



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN PARA SU USO EN UNA  
MÁQUINA DE IMPRESIÓN: SELECCIÓN DE PROPIEDADES, ENSAYOS  
EXPERIMENTALES Y DISEÑO DE MEZCLA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

HUGO IGNACIO REYES JOFRÉ

PROFESOR GUÍA:  
RAFAEL RUIZ GARCÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
EDUARDO NUÑEZ CASTELLANOS  
JAVIER LARRONDO PIÑA

SANTIAGO DE CHILE  
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: HUGO IGNACIO REYES JOFRÉ  
FECHA: 2018  
PROF. GUÍA: RAFAEL RUIZ GARCÍA

ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN PARA SU USO EN UNA  
MÁQUINA DE IMPRESIÓN: SELECCIÓN DE PROPIEDADES, ENSAYOS  
EXPERIMENTALES Y DISEÑO DE MEZCLA

La impresión 3D es una tecnología que está revolucionando la fabricación de muchos productos, procesos y servicios, mostrando su potencial en una amplia gama de disciplinas, incluso en el mundo de la ingeniería Civil y Construcción.

El proceso de impresión 3D se basa considerando el material, la forma o geometría del elemento, las fuerzas que son aplicadas y la técnica o estrategia de impresión. Estos principales componentes están estrechamente relacionados y conectados, pero las relaciones son generalmente desconocidas.

Este trabajo de título contempla sólo el estudio del material de impresión, en particular, el hormigón. Este material tiene una serie de características particulares que debe cumplir para que pueda usarse en una máquina de impresión 3D.

El hormigón de impresión tiene que tener la capacidad de ser transportado y extruido en una máquina, para luego, ser capaz de construirse en capas con una calidad, unión y resistencia aceptable. Por tal razón, se estableció que las propiedades críticas en estado fresco de una mezcla de impresión son: la extrudabilidad, calidad de extrusión, trabajabilidad, tiempo abierto y edificabilidad.

Con el propósito de encontrar una mezcla óptima para imprimir, se proponen una serie de ensayos experimentales de cada una de las propiedades en estado fresco, que se realizarán en una máquina de pruebas construida en paralelo a este trabajo. Además, se entregan una serie de antecedentes de una mezcla de impresión, en cuanto a sus componentes, características, influencia en las propiedades críticas, entre otros. Finalmente, se propone un protocolo de ensayos para encontrar la mezcla óptima.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivos generales . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Impresión 3D . . . . .	5
2.1.1. Funcionamiento . . . . .	6
2.1.2. Impacto . . . . .	6
2.1.3. Ventajas y desventajas . . . . .	7
2.1.4. Tecnologías . . . . .	8
2.2. Impresión 3D en hormigón . . . . .	8
2.2.1. Funcionamiento . . . . .	9
2.2.2. Máquina de impresión . . . . .	9
2.2.3. Beneficios . . . . .	11
2.2.4. Componentes . . . . .	12
2.2.5. Modelo de investigación . . . . .	13
2.2.6. Estado del arte . . . . .	17
2.3. Hormigón Convencional . . . . .	27
2.3.1. Materiales constituyentes . . . . .	27
2.3.2. Etapas del hormigón . . . . .	31
2.3.3. Hormigón en estado fresco . . . . .	32
2.3.4. Hormigón en estado endurecido . . . . .	34
2.3.5. Fabricación del hormigón . . . . .	35
2.3.6. Hormigón Proyectado . . . . .	36
2.3.7. Hormigón Autocompactante . . . . .	37
<b>3. Propiedades del hormigón de impresión</b>	<b>38</b>
3.1. Propiedades en estado fresco . . . . .	39
3.1.1. Extrudabilidad . . . . .	40
3.1.2. Calidad de extrusión . . . . .	41
3.1.3. Trabajabilidad . . . . .	43
3.1.4. Tiempo abierto . . . . .	45
3.1.5. Edificabilidad . . . . .	45

<b>4. Ensayos</b>	<b>49</b>
4.1. Trabajabilidad . . . . .	50
4.2. Extrudabilidad . . . . .	53
4.3. Calidad de extrusión . . . . .	54
4.4. Tiempo abierto . . . . .	56
4.5. Edificabilidad . . . . .	57
<b>5. Mezcla de impresión</b>	<b>58</b>
5.1. Diseño de mezcla . . . . .	58
5.2. Protocolo de Ensayo Propuesto . . . . .	62
5.2.1. Equipos y materiales . . . . .	62
5.2.2. Mezclas de prueba . . . . .	62
5.2.3. Procedimiento . . . . .	64
<b>6. Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>

# Índice de Tablas

2.1. Componentes de una mezcla utilizada por Contour Crafting. . . . .	19
2.2. Ventajas y desventajas del hormigón convencional. . . . .	27
2.3. Características de los cementos según su resistencia. . . . .	29
5.1. Revisión bibliográfica de mezclas de impresión. . . . .	61
5.2. Componentes seleccionados. . . . .	63
5.3. Dosificaciones de mezclas iniciales. . . . .	63
5.4. Trabajabilidad y tiempo abierto de la mezcla. . . . .	64
5.5. Ensayo de extrudabilidad. . . . .	64
5.6. Datos para el ensayo de calidad de extrusión. . . . .	65
5.7. Ensayo de calidad de extrusión. . . . .	65
5.8. Tiempo abierto óptimo. . . . .	66
5.9. Datos para el ensayo de edificabilidad. . . . .	66
5.10. Ensayo de edificabilidad. . . . .	66

# Índice de Figuras

2.1. Fotografía de dos máquinas de impresión 3D Makerbot en el Fablab U. de Chile. . . . .	7
2.2. Esquema de la tecnología FDM. . . . .	8
2.3. Esquema de una máquina de impresión 3D en hormigón. . . . .	10
2.4. Impresoras 3D con movimientos en coordenadas cartesianas y polares. . . . .	10
2.5. Componentes que intervienen en la impresión 3D en hormigón. . . . .	12
2.6. Estructura del modelo de investigación. . . . .	14
2.7. Construcción de una vivienda utilizando Countour Crafting. . . . .	17
2.8. Aplicaciones de Countour Crafting: Torres eólicas y construcciones en la Luna. . . . .	18
2.9. Castillo impreso en 3D por la empresa Totalkustom. . . . .	20
2.10. Habitación de un hotel impreso en 3D. . . . .	20
2.11. Casa impresa en 3D por WinSun. . . . .	22
2.12. Mansión y edificio impresos en 3D por WinSun. . . . .	22
2.13. Impresora y estructura D-Shape. . . . .	23
2.14. Impresora y estructura de 3DCP. . . . .	24
2.15. Impresora circular Apis Cor y construcción de una casa en Moscú 2016. . . . .	25
2.16. Tipos de estructuras estudiadas por Apis Cor. . . . .	26
2.17. Esquema del comportamiento del hormigón en el tiempo. . . . .	32
3.1. Esquema del proceso de extrusión. . . . .	40
3.2. Esquema de capa extruida en el tiempo de sección transversal rectangular. . . . .	42
3.3. Esquema de deformaciones en diferentes vistas de una capa impresa de sección transversal rectangular. . . . .	43
3.4. Representación del comportamiento de un cuerpo plástico de Bingham (a) y del comportamiento tixotrópico del hormigón (b). . . . .	44
3.5. Esquema de construcción en capas, donde se muestra la deformación debido al peso propio, peso de las capas superiores y presión de la extrusión. . . . .	47
3.6. Esquema de las propiedades en estado fresco. . . . .	48
4.1. Esquema del aparato de paletas de corte . . . . .	51
4.2. Fotografías del reómetro ICAR. . . . .	52
4.3. Gráfico de torque vs velocidad de giro. . . . .	53
4.4. Esquema del ensayo de extrudabilidad. . . . .	54
4.5. Esquema de ensayo de calidad de extrusión, vista en planta y frontal. . . . .	55
4.6. Gráfico de resistencia al corte vs tiempo. . . . .	56
4.7. Esquema del ensayo de edificabilidad. . . . .	57

# Capítulo 1

## Introducción

El objetivo de este trabajo se basa en la participación del Programa de Memorias Multidisciplinarias de Beauchef Proyecta, que busca dar la oportunidad a estudiantes de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, de participar en experiencias de proyectos multidisciplinarios en sus trabajos de título.

El proyecto consiste en el estudio e investigación de un innovador método de construcción y fabricación digital, hablamos de la impresión 3D, que imprime estructuras o componentes de hormigón. Este será sólo la etapa inicial de un gran proyecto de investigación, debido a que es un tema relativamente nuevo, existen pocos estudios y requiere una gran cantidad de experimentos, tiempo y recursos. En esta primera etapa, se investigarán sólo de forma teórica las características del hormigón para su uso en una máquina de impresión y en paralelo se construirá una máquina de pruebas para la investigación experimental de hormigones u otros materiales. Es decir, se dejarán una serie de antecedentes y una máquina de pruebas para que futuros estudiantes puedan continuar esta investigación y realizar la segunda etapa de este proyecto.

Trabajaran tres estudiantes de diferentes departamentos, Civil, Mecánica y el departamento de Ciencias de la Computación, en donde cada uno cumple un rol específico. A grandes rasgos, el Ingeniero Civil es el encargado de estudiar las características del hormigón a utilizar, el Ingeniero Mecánico tiene la labor de diseñar y construir la máquina de pruebas y el Ingeniero en Computación se encargará de la programación y de la parte eléctrica de la máquina.

En el presente trabajo de título, se desarrolla sólo el trabajo del Ingeniero Civil, el cual, como se mencionó anteriormente, es el encargado de estudiar las características del hormigón a utilizar.

## 1.1. Motivación

Hoy en día se está viviendo una época de constante evolución y existe una tecnología que está revolucionando la fabricación de muchos productos, procesos y servicios, tecnología que generará innovaciones revolucionarias que cambiarán completamente la forma de trabajar de muchos sectores. Hablamos de la fabricación aditiva y digital, más conocida como Impresión 3D.

Ante esta constante evolución, nace la pregunta ¿Por qué no poder imprimir una casa mediante tecnología 3D, construir rápidamente viviendas y edificios con diferentes materiales? Las tecnologías de impresión en 3D están dispuestas a revolucionar la industria actual y dejar de lado los métodos convencionales de construcción.

Es aquí donde nace la idea de realizar un estudio inicial de este tipo de tecnologías y entregar los antecedentes, información y motivación a futuros estudiantes, universidades, empresas o investigadores de Chile, u otros países donde no se conoce este método, con la intención de seguir realizando la investigación de la impresión 3D, para que en un futuro posiblemente sea este el método de construcción más utilizado.

Esta nueva tecnología no sólo construye a una alta velocidad, otras ventajas son la gran libertad de diseño, ahorro económico en cuanto a materiales y mano de obra, disminución de operarios, menos accidentes y lesiones, y otra serie de ventajas que en conjunto se traduce en una construcción más efectiva y óptima. Además, todos sabemos que los procesos industriales de construcción implican un amplio gasto energético y que, en la mayoría de los casos, representa un alto grado de impacto al medio ambiente. Ante esto, la impresión 3D y una adecuada elección de materiales, apunta a la disminución de estos efectos negativos y a una construcción eco-amigable.

El material es uno de los principales componentes del proceso de impresión 3D, el cual debe responder a una serie de objetivos y propiedades particulares que hacen que este no sea de fácil elección y diseño. Por tal razón, el presente trabajo de título tiene la finalidad de entregar un estudio detallado de las características del material de impresión.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivos generales

El objetivo general del equipo multidisciplinario será realizar un estudio inicial de la impresión 3D con hormigón, además de la construcción de una máquina de pruebas de materiales para la futura experimentación e investigación en una segunda etapa del proyecto.

El objetivo general del presente trabajo de título será investigar y estudiar las características de una mezcla de hormigón para la impresión, que cumpla con una serie de requisitos y objetivos particulares.

### 1.2.2. Objetivos específicos

En cuanto a los objetivos específicos del proyecto, cada integrante del equipo deberá realizar la investigación correspondiente a la función determinada en el proyecto. Es decir, en ingeniero Civil se preocupará del material, el ingeniero Mecánico en el diseño y construcción de la máquina de pruebas y el ingeniero en Computación, a la programación e instalación eléctrica de la máquina.

Por otro lado, los objetivos específicos del trabajo de título son:

- Realizar un estudio detallado de las características de un hormigón convencional, para entender e interiorizar el comportamiento del material en la construcción.
- Realizar una extensa revisión bibliográfica en cuanto a la impresión 3D en hormigón, para conocer el funcionamiento, los componentes que intervienen, el estado de arte, entre otros.
- Investigar y determinar las propiedades de un hormigón de impresión. En específico, las propiedades críticas y particulares de la mezcla en estado fresco.
- Proponer y especificar diferentes ensayos que se deben realizar para encontrar una mezcla de impresión óptima, utilizando la máquina de pruebas construida en paralelo.
- Entregar los principales antecedentes en cuanto a una mezcla de impresión estándar, en términos de componentes, características, relación con las propiedades, etc.
- Proponer un protocolo de ensayos para encontrar una mezcla óptima de impresión, utilizando la máquina de pruebas.

### 1.3. Alcances

Debido a que este método tecnológico es relativamente nuevo en el mundo, existen pocas investigaciones y antecedentes, requiere una gran cantidad de tiempo, recursos y ensayos experimentales, esta investigación y proyecto contemplará sólo la primera etapa del estudio de la impresión 3D en la construcción. Por tal razón, se dejarán los antecedentes necesarios y una máquina de pruebas para que este proyecto tenga una continuación en el futuro.

En cuanto a los alcances del presente trabajo de título, el material (hormigón) será investigado y estudiado sólo de forma teórica y se dejará de lado el estudio experimental de la mezcla. Sin embargo, se entregará una gran cantidad de antecedentes, ensayos y procedimientos para una realización futura de ensayos experimentales.

Aunque existen variados materiales de impresión que pueden ser investigados, este será limitado al hormigón, debido a sus características y a su gran uso en la construcción. Además,

existe una mayor revisión bibliográfica en comparación a otros materiales.

El estudio de las propiedades del hormigón de impresión será desarrollado sólo a nivel del estado fresco de la mezcla, debido a que estas propiedades son las más importantes a la hora de utilizar una máquina de impresión. El estudio de las propiedades en estado endurecido requiere otra gran investigación, tiempo y experimentación.

# Capítulo 2

## Antecedentes

Para comenzar con la investigación del presente trabajo de título, es necesario analizar y describir una serie de antecedentes que son fundamentales para entender e introducirse en el tema de estudio.

En primer lugar, se describe brevemente el concepto principal y de fondo para esta investigación, nos referimos a la impresión 3D. En esta particular tecnología de fabricación digital se basan los diferentes contenidos de este documento, en especial, el material en estudio. Conocer el concepto, funcionamiento, impacto, ventajas y las tecnologías que se están realizando en cuanto a este tema, será beneficioso.

Posteriormente, con un mayor análisis, se presenta una revisión bibliográfica de la impresión 3D, pero en el mundo de la ingeniería civil, en particular, donde se utiliza el hormigón como el material de impresión. Esta revisión principalmente se centra en el funcionamiento, las características de una máquina de impresión, las ventajas, los componentes que intervienen en el proceso, posibles metodologías de investigación y el estado del arte de este nuevo método de construcción.

Finalmente, se entregan una serie de antecedentes y características en cuanto al hormigón convencional que se utiliza en la mayoría de las construcciones de hoy en día, para entender de mejor manera las características de un hormigón de impresión. El hormigón convencional será descrito en cuanto a los materiales utilizados, propiedades principales, comportamiento, entre otros.

### 2.1. Impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología relativamente nueva, que se basa en la fabricación por adición, que crea un objeto físico, volumétrico y tridimensional desde un diseño digital, que puede ser de formas complejas y variadas geometrías.

Hoy en día existen diferentes tecnologías de impresión 3D y materiales con los que se puede imprimir, pero todos finalmente se basan en el mismo principio: un modelo digital 3D se convierte en un objeto físico creado capa a capa.

### 2.1.1. Funcionamiento

Cada objeto impreso comienza con un archivo de diseño 3D digital, que es la representación matemática de cualquier superficie tridimensional de un objeto. Estos modelos 3D se crean utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), en donde el diseño en CAD se corta en delgadas capas que luego se envían a la impresora 3D. Es importante destacar, que estos archivos de diseño 3D pueden ser creados con programas como Fusión 360, Rhinoceros, Solidworks, AutoCad, Inventor, entre otros. También pueden ser adquiridos explorando los miles de diseños existentes en plataformas de contenido de impresión 3D gratuitos.

Luego de tener el archivo de diseño 3D, el proceso de impresión varía según la tecnología utilizada, como pueden ser las impresoras de escritorio, que derriten un material plástico y lo depositan en una plataforma o grandes máquinas industriales que utilizan un láser para fundir el polvo de metal a altas temperaturas. Esta impresión puede tardar varias horas dependiendo del tamaño, calidad de impresión y complejidad del elemento.

Las impresoras 3D no pueden utilizar cualquier material, estos dependen del tipo de impresora y los objetivos que se quieran resolver, pero existe una gran variedad, que pueden ser desde el plástico, hasta metales, gomas, maderas, caucho, arenisca, entre otros, aunque cada año otros materiales se están investigando y apareciendo en el mercado.

### 2.1.2. Impacto

La impresión 3D es uno de los desarrollos más prometedores de la actualidad, se está viviendo una época de constante evolución y se está demostrando su potencial en una amplia gama de disciplinas, que van desde el mundo de la medicina, arqueología, arte, arquitectura, diseño industrial, industria alimenticia, ingeniería civil y muchos más.

Hasta el año 2009 la impresión 3D se limitaba principalmente a usos industriales, pero luego de que se patentara el modelado de deposición fundido (FDM) una de las tecnologías de impresión más comunes, estos límites se rompieron. Las ventas de impresoras 3D han ido creciendo exponencialmente desde entonces y se esperan más innovaciones en cuanto a esta tecnología en los próximos años. En la actualidad existen cientos de miles impresoras 3D en el mundo y esta cifra se duplica cada año.

Un ejemplo claro en el desarrollo de estas tecnologías, son la creación de los Fablabs (Fabrication Laboratory), que son espacios de experimentación y producción de objetos físicos a escala personal o local, que agrupan máquinas de fabricación digital. En las dependencias de la Escuela de Ingeniería de Universidad de Chile (FCFM), existe el Fablab U. de Chile en

el cual se pueden encontrar máquinas de impresión 3D (ver figura 2.1), donde los alumnos pueden realizar proyectos personales, de investigación o universitarios.

