laboratorio	Técnico de laboratorio
Natalia Castro Centeno	Aporte técnico en Holcim laboratorio	Técnica de laboratorio
Eduardo Artavia Calderón	Aporte técnico en Holcim laboratorio	Técnico de laboratorio

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

11.4. Normas aplicadas

Las pruebas de laboratorio permiten obtener datos numéricos con los que se pueden evaluar parámetros de diseño y, de esta manera, se aplica el enfoque cuantitativo. Las normas aplicadas fueron las siguientes:

- ACI 211: Diseño de mezcla de concreto. Se utilizó para crear la matriz de ensayos teórica, aplicando los conceptos descritos en esta norma, principalmente para la selección de los materiales, selección de dosificaciones, conceptos básicos relacionados con las mezclas de concreto, requerimientos técnicos para lograr una correcta mezcla, entre otros.
- ASTM C-1064: Método de ensayo normalizado de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado. Es utilizado para caracterizar el concreto, también para asegurar parámetros normales de temperatura en las mezclas frescas. Las temperaturas fueron tomadas y registradas al 0.5 °C más cercano.
- ASTM C-143: Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico. Se utilizó esta norma como referencia para obtener parámetros de asentamiento de las mezclas diseñadas y poder determinar la trabajabilidad de éstas, debido a la importancia que tiene esta propiedad en la metodología de impresión en 3D.
- ASTM C-138: Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento, y contenido de aire (gravimétrico) del concreto. Es utilizado para caracterizar el concreto.
- ASTM C-33: Especificación normalizada de agregados para concreto. Es utilizada para conocer requisitos de granulometría y calidad de los agregados fino y grueso, y también como referencia para la generación de la curva granulométrica combinada y realizada a partir de tres agregados seleccionados para la matriz teórica de ensayos.

- ASTM C-109: Método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico utilizando especímenes cúbicos. Con este ensayo, se determinó la resistencia a compresión de muestras de concreto fino cúbicas de 2 pulgadas.
- ASTM C-187: Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico.

11.5. Métodos de investigación

La metodología de investigación propuesta es la cuasiexperimental, donde las variables independientes corresponden a las distintas dosificaciones de las variables de los distintos diseños de mezcla que pueden ser manipulados deliberadamente para obtener el resultado deseado.

11.6. Población y muestra

11.6.1. Población

La población de esta tesis está definida mediante la norma ASTM C-109, la cual corresponde al método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de Cemento Hidráulico Utilizando Especímenes Cúbicos.

Por cada una de las distintas 9 mezclas se realizaron 6 especímenes, de los cuales 3 se fallaron a la edad de 7 días y los siguientes 3 a la edad de 28 días y, de esta manera, obtener la curva de resistencias desarrolladas a medida que el concreto envejece. Las variantes entre las mezclas fueron realizadas en los kilogramos de cemento, kilogramos de arena de río de 4,8 mm, litros de agua y cantidad de aditivo.

Con el fin de obtener la caracterización del concreto diseñado, se ejecutó un ensayo por cada una de las 9 mezclas de concreto: Norma ASTM C-1064 (método de ensayo normalizado de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado), ASTM C-143 (método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico y ASTM C-138 (método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto y ASTM C-187 (método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento hidráulico).

Asimismo, se realizó una prueba de impresión en 3D por cada una de las 9 mezclas. Dicha prueba fue planteada inicialmente utilizando un dispositivo hecho a partir de una base de madera

con ruedas y una cubeta que poseía en su interior un embudo, al cual se le conectó una manguera de 1 pulgada de diámetro, como se observa en la figura 6. Este fue descartado por problemas en la presión, lo que imposibilitó la extrusión de las mezclas y fue reemplazado por una manga pastelera con una abertura de 1 pulgada de ancho, observable en la figura 7.

Figura 6

Dispositivo extrusor descartado



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Figura 7

Dispositivo utilizado para pruebas de extrusión.



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

El patrón definido fue seleccionado debido a que es comúnmente utilizado por impresoras 3D para construcción, como se aprecia en la figura 5. Para las pruebas de esta tesis, se presentan las siguientes dimensiones: largo 25 cm, ancho 25 cm, alto 10 cm y espesor cada capa 2.5 cm., tal como se evidencia en la figura 7.

11.6.2. Muestra

Los tipos de muestra serán las muestras probabilísticas. Se debe cumplir con las tolerancias admisibles de los tiempos de ensayo, las cuales corresponden a ± 6 horas para la edad de 7 días y ± 20 horas para la edad de 28 días. El tamaño de la muestra corresponde a la misma de la población.

Tabla 4

Matriz de ensayos población y muestra

Nombre	Prueba de resistencia a la compresión		Ensayo para temperatura de concreto ASTM C1064	Ensayo para asentamiento ASTM C143	Ensayo para peso unitario, rendimiento y contenido de aire ASTM C138	Prueba de impresión
	7 días	28 días				
Mezcla #1	3	3	1	1	1	1
Mezcla #2	3	3	1	1	1	1
Mezcla #3	3	3	1	1	1	1
Mezcla #4	3	3	1	1	1	1
Mezcla #5	3	3	1	1	1	1
Mezcla #6	3	3	1	1	1	1
Mezcla #7	3	3	1	1	1	1
Mezcla #8	3	3	1	1	1	1
Mezcla #9	3	3	1	1	1	1
Total	27	27	9	9	9	9


Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

11.7. Definición de variables

Para establecer las variables de las diferentes mezclas, se definieron basándose en la ficha técnica de la impresora 3D para construcción de la empresa COBOD (Cobod, 2020). Con esta información, se seleccionaron las siguientes materias primas:

Figura 8

Ficha técnica agregado #1: arena industrial de 4 mm de granulometría

Resultados diarios de producción Laboratorio Control Interno Informe 2022						
Análisis granulométrico ASTM C-136 (INTE 06-02-09)						
Arena Industrial 4 mm						
Diámetros / Mallas	feb-22	may-22	sep-22	oct-22	Promedio	
19.000 3/4"	100%	100%	100%	100%	100%	
12.700 1/2"	100%	100%	100%	100%	100%	
9.500 3/8"	100%	100%	100%	100%	100%	
4.750 #4	100%	100%	100%	100%	100%	
2.360 #8	96%	90%	87%	93%	91%	
2.000 #10		-	-			
1.180 #16	73%	64%	61%	65%	66%	
0.600 #30	53%	42%	43%	45%	46%	
0.430 #40		-	-			
0.300 #50	35%	28%	28%	32%	31%	
0.150 #100	22%	17%	18%	19%	19%	
0.075 #200	13.5%	10.5%	10.7%	11.0%	11.4%	
Módulo Finura	2.22	2.59	2.65	2.46	2.48	
Observaciones:						
Realizó: Jhorsua Castrillo González			Revisó: Ing. Andrés Haug Mata			

Nota: Análisis granulométrico del primero de los 3 agregados seleccionados para las pruebas teóricas. Fuente: *Agregados Guápiles, 2022*

Figura 9


Ficha técnica agregado #2: Arena Industrial de 6 mm de granulometría

Tamiz	Porcentaje pasando (%)				
	Arena Industrial	Inferior	Superior	Incertidumbre	Cumplimiento
Tamiz 9,5 mm (3/8")	100	-	-	0,0083	-
Tamiz 4,75 µm (N° 4)	96	-	-	0,0090	-
Tamiz 2,36 µm (N° 8)	65	-	-	0,0080	-
Tamiz 1,18 µm (N° 16)	44	-	-	0,0080	-
Tamiz 0,6 µm (N° 30)	32	-	-	0,0090	-
Tamiz 0,3 µm (N° 50)	23	-	-	0,0100	-
Tamiz 0,15 µm (N° 100)	15	-	-	0,0110	-
Tamiz 0,075 µm (N° 200)	10,9	-	-	0,0119	-

Nota: Análisis granulométrico del segundo de los 3 agregados seleccionados para las pruebas teóricas. Fuente: *Agregados Guápiles, 2022*

Figura 10



Ficha técnica agregado #3: Piedra de 9 mm de granulometría

		Resultados diarios de producción Laboratorio Control Interno Informe 2022							
Análisis granulométrico ASTM C-136 (INTE 06-02-09)									
Piedra 6-16 mm									
Diámetros / Mallas		1	2	3	4	5	6	Promedio	
19.000	3/4"	100	100	100	100	100	100	100	
12.700	1/2"	100	100	100	100	100	100	100	
9.500	3/8"	100	100	99	99	100	100	100	
4.750	#4	8	9	8	8	9	6	8	
2.360	#8	2	2	2	1	2	1	2	
2.000	#10								
1.180	#16	1	1	1	1	1	0	1	
0.600	#30	0	1	1	1	1	0	1	
0.430	#40								
0.300	#50	0	1	1	1	1	0	1	
0.150	#100	0	1	1	1	1	0	1	
0.075	#200	0.3	0.5	0.6	0.4	0.4	0.3	0.4	
Gravedad específica y absorción ASTM C127 (INTE 06-02-33)									
		1	2	3	4	5	6	Promedio	
Piedra 6-16 mm	Gbs	2.73	-	-	2.73	-	2.71	2.72	
	Gbs	2.68	-	-	2.68	-	2.66	2.67	
	Absorción	1.95	-	-	1.88	-	1.78	1.87	
Observaciones:									
Realizó: Jhorsua Castrillo González					Revisó: Ing. Andrés Haug Mata				

Nota: Análisis granulométrico del tercero de los 3 agregados seleccionados para las pruebas teóricas. Fuente: *Agregados Guápiles, 2022*

Figura 11

Ficha técnica agregado #4: Arena de río de 4.8 mm de granulometría

		INVESTIGACION Y DESARROLLO CARACTERIZACION DE AGREGADO FINO					
MATERIAL:	ARENA DE RIO 4,8 mm						
IDENTIFIC:	GUAPILES						
TÉCNICO:	Eduardo A C						
FECHA:	27/3/2023						
1- ANALISIS GRANULOMETRICO (ASTM C136)						Peso inicial (g)	1037,9
Malla (mm)	Malla nominal	Peso retenido (g)	Ret. Individual %	Ret. acumulado %	Total pasando %	Especificación min (%) / máx (%)	
25,4	1 pulg.						
19,1	3/4 pulg.		0	0	100		
12,7	1/2 pulg.		0	0	100	100	100
9,5	3/8 pulg.		0	0	100	100	100
4,75	#4	37,7	4	4	96	80	100
2,36	#8	261,6	25	29	71	60	100
1,18	#16	247,9	24	53	47	40	85
0,6	#30	185,7	18	71	29	20	60
0,3	#50	143,0	14	84	16	10	45
0,15	#100	81,5	8	92	8	0	30
0,075	#200	37,1	4	96	4	0	18
0	Charola	44,5	4	100	0		
Total (g) =		1039,0	M.F. = 3,32		Δ % de peso inicial: 0,1%		

Nota: Agregado seleccionado para las pruebas finales de la tesis. Fuente: *Holcim, 2023*

Figura 12

Cemento blanco marca Aalborg



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Figura 13

Aditivo Plastol 5000 Ultra



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

11.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se hizo según lo recomendado por las respectivas normas ASTM y ACI, planteadas en los objetivos específicos y en el epígrafe 13.4. Los datos cuantitativos se recolectaron a través de los ensayos de laboratorio.

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos corresponden a los equipos del laboratorio de la empresa Holcim en su planta ubicada en San Rafael de Alajuela. Se utilizaron los instrumentos especificados en cada norma. Además, se verificó que cada uno de éstos estuviera correctamente calibrado para obtener confiabilidad en los resultados. Para el procesamiento de los datos recolectados durante y una vez terminadas las pruebas, se utilizó el programa Microsoft Excel.

11.9. Procedimiento metodológico

11.9.1. Etapa de investigación

Para realizar un diseño de mezcla como el propuesto en el objetivo específico, se requiere recopilar información de fuentes externas a las de Costa Rica, ya que actualmente no se cuenta con la suficiente cantidad de recursos en el país relativos a este tema. La idea fue poder entender el funcionamiento de esta tecnología en los países donde ya se encuentra implementada y valorar la aplicabilidad en nuestro país con los materiales que se encuentran aquí y comprobar su funcionalidad.

Al respecto, se sabía que los materiales debían ser granulares, sin embargo, no se conocían las características físicas y mecánicas específicas que éstos debían tener, por lo tanto, se propusieron los agregados más comunes en Costa Rica y, de esta manera, comprobar su trabajabilidad.

Asimismo, mediante un proceso de visualización, se identificó el tipo de textura y consistencia que se debía lograr. De este modo, se propuso crear un dispositivo de emulación de extrusión observable en la figura 6, mediante el cual se pudiera replicar la manera como se coloca la mezcla de concreto. Así se alcanzó la primera matriz de ensayos, la cual fue creada utilizando el programa Minitab 19 para poder generar los diseños de mezcla con fundamento estadístico.

Tabla 5*Matriz de ensayo teórica*

35 Litros de prueba

Orden estadístico	Orden corrida	Arena 3 mm (kg)	Arena 6 mm (kg)	Piedra 9 mm (kg)	Agua (l)	Cemento (kg)	Relación A/C	Resistencia proyectada (MPa)
8	1	5,32	4,66	56,53	5,78	11,73	0,49	38,00
7	2	5,21	4,56	55,34	6,13	12,78	0,48	40,00
4	3	5,38	4,70	57,12	6,30	10,50	0,60	36,00
1	4	5,15	4,51	54,74	0,80	0,40	0,40	42,00
3	5	5,38	4,70	57,12	5,60	11,20	0,50	37,00
2	6	5,15	4,51	54,74	6,30	13,30	0,47	41,00
6	7	5,21	4,56	55,34	5,78	13,13	0,44	41,00
5	8	5,26	4,61	55,93	5,95	12,25	0,49	39,00
9	9	5,32	4,66	56,53	6,13	11,38	0,54	38,00
Total		94,75	82,91	755,06	53,6	106,32		

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

11.9.2. Etapa exploratoria

Una vez obtenida la matriz de ensayo teórica, se llevó a cabo el proceso de comprobación. Según la información arrojada por el programa Minitad 19, se realizó primero la que en la columna de orden estadístico tenía asignado el número 1 y no se realizó con el orden de corrida con el objetivo de no tener una predisposición con los resultados. Todas estas pruebas se pueden ver reflejadas en la tabla 6, donde se observan las variables de cada mezcla, así como la cantidad de litros realizados y los porcentajes de los agregados utilizados.

La primera y única prueba realizada de la matriz de ensayo teórica se hizo utilizando los materiales para únicamente un litro de mezcla y poder obtener una observación preliminar del diseño de mezcla, como se demuestra en la figura 14. Se concluyó que este primer diseño de la matriz de ensayo teórica presentaba segregación por parte de la piedra de 9 mm y también que no existía pasta suficiente para amarrar la mezcla, además de un faltante importante de material granular fino. Por lo tanto, el resto de las mezclas de la matriz de ensayo teórica fueron descartadas.

Figura 14

Segregación de prueba preliminar de matriz de ensayo teórica



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Posteriormente, se colocó la mezcla en el dispositivo de simulación de extrusión descartado y la piedra no pasó por la manguera, ya que se obstruyó y solo se logró extruir cemento, agua y arena, la cual presentó una consistencia muy aguada. Por esta razón, no se utilizó el método alternativo de extrusión, como se evidencia en la figura 15.

Figura 15

Evidencia de extrusión fallida de prueba preliminar de matriz de ensayo teórica



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

En las pruebas 2 y 3, se variaron las cantidades de cada agregado en la mezcla. Se concluyó que la cantidad de piedra de 9 mm en relación con la cantidad de las 2 arenas era muy grande, por lo tanto, se procedió a eliminar la variable de la piedra en las pruebas siguientes.

Las pruebas 4 y 5 se realizaron con solo las arenas de 3 mm y 6 mm, además de cemento, agua y aditivo. Se consiguió un mejor resultado en relación con la consistencia deseada, sin embargo, la trabajabilidad no fue la correcta, debido a que se presentaron dificultades para la prueba de extrusión en ambos dispositivos propuestos. La prueba 6 se realizó utilizando mezcla de repello preparada para observar la consistencia lograda, la cual no fue la correcta y no se contempló en futuras pruebas.

Para las pruebas 7 y 8, se intentó utilizar la arena de 3mm en un porcentaje del 90% y la piedra de 9 mm en un porcentaje de 10% con el objetivo de probar si la piedra presentaba una mejor trabajabilidad y aumentaba la resistencia de la mezcla. Se descartaron ambas pruebas debido a que no se pudo pasar la mezcla a través de la manga pastelera, la cual, a partir de estas pruebas, se utilizó como único dispositivo para extruir.

Finalmente, las pruebas 9, 10 y 11 se realizaron con solo arena de río de 4.8 mm (cuarto agregado), cemento, agua y aditivo. La novena tuvo problemas de fluidez debido a que se utilizó una dosificación de 8,75cc de Plastol 5000 por cada kilogramo de cemento. Debido a esto, se presentó un asentamiento exagerado, además de que se notó una consistencia muy fluida.

Se modificó la dosificación de Plastol 5000 a 5cc por cada kilogramo de cemento para las pruebas 10 y 11. La décima fue realizada con cemento industrial y la onceava con cemento blanco, siendo la única diferencia un aumento en la cantidad de agua de la última debido a que el cemento blanco consume más por el tamaño de partícula, ya que se trata de un cemento más fino. Ambas pruebas fueron exitosas y se consiguieron las características mecánicas que se tenían como objetivo, además de que la prueba de extrusión también tuvo buenos resultados.