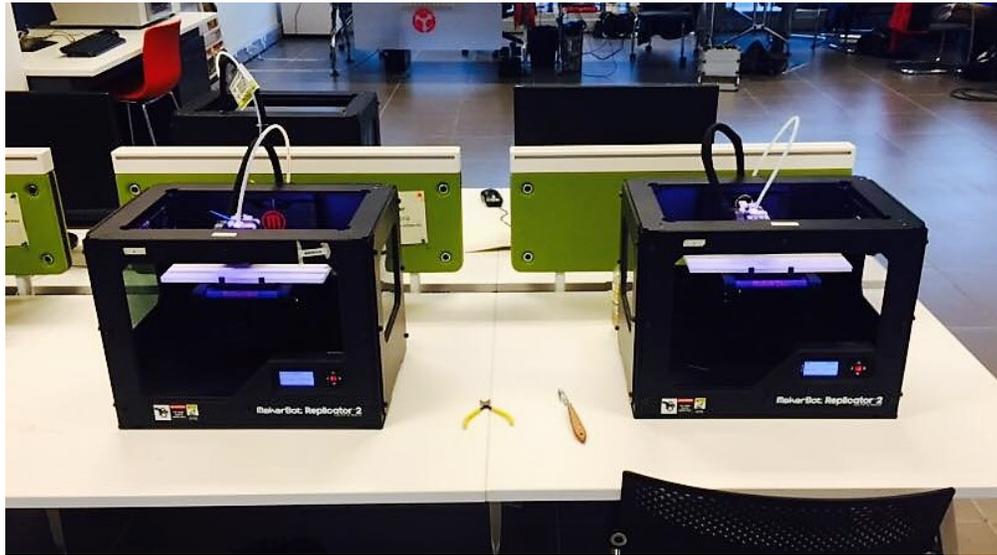


Figura 2.1: Fotografía de dos máquinas de impresión 3D Makerbot en el Fablab U. de Chile.

### 2.1.3. Ventajas y desventajas

Es importante poder entender que la impresión 3D es una tecnología que está en pleno desarrollo, por lo que inherentemente contiene ventajas y desventajas en comparación a los procesos de fabricación tradicionales.

A continuación, se exponen las principales ventajas y desventajas de esta tecnología.

Ventajas:

- Crea diseños complejos.
- Personalización de los elementos.
- No hay necesidad de herramientas y moldes.
- Velocidad y facilidad de prototipado.
- Menos residuos.

Desventajas:

- Mayor costo para largas producciones.
- Menos opciones de materiales.
- Fuerza y resistencia limitada.

### 2.1.4. Tecnologías

Todas las tecnologías de impresión 3D se basan en el mismo principio, crear un objeto físico a partir de diseños digitales capa a capa. Pero cada una utiliza un método diferente, es decir, difieren en los procesos de impresión, materiales utilizados, objetivos del elemento, etc.

Existen una gran cantidad de tecnologías, pero la más común es la impresión 3D de escritorio, llamada Modelado de deposición por fusión (FDM). El proceso de impresión FDM utiliza un material sólido llamado filamento, que se guía desde un carrete a la boquilla de la impresora, esta se calienta y funde el material. Una vez que está en estado fundido, el material puede ser extruido con una trayectoria específica que es determinada por el software del computador. Como el material se extruye en capas, instantáneamente estas se enfrían y se solidifican proporcionando soporte para las siguientes capas. FDM es utilizado generalmente para el prototipado rápido y de bajo costo y se puede utilizar para una amplia variedad de aplicaciones. La figura 2.2 muestra un esquema de esta tecnología.

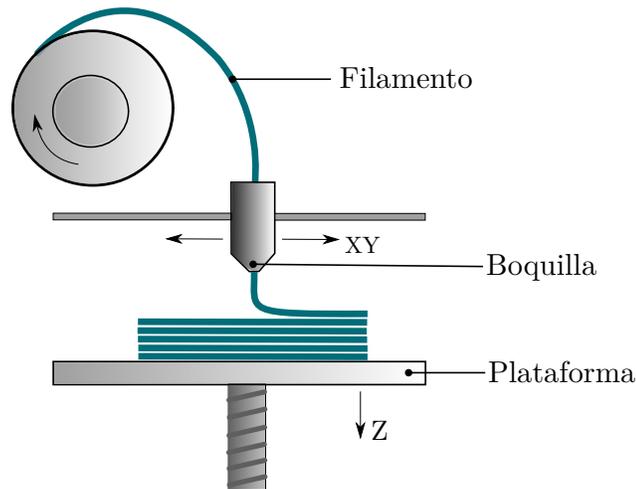


Figura 2.2: Esquema de la tecnología FDM.

## 2.2. Impresión 3D en hormigón

Tal como se mencionó anteriormente, la impresión 3D está viviendo una época de constante evolución y está demostrando su potencial en una amplia gama de disciplinas. Por tal razón, el mundo de ingeniería civil y construcción no se quiere quedar atrás y está enfrentando el cambio de mente para adoptar esta nueva y revolucionaria tecnología.

Un número reducido de empresas, universidades e investigadores están realizando este tipo de estudios, por lo que el sector de la construcción todavía está por detrás en el desarrollo de la impresión 3D. Esto se puede atribuir a la falta de investigación sobre el comportamiento estructural de las formas y los materiales que se utilizan, pero están adoptando esta técnica y su objetivo es aplicarlo a mayor escala.

### 2.2.1. Funcionamiento

Existen diferentes impresoras 3D en hormigón, de diferentes materiales, estructuras, piezas, tamaños, motores, etc. Sin embargo, el funcionamiento a modo general es similar en la mayoría. Este se realiza en tres etapas principales: preparación de los datos, preparación del hormigón y la impresión del objeto o estructura.

**Preparación de datos:** En esta etapa, al igual que una impresora 3D convencional, comienza con un archivo de diseño 3D digital que se crea utilizando herramientas CAD, donde el diseño en CAD se corta en capas con las dimensiones deseadas y posteriormente se genera el recorrido de la impresión para cada capa, con ciertos parámetros y técnicas de impresión.

**Preparación del hormigón:** La preparación del hormigón implica mezclar los componentes de este, regido por el diseño de mezcla previamente establecido y luego introducir la mezcla fresca al sistema de suministro.

**Impresión del objeto o estructura:** Una vez en el sistema de suministro, este es transportado en tuberías o mangueras al sistema de extrusión utilizando algún método de transporte (p.ej. bomba de desplazamiento positivo), en donde el hormigón fresco es extruido capa por capa para crear el objeto deseado, controlado por el sistema de movimiento.

### 2.2.2. Máquina de impresión

Como se menciono anteriormente, existen variadas máquinas de impresión, pero en términos generales sus funcionamientos y mecanismos son similares. Una máquina se podría definir como un conjunto de sistemas principales, donde cada uno de ellos cumple con un objetivo específico, pero responden a un fin común: Imprimir un objeto o estructura de hormigón.

Los principales sistemas que se pueden encontrar en una máquina de impresión (figura 2.3) se definen a continuación:

**Sistema de suministro:** Parte de la máquina de impresión que se preocupa de contener y transportar el material al sistema de extrusión. Generalmente se utiliza un contenedor para almacenar la mezcla antes de imprimir y mangueras o tuberías para transportar la mezcla fresca, que habitualmente es impulsada por bombas.

**Sistema de extrusión:** Se encarga de extruir la mezcla fresca, principalmente compuesto de un mecanismo de extrusión y boquilla. El mecanismo de extrusión se refiere al método para crear un flujo continuo, que puede ser realizado de diversas formas, con tornillos sin fin, bombas, sistema de engranajes, etc. En cuanto a la boquilla, esta es la responsable de entregar la sección transversal diseñada a la capa extruida, la cual puede integrar paletas laterales para una mejor superficie y acabado.

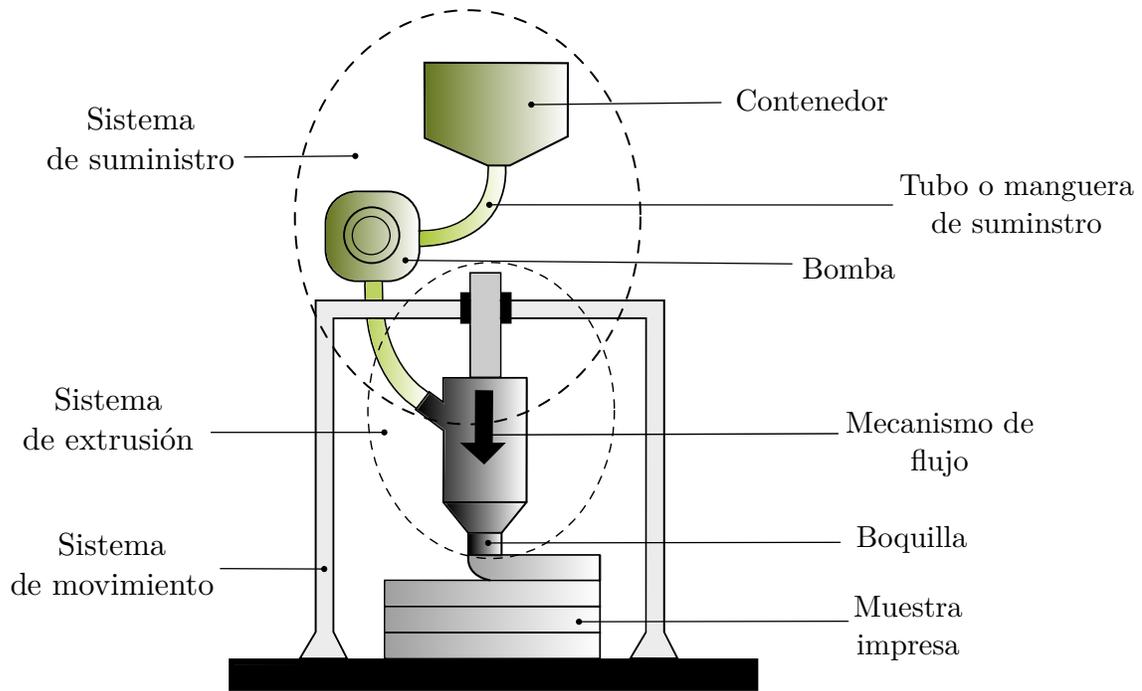


Figura 2.3: Esquema de una máquina de impresión 3D en hormigón.

**Sistema de movimiento:** Estructura de la máquina, la cual entrega soporte y movimiento al sistema de extrusión. Existen variadas formas de crear movimiento, pero el más general y más utilizado es el movimiento en coordenadas cartesianas X,Y y Z del sistema de extrusión. Otro tipo, podría ser un movimiento en coordenadas polares, que permiten construir desde el interior de una estructura. En la figura 2.4 se muestran dos tipos de impresoras con diferentes sistemas de movimiento.



Fuente: Universidad de Eindhoven [1] y Apis Cor [2].

Figura 2.4: Impresoras 3D con movimientos en coordenadas cartesianas y polares.

### 2.2.3. Beneficios

Los beneficios de las impresoras 3D en hormigón son numerosos. A continuación, se presentan los principales beneficios de esta tecnología en la construcción:

- Construcción de alta velocidad, donde casas promedio pueden ser terminadas en un día. Actualmente una casa promedio se tarda en construir de 6 a 9 meses.
- Existe una gran libertad de diseño, tanto en el diseño arquitectónico como en el estructural y no requiere elementos idénticos para disminuir costos y tiempo. Se pueden construir una gran variedad de formas: curvadas, redondas, asimétricas, etc. Además de formas eficientes, respondiendo a un entorno más sostenible. Actualmente las construcciones utilizan encofrado (armazón para contener el hormigón fresco) que limita las formas debido a que contienen geometrías planas, además de ser un método engorroso que quita tiempo. Por lo mismo, se tratan de diseñar estructuras simétricas y de formas poligonales (segmentos rectos) debido al aumento significativo del costo de estructuras no típicas.
- La construcción mediante impresión 3D espera cambiar la imagen tradicional de la construcción, donde existe una área ruidosa, polvorienta, antiestética, etc. Para tener construcciones eco amigables, secas, limpias, sin contaminación debido a las emisiones y mucho más eficientes, sin perder calidad. Actualmente una casa familiar típica genera aproximadamente entre 3 a 7 toneladas de residuos. Además, en términos de recursos, más del 40 % de las materias primas utilizadas en el mundo se consumen por la industria de la construcción.
- Gran reducción de costos, tanto en mano de obra como en materiales. Si bien los costos de mano de obra se reducirán significativamente, la energía física se intercambiará por el poder de la mente en la industria de la construcción.
- No se requieren estructuras sólidas y masivas. Con esta tecnología de impresión 3D, las estructuras pueden ser ahuecadas. Se están estudiando y realizando estructuras tipo sándwich, donde las más comunes son las que se forman con dos paredes rectas unidas por un puente en forma sinusoidal. Dentro de estas estructuras huecas se pueden poner cañerías, sistemas de aislación, sistemas eléctricos, etc.
- Disminución de accidentes y lesiones en las obras de construcción. Por ejemplo, anualmente en Estados Unidos cerca de 400.000 trabajadores se lesionan gravemente en la construcción.
- Ventaja socio-económica, ya que se pueden construir casas dignas y asequibles a costo competitivo, produciendo un mayor acceso a las familias de bajos recursos.
- Por primera vez, todo tipo de personas podrán participar en la industria de la construcción. La construcción podría convertirse en un mercado de consumo, donde una casa u otra estructura podría ser diseñada y construida por la familia que la ocupará. La reducción de costos y la construcción automatizada, harán accesible la construcción a cualquiera.
- Excelente calidad de las estructuras que se obtienen mediante un ambiente controlado, robotizado y gestionado por personal capacitado.
- Tecnología que puede ser útil para la reconstrucción rápida de refugios de emergencia debido a desastres, como terremotos, inundaciones, guerras y otros desastres naturales.

En la actualidad, se pueden tomar varios meses o años antes de que las víctimas de algún desastre sean colocadas en refugios permanentes.

#### 2.2.4. Componentes

El estudio de la impresión 3D en hormigón se basa considerando el material impreso, la forma o geometría del elemento, las fuerzas que son aplicadas y la técnica o estrategia de impresión (figura 2.5). Estos son los principales componentes que intervienen en este nuevo método de construcción, los cuales están estrechamente relacionados y conectados, pero las relaciones son generalmente desconocidas.

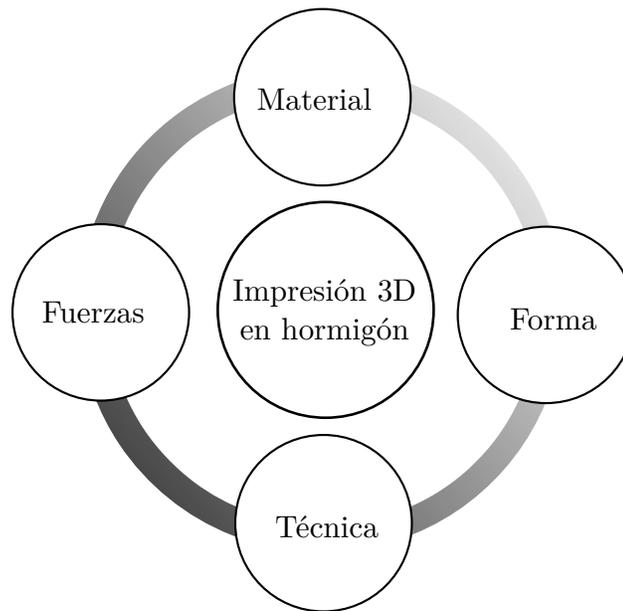


Figura 2.5: Componentes que intervienen en la impresión 3D en hormigón.

**Material:** Es uno de los componentes críticos de la impresión 3D. Si bien, existen variados materiales que se podrían utilizar, se seleccionó el hormigón como material principal debido a sus grandes beneficios y por su gran uso en la industria actual.

Este hormigón de impresión debe responder a variadas propiedades y requisitos particulares para ser utilizado en una máquina de impresión, debe ser capaz de ser transportado por el sistema de suministro, extruido por el sistema de extrusión y tener la capacidad de ser construido en capas con una resistencia adecuada.

**Forma:** En cuanto a la forma o geometría del elemento impreso, la impresión 3D otorga una gran libertad de diseño, debido a que no utiliza encofrado, no es necesario tener estructuras masivas y no es necesario tener elementos idénticos para la disminución de costos y tiempo. Todas estas características hacen que este método consiga geometrías y formas que antes eran imposibles de crear con las técnicas tradicionales de construcción.

Nuevas formas de los elementos se están investigando y podría ser beneficioso imprimir estructuras tipo sándwich, que han demostrado ser alternativas de gran éxito para diversos campos de aplicación, esto es gracias a sus excelentes propiedades de rigidez y resistencias, específicamente frente a cargas de flexión y fatiga, además este tipo de estructuras ayudarían a la disminución de la masa de los elementos, que se resume en ahorro de material.

**Técnica:** La técnica o estrategia de impresión, se refiere a las características y parámetros relacionados con la máquina de impresión y como esta imprime un elemento. Los más importantes son: la velocidad de impresión y extrusión, número de capas, dimensiones de la capa (alto, ancho y espesor), medio ambiente de impresión, entre otros.

**Fuerza:** Se refiere a las cargas aplicadas al objeto o estructura impresa. Este componente es fundamental cuando se requiere construir una estructura, debido a que esta tiene que estar construida de tal forma que resista satisfactoriamente las cargas.

Cada uno de estos componentes dependen del otro, por ejemplo, si se tiene un determinado material con sus respectivas propiedades físicas y mecánicas, es posible que, si varían las cargas aplicadas al objeto impreso, las formas o geometrías y la técnica de impresión deban cambiar para poder soportarlas. Es por esto, que el punto de partida de la impresión 3D, puede ser una forma diseñada o también las propiedades del material o una técnica de impresión. Por esta razón, se requiere un enfoque de ingeniería invertida, lo que permite que la impresión 3D pueda ser estudiada desde múltiples perspectivas.

Pero estos componentes sin una relación eficiente generan una gran cantidad de variables dependientes, que provocan que el encontrar el óptimo de cada uno de estos sea sumamente costoso. El método más básico de encontrar el óptimo sería realizar un análisis de ensayo y error, pero esto genera que al querer modificar uno de los componentes de un objeto ya diseñado, el proceso y los ajustes de la impresora tengan que comenzar de nuevo. Por tal razón, se debe ir variando de manera exhaustiva los componentes para encontrar los nuevos atributos adecuados y con la gran cantidad de variables involucradas, el tiempo requerido y los cálculos inherentes, aumenten dramáticamente, provocando el retraso en el desarrollo de la impresión 3D.

### 2.2.5. Modelo de investigación

R.J.M Wolfs [3] propuso y desarrolló un modelo de investigación para evaluar las relaciones de los componentes de la impresión 3D de forma inteligente y eficiente.

Debido a la gran cantidad de variables implicadas, desarrolló un enfoque paramétrico, lo que permite una gran adaptabilidad de los parámetros implicados y las relaciones entre ellos, además, para evitar que se generen una gran cantidad de combinaciones y variaciones incapaces de proporcionar soluciones útiles y óptimas, optaron por utilizar una técnica de optimización llamada “simulated annealing (SA)” o recocido simulado, la cual es una estrategia de resolución de problemas que permiten una rápida evaluación de un dominio desconocido de parámetros, encontrando óptimos locales durante las iteraciones, para posteriormente converger a un óptimo global.