Tabla 6*Matriz de ensayo de pruebas exploratorias*

Prueba	Arena 3 mm (kg)	Arena 6 mm (kg)	Piedra 9 mm (kg)	Arena 4.8 mm (kg)	Agua (l)	Cemento (kg)	Relación A/C	Plastol por kg de cemento (mL)	Litros de prueba	Porcentaje agregados (3 mm-6 mm-9 mm-4.8 mm)
1	0,76	0,67	8,01	0,00	0,83	1,68	0,49	8,00	5,00	7,5-8-84,5-0
2	0,86	1,52	2,40	0,00	0,41	0,84	0,48	8,00	2,50	18-32-50-0
3	0,76	0,57	0,57	0,00	0,17	0,34	0,50	8,00	1,00	40-30-30-0
4	1,10	0,73	0,00	0,00	0,16	0,40	0,40	8,00	1,00	60-40-0-0
5	1,10	0,73	0,00	0,00	0,16	0,40	0,40	5,00	1,00	60-40-0-0
6	1,84*	0,00	0,00	0,00	0,29	0,80	0,20	7,00	1,00	0-0-0-0*
7	4,16	0,00	0,46	0,00	0,64	2,00	0,32	6,75	2,50	90-0-10-0
8	4,16	0,00	0,46	0,00	0,64	2,00	0,32	8,75	2,50	90-0-10-0
9	0,00	0,00	0,00	4,62	0,64	2,00	0,32	8,75	2,50	0-0-0-100
10	0,00	0,00	0,00	4,60	0,60	2,00	0,32	5,00	2,50	0-0-0-100
11	0,00	0,00	0,00	4,60	0,60	2,00	0,32	5,00	2,50	0-0-0-100

Nota: *Prueba realizada utilizando mezcla para repello preparada. Fuente: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

11.9.3. Etapa pruebas finales

Posteriormente a haber logrado éxito en las pruebas 10 y 11 de la tabla 6, se creó una nueva matriz de ensayos tomando como la referencia principal y, como mezcla patrón, la prueba número 11, ya que ésta fue la que cumplió con todas las propiedades y cualidades que se buscaban. La matriz de ensayo de pruebas finales consiste en 9 mezclas diseñadas en el programa Minitab 19 para obtener las variaciones de cada mezcla y obtener respaldo estadístico. Estas 9 mezclas se diseñaron para 20 litros cada una. De éstas, se obtiene la población y muestra de la tesis, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7*Matriz de ensayo pruebas finales*

20 litros de prueba

Orden estadístico	Humedad arena (%)	Arena 4.8 mm (kg)	Agua teórica (l)	Cemento (kg)	Relación A/C	Plastol (mL)	Resistencia proyectada (MPa)
1	10	36,99	5,10	15,90	0,32	79,50	40
8	10	35,86	5,58	16,25	0,34	81,30	41
7	10	35,86	6,53	15,30	0,43	76,50	39
2	10	35,48	7,00	15,10	0,46	75,50	38
6	10	36,61	5,58	15,70	0,36	78,50	39
3	10	35,48	5,10	17,00	0,30	85,00	42
4	10	36,99	7,00	14,00	0,50	70,00	36
5	10	36,24	6,05	15,50	0,39	77,50	39
9	10	36,61	6,53	14,75	0,44	73,80	38
Total		326,13	54,45	153,45		697,50	

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12. Análisis de resultados

Se ejecutaron los ensayos para la caracterización del concreto, los cuales se mencionan en los objetivos específicos, bajo las normas ASTM C1064, ASTM C143 y ASTM C138. Además, se incluyó la norma ASTM C187 para obtener parámetros de trabajabilidad. Estos ensayos permitieron recopilar información con respecto al comportamiento y a las propiedades de los concretos diseñados. Gracias a la caracterización, se pudo determinar, con datos cuantitativos, cuáles mezclas presentaron los resultados más favorables.

12.1. Temperatura

La tabla 8 muestra el orden como se realizaron las mezclas, comenzando por la primera a las 9:27 a.m. y terminando la novena a las 2:50 p.m. el día 22 de marzo de 2023.

Tabla 8

Temperatura registrada de cada mezcla

Orden ejecución	Número mezcla	Ensayo para temperatura de concreto ASTM C1064 (Grados Celcius)	Temperatura en San Rafael de Alajuela 22 de marzo de 2023 (grados Celcius)	Hora moldeado
1°	1	23	25	9:27 a.m.
2°	8	24	27	10:15 a.m.
3°	3	23	27	10:27 a.m.
4°	4	25	28	11:38 a.m.
5°	5	26	28	11:45 a.m.
6°	6	27	29	1:15 p.m.
7°	7	27	29	1:45 p.m.
8°	2	27	29	2:20 p.m.
9°	9	28	29	2:50 p.m.

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Se puede notar cómo, a medida que aumentó la temperatura del día, influyó de manera directa en la temperatura de cada mezcla, empezando por la mezcla número 1 registrando una temperatura de 23°C y 25°C en el ambiente, terminando con la mezcla número 9 registrando una temperatura de 28°C en el termómetro del laboratorio y 29°C en el exterior.

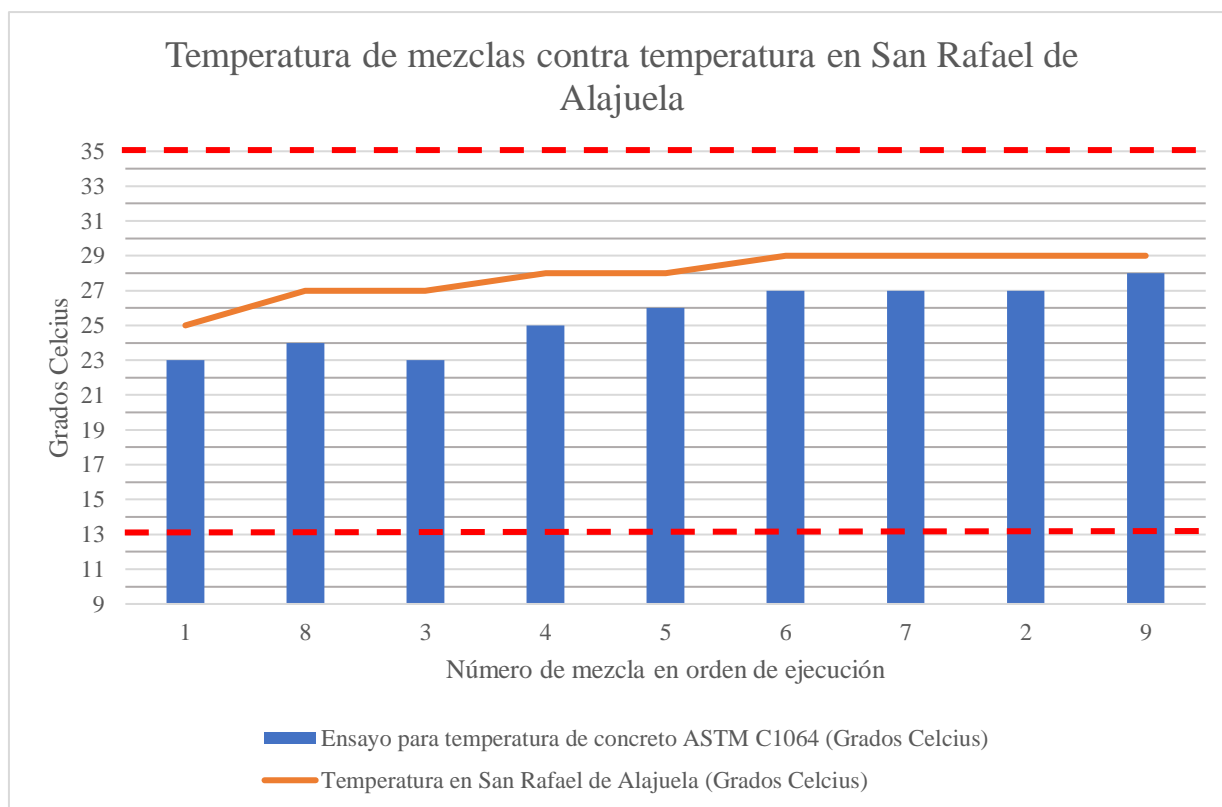
En el gráfico 1, se demuestra la tendencia alcista en cuanto a la temperatura del ensayo en comparación con la temperatura del exterior, tal como lo demuestra la línea en color naranja. Se

demarca en color rojo una línea discontinua marcando los 35°C como límite máximo recomendado para la colocación de concretos, además del límite mínimo, el cual se trata de 13°C para secciones cuya menor dimensión sea inferior a 30 cm según el ACI 301S-10.

Según lo mencionado en la anterior especificación, sección 4.2.2.6, la temperatura del concreto colocado no debe exceder más de 11°C por encima de los 13°C. Por lo tanto, las mezclas 1, 8 y 3 son las que no exceden este límite y corresponden a las que teóricamente no van a tener modificaciones en la humedad por la temperatura.

Gráfico 1

Temperatura de mezclas contra temperatura en San Rafael de Alajuela



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.2. Asentamiento

De acuerdo con lo evidenciado en la tabla 9, la mezcla número 3 fue la que obtuvo un mayor asentamiento con 26,00 cm. Esta mezcla fue de las que presentó mejores resultados en cuanto a trabajabilidad. La mezcla número 9 fue la menos trabajable con 15,50 cm de asentamiento. Se puede decir que todas las mezclas se clasifican como concretos de alta fluidez, en gran parte por el aporte del aditivo Plastol 5000 Ultra, ya que este producto permite alcanzar trabajabilidades en condiciones de relación A/C bajas.

Entre las 9 mezclas se obtiene un promedio de A/C de 0,39, lo cual demuestra que se realizaron pruebas en concretos con alto contenido de cemento y poca agua. El Plastol 5000 es un reductor de agua de alto rango, por lo cual, a los diseños, en el momento de la mezcla, se les aplicó un ajuste por humedad para no sobrepasar la consistencia que se estaba buscando.