### Estructura del modelo

La estructura del modelo (figura 2.6) se compone de un núcleo, que es un análisis estructural, que no se limita a formas predefinidas, materiales o tipos de carga. Como existe una gran cantidad de variables utilizadas para este análisis estructural y la salida es extensa, el módulo de análisis estructural se coloca en un entorno paramétrico. La entrada es altamente adaptable y reemplazable con nuevos datos, mientras que la salida ahora es más clara y comprensible de manera gráfica.

Es importante encontrar los ajustes y relaciones de entrada de una manera más inteligente, para eso, se requiere ir ajustándola utilizando la evaluación de los resultados del análisis estructural. Esto se logra aplicando un bucle de optimización.

Por último, el modelo se amplía con un bucle variacional y se utiliza para evaluar la influencia de la técnica de impresión 3D. Las propiedades de impresión se varían de manera escalonada, entrando en el bucle de optimización para cada paso.

El material de impresión, fuerzas aplicadas, formas impresas y la técnica de impresión, están todos conectados en el entorno paramétrico. El punto de partida puede ser cualquiera de estos componentes (el modelo se construye a partir de un enfoque de ingeniería inversa), cada uno de ellos puede ser seleccionado como una variable y dejar fijos los otros valores. El componente seleccionado es entonces optimizado, y este puede cambiar fácilmente al cambiar una componente diferente sin la necesidad de reconstruir todo el modelo. Esto permite una evaluación rápida y variación de los parámetros, cuyo comportamiento sigue siendo desconocido.

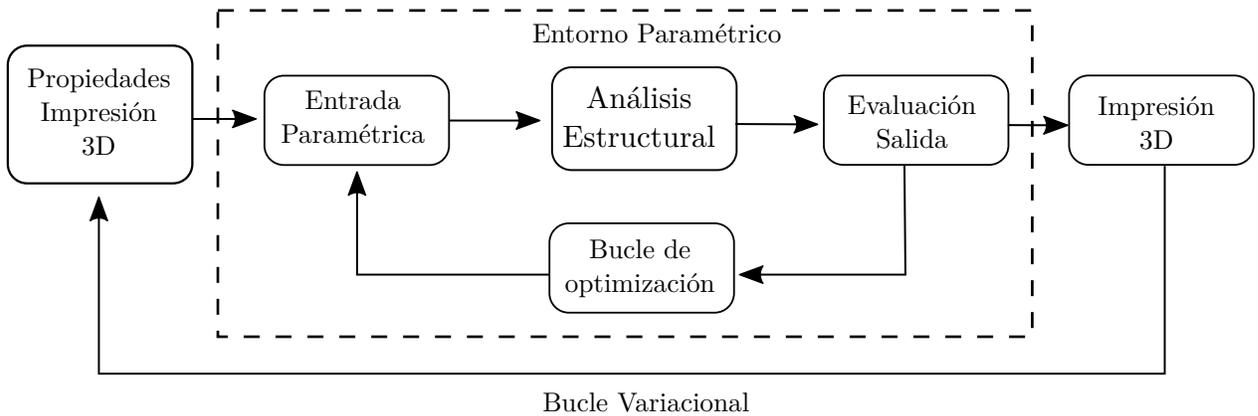


Figura 2.6: Estructura del modelo de investigación.

### Entorno y diseño paramétrico

El diseño paramétrico es un proceso de diseño que se basa en un esquema algorítmico, que permite expresar parámetros y reglas que definen la relación entre los requerimientos del diseño y el diseño resultante.

La idea y objetivo de este método, es diseñar un proceso y no un resultado concreto, lo que genera que se pueda desarrollar una colección de relaciones matemáticas y geométricas, en donde las variables y las propiedades se puedan modificar en tiempo real y así comparar más de un resultado, con la finalidad de tener un diseño óptimo.

Por lo general, los softwares que se utilizan en este tipo de procesos de diseño son Rhinoceros y Grasshopper. Es más probable que la mayoría de los arquitectos estén al tanto de Rhinoceros como software que permite la modelación en 3D, sin embargo, Grasshopper resulta ser un software más nuevo o desconocido. Grasshopper es un plug-in de Rhinoceros, orientado específicamente al diseño paramétrico y la ventaja de este programa es que, a diferencia de otros, no se necesita experiencia en programación, lo cual permite crear diseños paramétricos a partir de componentes generados, optimizando considerablemente el tiempo.

Wolfs realiza el modelo paramétrico en Grasshopper, que es necesario para poder variar rápidamente las propiedades y evaluar sus relaciones, en donde se puede tener una gran cantidad de parámetros que se pueden clasificar en las propiedades del material, geometría, las cargas y condiciones de entorno. Además, el lenguaje de programación Python se utiliza para escribir los algoritmos necesarios.

Este modelo permite al usuario seleccionar el comportamiento del material, que podría ser lineal o no lineal elástico, seleccionar la sección transversal para que sea masiva o tipo sándwich. Además, se tiene la opción de elegir el tipo y ubicación de los soportes, basado en la estructura asumida.

### **Análisis Estructural**

Las relaciones paramétricas y los algoritmos de Python actúan como entrada para el análisis estructural, el cual se puede realizar en un software como Ansys, Autodesk Civil 3D, SAP 2000, Midas, Abaqus, entre otros.

Wolfs utilizó el software de métodos de elementos finitos (FEM) Abaqus, que incluye un comportamiento ortotrópico, que es un resultado típico del método de producción en capas, además, en este modelo FEM, se tienen en cuenta el desarrollo de nuevos materiales y formas imprimibles, propiedades del material y las secciones transversales.

El lenguaje Python puede usarse para controlar Abaqus. En Grasshopper, se genera un script que incluye todos los parámetros, objetivos de optimización y objetivos salida. Estos comandos se envían a Abaqus, que ejecuta el análisis estructural como el bucle de optimización. En tiempo real, los resultados son enviados de vuelta a Grasshopper, lo que permite realizar un seguimiento y optimizar los resultados. Estos resultados se traducen en las tensiones y deformaciones máximas que se producen en la estructura analizada, junto con su localización nodal.

### **Optimización**

Para optimizar los resultados del análisis estructural (tensiones y deformaciones), es necesario un algoritmo que utilice estos valores y busque combinaciones eficientes de los parámetros de entrada y así evitar una gran cantidad de cálculos. Los algoritmos de optimización y el

bucle variacional de las propiedades de impresión se escriben en el lenguaje de programación Python.

Lo primero que se viene a la mente cuando existe un problema con una gran cantidad de parámetros, es variar todos ellos y analizar las combinaciones, luego se evalúan los resultados y se selecciona la combinación que más se aproxima al óptimo. Esta es la llamada “búsqueda exhaustiva” que no requiere un algoritmo complejo. Pero al aumentar el número de variables, las combinaciones posibles y el tiempo computacional aumentan considerablemente.

Se requiere una búsqueda más inteligente y eficiente, y la posible solución es que el algoritmo debe ajustar la entrada en base a los resultados previamente adquiridos del análisis estructural. Una vez que se ha evaluado un determinado valor, se elige uno del entorno del valor anterior, si este punto es mejor, se elige como el nuevo punto de partida, de lo contrario, se selecciona un nuevo punto de su entorno, esto se repite hasta que no se consiga ningún valor mejor que el anterior. Este método se conoce como “algoritmo hill climbing” (ascenso de colinas), y aunque es una mejora en comparación a la búsqueda exhaustiva, todavía tiene desventajas. En general el resultado termina en un óptimo local y no se entrega información acerca de cuan desviado está del óptimo global. Además, el óptimo encontrado depende en gran medida del dominio inicial elegido. Afortunadamente, los algoritmos de optimización se han mejorado en los últimos años y se han desarrollado métodos que tienen en consideración esos problemas, el algoritmo “simulated annealing (SA)” es un método muy adecuado para estudiar la impresión del hormigón.

El algoritmo SA o recocido simulado, se inspira en la termodinámica y el trabajo con metales. El recocido consiste en calentar y enfriar un material, alterando sus propiedades, cambiando su estructura a nivel molecular. Una vez que se tienen las propiedades deseadas, el material se enfría y la estructura se bloquea.

El algoritmo SA tiene una variable ficticia de temperatura, esta comienza “caliente” y se “enfría” a medida que se ejecuta el algoritmo. En altas temperaturas, el algoritmo permite aceptar soluciones peores que la actual, por lo que es capaz de saltar de los óptimos locales. La posibilidad de aceptar soluciones peores se reduce a medida que la temperatura disminuye, cuando el algoritmo ha completado varias iteraciones, esto permite al algoritmo reducir el dominio de búsqueda y para poder encontrar una solución global óptima.

### **Técnica de impresión**

Una vez que se establece una relación eficiente entre la entrada paramétrica, el análisis estructural y el método de optimización, entonces se procede a estudiar las técnicas de impresión, tales como velocidad, tamaño de capa, medio ambiente de impresión (in-situ o prefabricado), entre otros.

Una de las técnicas más relevantes en esta investigación es la velocidad de la impresión, ya que esta influye en dos características importantes de los materiales: la resistencia de unión entre capas y el desarrollo general de la resistencia del hormigón. Además, esta técnica junto con el tamaño de capa, determinan el tiempo que se necesita para completar el objeto impreso. La altura del elemento está dividida en un número de capas, por lo que el tiempo total de impresión se encuentra entonces multiplicando el tiempo de cada capa por el número total

de ellas. Este tiempo se puede usar para calcular la madurez del hormigón, que finalmente se utiliza para calcular la fuerza desarrollada en un cierto tiempo después de la impresión.

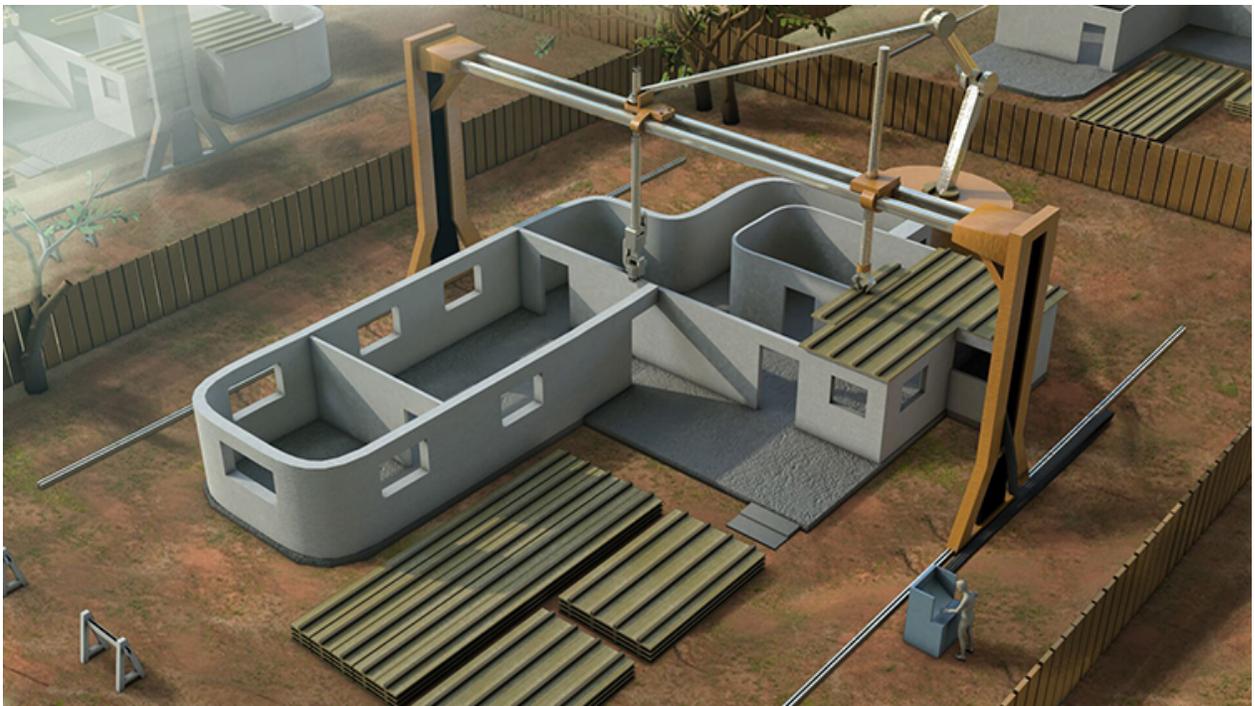
Todas estas propiedades de impresión están incluidas en el modelo paramétrico de Grasshopper, donde la velocidad máxima de impresión, tamaño de capa y la temperatura pueden ser fijos.

### 2.2.6. Estado del arte

La industria de la construcción, empresas, institutos y universidades de todo el mundo, ya han estado estudiado e investigando acerca de la impresión 3D en hormigón. A continuación, se presenta un resumen del estado del arte de esta técnica en el mundo. Sin embargo, como la impresión en hormigón crece constantemente, esta revisión está limitada a la fecha de término del presente de trabajo de título.

#### Contour Crafting

Contour Crafting (CC) es una de las tecnologías de construcción más importantes del momento, que fue inventada y está siendo desarrollada por el Dr. Behrokh Khoshnevis, profesor de la Universidad del Sur de California. Actualmente existe la empresa Contour Crafting Corporation (CC Corp) en etapa inicial, con el objetivo de comercializar tecnologías de construcción.



Fuente: Contour Crafting [4].

Figura 2.7: Construcción de una vivienda utilizando Countour Crafting.

La tecnología CC utiliza sistemas robóticos modernos especialmente diseñados para construir edificios rápidamente usando datos de diseño CAD en 3D. Si bien existen variadas aplicaciones, CC inicialmente está enfocada en transformar y revolucionar la construcción de viviendas.

Cuando la tecnología CC este totalmente desarrollada, esta podría permitir la construcción de una vivienda en tan sólo pocas horas y a costos mucho menores que los tradicionales métodos (figura 2.7). Por ejemplo, una casa de 2000 pies cuadrados se podría construir en menos de 24 horas y reducir los costos alrededor de un quinto en comparación a la construcción convencional.

En la actualidad, estas tecnologías serían más útiles para viviendas de bajos ingresos y la reconstrucción de emergencia debido a desastres como terremotos, inundaciones, guerras y otros desastres naturales.

Varios tipos de elementos de infraestructura puede ser construidos por la tecnología CC. Un ejemplo de esto es el método propuesto para la construcción autónoma de altas torres de hormigón, que se aplica a torres de turbinas eólicas, torres de puente, torres de agua, chimeneas, etc. El método funciona con un sistema robótico que puede trepar a la torre, un módulo de construcción basado en Contour Crafting y un nuevo sistema de suministro de material (figura 2.8). Actualmente las torres de turbinas eólicas se construyen utilizando segmentos de acero hueco que se producen en las fábricas, que son transportadas al sitio, montadas con grúas especiales y utilizan una tripulación especializada, todo esto genera que el tiempo, el costo y el peligro sea mayor en comparación con el método propuesto por CC.



Fuente: Contour Crafting [4].

Figura 2.8: Aplicaciones de Countour Crafting: Torres eólicas y construcciones en la Luna.

Por último, una de las aplicaciones más novedosas que se quiere implementar, es la construcción extraterrestre, es decir, construir sobre la Luna y Marte para la exploración planetaria, hábitat y colonización. La tecnología Contour Crafting tiene el potencial de construir estructuras lunares seguras, laboratorios y otras instalaciones antes de la llegada de los seres

humanos. Los desarrollos de estos sistemas de construcción pretenden utilizar una combinación de hormigón de azufre y el suelo de luna sintetizado, llamado regolito. Ambos pueden obtenerse fácilmente in situ, ahorrando costos de transporte (figura 2.8).

Contour Crafting es un método de fabricación por capas que utiliza cemento, polímeros y otros materiales, que se mezclan para construir objetos a gran escala con un acabado superficial liso, que se logra limitando el flujo extruido en la dirección vertical y horizontal. Tiene una paleta lateral que se puede controlar dinámicamente para ajustarse a la pendiente de una cierta superficie, además, también es capaz de utilizar una gran variedad de materiales y aditivos como fibras de refuerzo. Las estructuras que se pueden crear son del tipo sándwich, por lo que la boquilla puede extruir en diferentes salidas, una en cada lado de la estructura y otra para el interior de esta (núcleo).

Poca información existe acerca de la composición y las propiedades del hormigón CC, pero un grupo de investigación en California ha logrado una adecuada mezcla de concreto basado en experimentos de ensayo y error. La tabla 2.1 muestra los componentes de la mezcla.

Tabla 2.1: Componentes de una mezcla utilizada por Contour Crafting.

Componente	%
Cemento Hidráulico Portland Tipo II	37
Arena	41
Plastificante	3
Agua	19

Como se observa, la mezcla contiene plastificantes que se utilizan para aumentar la trabajabilidad y áridos con un tamaño de partícula limitado al diámetro de la boquilla. La relación agua/cemento es igual a 0.5 y los experimentos muestran que la resistencia a compresión media es igual a 18.9 [N/mm<sup>2</sup>] que se consigue en pocas horas de curado. Existen publicaciones donde se menciona la utilización de fibras, pero se desconoce el tipo y porcentaje de estas.

### **TotalKustom**

TotalKustom (TK) es una empresa con sede en Minnesota, Estados Unidos, que fue fundada por Andrey Rudenko. Esta empresa es capaz de imprimir estructuras comparables a CC, pero con una altura de capa menor, el estándar actual es de 1 centímetros de altura por 3 centímetros de ancho.

La misión de esta empresa es desarrollar sistemas robóticos para la construcción de viviendas asequibles y rápidas, que generan una reducción a la necesidad de la mano de obra. Además, pretende que los diseñadores y arquitectos busquen crear una nueva mirada para los edificios, esta tecnología 3D permite implementar nuevas ideas arquitectónicas en la construcción y es increíble lo que pueden variar las estructuras arquitectónicas de los actuales hogares. Con esta tecnología, es posible imprimir ilimitadas cantidades de decoraciones clásicas, así como nuevos elementos y formas.

Una de las primeras estructuras creadas, fue un modelo a escala de un castillo (figura 2.9), que mide aproximadamente 3 por 5 metros. La impresora fue capaz de crear 50 centímetros en 8 horas y tomo 6 meses en terminar la construcción del castillo.



Fuente: Total Kustom [5].

Figura 2.9: Castillo impreso en 3D por la empresa Totalkustom.