Se concluye que la mezcla 3 es la más fluida, por lo tanto, puede presentar las mejores condiciones para un concreto bombeable. En la contraparte, se establece que la mezcla número 9 podría presentar problemas para pasar a través de mangueras e, incluso, presentar problemas de presión en impresiones 3D reales. Como otra conclusión, se puede notar que las relaciones A/C promedio de las 9 mezclas se encuentran dentro del rango de concretos bombeables de acuerdo con la tabla 2.

Tabla 9

Asentamiento registrado de cada mezcla ordenado de mayor a menor

Número mezcla	Ensayo para asentamiento ASTM C143 (cm)	Relación A/C
3	26,00	0,30
1	24,50	0,32
2	24,50	0,46
8	23,50	0,34
4	23,50	0,50
5	20,00	0,39
7	18,50	0,43
6	18,50	0,36
9	15,50	0,44
Promedio	21,61	0,39

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

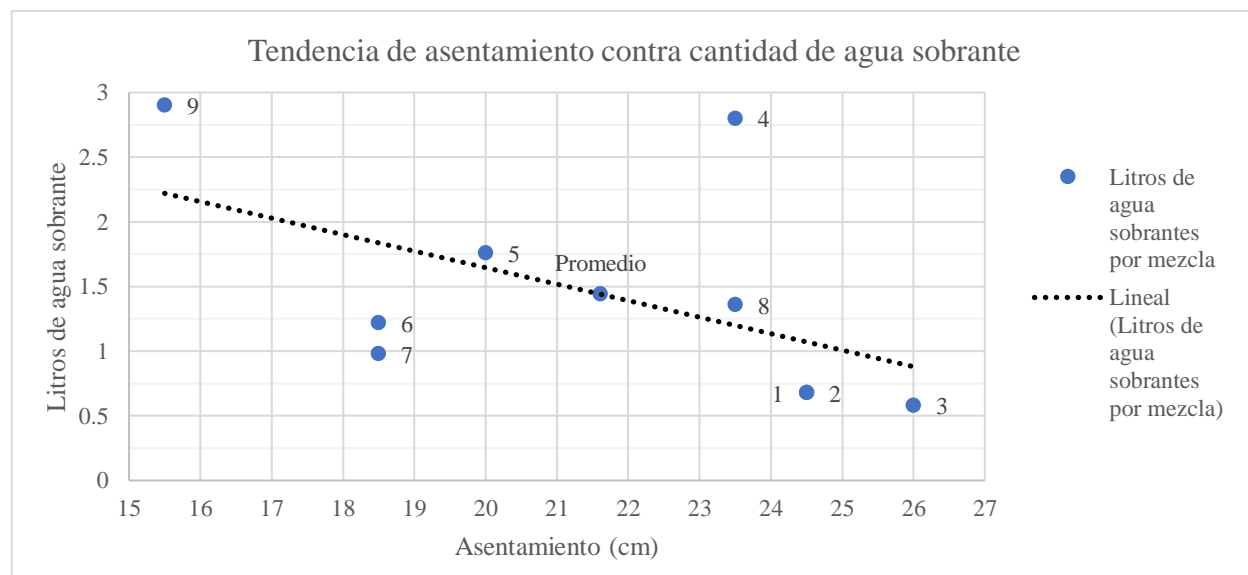
En el gráfico 2, se puede observar cómo, a medida que aumentó la cantidad de agua sobrante, disminuyó el asentamiento, siendo la mezcla 9 la que presentó menos fluidez y la más seca, con un asentamiento de 15,50 cm y 2,90 litros de agua sobrante. Por otra parte, la mezcla número 3 presentó el mayor asentamiento con 26 cm y la menor cantidad de agua sobrante con 0,68 litros.

Se puede observar una línea de tendencia a la baja, la cual indica el comportamiento de las mezclas en relación con asentamiento y litros de agua que no fueron agregados a la mezcla. Se encuentra un promedio de las 9 mezclas que presentan un asentamiento de 21,61 cm y 1,44 litros de agua sobrante.

En el extremo donde se encuentra la mezcla número 9, se puede concluir que existe un asentamiento poco fluido en comparación con el extremo de la mezcla número 3. Ello puede significar que la primera presenta una menor trabajabilidad que la segunda, lo cual, para efectos de aplicación en construcción con impresoras 3D, implica que la mezcla 3 es más apta. No se encontraron rangos de asentamiento establecidos o recomendados para impresión 3D.

Gráfico 2

Tendencia de asentamiento contra cantidad de agua sobrante



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Para brindar una ejemplificación del efecto de la relación A/C sobre los concretos diseñados, se puede observar, en la figura 16, que la consistencia obtenida es muy fluida, además de que se aprecia la aplicación de la norma ASTM C-143.

Figura 16

Ejemplo de ensayo de asentamiento en mezcla 8



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.3. Densidad

De acuerdo con la información de la tabla 10, se puede deducir que la mezcla número 3 posee la mayor densidad con un valor de $2295,45 \text{ kg/m}^3$, lo que significa que corresponde a la mezcla con más masa, también es la mezcla que presenta la mayor cantidad de cemento con 17 kg.

La mezcla que presenta la menor densidad corresponde a la número 2 con 2196.02 kg/m^3 , la cual presenta la menor cantidad de arena de río con 35,48 kg, sin embargo, también es la que contiene más agua.

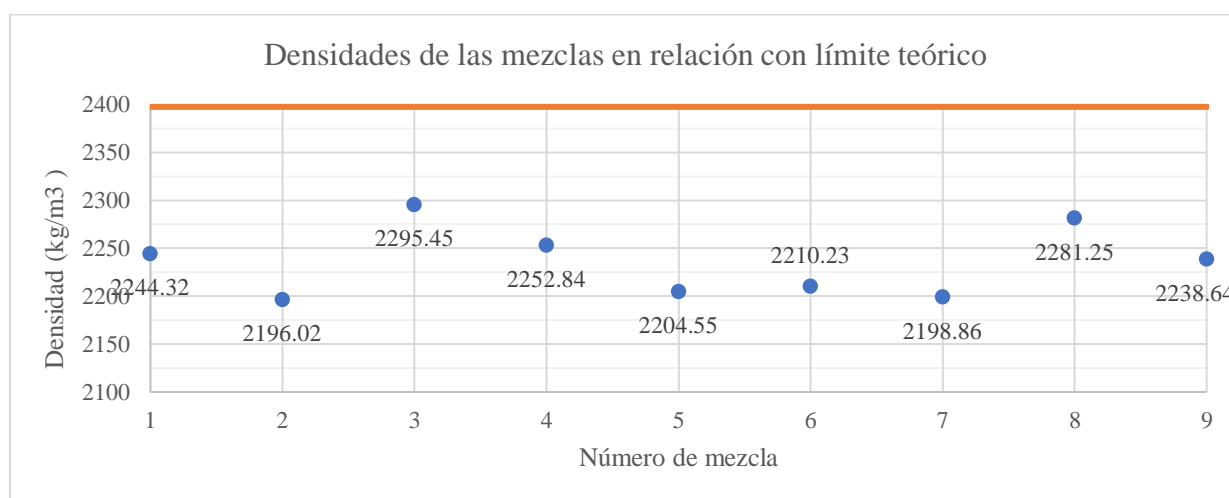
En relación con lo anterior, se puede concluir que la mezcla 3 presenta una mejor durabilidad y poca permeabilidad, lo cual es beneficioso y se puede recomendar para ser utilizada en elementos prefabricados, ya que también va a presentar alta resistencia.

Tabla 10*Densidades registradas de cada mezcla*

Número de mezcla	Densidad (kg/m ³)	Cemento (kg)	Arena de río 4,80 mm (kg)	Agua teórica (l)
1	2244,32	15,90	36,99	5,10
2	2196,02	15,10	35,48	7,00
3	2295,45	17,00	35,48	5,10
4	2252,84	14,00	36,99	7,00
5	2204,55	15,50	36,24	6,05
6	2210,23	15,70	36,61	5,58
7	2198,86	15,30	35,86	6,53
8	2281,25	16,25	35,86	5,58
9	2238,64	14,75	36,61	6,53

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

El límite teórico de densidad, de acuerdo con el ACI 211, indica que corresponde a 2400 kg/m³, como se muestra en el gráfico 3. Ninguna de las mezclas sobrepasa el límite marcado con una línea en color naranja. Además, se puede establecer una relación en la que cuanto más arriba se encuentre el punto de dispersión en el gráfico, más tendencia hay a desarrollar resistencias a compresión alta.