Otro de los grandes desarrollos de esta empresa data del año 2015, donde el Lewis Grand Hotel de Filipinas se asocia con Andrey Rudenko para desarrollar el primer hotel en 3D impreso en el mundo (figura 2.10). La habitación del hotel impreso en 3D mide 10.5 por 12.5 metros con una altura de 4 metros, e incluye dos dormitorios, una sala de estar y una sala con un gigante jacuzzi también impreso en 3D. La impresión tardó aproximadamente 100 horas, aunque eso no incluye paradas como la instalación del cableado, plomería y barras de soportes.



Fuente: Total Kustom [5].

Figura 2.10: Habitación de un hotel impreso en 3D.

En cuanto a los materiales utilizados se conoce muy poco, pero para la construcción de la habitación del hotel, se utilizaron materiales de la localidad, como arenas y cenizas volcánicas, que son difíciles de extruir, pero generan paredes muy fuertes y con una buena unión entre capas. Es importante destacar el clima en donde se realiza la impresión, la habitación del hotel se hizo en un clima cálido durante todo el año como es Filipinas, perfecto para la impresión de este tipo debido a las características del curado del hormigón.

El éxito de Rudenko produjo la idea de seguir con proyectos de impresión 3D. En particular, el próximo enfoque se centra en los hogares comerciales y en la propia industria de la construcción. Sin embargo, el foco principal es el desarrollo de hogares para ayudar a la gente. Específicamente en Filipinas, un país lleno de pobreza y barrios marginales, por lo que una gran cantidad de hogares de bajos ingresos están ahora en la agenda de esta empresa.

### **Yingchuang Building Technique**

Se pronostica para el año 2050 que el crecimiento demográfico y la urbanización continúen aumentando a 2500 millones de personas a la población urbana del mundo, y que casi el 90 % se concentrara en Asia y África según el reporte de U.N World Urbanization Prospects (The 2014 Revision), ante lo cual China está buscando nuevas alternativas para la construcción de viviendas y edificios, con el objetivo de disminuir costo y tiempo, aumentar la eficiencia y ser más amigable con el medio ambiente.

Yingchuang Building Technique Co. Ltd o también llamado WinSun, es una empresa China ubicada en Shanghai, liderada por Ma Yihe (Presidente y Director General) que tiene como objetivo revolucionar la industria de la construcción utilizando la tecnología de impresión 3D. Esta empresa se inició en la producción de grandes materiales para los edificios, pero posteriormente se convirtió en la primera empresa en el mundo que puede comercializar construcciones impresas en 3D para su uso práctico.

WinSun utiliza una impresora con una boquilla de pulverización y un sistema automático de movimiento de material. Las dimensiones son de 10 metros de ancho por 150 metros de largo con un alto de 6.6 metros, con estas dimensiones se pretende aumentar hasta 10 veces la eficiencia en la producción, reducir el material entre un 30-60 %, reducir los costos laborales en un 50 hasta un 80 % y acortar los tiempos de producción en 50 o incluso un 70 %.

Uno de los puntos importantes de WinSun es la exclusividad del material utilizado, en donde se utilizan hasta un 50 % de residuos de demolición, fibra de vidrio, arena, cemento fino y aditivos especiales. Según la empresa, los residuos de reciclaje de la construcción producen una gran cantidad de emisiones de carbono, pero con la impresión 3D se pretende utilizarlos como nuevos materiales de construcción.

En marzo del 2014, WinSun presento diez casas impresas en 3D en Shanghai, China (figura 2.11). Estas fueron creadas completamente de hormigón utilizando la impresora 3D, con un precio aproximado de 4.800 dólares cada una.



Fuente: WinSun [6].

Figura 2.11: Casa impresa en 3D por WinSun.

Además, posteriormente a la construcción de las casas, se aplicó el mismo método para la construcción de un edificio de apartamentos de cinco pisos y una mansión de dos pisos de 1.100 metros cuadrados que incluso viene con decoraciones internas y externas, que tuvo un día de impresión, dos días de montaje y el uso de sólo 3 trabajadores (figura 2.12).



Fuente: WinSun [6].

Figura 2.12: Mansión y edificio impresos en 3D por WinSun.

WinSun Global, empresa formada por WinSun y una compañía estadounidense, pretenden establecer fábricas en Arabia Saudita, los Emiratos Árabes Unidos, Qatar, Marruecos, Túnez, los Estados Unidos y otros países, con el fin de popularizar la impresión 3D. Otro objetivo de la empresa es construir en el Medio Oriente y África para proporcionar hogares baratos y eficientes para las familias de bajos ingresos.

Actualmente esta empresa sigue firmando contratos para seguir creciendo y continuar con la construcción de casas impresas en 3D.

### D-Shape

El inventor Italiano Enrico Dini, fundador de Monolite UK Ltd, ha desarrollado D-Shape, el cual es un método de impresión 3D diferente a los descritos anteriormente.

D-Shape es una gran impresora tridimensional que tiene un cabezal de impresión compuesta de 300 boquillas, montadas en un marco de aluminio de pórtico de base cuadrada (figura 2.13). El proceso de impresión comienza cuando una capa de arena de 5 a 10 mm de espesor mezclada con óxido de magnesio sólido (aglutinante) es depositada y compactada en el área de impresión, luego el cabezal de impresión se desplaza a través de la base y se deposita un líquido de unión compuesto por cloruro de magnesio siguiendo el diseño CAD previamente creado, esta acción es repetida una y otra vez hasta completar el objeto diseñado. El aglutinante y la arena reaccionan químicamente y este se solidifica completamente durante 24 horas, el resto de la arena que no se solidificó funciona como soporte del objeto diseñado. Finalmente, luego que la impresora termina su trabajo, el exceso de arena es removido.



Fuente: D-Shape [7].

Figura 2.13: Impresora y estructura D-Shape.

A diferencia del hormigón, que tiene baja resistencia a la tracción, las estructuras D-Shape tienen una resistencia a la tracción relativamente alta y no requieren refuerzos de acero. Además, el proceso de construcción toma una cuarta parte del tiempo y una reducción notable del costo en comparación a los métodos tradicionales.

### 3DCP

El equipo de investigación del Departamento de Ingeniería Civil y Construcción de la Universidad de Loughborough, ha desarrollado la tecnología 3D de impresión de hormigón 3DCP para la fabricación de componentes de construcción y arquitectura de gran escala.

El proceso de impresión basado en la extrusión es similar a la técnica Contour Crafting, sin embargo, tiene una menor resolución de deposición. 3DCP permite un mayor control de las geometrías internas y externas, produciendo superficies acanaladas que dependen en gran medida del espesor de la capa (figura 2.14).

La universidad de Loughborough ha desarrollado un hormigón de impresión de alto rendimiento después de varias pruebas y una extensa investigación, donde se obtuvieron resistencias a compresión de hasta 100 MPa y resistencias a la flexión de 12 MPa a los 28 días.

El diseño de mezcla consta de agua, arena, un cemento CEM I 52.5, cenizas volantes, humo de sílice y como aditivos se utilizan superplastificantes y retardadores para aumentar la trabajabilidad y la resistencia. Para reforzar la mezcla se utilizó una fibra de polipropileno de 12 mm de longitud y 0.18 mm de diámetro. La mezcla óptima que se determinó tiene una relación de arena-aglutinante 3:2 con 1.2 kg/m<sup>3</sup> de fibras. El aglutinante consiste en un 70 % de cemento, 20 % de cenizas volantes y un 10 % de humo de sílice, con una relación aglutinante-agua de 0.26, además, contiene superplastificante y un retardador con dosificaciones de 1 % y 0.5 % en peso del aglutinante, de manera que el tiempo abierto se extiende a 100 minutos. Finalmente, las muestras mostraron una densidad de 2350 kg/m<sup>3</sup>.



Fuente: Universidad de Loughborough [8].

Figura 2.14: Impresora y estructura de 3DCP.

### Apis Cor

Apis Cor, es una empresa de Ingenieros, constructores e inventores que tienen una idea conjunta: cambiar la industria de la construcción para que millones de personas mejoren sus condiciones de vivienda. La impresora fue creada por Nikita Che-yun-tai y presenta grandes posibilidades para la construcción 3D in situ.

La característica fundamental de esta impresora es que no tiene una configuración tradicional de los tres ejes (X, Y y Z), la impresora circular Apis Cor tiene una base giratoria y un brazo similar a una grúa y esta puede girar en todas las direcciones, imprimiendo estructuras completas desde adentro hacia afuera, en lugar de realizar estructuras prefabricadas individuales que luego se montan en el sitio de construcción. Esta impresora tiene un tamaño compacto (plegado) de 4 m de longitud, 1.6 m de ancho y 1.5 m de altura, pero la longitud y altura se pueden extender generando un área de impresión cercana a los 132 m<sup>2</sup> en un punto fijo, pero esta puede ser trasladada a otro punto para seguir imprimiendo. Esta máquina

pesa cerca de 2 toneladas, por lo que junto a sus dimensiones el transporte se facilita, donde incluso puede ser transportada por un camión estándar. Además, utiliza un bajo consumo de energía y no genera residuos de construcción, ahorrando hasta un 70% de los costos de los métodos tradicionales.

En cuanto al material utilizado, Apis Cor utiliza un mortero de cemento especialmente desarrollado con la adición de aditivos especiales, incluyendo agentes de refuerzo. Esta mezcla se suministra en forma seca y se mezcla con agua en el sistema de mezcla automático de la impresora, que proporciona una excelente calidad, asegurando una velocidad óptima y la proporción adecuada para el suministro de alimentación de esta.

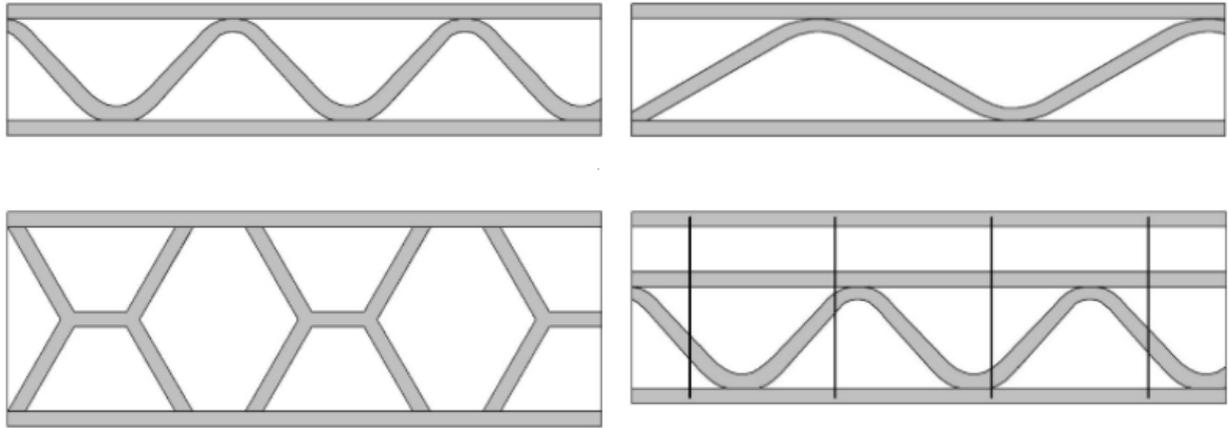
En diciembre del 2016, Apis Cor comenzó a imprimir un edificio utilizando su impresora 3D circular (figura 2.15). La construcción se llevó a cabo en la región de Moscú Stupino, que duró aproximadamente 24 horas. Esta construcción consta de un área impresa de 38 m<sup>2</sup> con un diseño de una casa no convencional, debido a que el objetivo principal de la construcción era demostrar las posibilidades flexibles y variedades de formas de construcción.



Fuente: Apis Cor [2].

Figura 2.15: Impresora circular Apis Cor y construcción de una casa en Moscú 2016.

El principal tipo de estructura impreso por Apis Cor, son muros que se diseñan formando dos capas rectas, conectadas por un puente de forma sinusoidal. Pero esta configuración no es la única, se están estudiando otras formas, como el cambio del puente interno, en donde se puede cambiar el periodo de la senoide o crear puentes con formas de panal, cambiando la capacidad de carga. Además, se puede añadir capas rectas para generar aislamiento en la estructura (figura 2.16).



Fuente: Apis Cor [2].

Figura 2.16: Tipos de estructuras estudiadas por Apis Cor.

### BauMax

En Chile, si bien aún no existen impresoras 3D que impriman estructuras in situ, se están desarrollando tecnologías que se están acercando a este concepto. BauMax es una empresa chilena de construcción robotizada de hormigón, que produce estructuras prefabricadas para luego montarlas en el lugar de construcción. Forma parte del programa Construye 2025 de Corfo y busca mejorar la productividad y eficiencia de la construcción en Chile.

BauMax busca una alternativa para solucionar el problema inmobiliario que afecta a Chile por el encarecimiento de las edificaciones que afecta la economía y el desarrollo social. La meta de la empresa es reducir en un 20 % los costos de producción de las edificaciones, aumentar en un 20 % las edificaciones sustentables y disminuir en un 30 % las emisiones de CO<sub>2</sub> en Chile de aquí al 2030.

BauMax produce estructuras de hormigón utilizando bloques prefabricados, que incluyen las conexiones eléctricas y sanitarias, que posteriormente se montan en el sitio de la construcción. Los materiales y la tecnología que utiliza esta empresa son traídos de Alemania, pero el análisis estructural se hace en Chile debido a las características sísmicas del país. Este sistema robotizado en 3D permite terminar y entregar casas de 120 m<sup>2</sup> en menos de 24 horas.

Un punto importante que destacar es la utilización de BIM (Modelado de información de construcción) donde se puede utilizar un software CAD-CAM (Diseño asistido por computadora - Fabricación asistida por computadora), que permite dimensionar los elementos directamente desde el modelo BIM.

La fábrica de BauMax se encuentra en Lampa y actualmente está trabajando sólo con inmobiliarias, pero no descartan que en un futuro se comiencen a construir grandes obras, edificios y construcción de viviendas sociales.

## 2.3. Hormigón Convencional

El hormigón o Concreto es un material muy utilizado en la industria de la construcción, especialmente cuando se utiliza junto al acero, el hormigón armado. Su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería, tales como casas, edificios, puentes, diques, puertos, canales, túneles, etc. Incluso en edificaciones de acero, donde es utilizado en las cimentaciones.

En Chile, la producción de acero es escasa, por lo cual, el hormigón es uno de los principales materiales en las grandes construcciones, por sobre la utilización de acero, madera y albañilería. Además, de ser un país con gran producción de cementos y áridos, lo que genera que los costos sean menores y la facilidad de obtenerlos aumente.

El hormigón al igual que otros materiales, posee una serie de ventajas y desventajas, las cuales se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas del hormigón convencional.

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Durable	Baja resistencia a la tracción
Versátil-Moldeable	Inestabilidad volumétrica
Gran Plasticidad	Baja ductilidad
Diversidad de métodos de construcción	Baja relación resistencia/peso
Alta resistencia a la compresión	-
Resistente al fuego	-

### 2.3.1. Materiales constituyentes

Cuando se calculan estructuras de hormigón, se hacen bajo la hipótesis de estar frente a un material homogéneo con propiedades mecánicas uniformes, donde hay valores únicos de resistencias, módulo de elasticidad, fluencia, etc. Pero en realidad el hormigón es un material compuesto, que está formado principalmente por cemento hidráulico, partículas o fragmentos de un agregado (materiales pétreos inertes), agua y aditivos específicos.

Una mezcla estándar contiene:

- Cemento 10-15 %
- Agregados Pétreos (Áridos Granulares) 65-75 %
- Agua 15-20 %
- Aire 1- 2 %
- Aditivos y adiciones (Eventuales) % variable

#### **Cemento**

El cemento según la NCh 148 of 68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales” [9], es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente

de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Es el componente activo del hormigón y su función principal es llenar los huecos del árido y aglomerarlos. Además, en estado fresco la pasta lubrica y da cohesión, para finalmente proporcionar resistencia al hormigón endurecido.

Los cementos están compuestos principalmente por Clinker, yeso y adiciones.

**Clinker:** Es un producto formado esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos que se obtienen por el calentamiento de una mezcla homogénea finamente molida en proporciones adecuadas, formada principalmente por óxido de calcio (CaO) y silicio (SiO<sub>2</sub>), y en menores cantidades, por óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), hasta una temperatura que no podrá ser inferior a la temperatura de fusión incipiente [9].

**Yeso:** Se adiciona en cantidades pequeñas para regularizar el tiempo de fraguado.

**Adiciones:** Estos materiales generalmente son subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, que son de naturaleza inorgánica y tienen características puzolánicas o hidráulicas, que finamente molidos pueden ser añadidos al cemento u hormigón a fin de mejorar sus propiedades o entregarle características especiales en el estado fresco y endurecido. Principalmente utilizados para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia. La principal adición es la puzolana, que es un material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando esta finamente dividido en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente [9]. Existen puzolanas naturales como las provenientes de rocas sedimentarias y volcánicas. Pero también existen las puzolanas artificiales, donde las principales son:

- **Cenizas volantes:** Son polvos muy finos, arrastrados por los gases provenientes de una cámara de combustión de carbón pulverizado, utilizado en centrales termoeléctricas.
- **Escoria granulada de alto horno:** Es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro en un alto horno [9]. Esta escoria tiene propiedades de conglomerantes por sí sola, es decir, que finamente molida reacciona como un verdadero cemento, pero con la particularidad de ser un cemento lento.
- **Humo de sílice:** Es un producto de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferrosilíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. Se utiliza como adiciones para hormigón de alta resistencia.

Existen diferentes tipos de cementos, los cuales se pueden clasificar según sus componentes y por su resistencia. Según la norma NCh 148 [9], de acuerdo con su resistencia los cementos se clasifican en dos grados, tal como se muestra en la tabla 2.3 y de acuerdo con los componentes se clasifican en:

- Cemento Portland (Clinker + yeso).
- Cementos Puzolánico (Clinker + yeso + puzolanas).
- Cementos Siderúrgicos (Clinker + yeso + escoria).

Tabla 2.3: Características de los cementos según su resistencia.

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo Min	Final máximo h	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>
<b>Corriente</b>	60	12	180	250	35	45
<b>Alta resistencia</b>	45	10	250	350	45	55

En cuanto al proceso de hidratación de los cementos hidráulicos, estos fraguan y se endurecen al reaccionar químicamente con el agua. En esta reacción llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta. La hidratación comienza cuando el cemento entra en contacto con el agua donde cada partícula de cemento aumenta en su superficie y se enlaza con otras partículas de cemento o se adhiere a las sustancias adyacentes. El resultado es una progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de la resistencia. Esta hidratación sigue mientras se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (curado).

### Áridos Granulares

Los áridos o agregados se definen como materiales compuestos de partículas de origen pétreo, duras, de forma y tamaño estables. Estos se clasifican según su tamaño y textura superficial de sus partículas [10].