Gráfico 3*Densidades de las mezclas en relación con límite teórico.*

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.4. Contenido de aire

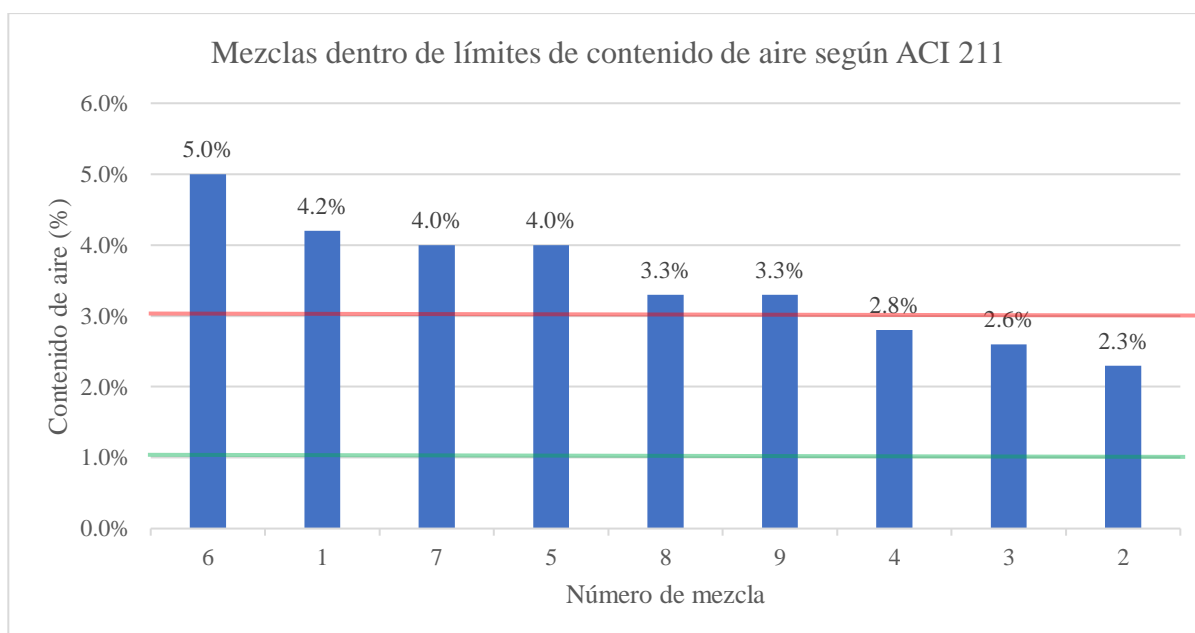
De acuerdo con el ACI, en su sección 11.2.2.1 Especificaciones para concreto estructural, se menciona que el contenido de aire no debe ser mayor a 3%. Por lo tanto, se marcó, en el gráfico, una línea de referencia en este punto. Se demuestra que las mezclas 6, 1, 7, 5, 8 y 9 sobrepasan el nivel máximo recomendado.

La mezcla más permeable corresponde al número 6 con un 5,00% de contenido de aire. En contraparte, la mezcla número 2 presenta el menor contenido de aire con un 2,30%. Cabe resaltar que este aire se clasifica como aire atrapado, por lo cual se puede deducir que la mezcla que presenta mayor cantidad de vacíos, por lo tanto, a largo plazo, la número 6 va a tener menor durabilidad. Por otra parte, la que presenta mejores cualidades corresponde a la mezcla número 2, aunque la mezcla 3 y 4 también entran en los rangos de mejor durabilidad.

En la tabla 4.2.2.7.b.1 del ACI 301S-10, se menciona que para mezclas con $f'c$ mayores o iguales a 35 MPa, se permite reducir el contenido de aire hasta 1%, por lo tanto, en el gráfico, se marcó ese nivel en color verde para demostrar que todas cumplen.

Gráfico 4

Mezclas dentro de límites de contenido de aire según ACI 211



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

En la figura 17, se puede apreciar el equipo utilizado para realizar el ensayo de contenido de aire, el cual corresponde a la norma ASTM C-138. Esta imagen corresponde a la mezcla número 5, la cual obtuvo un contenido de aire de 4%.

Figura 17

Ejemplo de contenido de aire en mezcla 5



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.5. Consistencia

Se utilizó la consistencia como una de las referencias para trabajabilidad, debido a que la consistencia indica el grado de dificultad que tiene una mezcla para ser colocada. Además, se puede tener un parámetro de plasticidad. La tabla 11 muestra la cantidad de cemento de cada mezcla y la consistencia obtenida.

Tabla 11

Densidades registradas de cada mezcla

Número de Mezcla	Cemento (kg)	Consistencia (mm)
3	17,00	70,00
1	15,90	65,00
2	15,10	65,00
8	16,25	62,00
5	15,50	60,00

4	14,00	60,00
7	15,30	54,00
6	15,70	50,00
9	14,75	50,00

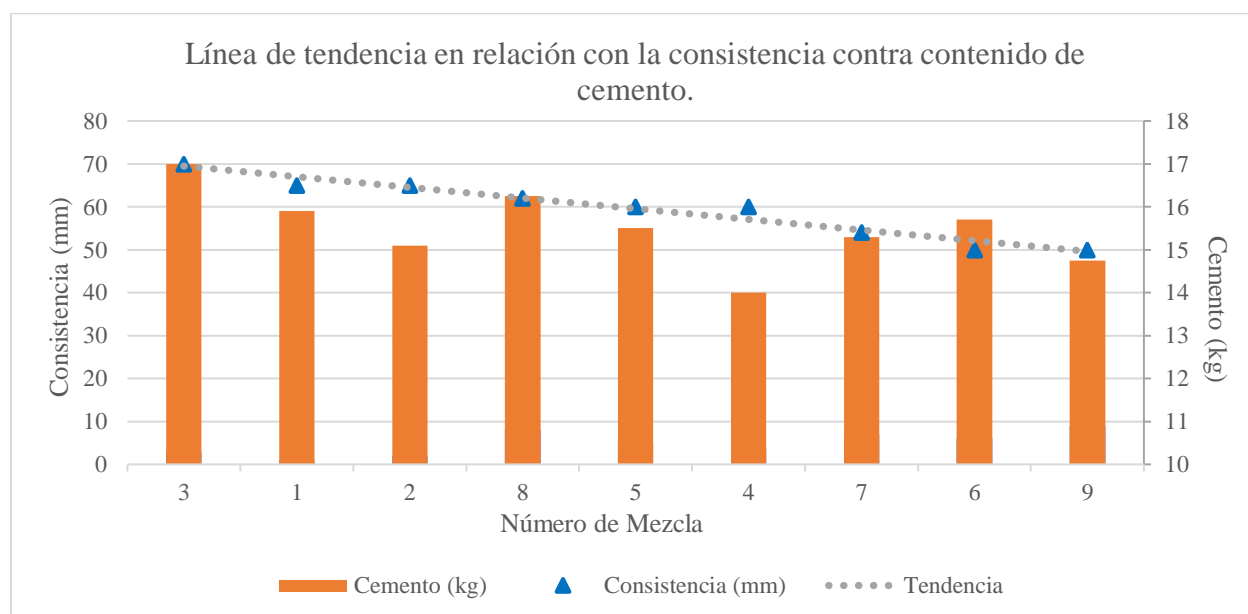
Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Como se puede observar en el gráfico 5, la mezcla número 3 presenta el mayor contenido de cemento (17 kg) y, al mismo tiempo, presenta la mayor consistencia (70 mm). En el lado opuesto, se encuentra la mezcla número 9, la cual es la segunda con menor cantidad de cemento (14,75 kg) solo después de la primera con una diferencia de 0,75 kg con respecto a la primera. La mezcla 9 presenta una consistencia de 50 mm.

Al analizar la gráfica, se puede ver cómo se forma una línea de tendencia, la cual denota que, a mayor cantidad de cemento, mayor consistencia, aunque esta condición no se cumple en el 100% de los casos. Se puede atribuir a que el aditivo actúa con base en la cantidad de cemento, por lo tanto, cuanto mayor sea la cantidad de cemento, mayor va a ser la cantidad de Plastol 5000. Ello provoca que la mezcla 3 presente una mejor trabajabilidad que la 9. De este modo, se deduce que se pueden obtener mejores resultados en relación con la impresión en 3D.

Gráfico 5

Línea de tendencia en relación con la consistencia contra contenido de cemento



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

En la figura 18 se puede observar la consistencia obtenida en la mezcla número 3, además del equipo de laboratorio utilizado en este ensayo.

Figura 18

Ejemplo de ensayo de consistencia en mezcla 3



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.6. Ajuste por humedad

En cada una de las 9 mezclas, se realizó un ajuste de humedad. Durante el proceso de mezclado, se vertió un 80% del agua total debido a que el Plastol 5000 provocó una fluidez muy intensa en los primeros minutos. Posteriormente, las mezclas consiguieron mejor consistencia y mejoraron su trabajabilidad. De modo empírico y revisando constantemente la consistencia, se agregaba agua en caso de que así lo requiriera la mezcla. En la siguiente tabla 12, se establece el agua teórica de cada mezcla, así como la cantidad de agua sobrante.

Tabla 12*Relación A/C teórica en orden descendente*

Número mezcla	Agua teórica (l)	Cemento (kg)	Relación A/C	Litros de agua sobrantes
4	7,00	14,00	0,50	2,80
2	7,00	15,10	0,46	0,68
9	6,53	14,75	0,44	2,90
7	6,53	15,30	0,43	0,98
5	6,05	15,50	0,39	1,76
6	5,58	15,70	0,36	1,22
8	5,58	16,25	0,34	1,36
1	5,10	15,90	0,32	0,68
3	5,10	17,00	0,30	0,58

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Como se puede observar en la tabla anterior, la mezcla que presenta la relación A/C teórica más alta corresponde a la número 4 con 0,50, además de ser la que presenta mayor cantidad de litros utilizados en la mezcla con 7. La relación A/C teórica más baja corresponde a la mezcla 3 con 0.3 y es la que presenta la menor cantidad de agua con 5,10 litros.