Cerca del 70 % del volumen del hormigón está ocupado por los áridos, por tal razón, la calidad de estos es de suma importancia. Los áridos son el esqueleto inerte del hormigón, que da rigidez para resistir la acción de cargas, la abrasión, el paso de la humedad y sollicitaciones químicas. Además, mejoran la estabilidad dimensional al reducir cambios en el volumen de la pasta de cemento, mejoran la economía del material, detienen la fisuración y tienen mejor durabilidad que la pasta de cemento.

En Chile la norma que define los requisitos para los áridos que se utilizarán en el hormigón, es la NCh 163 of 79 "Áridos para morteros y hormigones – requisitos generales" [10].

Los áridos según su tamaño de partículas se clasifican en:

- **Arena(Árido fino):** árido que pasa por el tamiz de abertura nominal de 5 mm y retenido en el de 0,080 mm, con las tolerancias establecidas en la NCh 163 [10].
- **Grava (Árido grueso):** árido retenido en el tamiz de abertura nominal de 5 mm con las tolerancias establecidas en la NCh 163 [10]. Dentro de los áridos gruesos podemos hacer otra división:
  - **Grava:** retenido en tamiz  $\frac{3}{4}$ ".
  - **Gravilla:** que pasa por el tamiz  $\frac{3}{4}$ ".

### Agua

El agua en el hormigón confiere plasticidad en estado fresco, hidrata al aglomerante y genera el curado del hormigón (ambiente saturado), que debe cumplir con determinadas normas de calidad. Estas normas son variables en cada país y además puede tener algún tipo de variación según el tipo de cemento que se quiera mezclar.

En Chile la norma que especifica los requisitos del agua es la NCh 1498 Of 82 “Hormigón-agua de amasado-requisitos” [11], en donde se establecen los requisitos que debe cumplir el agua que se utiliza en el amasado de morteros y hormigones.

### Aditivos

Son el material activo que es agregado al hormigón en pequeñas cantidades para modificar alguna de sus propiedades por acción física, química o fisicoquímica [12]. Estos pueden ser agregados inmediatamente antes del mezclado o durante el mismo.

La norma chilena que establece los requisitos para los aditivos es la NCh 2182 Of 95 “Hormigón y mortero- aditivos- clasificación y requisitos” [12] en donde se clasifican y establecen los requisitos de los aditivos químicos que se agregan al hormigón y al mortero durante su fabricación.

La efectividad de los aditivos en el hormigón están en función de: la composición química del aditivo, de la temperatura del hormigón, de la composición y finura del cemento, del contenido de cemento y la presencia de otro aditivo.

Por su función, los principales aditivos se clasifican como:

**Plastificante:** Material que aumenta la trabajabilidad para un determinado contenido de agua, o permite reducir la cantidad de agua para obtener una trabajabilidad específica (Entre un 5 a 10 %). Además, mejora la cohesión, reduce la tendencia a la segregación y al sangrado, reduce la tendencia al agrietamiento y en estado endurecido, aumenta la resistencia a la compresión axial y a la flexión.

**Retardador:** Material que disminuye la velocidad de la reacción química entre el cemento y el agua retrasando el inicio del fraguado. Se usan principalmente para compensar el efecto acelerante que tiene el clima cálido en el fraguado del hormigón, demorar el fraguado inicial del hormigón cuando se presentan condiciones de colocados difíciles o poco usuales y retrasar el fraguado para aplicar procesos de acabados especiales.

**Acelerante:** Material que aumenta la velocidad de reacción química entre el cemento y el agua, acortando el inicio del fraguado. Se emplean para acelerar el desarrollo de la resistencia del hormigón a temprana edad.

**Plastificante retardador:** Material que combina las acciones de plastificante y retardador.

**Plastificante acelerador:** Material que combina las acciones de plastificante y acelerador.

**Superplastificante:** Material que mediante su acción fluidificante otorga una alta trabajabilidad o, permite una gran disminución de agua libre para una trabajabilidad dada (Entre un 12 a 30 %). Esos son aditivos reductores de agua de alto rango que se agregan a los hormigones de cono y relaciones agua/cemento (a/c) bajas a normales para producir hormigones fluidos de alta trabajabilidad. Los hormigones producidos son fluidos pero trabajables.

**Superplastificante retardador:** Material que combina las acciones de un superplastificante y del retardador.

**Incorporador de aire:** Material que permite que una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire sean incorporadas durante el amasado y permanezcan después del endurecido. Se utilizan para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire del hormigón, mejorar drásticamente la durabilidad de los hormigones que están expuestos a la humedad durante los ciclos de congelación y deshielo, mejorar considerablemente la resistencia del hormigón contra el descaramiento de la superficie y mejorar de manera importante la trabajabilidad del hormigón fresco y la segregación.

### 2.3.2. Etapas del hormigón

El hormigón es un material que cambia en el tiempo debido a las reacciones químicas de la hidratación de los componentes del cemento. Sin embargo, aunque en realidad sólo hay un único proceso de hidratación, el comportamiento se puede dividir en tres etapas principales: estado fresco, fraguado y estado endurecido (figura 2.17). Esta división se establece arbitrariamente con los tiempos de fraguado inicial y final que se determinan mediante un aparato de Vicat [13,14].

**Estado fresco:** Es la primera fase de hidratación, comienza cuando el cemento entra en contacto con el agua, donde se forma una pasta en estado plástico que es trabajable y moldeable. Al pasar el tiempo, la pasta adquiere rigidez hasta el punto en que pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar, tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla, que ocurre generalmente a los 40-60 minutos. Se recomienda que todo tipo de manipulación del hormigón, es decir, transporte, colocación, compactación, etc., se realicen durante esta etapa, si se manipula después de esta, se podrían romper los enlaces de los cristales que están formándose.

**Fraguado:** Corresponde a la etapa comprendida entre el fraguado inicial y final del hormigón. En este estado el hormigón se encuentra en una constante rigidización y se pierde paulatinamente la plasticidad, hasta el punto de tener una rigidez significativa, que se determina como el fraguado final. El tiempo comprendido por el fraguado se estima en unas diez horas, aunque varía dependiendo de la humedad relativa, temperatura ambiente, cantidad de cemento, finura del cemento, uso de aditivos, etc.

**Estado endurecido:** Posterior al fraguado final, el hormigón comienza la etapa de endurecimiento, en donde se desarrollan progresivamente las resistencias mecánicas. Durante esta etapa, mientras continúe la hidratación, el hormigón se vuelve más duro y resistente. Este aumento de la resistencia puede durar varios días.

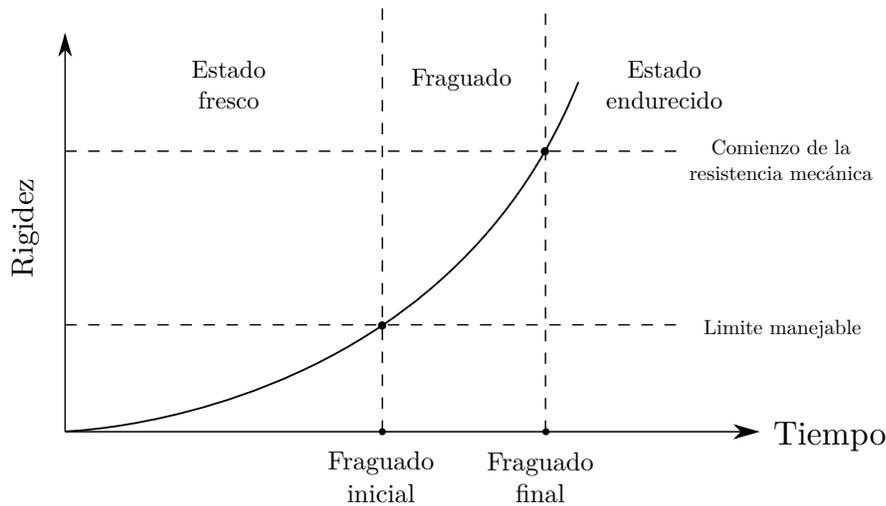


Figura 2.17: Esquema del comportamiento del hormigón en el tiempo.

### 2.3.3. Hormigón en estado fresco

El estado fresco del hormigón se define como el tiempo que transcurre entre el momento que se puso en contacto el agua con el cemento hasta cuando el hormigón comienza a endurecer (fraguado) y durante este intervalo, este se encuentra en estado fluido (plástico y moldeable). Muchas propiedades exigibles a un hormigón en estado endurecido dependen de las propiedades de este cuando se encuentra en estado fresco.

Las características que debe tener una mezcla fresca dependerán de las características de la estructura a construirse y de los métodos de colocación y compactación disponibles.

#### Trabajabilidad

Una de las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco es la trabajabilidad. Esta se puede definir como la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación [15]. Otros autores, mencionan la trabajabilidad como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla de hormigón fresco, que incluye el transporte, colocación, compactación y en algunos casos terminación.

La trabajabilidad es una propiedad compuesta y como tal, no puede ser determinada cuantitativamente por un sólo parámetro. Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, movilidad, bombeabilidad, compactibilidad, facilidad de acabado, fluidez, entre otros. Esta es determinada principalmente por la consistencia y cohesividad del hormigón fresco. La consistencia, se refiere al grado que tiene el hormigón fresco para deformarse, y la cohesividad es la resistencia a que el material se segregue. Para dar al hormigón una trabajabilidad deseada, la consistencia y cohesividad tiene que ser controladas.

Son muchos los factores que influyen en la trabajabilidad de una mezcla. Los principales factores se presentan a continuación:

- **Contenido de agua en la mezcla:** El agua es el principal factor que afecta la trabajabilidad. Al aumentar la dosis de agua en la mezcla, se incrementa la facilidad con que el hormigón fluye y puede ser compactado, pero este aumento va en desmedro de la resistencia y puede producir segregación y exudación del hormigón. Además, es importante considerar las características de absorción y humedad de los áridos de la mezcla para ajustar la dosis de agua.
- **Propiedades de los áridos:** La cantidad de áridos en la mezcla y la relación entre áridos finos y gruesos son los factores relevantes. Para una relación agua/cemento (a/c) constante, al incrementar la relación áridos/cemento provocará una disminución de la trabajabilidad. Una mayor cantidad de cemento es requerida cuando se incorporan mayores cantidades de árido fino. Cantidades menores de árido fino provocaran una mezcla fácilmente segregable y de difícil terminación. Forma y textura del árido afectan la trabajabilidad, como regla general se tiene que mientras más esféricas son las partículas de árido, más trabajable será el hormigón. La porosidad también afecta, se debe considerar la absorción para calcular el agua libre efectiva que se debe considerar para el cálculo de la relación a/c. Al aumentar la superficie específica del agregado fino es necesario un mayor contenido de agua para mantener la trabajabilidad, siendo entonces las características de la arena fundamentales en la determinación del contenido de agua.
- **Tiempo y temperatura:** Muchas veces el hormigón se transporta durante un largo periodo o también, la temperatura en el lugar de colocación es mayor a la existente en el laboratorio cuando se diseñó la mezcla. El tiempo y la temperatura modifican la relación de hidratación, el contenido de agua por evaporación y la rigidez de la mezcla, es decir, mayores temperaturas o largos tiempos, provocan una disminución de la trabajabilidad.
- **Características del cemento:** Al aumentar la finura del cemento se reduce la trabajabilidad. Los cementos de alta resistencia por lo general son más finos, que se hidratan con mayor rapidez, pero la demanda de agua es mayor.
- **Aditivos:** Los plastificantes, superplastificantes e incorporadores de aire provocan en las mezclas un aumento de trabajabilidad, permitiendo reducir el contenido de agua y en algunos casos, el contenido de cemento. Los retardadores de fraguado ayudan a mantener la trabajabilidad por mayor tiempo.

Como se mencionó anteriormente, la trabajabilidad es una propiedad compuesta, por lo que no puede ser determinada por un sólo parámetro. Desafortunadamente no se conoce ninguna prueba de laboratorio o de obra que mida la trabajabilidad en la forma que se definió. Existen muchos métodos para medir la trabajabilidad, pero cada uno mide diferentes parámetros, además dependen de que tan trabajables son los hormigones.

Los diversos ensayos que existen cambian con las diferentes normas o países, los cuales tienen diferentes objetivos y parámetros. La prueba más utilizada en las especificaciones y en la práctica es la prueba del asentamiento, luego, con menos frecuencia, el factor de compactación y el VeBe, que se utilizan para hormigones de baja trabajabilidad, posteriormente, con la aparición de los hormigones con trabajabilidades más altas, se integraron ensayos como la prueba de flujo.

En Chile, la elección de la trabajabilidad en el momento de su colocación o en laboratorio es medida por el asentamiento del cono de Abrams de acuerdo con la norma NCh 1019 [15]. Este método se aplica para hormigones cuyo árido sea de tamaño inferior o igual al tamiz de abertura 50 mm y cuya plasticidad y cohesión cumplan con ciertas condiciones establecidas en la norma. Esta prueba permite medir la trabajabilidad del hormigón fresco por la disminución de altura que experimenta en este ensayo, entre 2 a 18 cm. El asentamiento del cono se usa como medida de la consistencia, que es considerada una buena indicación de trabajabilidad.

### **Uniformidad**

Se refiere a la cualidad que debe mantener un hormigón para que este mantenga sus propiedades y durabilidad homogéneas en toda su masa, en el contenedor, durante el transporte, colocación y compactación. La uniformidad se ve afectada por los fenómenos de segregación y exudación.

**Segregación:** Se refiere a la separación de los componentes del hormigón fresco, resultando una mezcla no uniforme. Se manifiesta en la separación del árido grueso del mortero (pasta de cemento + ardo fino). La segregación se genera por la utilización de áridos con tamaño mayor, un alto peso específico de los áridos y por un bajo porcentaje de finos (arena o cemento). El uso de adiciones minerales finamente divididos reduce el riesgo de segregación, sin embargo, la colocación y el manejo del hormigón son más relevantes para prevenirla.

**Exudación:** Es el movimiento de agua luego de que el hormigón fue colocado y compactado, pero antes que el hormigón haya fraguado. El agua al ser un componente liviano tiende a segregarse del resto de los componentes. Este problema puede ser reducido si se incrementa la finura del cemento, usando puzolanas u otra adición finalmente dividida, aumentando la tasa de hidratación, incorporando aire a la mezcla o reduciendo el contenido de agua manteniendo una trabajabilidad aceptable.

### **2.3.4. Hormigón en estado endurecido**

Luego del estado fresco, el hormigón pierde paulatinamente la humedad y adquiere dureza. A medida que el hormigón experimenta el proceso de endurecimiento progresivo, se transforma de un material plástico a sólido, mediante un proceso fisicoquímico de larga duración. En este estado, el hormigón presenta características favorables que le permiten ser un material de uso masivo en las construcciones civiles.

Las principales propiedades del hormigón en estado endurecido son:

**Densidad:** Cantidad de peso por unidad de volumen. Depende de los componentes y proporciones de estos.

**Resistencia mecánica:** Es la capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse.

La norma chilena NCh 170 [16] clasifica en dos grados según resistencia:

-Resistencia a compresión: De acuerdo con las normas NCh1017 [17] y NCh 1037 [18].

-Resistencia a flexotracción: De acuerdo con las normas NCh 1017 [17] y NCh 1038 [19].

**Durabilidad:** Es la propiedad más importante, aunque siempre se hace hincapié en la resistencia debido a que es más fácil de evaluar. Se define la durabilidad como la habilidad del material a resistir la acción de la intemperie, ataques químicos, abrasivos y cualquier otro proceso de deterioro. Para obtener un hormigón durable, resulta necesaria la implementación de medidas adecuadas en el diseño de mezcla, fabricación, correctas prácticas de colocación, compactación, curado y protección del hormigón. La norma NCh 170 [16] establece los requisitos de durabilidad.

**Permeabilidad:** Es la capacidad de un material de ser atravesado por líquidos o gases. Propiedad que está muy relacionada con la durabilidad. Directamente relacionada con el tamaño, cantidad y continuidad de los poros en la pasta de cemento hidratada.

**Variaciones de volumen:** El hormigón experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones durante toda su vida útil por causas físico-químicas.

**Porosidad:** Proporción de huecos respecto a la masa total, influye en la resistencia, la densidad y la permeabilidad del hormigón.

### 2.3.5. Fabricación del hormigón

El hormigón debe ser durable y resistente, esto se logra cuando una vez endurecido es capaz de mantener sus propiedades resistentes bajo las condiciones de exposición previstas para su vida útil. Se obtiene a partir de componentes de buena calidad, diseñado mediante una dosificación de mezcla cuidadosamente estudiada, tomando en cuenta las condiciones a las que estará expuesto y fabricado a través de un proceso debidamente controlado, desde la compra y la recepción de los materiales en terreno hasta su correcta colocación, compactación y curado en obra.

En cuanto al diseño de mezcla, la dosificación que efectivamente se aplique en obra, debe ser tal, que el hormigón cumpla la resistencia especificada, la trabajabilidad, la durabilidad y las restantes exigencias complementarias según la norma con que se trabaje.

La confección y transporte del hormigón debe garantizar que los materiales constituyentes sean medidos, mezclados y amasados de modo de lograr un hormigón homogéneo.

Finalmente, la colocación del hormigón debe evitar segregaciones, aumentar la durabilidad, asegurar el monolitismo, obtener las formas diseñadas y obtener las características mecánicas y de durabilidad diseñadas. Para esto, es importante una adecuada compactación y vibrado con el fin de acomodar el hormigón a la forma del moldaje y posteriormente entregar una protección y curado del hormigón para generar una deseable hidratación del cemento y no perder agua.

### 2.3.6. Hormigón Proyectado

El hormigón proyectado o shotcrete se puede definir como un hormigón que es transportado a través de mangueras y es proyectado a alta velocidad desde una boquilla hasta una superficie para conformar elementos estructurales y no estructurales, sin utilizar encofrados. Es utilizado para una amplia variedad de usos en obras civiles, como estabilización y revestimiento en túneles, taludes y construcciones subterráneas, estabilización en la construcción de minas y galerías, reparaciones de hormigones, sello de fundaciones, etc.

Actualmente existen dos procesos en hormigón proyectado: proyección en seco y en húmedo. En el proceso húmedo, los componentes (cemento, áridos, aditivos y agua) se mezclan entre si antes de alimentar el equipo de suministro o la bomba, donde la mezcla se transporta bajo presión a la boquilla, donde se inyecta aire comprimido para proyectar la mezcla en su lugar. Esto difiere del proceso en seco, en que los constituyentes se juntan antes de ser transportados bajo presión por la manguera de suministro a la boquilla, donde se introduce el agua necesaria para la hidratación del cemento para luego proyectar la mezcla en su lugar.

En cuanto a la mezcla utilizada para un hormigón proyectado, esta es relativamente seca y se consolida por la fuerza del impacto, donde se desarrolla una fuerza de compresión similar al hormigón normal o al hormigón de alta resistencia, dependiendo de la dosificación utilizada. Los áridos utilizados constituyen alrededor del 75 % del peso del shotcrete y el 65 % de su volumen, pueden ser rodados o chancados, pero se restringen en el tamaño máximo, donde normalmente ocupan áridos de tamaño máximo 10 mm. El cemento utilizado es de alta resistencia debido a que es necesaria la generación de altas resistencias a edades muy tempranas, la relación con el agua (a/c) está comprendida generalmente entre 0,4 y 0,5. Las adiciones complementarias, como escorias, cenizas volantes y humo de sílice, se utilizan en el shotcrete para complementar el equilibrio de finos, mejorar las propiedades de durabilidad, aumentar la capacidad de retención de agua y reducir la presión del bombeo durante la aplicación. Los aditivos utilizados, como los acelerantes, se utilizan para acelerar el fraguado de la mezcla y el desarrollo de la resistencia temprana, plastificantes y superplastificantes para aumentar la fluidez de la mezcla sin pérdida de resistencia, retardantes para mantener la consistencia de la mezcla durante su transporte y estabilizantes para aumentar la cohesión interna de las partículas, evitando su segregación y asegurando la bombeabilidad de la mezcla. Finalmente, se utilizan fibras de refuerzo, que pueden ser fibras sintéticas o de acero con el objetivo de aumentar el refuerzo estructural.

Las propiedades fundamentales se centran en: una fluidez o trabajabilidad adecuada para facilitar la bombeabilidad y facilitar la proyección, optimizar la dispersión de acelerantes y fibras, asegurar la adhesión del hormigón al sustrato, una resistencia temprana y elevada para asegurar un soporte durante las primeras horas después de la proyección, y finalmente, una durabilidad óptima que sea capaz de resistir las influencias agresivas del entorno al que está expuesto.

### 2.3.7. Hormigón Autocompactante

El hormigón autocompactante es un tipo de hormigón, que gracias a la incorporación de aditivos químicos de última generación y un adecuado diseño de mezcla, se caracterizan por la capacidad de fluir y rellenar cualquier parte del encofrado, solamente por la acción de su propio peso, sin requerir vibrado ni otro tipo de compactación. Este hormigón es utilizado principalmente en obras donde no es posible vibrar o sólo se permita una mínima compactación, obras que requieran una rápida colocación con mayores rendimientos de mano obra y reducción de equipos, elementos densamente armados, rellenos de difícil acceso y especialidades arquitectónicas con superficies complejas en que se requiera una buena terminación.

La mezcla para este hormigón requiere una dosificación muy controlada de sus componentes. En relación con otros hormigones, los autocompactantes tienen un mayor contenido de finos (cementos, áridos y adiciones). Utilizan adiciones como micro sílice o humo de sílice y cenizas volantes, que le confieren resistencia a la flexión y alta cohesión. Los áridos utilizados son arenas de granulometrías continuas, que van del 50 al 60 % del total de áridos y gravas con un tamaño máximo en el orden de 12 a 16 mm. Aditivos superplastificantes para reducir el contenido de agua y lograr una fluidez máxima con consistencias secas. Una relación de agua y finos (a/f) entre 0,9 y 1,05. Y finalmente, incorporación de modificadores de viscosidad para proveer cohesión interna formando una especie de red tridimensional que le sirve de soporte, sin perder fluidez y evitando la segregación.

## Capítulo 3

# Propiedades del hormigón de impresión

Como ya se mencionó anteriormente, el material de impresión es uno de los 4 principales componentes que intervienen en el proceso de impresión 3D, y por tal motivo, el estudio de este es de vital importancia. En esta investigación, el material de impresión que se eligió es el hormigón, debido a una serie de características y propiedades que hacen que este material cumpla con los objetivos y requisitos necesarios para abarcar este tipo de tecnologías.

Existen pocos estudios que han proporcionado una comprensión inicial de las principales propiedades necesarias para una mezcla de impresión de hormigón, por lo que aún se necesita una amplia investigación y datos obtenidos de ensayos y experimentos, y así lograr un avance notorio en este método de construcción.

Las diversas propiedades que tiene un hormigón convencional no siempre serán aplicables a un hormigón de impresión, es por eso, que en este capítulo abordaremos las propiedades críticas y más importantes que se deben considerar para tener un hormigón con las características deseables.

Las propiedades de un hormigón de impresión tienen que tener en cuenta que este será transportado por un sistema de suministro y que debe pasar por un sistema de extrusión, por lo que la mezcla debe tener ciertas características para poder fluir y extruir de buena manera el material. Además, después de que se este se extruye, debe ser capaz de construirse en capas con una calidad, unión y resistencia aceptable. Cabe destacar que, estas propiedades dependen de los otros componentes de la impresión 3D, como puede ser la técnica de impresión y la forma del objeto o estructura, por lo cual el estudio se vuelve más complejo.

En esta investigación, dejaremos un poco de lado la relación con los demás componentes que intervienen en la impresión 3D, para enfocarnos específicamente en las propiedades del material. Si bien, inherentemente algunos parámetros de los otros componentes afectan estas propiedades, el estudio de estos se dejará propuesto para una futura investigación.

Para comenzar y acercarse un poco a estas propiedades, fue de gran ayuda el estudio de dos tipos de hormigones que se utilizan en la actualidad, estos son el hormigón proyectado y el hormigón autocompactante, que se describen con más detalle en el capítulo 2. Estos

hormigones serán de gran ayuda debido a que responden a ciertos requisitos que tiene un hormigón de impresión. En el caso del hormigón proyectado, este nos será útil para responder a las propiedades relacionadas con la capacidad que tiene para poder transportarse por el sistema de suministro y extrusión, además de las características del hormigón para que este se utilice sin encofrado. En cuanto al hormigón autocompactante, nos entregará indicios de la trabajabilidad (fluidez) que tiene el material para eliminar el proceso de compactación.

A continuación, se presentan las principales propiedades en estado fresco de una mezcla de impresión, donde se expondrán nuevas propiedades y la modificación de algunas ya conocidas.

### 3.1. Propiedades en estado fresco

En el capítulo 2, se define el estado fresco del hormigón como el tiempo entre el momento en que se pone en contacto el agua con el cemento hasta cuando el hormigón comienza a endurecer (fraguado), en el cual, la mezcla se encuentra en un estado fluido (plástico y moldeable).

El material en estado endurecido, resistente y durable que se obtiene después de la etapa de plasticidad, es generalmente el punto en que se pone mayor atención y se deja un poco de lado la importancia de las propiedades en estado fresco, a pesar de que son ellas las que generan las propiedades deseables en estado endurecido.

La caracterización del comportamiento del estado fresco de un hormigón de impresión requiere una investigación profunda, a diferencia de las propiedades en estado fresco de un hormigón convencional. El hormigón de impresión tiene una serie de características y requisitos particulares que se deben cumplir para que este se pueda utilizar en una máquina de impresión y características específicas del material después de ser extruido.

En esta investigación de las propiedades en estado fresco, el estudio se basó en diversos autores [20–22] los cuales ya comenzaron a describir y estudiar diferentes propiedades en estado fresco del hormigón de impresión. Este capítulo contiene las propiedades más importantes y críticas mencionadas, donde se seleccionaron, complementaron y desarrollaron con la investigación de los autores que están estudiando la técnica de impresión 3D en hormigón.

Las cinco principales propiedades seleccionadas en estado fresco que debe tener una mezcla de impresión en hormigón son: Extrudabilidad, edificabilidad, trabajabilidad, tiempo abierto y calidad de extrusión. Todas estas propiedades están relacionadas fuertemente, por lo que es de suma importancia conocerlas para poder entender estas relaciones y encontrar un equilibrio entre ellas.

Cabe mencionar, que las figuras que se utilizarán para esquematizar y complementar ciertas propiedades, consideran que la capas extruidas por la impresora tienen una sección transversal rectangular. Esto es sólo a modo de ejemplo, debido a que existen muchas otras secciones transversales (cuadrada, elíptica, circular, etc.) que también son aplicadas a las diversas propiedades en estado fresco.

### 3.1.1. Extrudabilidad

El termino extrusión en general se puede definir como un proceso que se utiliza para crear objetos y formas con una sección transversal definida y fija, y esta es una de las principales características que tiene el proceso de impresión 3D, donde el material es extruido (figura 3.1) y no colocado, depositado o proyectado como se suele hacer en los hormigones convencionales.

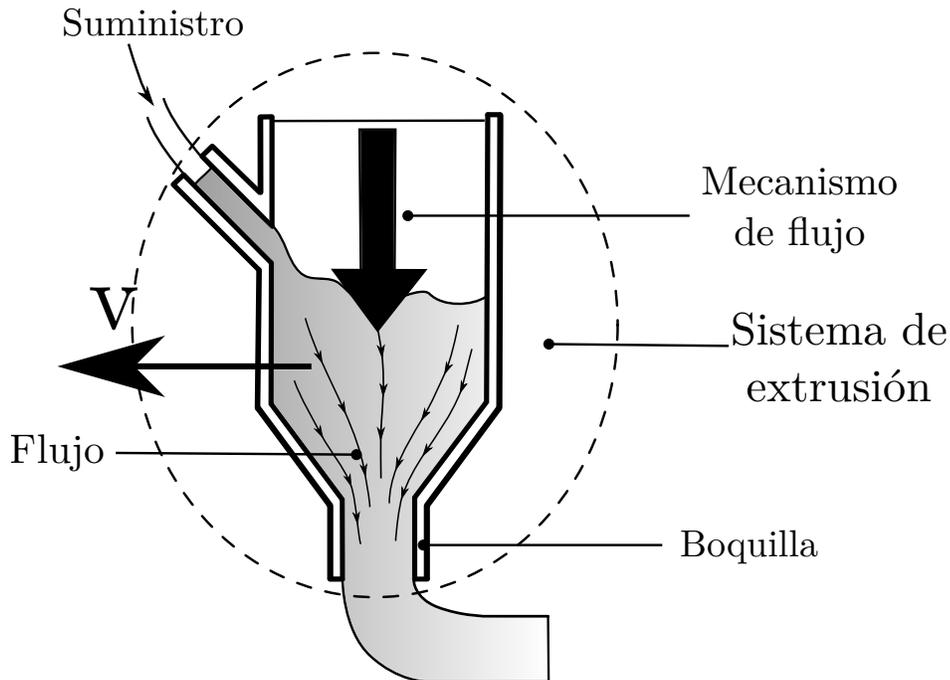


Figura 3.1: Esquema del proceso de extrusión.

Existen diferentes máquinas de impresión 3D, y por lo tanto, diferentes sistemas de extrusión, con diferentes mecanismos, como tornillos, bombas y engranajes, distintas boquillas de diferentes tamaños, secciones y formas, y otros componentes que pueden variar, por lo que, esta propiedad es importante y fundamental en cada máquina de impresión.

Diversos autores [21, 23] ya han definido y estudiado el término de extrudabilidad o capacidad de extrusión, el cual, con la ayuda de estos, podemos definir como la capacidad que tiene una mezcla de impresión a pasar a través de los sistemas de suministro y de extrusión, sin bloqueo u obstrucción, además de mantener una velocidad de flujo constante para extruir una capa continua fuera del sistema.

Cabe señalar que, para esta investigación, la propiedad de extrudabilidad será limitada sólo para la capacidad que tiene la mezcla a pasar a través del sistema de extrusión y no del sistema de suministro, debido a que la máquina construida en paralelo no tiene incluido este sistema, por lo que se dejará como tema propuesto de estudio para futuras investigaciones. Además, es importante mencionar, que las características de la mezcla de impresión que responden a esta propiedad están inherentemente relacionadas con el sistema de extrusión, es decir, de alguna u otra manera, el mecanismo y los componentes de este sistema, pueden generar un cambio en estas propiedades.

El hormigón proyectado puede ser útil para acercarnos un poco a la propiedad de extrudabilidad y entender ciertas características fundamentales de la mezcla de impresión. Austin et al [24, 25] hizo mención a la bombeabilidad, una propiedad importante que debe cumplir el hormigón proyectado en húmedo, esta hace referencia al comportamiento de la mezcla cuando se bombea a través de un sistema de tuberías, por lo que la mezcla debe cumplir con ciertas características que permitan que esta se transporte a una cierta velocidad sin generar obstrucción o bloqueo. Estudios más detallados sobre el comportamiento del hormigón en una tubería fueron realizadas por Dawson [26], donde se realizaron experimentos de bombeo con hormigones de distinta trabajabilidad en distintas longitudes de tubería, Ede [27] que también estudió la resistencia del hormigón en tuberías, pero en términos de presión de segregación, que es la presión requerida para separar líquidos y sólidos de la mezcla, y una serie de otras investigaciones [28–30] que pueden ser útiles para entender el concepto de extrudabilidad.

La diferencia particular que tiene el hormigón de impresión con el hormigón proyectado es que, en la técnica de impresión, el hormigón es extruido con una forma establecida y no expulsado como un sistema de partículas a gran velocidad. Existen diferentes estudios [31–33] un tanto más reológicos, donde se están realizando experimentos con materiales cementosos utilizando técnicas de extrusión, en particular Bin Mu et al [31] presenta estudios teóricos y experimentales de un compuesto reforzado con fibra fabricado por extrusión, donde se considera que el compuesto cementoso en la extrusora se comporta como un fluido viscoelástico no lineal y supone que los flujos en un extrusor son flujos bidimensionales de corte constante para establecer una teoría de la velocidad de flujo.

Pero para la caracterización y experimentación de esta propiedad, nos enfocaremos principalmente en el material y sus componentes. La extrudabilidad está influenciada principalmente por la trabajabilidad del hormigón, las proporciones y componentes de la mezcla, es decir, el material tiene que ser lo bastante trabajable (fluido) para poder transportarse dentro del sistema de extrusión sin sufrir un bloqueo, obstrucción o cambios en la mecánica del sistema, y para lograr esta trabajabilidad, es importante seleccionar cuidadosamente los componentes y diseñar una mezcla adecuada. Además, estas características mencionadas se tienen que mantener durante un tiempo determinado, para que el material no cambie en sus propiedades ni comience a fraguar inmediatamente. Finalmente, la extrudabilidad está muy relacionada con la calidad de extrusión, que será descrita a continuación, debido a que no se puede esperar una buena calidad de extrusión con una mala extrudabilidad de la mezcla.

### 3.1.2. Calidad de extrusión

Es importante que la mezcla de impresión no sólo tenga una buena capacidad de extrusión, también es importante que el material extruido (fuera del sistema de extrusión) cumpla con ciertas características y propiedades específicas.

En este estudio, guiados de Ali Kazemian et al [20] definiremos la calidad de extrusión como las propiedades que tiene una capa impresa (figura 3.2), en cuanto a los requisitos de calidad superficial, conformidad y estabilidad dimensional.

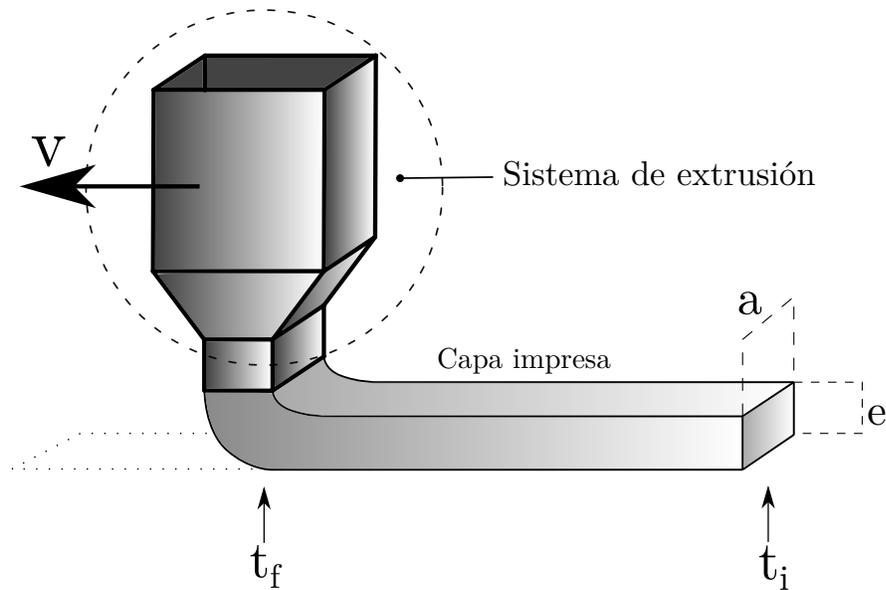


Figura 3.2: Esquema de capa extruida en el tiempo de sección transversal rectangular.

Es importante señalar, que para los requisitos establecidos se deben establecer rangos límites para evaluar el aceptar o rechazar una capa impresa, debido a que en muchas ocasiones no se obtendrán capas perfectas. Estos rangos tienen que ser determinados a partir de un gran número de experimentos para establecer un % de error razonable de aceptación. Además, en esta investigación las limitaciones de las dimensiones se establecen para las capas de hormigón fresco y no tienen en consideración las variaciones volumétricas que ocurren en el proceso de fraguado o en el hormigón endurecido.

Nos limitaremos a defectos debidos a la mezcla y no a problemas de software, ni fallos técnicos o eléctricos de la máquina de impresión.

A continuación, se presentan los principales requisitos que debe tener una capa impresa para tener una calidad de extrusión aceptable.

**1. Calidad Superficial:** Se refiere a que la capa tiene que estar libre de defectos superficiales, tales como el agrietamiento, segregación, huecos, etc. Es muy importante tener un buen diseño de mezcla para tener una excelente calidad superficial.

**2. Conformidad dimensional:** Se refiere a que las dimensiones de la sección transversal impresa se encuentran dentro de un rango aceptable con respecto a las dimensiones objetivo o de diseño (figura 3.3). Tiene relación con la capacidad que tiene el material para reproducir con gran exactitud una superficie en tres dimensiones en estado pasivo, es decir, no estar sometido a ninguna presión de deformación (tracción o compresión).

**3. Estabilidad dimensional:** Se refiere a la capacidad que tiene la capa impresa a mantener su conformidad dimensional en el tiempo. La capa tiene que ser impresa continuamente sin quiebres o reducciones de la sección transversal por sobre un rango establecido (figura 3.3). La posible discontinuidad de capa se puede deber a la rigidez excesiva o una cohesión de la mezcla inadecuada.