Realizando un ajuste mediante el cual se restan los litros de agua sobrante a la cantidad de litros de los diseños de mezcla, se obtienen las relaciones A/C reales, lo cual provoca los siguientes cambios observables en la tabla 13:

Tabla 13*Relación A/C real en orden descendente*

Número mezcla	Agua real	Cemento	Relación A/C	% de diferencia entre agua teórica y agua real
2	6,32	15,10	0,42	9,71%
7	5,55	15,30	0,36	15,02%
4	4,20	14,00	0,30	40,00%
6	4,36	15,70	0,28	21,88%
5	4,29	15,50	0,28	29,09%
1	4,42	15,90	0,28	13,33%

3	4,52	17,00	0,27	11,37%
8	4,22	16,25	0,26	24,39%
9	3,63	14,75	0,25	44,44%

Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

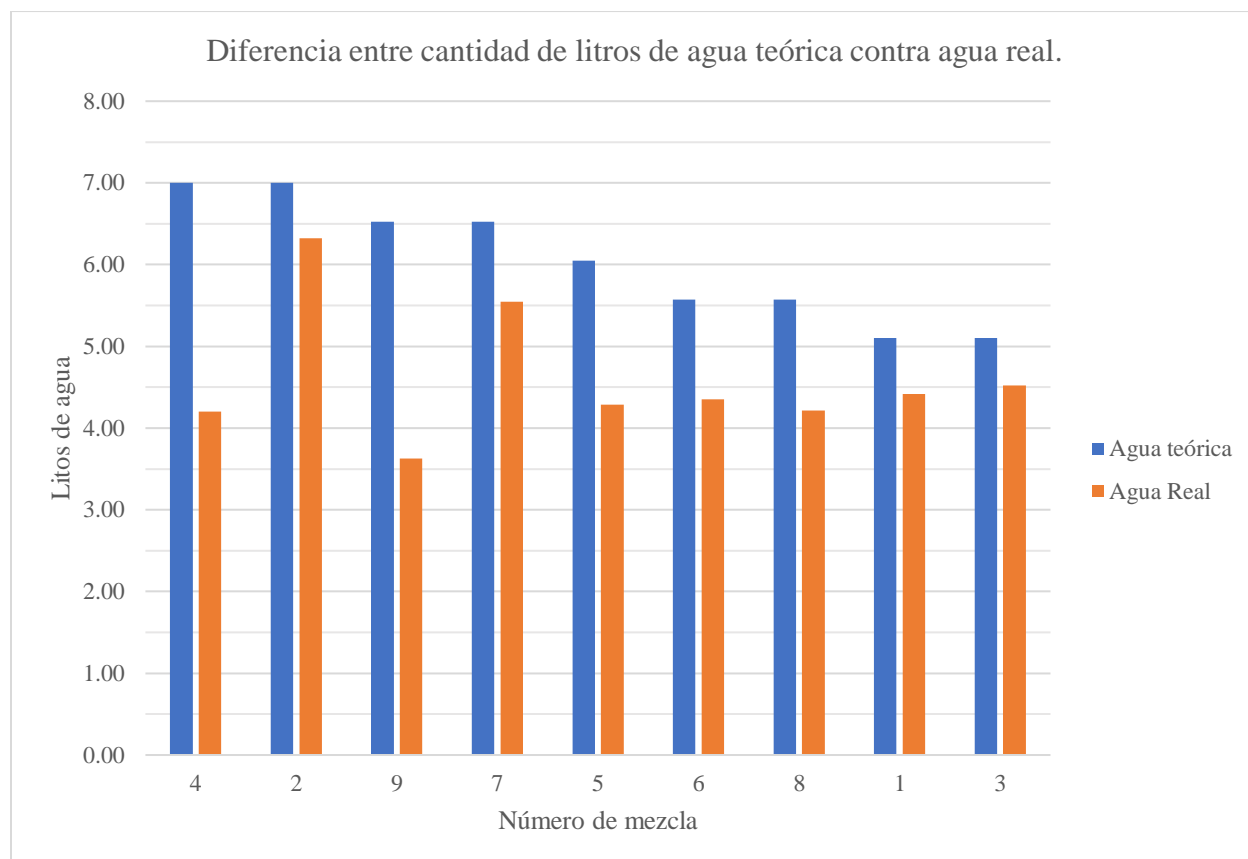
Se puede apreciar que la mezcla número 9 fue la que obtuvo la relación A/C más baja con 0,25 y la mezcla 2 obtuvo la más alta con 0,42. La tabla anterior evidencia, de menor a mayor, el orden de las relaciones A/C reales. Se puede esperar que las mezclas ubicadas en la parte superior de la tabla tengan más resistencia a compresión que las de la parte inferior.

Generalmente, las mezclas con menor relación A/C son las que resultan más costosas, debido al alto contenido de cemento, en este caso corresponde a la número 3 con un total de 17 kg de cemento. Ésta se encuentra entre las relaciones A/C bajas. De igual manera, la menos costosa corresponde a la número 4, que contiene 14 kg de cemento y está entre las relaciones A/C reales más altas.

En el gráfico 6, se puede notar cómo la mezcla 9 sufrió la mayor diferencia de agua entre el agua teórica y el agua real, así como la número 2 fue la que obtuvo una menor diferencia. La mezcla número 9 fue a la que se le aplicó la menor cantidad de agua real, lo cual representa menor trabajabilidad, así como una consistencia más seca y menor resistencia a compresión.

Gráfico 6

Diferencia entre cantidad de litros de agua teórica contra agua real



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.7. Resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron a 7 y 28 días con el fin de graficar la curva de resistencia-edad. Se seleccionaron las mezclas que alcanzaron la mayor y menor resistencias promedio en ambas edades.

Los especímenes fueron moldeados el día 22 de marzo de 2023 entre las 9 a.m. y 2 p.m. Los ensayos a compresión a 7 días se realizaron el día 29 de marzo de 2023 entre las 9:40 a.m. y 12:46 p.m., mientras los ensayos a compresión a 28 días se ejecutaron el día 12 de abril de 2023 entre las 10:31 a.m. y 12:37 p.m. Por lo tanto, se cumple, en todos los casos, con las tolerancias para cada una de las edades. En la tabla 14, se encuentran los resultados de las pruebas a compresión de cada mezcla, así como el promedio de cada edad.

Tabla 14*Matriz de ensayos de resistencia a compresión*

Orden estadístico	Ensayos de prueba a compresión (MPa) 7 días				Ensayos de prueba a compresión (MPa) 28 días			
	Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	Promedio	Cubo 4	Cubo 5	Cubo 6	Promedio
1	72,34	80,68	82,23	78,42	80,44	60,77*	86,10	83,27
8	79,52	89,73	91,97	87,07	102,51	89,88*	101,32	101,91
7	68,48	32,40*	33,10*	68,48	85,10	81,64	65,46*	83,37
2	67,96	67,93	65,50	67,14	82,18	82,29	80,32	81,60
6	56,43	54,73	44,30*	55,58	67,08	75,98	85,64	76,23
3	91,15	87,47	80,17	86,26	97,38	93,17	104,17	98,24
4	76,04	74,26	63,07*	75,15	88,93	87,17	87,72	87,94
5	74,89	74,10	69,67	72,89	88,68	88,24	85,68	87,53
9	65,59	74,26	64,77	68,21	87,09	83,86	81,32	84,09

Nota: Se marcaron con asterisco (*) los datos atípicos, por lo que no fueron tomados en cuenta en el análisis ni en el promedio. *Fuente:* Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

De acuerdo con el gráfico 7, se concluye que la mezcla que obtuvo los resultados más altos fue la 8 con 87,07 MPa a los 7 días de edad y 101,91 MPa a los 28 días. La mezcla con los resultados más bajos corresponde a la 6 con 55,58 MPa y 76,26 MPa a los 28 días.