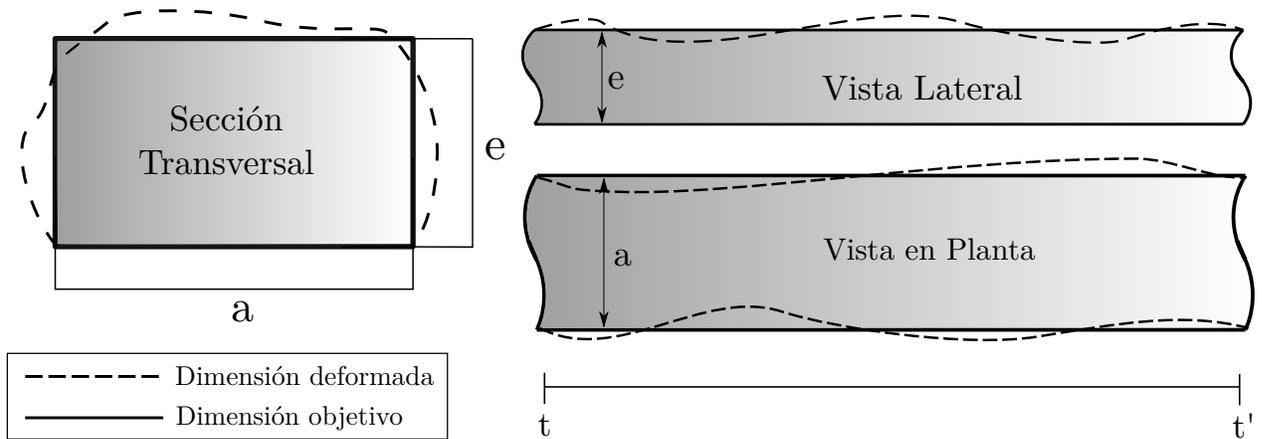


Figura 3.3: Esquema de deformaciones en diferentes vistas de una capa impresa de sección transversal rectangular.

### 3.1.3. Trabajabilidad

Tal como se mencionó en las propiedades del hormigón convencional, la trabajabilidad es una de las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco. Esta se define tradicionalmente como la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación [15]. Pero esta definición es bastante general y simple, y no es suficiente para el estudio del comportamiento del estado fresco de una mezcla de impresión, por lo que necesariamente se requiere una investigación más profunda y un estudio de la reología del hormigón es conveniente.

El estudio de la reología, que se refiere a la ciencia que estudia la deformación y el fluir de la materia, que tiene como propósito encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales, es una gran opción para entregarle un enfoque cada vez más científico al comportamiento en estado fresco del hormigón. Además, es útil para caracterizar las propiedades reológicas fundamentales del hormigón que existen durante los procesos de transporte, mezcla, colocación y compactación. Así posiblemente se puedan predecir nuevas propiedades, se puedan diseñar y seleccionar materiales más específicos y se puedan generar modelos de procesos para lograr los rendimientos requeridos para los hormigones convencionales y por sobre todo, para los nuevos métodos de construcción, como las impresoras 3D, en donde las características del material son claves.

Tattersall [34] y Banfill [35] entre otros, son autores que han estado investigando la reología del hormigón fresco, en particular, parámetros como el bombeo, la dispersión, el moldeado y la compactación que dependen de la reología. En estas investigaciones reológicas, se caracteriza el flujo del hormigón como un cuerpo plástico de Bingham (figura 3.4 (a)), es decir, el material se comporta como un sólido hasta que excede un determinado valor de tensión y luego comienza a fluir como si fuese un fluido. Este comportamiento puede representarse mediante la relación entre el esfuerzo cortante  $\tau$  y la velocidad de corte  $\gamma$ , tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma$$

Donde  $\tau_0$  es el límite elástico dinámico y representa el esfuerzo de corte necesario para iniciar el flujo, y  $\mu$  la viscosidad plástica, que afecta la resistencia al flujo después de que haya superado la resistencia al flujo.

Otro punto importante, es que el hormigón muestra un comportamiento tixotrópico, que significa que el esfuerzo de corte necesario para iniciar el flujo es alto si el hormigón ha estado en condiciones de reposo, pero se necesita un menor esfuerzo para mantener el flujo una vez que ha comenzado. En la figura 3.4 (b) se muestra la variación del esfuerzo de corte con el tiempo para el caso de una baja velocidad de corte, al comienzo el esfuerzo de corte aumenta gradualmente, pero no hay flujo y luego de que se alcanza el límite elástico estático, el hormigón comienza a fluir y el esfuerzo de corte se reduce al límite elástico dinámico. Este comportamiento tixotrópico se debe a la acumulación y descomposición de la estructura 3D interna dentro de la pasta cementicia [20], que ocurre debido a la coagulación y dispersión de partículas de cemento que, a su vez, son el resultado de fuerzas entre partículas y conexiones químicas [36, 37]. Esta acumulación y descomposición de la estructura interna causan el aumento y la reducción en la viscosidad respectivamente de la pasta fresca [38]. Este comportamiento de la estructura interna hay que tenerlo en cuenta debido a que el proceso de impresión en 3D experimenta un considerable esfuerzo de corte y agitación antes de depositarse como una capa.

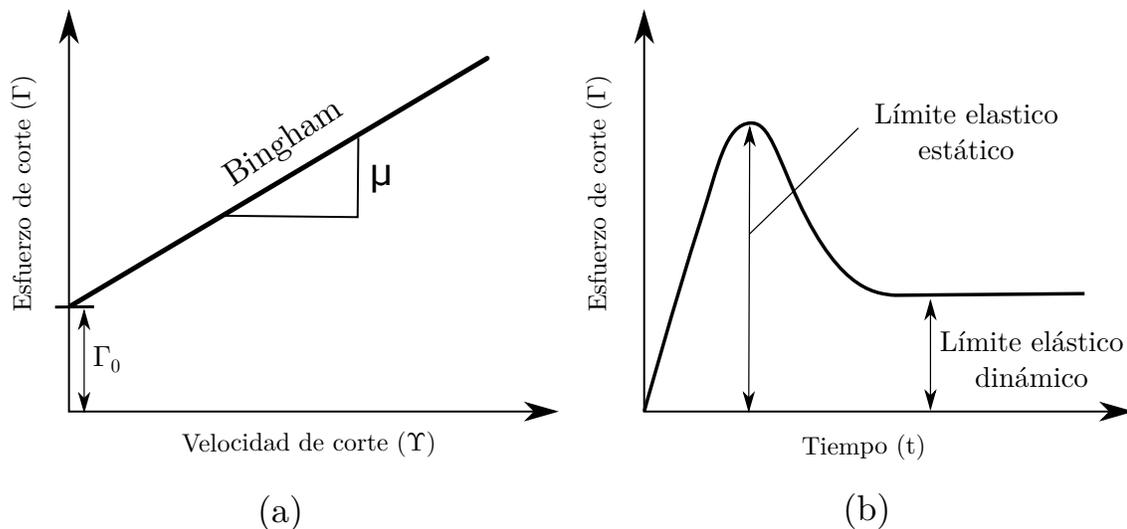


Figura 3.4: Representación del comportamiento de un cuerpo plástico de Bingham (a) y del comportamiento tixotrópico del hormigón (b).

La trabajabilidad del hormigón de impresión puede sacar provecho de las ventajas del hormigón autocompactante y el hormigón proyectado. Por un lado, el hormigón autocompactante tiene la característica de que no necesita medios mecánicos para compactarse debido a su gran fluidez y no presenta problemas de segregación. Y por otro, el hormigón proyectado tiene la característica de que el material es transportado eficazmente por un sistema de tuberías de forma continua y sin bloqueo. Estas características están relacionadas direc-

tamente con la trabajabilidad y se pueden lograr con la incorporación de aditivos químicos, una adecuada selección de los componentes de la mezcla y una adecuada dosificación.

La trabajabilidad es un parámetro clave, la cual está relacionada con todas las propiedades descritas, por lo cual, el control de este es fundamental para tener un correcto funcionamiento de la máquina y un correcto comportamiento de la mezcla de hormigón.

### 3.1.4. Tiempo abierto

El tiempo es un parámetro muy importante que debe ser considerado en el proceso de impresión 3D, debido principalmente al comportamiento del hormigón, el cual tiene propiedades que dependen del tiempo, tales como el proceso de rigidización (fraguado y endurecimiento). Además, como ya se dio a entender, el material utilizado para imprimir debe obedecer distintas propiedades particulares, pero estas no sólo se deben cumplir en un determinado momento, sino que, dependiendo de ciertos objetivos y requisitos de la máquina de impresión y de la mezcla, estas se tienen que mantener durante una cierta cantidad de tiempo. Es decir, no sirve de nada que una mezcla cumpla con la extrudabilidad sólo algunos segundos, si luego de estos, el sistema de extrusión se bloquea y el proceso de impresión se termina. Por tal razón, es importante el conocimiento de este parámetro para un correcto análisis y optimización del proceso de impresión.

Para poder caracterizar el tiempo con parámetros asociados al sistema de impresión, se define el tiempo abierto, concepto que está muy relacionado con los materiales adhesivos y se determina como el periodo de tiempo desde que un adhesivo es aplicado hasta el momento en que este pierde la capacidad de unión efectiva con otra superficie. Pero para esta investigación y tal como lo explican y definen diversos autores [21, 23] el tiempo abierto está relacionado con una de las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco y propiedad que caracteriza las demás propiedades particulares del hormigón de impresión, hablamos de la trabajabilidad. Por tal razón, el tiempo abierto será determinado como el cambio de la trabajabilidad en el tiempo.

Finalmente, para poder entregar valores más concretos del tiempo abierto y realizar las comparaciones convenientes, se definirá el tiempo abierto óptimo, que será el tiempo en que la trabajabilidad del hormigón fresco se encuentra en un nivel en que se mantiene la extrudabilidad y calidad de extrusión.

### 3.1.5. Edificabilidad

La edificabilidad o capacidad de construcción, es una propiedad clave y particular de una mezcla de impresión, debido al tipo de fabricación de sus componentes, que se realiza capa a capa (figura 3.5). A diferencia de la mayoría de los hormigones convencionales, que se vacían en un encofrado como un fluido y no es necesario el cumplimiento de esta propiedad.

El hormigón proyectado (Shotcrete) es una excepción y existen estudios donde ya se comenzó a investigar conceptos que se acercan a la edificabilidad. Austin et al [25] hizo mención de la capacidad de pulverización, la cual se puede definir como una propiedad que incorpora parámetros como la adhesión, cohesión (influye en el espesor que se puede acumular) y el rebote, que se estiman en pruebas de construcción horizontal, que pueden ser útiles para acercarnos a la propiedad de edificabilidad, pero que aún se escapan debido al tipo de construcción vertical que esta investigación propone.

Existen variadas investigaciones [20, 21, 23] de las cuales podemos entender y definir el concepto de edificabilidad como la capacidad que tiene el hormigón fresco a ser construido en un número considerable de capas, sin una deformación apreciable debido al peso propio, peso de las capas superiores y presión de la extrusión (figura 3.5), además de asegurar una buena adherencia (unión) entre ellas para crear componentes monolíticos.

La edificabilidad, por ende, tiene que superar dos limitaciones principales: primero, la resistencia del hormigón debe ser suficiente para mantener el peso de las capas posteriores sin deformaciones apreciables y segundo, la unión y adherencia entre las capas debe asegurar la construcción de componentes monolíticos.

Estas limitantes dependen fuertemente del intervalo de tiempo entre dos capas extruidas una arriba de otra, lo que genera una paradoja en cuanto a la velocidad de producción del proceso. El intervalo de tiempo debe ser lo suficientemente largo para proporcionar una resistencia adecuada, capaz de soportar el peso de las capas posteriores y también lo suficientemente corto para asegurar una adherencia óptima entre las capas. Por lo tanto, parece ser que el rango de tiempo óptimo entre capas debe ser el más corto que permita una adecuada rigidez de la capa. Tal optimización de tiempo permitiría una mayor adherencia y mayor velocidad de construcción compatible con una estructura de hormigón fresco estable.

En cuanto a la primera limitación de la edificabilidad, una mezcla con una adecuada calidad de extrusión produce una capa sin deformaciones debido al peso propio. Sin embargo, el peso de las capas posteriores y la presión de extrusión podrían conducir a deformaciones indeseables, por tal motivo, es importante mencionar que la calidad de extrusión aceptable no garantiza la primera limitación de edificabilidad. Esto genera una gran importancia a las pruebas de laboratorio en cuanto a la edificabilidad durante la etapa de diseño de mezcla [20].

La capacidad de las capas extruidas para sostener su propio peso y de las posteriores antes del fraguado, está vinculada a su reología, en específico a su límite elástico [39]. Durante la construcción capa a capa, la primera capa se somete a la carga más pesada y por ende el límite elástico debe ser suficiente para mantener esta carga. Investigaciones realizadas [39, 40] mencionan que el límite elástico aumenta con el tiempo en ausencia de agitación y esfuerzo de corte, que se debe a la nucleación de los granos de cemento en su punto de contacto por la formación de C-S-H (Silicato de calcio hidratado) durante el periodo de latencia antes del tiempo de fraguado [41]. Además, este aumento del límite elástico en el tiempo, según diversos autores [39, 40, 42], es de forma lineal durante el periodo de latencia, lo que sugiere una posibilidad de que la capacidad de las capas para sostener la carga también tenga un comportamiento lineal en el tiempo.

La segunda limitante de la edificabilidad, que habla de la unión y adherencia entre las capas, puede ser una debilidad en una estructura impresa a diferencia de los métodos convencionales, por lo que también requiere un estudio particular. T.T.Le et al [43] en un estudio sobre las propiedades endurecidas del hormigón de impresión, investigaron la influencia del rango de tiempo entre capas consecutivas con respecto a la fuerza de unión mecánica de las capas. Los resultados indicaron que un intervalo de tiempo más largo conduce a una menor resistencia de la unión, lo cual es indeseable en términos de propiedades estructurales de la estructura o elemento impreso. Esto significa la importancia de reducir el intervalo de tiempo entre capas, con el fin de minimizar la pérdida de fuerza de adhesión, sin embargo, esto es practico sólo si las capas depositadas poseen la capacidad de resistir las cargas de las capas superiores. Idealmente, una capa extruida debería ser capaz de resistir la carga de las siguientes capas inmediatamente después de su extrusión, lo que significa una mínima deformación cuando el intervalo de tiempo es cero.

La trabajabilidad en consecuencia es un parámetro importante para la edificabilidad, que implica conocer los parámetros reológicos del hormigón para establecer los requisitos específicos que tiene que tener la mezcla de impresión. Por otro lado, el tiempo abierto también es una propiedad que está relacionada con la edificabilidad, en particular, con el intervalo de tiempo entre capas consecutivas, donde un tiempo abierto óptimo largo ayudaría con la adherencia entre capas y un tiempo abierto óptimo corto ayudaría a disminuir la deformación de las capas.

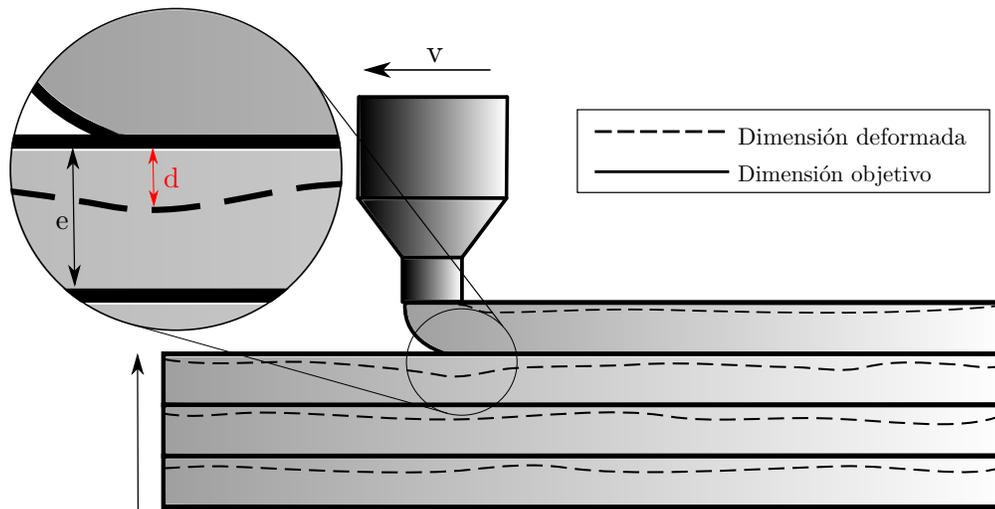


Figura 3.5: Esquema de construcción en capas, donde se muestra la deformación debido al peso propio, peso de las capas superiores y presión de la extrusión.

Como se puede observar y entender de estas cinco propiedades, es que ellas están muy relacionadas entre sí (figura 3.6), por lo cual, es importante poder conocer estas relaciones para poder optimizar el proceso y mezcla. Para comenzar, es necesario tratar de maximizar o minimizar diferentes parámetros, por ejemplo, es necesario maximizar la fluidez de la mezcla para no tener problemas de extrudabilidad, pero que asegure la extrusión de una capa continua, que cumpla con los tres requisitos para obtener una calidad de extrusión aceptable. Además, para mantener una buena extrudabilidad en el tiempo, es necesario maximizar el tiempo abierto óptimo, de lo contrario, el material rápidamente se volvería más rígido cau-

sando problemas en el sistema de extrusión. En cuanto a la edificabilidad, se debe minimizar el intervalo de tiempo entre capas o maximizar el tiempo abierto óptimo para una adecuada adherencia y formar componentes monolíticos, pero tratando de maximizar el número de capas con una mínima deformación.

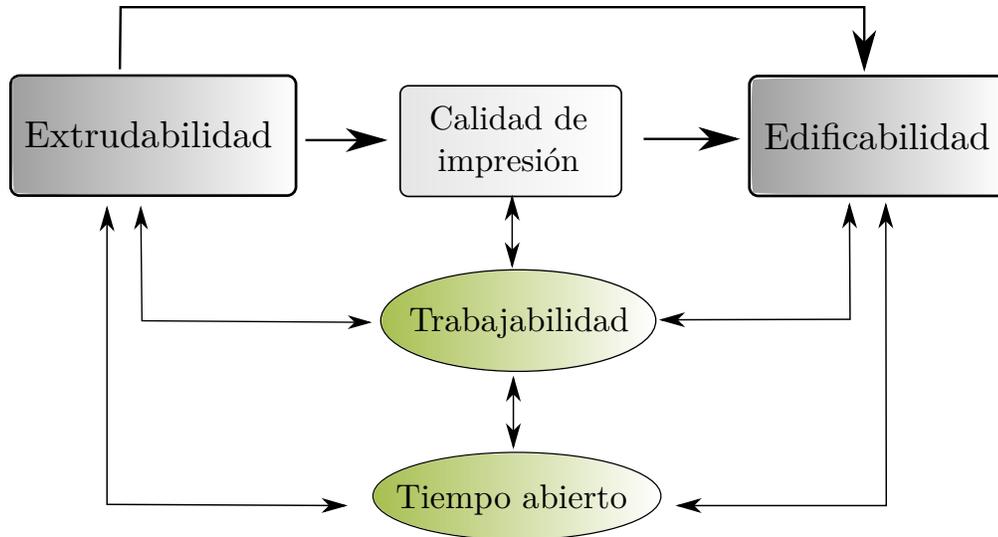


Figura 3.6: Esquema de las propiedades en estado fresco.