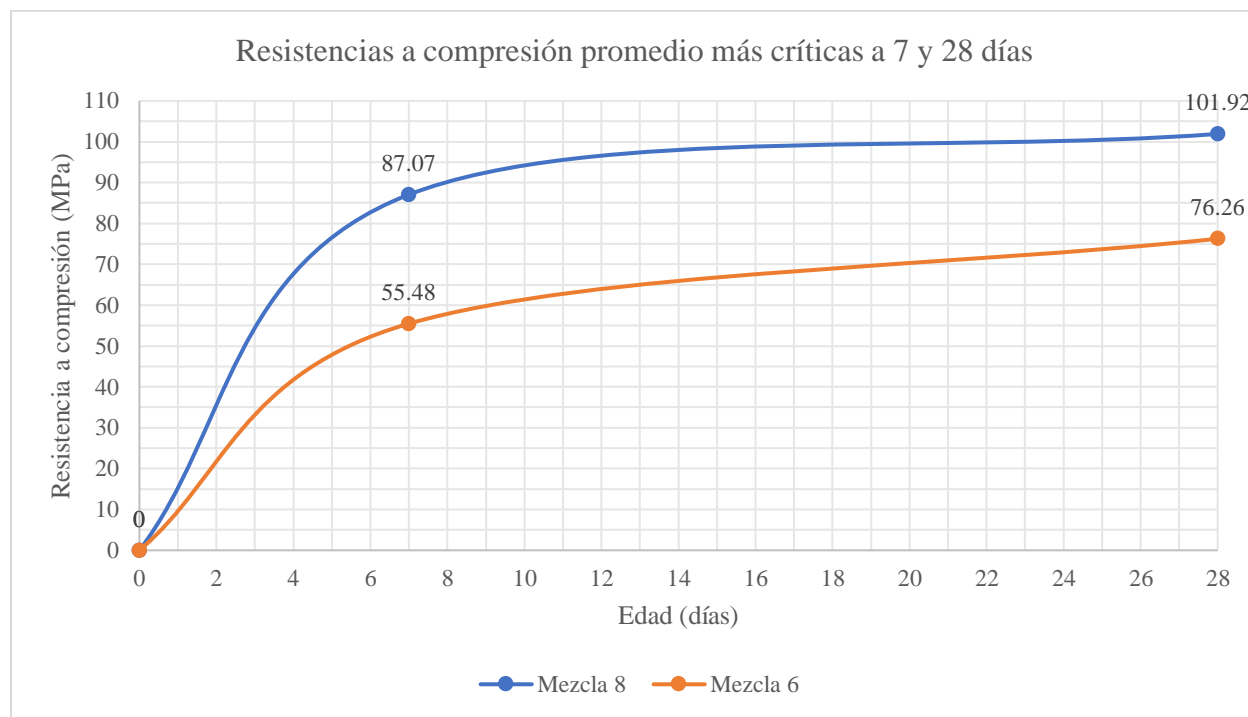
Cabe destacar que la resistencia a compresión objetivo de 35 MPa fue alcanzada de manera temprana, en el caso de la mezcla 8 al día 2, mientras en el caso de la mezcla 6 al día 3. Esto se debe a dos factores principales:

1. Las mezclas tienen entre sus variantes un aditivo que, además de ser reductor de agua, entre sus principales características, se encuentra la alta resistencia a compresión y flexión en todas las edades.

- Las mezclas contienen gran cantidad de cemento, que desarrolla altas resistencias a edades tempranas.

Gráfico 7

Resistencias a compresión promedio más críticas a 7 y 28 días



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

En la figura 19, se puede observar un ejemplo de un ensayo a compresión realizado a los 28 días de edad. Cabe resaltar que, para llevar a cabo de manera correcta este ensayo, se debían colocar los cubos en la posición correcta dentro del área definida, cuidando que la totalidad del cubo se encontrara siempre dentro de ambas placas circulares (superior e inferior).

Figura 19

Sexto cubo de mezcla número 9 a 28 días de edad



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Una vez terminado el ensayo a compresión, se debió tomar el dato de la cantidad de MPa que resistió cada espécimen. La toma de esta información se realizó como se observa en la figura 20.

Figura 20

Resistencia a compresión del sexto cubo de mezcla número 9 a 28 días de edad.



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

12.8. Impresión 3D

De las 9 mezclas, las que presentaron mejores resultados en la impresión 3D fueron la 2 y 3. Sin embargo, se seleccionó la número 2 como la mejor en esta prueba debido a que presentaba los mejores resultados visuales, ya que son comparables a los resultados realizados por las impresoras 3D reales.

Lo más destacable es la uniformidad de las capas, pues presentan un alto y ancho muy constante, además de una forma rectangular plana, como se puede apreciar en la siguiente figura 21.

Figura 21

Prueba de impresión mezcla 2, ángulo de capas externas



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Asimismo, se logró una adhesión entre capa y capa muy interesante. En las zonas donde fue más complicado mantener la forma, como lo fueron los vértices y las esquinas, se logró un producto terminado con aspecto similar a las impresiones reales. Aunque de la misma manera, se pueden apreciar desperfectos atribuidos al error humano, como se puede notar en la figura 22.

Figura 22

Prueba de impresión mezcla 2, ángulo de vértice interno



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

Las mezclas que presentaron los peores resultados en la prueba de impresión fueron la 4 y la 9, aunque se seleccionó la 9 por tener las propiedades y características más desfavorables y porque, en el aspecto visual, también resultó tener problemas como grietas y juntas frías. Además, en el momento de la extrusión, resultó bastante complicado pasar la mezcla por la manga debido a que la trabajabilidad fue bastante baja y presentó problemas de consistencia como se evidencia en la figura 23.

Figura 23

Prueba de impresión mezcla 9, juntas frías y grietas



Nota: Elaboración propia del investigador para efectos del presente trabajo investigativo, 2023

13. Conclusiones

1. Se concluye que se alcanza una resistencia a la compresión de 35 MPa a los 3 días de edad.
2. Se validaron las pruebas de impresión en 3D para todas las mezclas a través de una manga pastelera y se obtuvo una trabajabilidad entre 70 mm y 50 mm de consistencia.
3. Se establecieron parámetros de caracterización de concreto en estado fresco de la mezcla ideal, los cuales fueron los siguientes: 23°C de temperatura, 26 cm de asentamiento, 16,16 kg de peso unitario, 2295,45 kg por metro cúbico de densidad, 2,60% de contenido de aire y una consistencia de 70 mm, siendo ésta la mezcla número 3.
4. Se logró desarrollar un diseño de mezcla que cumple con la capacidad de ser extruida y que presenta resistencias a la compresión a los 28 días entre 101,92 MPa y 76,23 MPa.

14. Recomendaciones

1. Optimizar los diseños de mezcla en función de la relación A/C.
2. Evaluar el desempeño y comportamiento de la mezcla de concreto ideal (número 2) en ensayo a flexión, generando un elemento estructural en forma de viga y aplicando una carga sobre ésta para poder conocer la manera como este elemento básico puede actuar.
3. Comparar los costos directos e indirectos de una obra construida con concreto de uso general contra una obra construida en impresión 3D, aplicando el diseño de mezcla ideal para obtener información y una posible factibilidad económica.
4. Investigar sobre la implementación de acero en elementos estructurales construidos con metodología de impresión en 3D, como varillas, aros, vigas, placas, etc.
5. Investigar sobre otras opciones de aditivos que puedan ser aplicados en las mezclas de concreto para impresión en 3D, incluso combinándolos para generar posibles mejoras en la aplicación de estos diseños de mezcla en la metodología.

15. Bibliografía

- AFP Español (2020, 23 de diciembre). *Construcción en hormigón con impresoras 3D ¿Una solución a las viviendas precarias? AFP [Video]*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=gOgv4U9SBJg>.
- Amelia, H. (2021, 8 de enero). How does a concrete 3D printer work?, 3D Native. <https://www.3dnatives.com/en/how-does-a-concrete-3d-printer-work-080120215/#!>
- Assaad, J., Yassin, A., Alsakka, F., & Hamzeh, F. (2020, 15 de abril). *A Modular Approach for Steel Reinforcing pf 3D Printed Concrete-Preliminary Study*. MDPI. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4062>.
- ASTM (16 de octubre, 2017). *Método de ensayo normalizado de temperatura de concreto de cemento hidráulico recién mezclado*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/456881634/C143-C143M-15a>.
- ASTM (27 de agosto, 2015). *Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/456881634/C143-C143M-15a>.
- ASTM (24 de mayo, 2017). *Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (gravimétrico) del concreto*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/456881610/C138-C138-17a>.
- ASTM (20 de abril, 2018). *Especificación normalizada de agregados par concreto*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/467261527/astm-c33-espanol>.
- ASTM (16 de diciembre, 2022). *Método de prueba estándar para la consistencia del cemento hidráulico*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/405063375/Norma-ASTM-C-187-Espanol>.
- ASTM (12 de marzo, 2020). *Método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (utilizando especímenes cúbicos de 2 in. o [50-mm])*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/427989579/Traduccion-ASTM-C-109>.

Báez, F. L. y Pardo, S. A. (2015). *Concreto reforzado. Fundamentos*. ECOE EDICIONES.

Cemex (s.f.) *Clinker*. Cemex.es. <https://www.cemex.es/productos-y-soluciones/clinker#:~:text=El%20cl%C3%ADnker%20es%20un%20producto,entre%20los%201350%20y%201450%C2%BAC>.

Cemex. (s.f.) *Productos y soluciones*. Cemex.com. https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento#_tipos-de-cemento.

Cemix (s.f.) *¿Qué es y para qué sirve el cemento blanco?* Cemix.com. <https://www.cemix.com/para-que-sirve-el-cemento-blanco/>.

Cobod (2020). *BOD2 Specifications*. Cobod.com. <https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/09/BOD2-Specifications-1.pdf>.

Código Sísmico (2010). *Código Sísmico de Costa Rica*. Ley N°37070 (Última reforma en ley N°37070) Costa Rica. <https://www.codigosismico.or.cr/descargas/CSCR2010.pdf>.

CYBE 3D CONCRETE PRINTERS SPECIFICATIONS, (s.f.) lybrary.cybe.eu. CyBe. https://lybrary.cybe.eu/wp-content/uploads/dlm_uploads/2020/12/2019.07.04-CyBe-Printer-Specifications.pdf.

Dixon, D., Abdun Nur, E., Barton, S., Bell, L., Blas Jr, S., Carraquillo, R., Carraquillo, P., Carter, A., Conrey, M., Cook, J., Cook, R., Cordon, W., Costa, W., Crocker, D., Day, K., Dodl, C., Fox, T., Graham, D., ... Wilson, J. (1997). *Standart Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91) Reapproved 1997*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/358202789/ACI-211-1-91-Standard-Practice-for-Selecting-Proportions-for-Normal-Heavyweight-And-Mass-Concrete>.

Ferrell, M. (2021, 4 de mayo). *This 3D Printed House Changes Everything-Explained* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=gxbyWly_pls

- Guevara, F. G., Hidalgo, M. C., Pizarro, G. M., Rodríguez, V. I., Rojas, V. L. y Segura, G. G. (2011, 24 de mayo). *Efecto de la variación agua/cemento en el concreto*. Tecnológico de Costa Rica. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1632.
- Hager, I., Golonka, G., & Putanowicz, R. (2016). *3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?* ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816317453>.
- Holcim (20 de setiembre, 2016). *HOLCIM AND XTREEE INNOVATE WITH 3D PRINTED CONCRETE*. <https://www.holcim.com/lafargeholcim-innovates-with-3D-concrete-printing>.
- Jarauta, B. I. (s.f.) *Aditivos superplastificantes y reductores de agua*. Coatz.org. <https://www.coatz.org/wp-content/uploads/2016/12/1.-Aditivos-superfluidificantes-y-reductores-de-agua.pdf>.
- Knight G., Barringer W., Bartojay K., Basheer M., Blankenship J., Bognacki C., Carrasquillo, R., Castles, B., Chua, T., Cook, J., Crocker, D., Daniel, D., Deadrick, K., Dixon, D., Eckholdt III, B., Elliot, D., Fowler, D., Harris, G., Hill, R., ... Lingscheit J. (Agosto, 2018). *Guide to Selecting Proportions for Pumpable Concrete*. https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211918&Language=English&Units=US_AND_METRIC.
- Kolirin, L. (30 de abril, 2021). A boulder-shaped houser made from 3D-printed concrete is ready for its first tenants. *CNN*. <https://edition.cnn.com/style/article/3d-printed-house-scli-intl/index.html>
- Lee, H., Ho, J., Moon, J., Kim, W., & Seo, E. (6 de noviembre, 2019). *Evaluation of the Mechanical Properties of a 3D-Printer Mortar*. MDPI. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/24/4104>.
- Li, Z., Li, W., & Ma, G. (30 de mayo, 2018). Method for the Enhancement of Buildability and Bending Resistance of 3D Printable Tailing Mortar. *International Concrete*

Abstracts Portal, 12.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51706935>.

Palacios, B. (2021, 29 de marzo). *La cantidad de construcciones en Costa Rica cayó 10.9% en 2020*. República Inmobiliaria.
<https://www.republicainmobiliaria.com/editorial/construcciones-costa-rica-2020/>

Real Academia Española (2017). *Diccionario de la Lengua Española*. <https://www.rae.es/>.

Silva, J. (s.f.) *Tipos de agregados y su influencia en el diseño de mezcla del concreto*.
<https://360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto/>.

Toxement (2020). *PLASTOL 5000 ULTRA, Aditivo reductor de agua de alto rango*.
<https://www.toxement.com.co/media/5685/plastol-5000-ultra.pdf>.

Trujillo, J. C. (2011). *Pastas, morteros, adhesivos y hormigones*. IC Editorial.

Umaña, P. (15 de octubre, 2021). *Materiales de construcción mantienen fuertes aumentos en sus precios*. *La Nación*.
<https://www.nacion.com/economia/indicadores/materiales-de-construccion-mantienen-fuertes/2UUA7IUXTBEXNPIK6VXNDCEHHU/story/>.

Wang, L., Jiang, H., Li, Z., & Ma, G. (2020). *Mechanical behaviors of 3D printed lightweight concrete structures with hollow section*. SpringerLink.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s43452-020-00017-1>.

Weather Spark (2023). *El tiempo en 22 de marzo en Alajuela Costa Rica*. Es.weatherspark.com. <https://es.weatherspark.com/d/15529/3/22/Tiempo-promedio-el-22-de-marzo-en-Alajuela-Costa-Rica>.

Webb, J. (18 de setiembre, 2018). *ACI FORMS COMITEE TO ADDRESS 3-D PRINTING*. American Concrete Institute.
<https://www.concrete.org/news/newsdetail.aspx?f=51711162>.

Zumbado, S. (13 de setiembre, 2018). *Sector construcción: gran motor de empleo*. Cámara Costarricense de la Construcción.
<https://www.construccion.co.cr/Post/Detalle/24282/sector-construccion-gran-motor-de-empleo#:~:text=Sector%20construcci%C3%B3n%20gran%20motor%20de%20empleo&text=Una%20de%20ellas%20es%20la,13%25%20del%20total%20del%20pa%C3%ADs>.

16. Anexos

16.1. Anexo 1

Figura 24

Especificaciones de impresora BOD2

BOD2 SPECIFICATIONS

Max printing length:	No limit
Max printing width:	14.6 m
Max printing height:	8.1 m + height of concrete feet on to which the printer can be mounted
Max printing speed:	Up to 1000 mm/s (1 meter/s)
Layer height:	5-30 mm
Layer width:	30-300 mm
Movement system:	Servo
Material flow:	Up to 3,6 m ³ /hour at 1000 mm/s speed (for a 5cm wide and 2 cm height print)
Max aggregate size:	10 mm
Printer setup time:	4-6 hours
Printer takedown time:	2-3 hours
Manning:	2 operators
Connection:	Wifi or LAN
Interface:	Web client (through browsers like Chrome or Safari)
Slicer software:	COBOD Slice (Windows, MacOS), Third party slicers
Power supply:	32 A, 400 V, 3 phase

Nota: Extraído de ficha técnica, *Cobod*, 2020 (<https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/09/BOD2-Specifications-1.pdf>)

16.2. Anexo 2

Figura 25

Ejemplo de diseño de mezcla utilizado por la impresora BOD2

Material	Quantity [ton]	Price DKK	Price EUR	Percentages by weight
Cement	6.12 ton	10,374 DKK	1,391 EUR	32 %
0-2mm sand	3.50 ton	595 DKK	80 EUR	18 %
0-4mm gravel (0-8mm)	3.50 ton	637 DKK	85 EUR	18 %
0-4mm recycled roofing tiles (0-8mm)	4.38 ton	525 DKK	70 EUR	23 %
Water	1.66 ton	62 DKK	8 EUR	9 %
Glenium sky 631 (superplasticizer)	0.04 ton	191 DKK	26 EUR	-0 %
Crackstop fibers	0.02 ton	1,038 DKK	139 EUR	-0 %
Total	19.22 ton	13,422 DKK	1,799 EUR	100 %

Nota: Extraído de ficha técnica, *Cobod*, 2020 (<https://cobod.com/wp-content/uploads/2020/09/BOD2-Specifications-1.pdf>)

16.3. Anexo 3

Figura 26

Ejemplo de proyecto desarrollados con metodología de construcción en 3D

Project #3

First 3D Printed Home For Sale

SQ4D has listed for sale the first 3D printed home in the United States. This is the first 3D printed home slated to receive...

Build Time

SQ4D | 48 hrs

Traditional Construction | 10 weeks

Cost of Build

SQ4D | \$20k

Traditional Construction | \$150k



VIEW PROJECT

Nota: Proyecto de vivienda que se encuentra en venta desarrollado por la empresa SQ4D en Estados Unidos, *Recent Projects*, por SQ4D, 2021 (<https://www.sq4d.com/projects/>)

17. Glosario

- Metodología: “Conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal” (RAE, 2014).
- Resistencia: “La resistencia de un mortero o pasta es la facultad de resistir los esfuerzos a los que se somete sin descomponerse” (Trujillo, 2011, p.22).
- Concreto: “El concreto simple es un material compuesto, con características similares a las de los materiales rocosos, que se obtiene mediante la mezcla de agregados pétreos con una graduación en su tamaño que puede ir desde la fracción de milímetro hasta varios centímetros-gravas y arena-, ligados por medio de una pasta de cemento hidráulico” (Lamus y Andrade, 2015, p. 20).
- Muestras: “Subgrupo del universo o población del cual se recolectan los datos y que debe ser representativo de ésta”. (Hernández, et al., 2010, p. 173).
- Tecnología: “Conjunto de instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto” (RAE, 2014).
- Población: “Conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones” (Hernández, et al, 2010, p. 174).
- Diseño: “Proyecto, plan que configura algo” (RAE, 2014).
- Máquina: “Conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía y transformarla en otra más adecuada, o para producir un efecto determinado” (RAE, 2014).
- Material: “Elemento que entre como ingrediente en algunos compuestos” (RAE, 2014).
- Piedra caliza: “La piedra caliza es una roca de origen sedimentario, en cuya composición interviene de forma mayoritaria el carbonato de calcio, aunque también es posible que participen en menor medida otros minerales como la arcilla” (Trujillo, 2011, p.12).
- Ensayo: “Acción y efecto de ensayar” (RAE, 2014).
- Norma: “Regla que se debe seguir o a que se deben ajustar conductas, tareas, actividades, etc.” (RAE, 2014).
- Especímenes: “Muestra o ejemplar” (RAE, 2005).
- Compresión: “Acción o efecto de comprimir” (RAE, 2014).
- Tensión: “Fuerza de tracción a la que está sometido un cuerpo” (RAE, 2014).