# Capítulo 4

## Ensayos

Un proceso óptimo y aceptable de la impresión 3D, requiere en términos generales, que el funcionamiento de la máquina y el comportamiento del material sean adecuados. Por tal motivo, es fundamental la realización de una gran cantidad de ensayos experimentales para las correctas calibraciones en cuanto a la máquina (velocidad de impresión, velocidad de extrusión, dimensiones de capa, etc.) y en cuanto al material (componentes, diseño, dosificación, etc.), con el fin de cumplir con los objetivos determinados previamente.

Como ya se ha mencionado en reiteradas ocasiones, la presente investigación tiene como objetivo caracterizar sólo uno de los componentes del proceso de impresión 3D, es decir, la caracterización del material de impresión. Por tal razón, en este capítulo se expondrán y propondrán los principales ensayos que se deben realizar para caracterizar el material de impresión y se dejarán de lado los ensayos relacionados con las técnicas de impresión, donde los parámetros serán determinados a partir de la revisión bibliográfica. En particular, se propondrán ensayos para caracterizar las propiedades en estado fresco descritas en el capítulo 3, es decir, sobre la extrudabilidad, calidad de extrusión, trabajabilidad, tiempo abierto y edificabilidad.

Es importante mencionar que, si bien esta investigación no es de carácter experimental, se pretende entregar una serie de antecedentes y ensayos para la realización futura de experimentos.

Para la realización de los ensayos propuestos en este capítulo, se confeccionó una máquina de pruebas en paralelo. Por tal motivo, los ensayos descritos están limitados a las características de esta máquina de pruebas, es decir, al espacio de impresión, sistema de extrusión, suministro, etc.

## 4.1. Trabajabilidad

En el capítulo 3, la trabajabilidad se determinó como una propiedad crítica y clave en las demás propiedades frescas del hormigón de impresión, por lo cual el control de esta es fundamental para tener un correcto funcionamiento de la máquina y un correcto comportamiento de la mezcla.

La trabajabilidad es una propiedad compuesta y como tal, no puede ser determinada por un sólo parámetro. No existen métodos que midan la trabajabilidad de la forma en que se define, pero los métodos que se usan generalmente pueden ayudar a caracterizar diferentes parámetros de la trabajabilidad, como la prueba de asentamiento, factor de compactación, prueba de flujo, entre otros.

Para una mezcla de impresión, los métodos convencionales no son suficientes, debido a que no miden las propiedades físicas fundamentales, además de que las mezclas frescas de un hormigón de impresión tienen características particulares, como lo es su elevada fluidez. La prueba convencional que más puede representar la trabajabilidad de una mezcla de impresión sería la prueba de fluidez [44], tal como lo propone Zeina et al [23] en un estudio de un hormigón de impresión. En esta prueba, el hormigón se extiende desde un cono invertido y se mide el tiempo en que la mezcla alcanza un diámetro específico, con el fin de obtener la velocidad de flujo.

Tal como se mencionó en las propiedades de una mezcla de impresión, un estudio reológico del hormigón sería más representativo. Banfill [45] menciona que las características de trabajabilidad de los hormigones se definen por dos constantes, que son la fluencia inicial y la viscosidad, lo cual supone un comportamiento de Bingham. Estas características pueden ser medidas con un reómetro particular, como lo es la prueba de dos puntos de Tattersall [34], el primer reómetro rotacional comercialmente disponible para el hormigón, en el cual un impulsor helicoidal gira a velocidades controladas en un recipiente cilíndrico de hormigón fresco y se analiza el comportamiento según el torque inducido. Otro estudio [35] menciona soluciones para el mortero, que se acerca más al hormigón de impresión debido a que no tiene agregado grueso, en este, Banfill describió el uso de Viskomat como un pequeño mezclador calibrado para pruebas de mortero [46]. Pero, la utilización de estos métodos conlleva varias dificultades, principalmente en la complejidad y calibración, además de que no pueden ser realizados in situ.

Austin et al [24] en un estudio sobre el hormigón proyectado, examinó el rendimiento de una gran cantidad de morteros utilizando métodos como el Viskomat, prueba de dos puntos de Tattersall, prueba de asentamiento, una prueba de resistencia al corte, entre otros, para formar una auditoría reológica de cada uno de ellos. Entre estos métodos destaca la prueba de resistencia al corte de paleta, la cual es una forma modificada de la prueba de paleta de corte para suelos de la British Standards Institution [47], que es un método que determina in situ la resistencia al corte de suelos intactos débiles cohesivos usando una paleta de sección cruciforme, que está sujeta a una llave de torsión para medir el máximo torque, el cual mediante una calibración puede ser usado para calcular la resistencia al corte. El cálculo de la resistencia al corte  $\tau$  (kpa) [47], se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{M}{K}$$

Donde:

$M$ : Torque para cortar el suelo (en  $N \cdot m$ ).

$K$ : Constante que depende de las dimensiones y forma de la paleta.

$$K = \pi \frac{d^2 h}{2} \left(1 + \frac{d}{3h}\right) 10^{-6}$$

Donde:

$d$ : Ancho medido de la paleta (en mm).

$h$ : Altura medida de la paleta (en mm).

Este método modificado de paletas de corte se determinó como un aparato simple, de bajo costo y portátil que podría dar una lectura instantánea e in situ de parámetros reológicos para caracterizar la trabajabilidad en varios puntos del proceso. T.T.Le et al [21] en su investigación de un hormigón de impresión, adoptó este método y caracterizó la trabajabilidad en términos de resistencia al corte, con el cual logró establecer relaciones con las otras propiedades de impresión 3D en hormigón. De forma esquemática se presenta la siguiente figura 4.1 del método de paletas de corte.

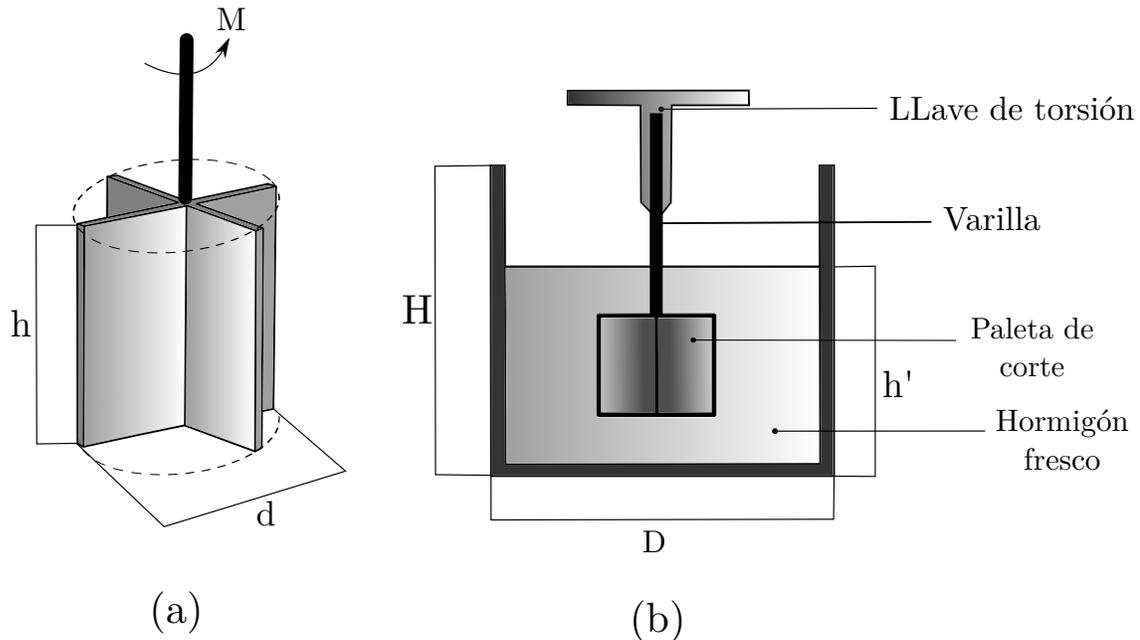


Figura 4.1: Esquema del aparato de paletas de corte

Finalmente, mencionaremos un posible método actual, avanzado, digital, con software integrado, de fácil operación, con mediciones rápidas y portátil, pero de muy elevado costo, para caracterizar la trabajabilidad en términos reológicos con parámetros fundamentales, como el límite elástico estático, límite elástico dinámico y viscosidad plástica del hormigón, hablamos del reómetro ICAR (figura 4.2) de la empresa Germann Instruments [48], que se dedica al campo de los sistemas de prueba para la investigación no destructiva in situ de estructuras de hormigón armado. El instrumento se compone por un contenedor cilíndrico, que además tiene una serie de barras verticales alrededor del perímetro para evitar el deslizamiento del hormigón a lo largo de la pared del contenedor durante la prueba. Este contenedor es llenado con hormigón fresco hasta una cierta altura y luego se introduce una paleta cruciforme, que se conecta por medio de una varilla a un cabezal de impulsión que incluye un motor eléctrico y un medidor de torque, que esta sostenido por un marco que se ajusta al contenedor.



Fuente: Germann Instruments [48].

Figura 4.2: Fotografías del reómetro ICAR.

Este método se basa en el descubrimiento de Tattersal [24] el cual establece una relación del torque y la velocidad de giro con la resistencia al corte y la tasa de corte respectivamente. Tattersal menciona que cuando el torque  $T$  se traza frente a la velocidad  $N$  para los resultados decrecientes, la relación era casi lineal (figura 4.3), de igual forma que el modelo de Bingham, por lo que  $g$  se relaciona al límite elástico dinámico y  $h$  a la viscosidad plástica.

$$T = g + h \cdot N$$

De esta forma, el reómetro ICAR puede calibrar de forma computarizada utilizando un software integrado los valores de  $g$  y  $h$ , para entregar los valores de los parámetros reológicos fundamentales (Límite elástico y viscosidad). Con este instrumento se pueden realizar dos tipos de pruebas:

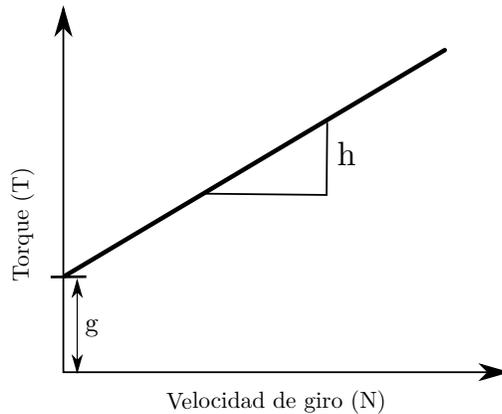


Figura 4.3: Gráfico de torque vs velocidad de giro.

**1. Crecimiento de tensión:** En esta prueba, la paleta se gira a una velocidad lenta y constante (0,025 rev/s), con lo que se puede realizar un gráfico de torque en función del tiempo, donde el torque máximo medido durante esta prueba se utiliza para calcular el límite de fluencia estático.

**2. Curva de flujo:** Esta prueba se utiliza para calcular el límite elástico dinámico y la viscosidad plástica. Para realizar esta prueba, primero se comienza por la “descomposición” de la mezcla, que se refiere a la ruptura de cualquier estructura tixotrópica y para esto se gira la paleta a gran velocidad. Luego, la velocidad de paleta se reduce en un número específico de pasos, durante cada paso la velocidad de paleta se mantiene constante y se registran la velocidad de giro y el torque promedio. El gráfico del torque frente a la velocidad de la paleta define la curva de flujo, con la cual se calculan los parámetros de Bingham.

## 4.2. Extrudabilidad

Como se indicó en el capítulo 2, la extrudabilidad depende fuertemente de las características de la mezcla impresión, pero también influyen las características del sistema de extrusión, como lo es el mecanismo de flujo y boquilla. Un mecanismo de flujo que no tenga la suficiente fuerza para extruir el material podría reducir el número de posibilidades de mezclas aptas para ser extruidas, o una boquilla con dimensiones relativamente pequeñas podría generar el bloqueo en el sistema. En esta ocasión, el ensayo que será propuesto tiene como objetivo ser aplicado a diferentes sistemas de extrusión y por tal razón, este se centrará en las características del material y no en el funcionamiento del sistema, donde los parámetros como velocidad de extrusión, velocidad de impresión, dimensiones de boquilla, etc., serán fijos en cada ensayo y sólo se irá modificando la mezcla de impresión.

El ensayo consiste en extruir una forma cuadrada de una sola capa (Con velocidades de impresión, extrusión y dimensiones de capa establecidas previamente) tal como se muestra en la figura 4.4 y evaluar con indicaciones muy prácticas de aceptación, en términos de bloqueo, obstrucción, cambio en la velocidad de flujo y extrusión incompleta de la forma cuadrada. Es decir, mezclas que produzcan alguno de los problemas mencionados serán descartadas o

modificadas hasta cumplir con la extrudabilidad.

La trabajabilidad de la mezcla es el parámetro clave para caracterizar la extrudabilidad, esta nos indicará en qué nivel se debe encontrar para que se cumpla esta propiedad adecuadamente. Por tal motivo, es importante caracterizar la trabajabilidad de cada mezcla antes de realizar el ensayo de extrudabilidad.

En el caso de utilizar el aparato de paletas de corte para caracterizar la trabajabilidad, un elevado valor de corte indicará que el material es más rígido y por ende probablemente tendrá mayores problemas para ser extruido, causando un bloqueo o disminución notoria de la velocidad del flujo. Por otro lado, una resistencia al corte relativamente baja, puede ser un indicador de una elevada fluidez que probablemente producirá una mezcla segregable, que podría bloquear al sistema de extrusión. En este caso, el valor máximo de corte permitido será el más importante en la extrudabilidad, este nos indicará el límite superior en términos de la resistencia al corte para un correcto proceso de impresión.

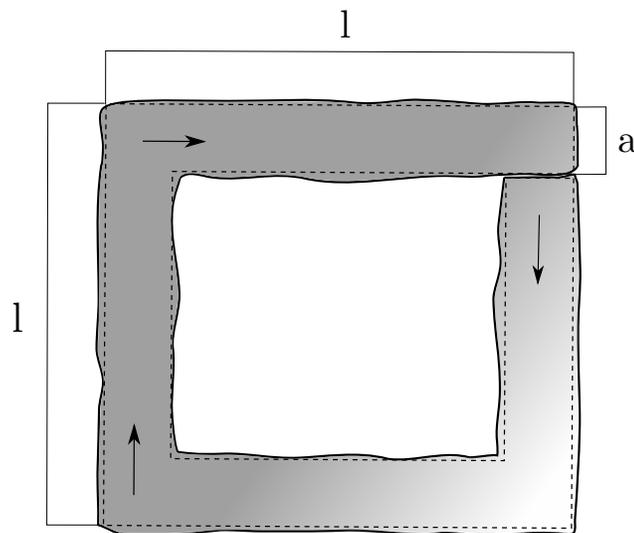


Figura 4.4: Esquema del ensayo de extrudabilidad.

La forma elegida en el ensayo responde a la necesidad de conocer cómo se comporta la mezcla cuando se hacen cambios de trayectoria y además de representar formas típicas en la construcción de elementos impresos en 3D

### 4.3. Calidad de extrusión

El ensayo de la calidad de extrusión está muy relacionado al de extrudabilidad, debido a que, para tener una buena calidad de extrusión, antes se debe tener una óptima extrudabilidad.

El ensayo consiste en extruir una forma cuadrada de una sola capa (al igual que el ensayo anterior) y visualizar la capa impresa utilizando dos cámaras (vista frontal y vista en planta),

para evaluar con indicaciones de aceptación cualitativas y cuantitativas la calidad superficial, conformidad dimensional y estabilidad dimensional.

Se utilizará ImageJ [49], un programa de procesamiento de imagen digital escrito en Java, que se puede encontrar de forma gratuita. Con este programa se podrá medir el ancho y espesor de capa de forma simple y precisa. Es importante colocar una regla al lado de las capas para tener una referencia en las mediciones.

En primer lugar, se evalúa con indicaciones prácticas de aceptación la calidad superficial de la capa (agrietamiento, segregación, huecos, etc.) para aceptar o rechazar la impresión, por ejemplo, una capa con demasiadas grietas o fisuras indicarían un posible rechazo de la impresión. Luego, utilizando el programa ImageJ se miden el ancho y espesor de la capa para evaluar la conformidad y estabilidad dimensional. Para el ancho se utilizará la vista en planta, donde se elige un lado de la forma cuadrada impresa, la cual se divide en  $n$  partes para luego ser medidas y determinar si son aceptables o no a partir del error permitido, por ejemplo, si el ancho de capa de diseño es de 40 mm y el error permitido es del 10 %, entonces el rango aceptable de ancho es de 40-44 mm. En la figura 4.5 (a) se muestra a modo de ejemplo una división de 4 partes del lado inferior de la forma cuadrada impresa (a1, a2, a3 y a4). Finalmente, para el espesor se utilizará la vista frontal y se realizará el mismo procedimiento anterior (figura 4.5 (b)).

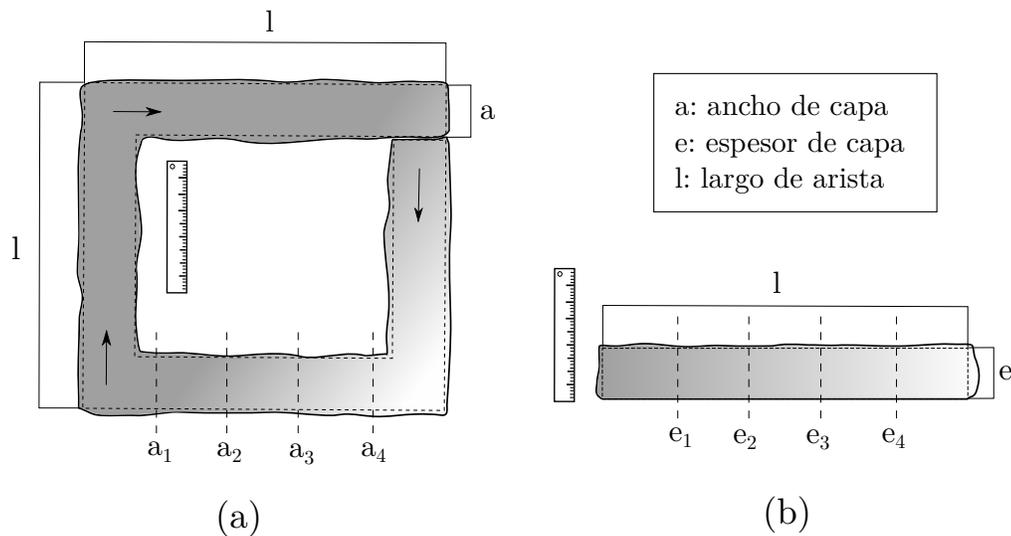


Figura 4.5: Esquema de ensayo de calidad de extrusión, vista en planta y frontal.

La trabajabilidad nuevamente será el parámetro para caracterizar los rangos límites aceptables de la calidad de extrusión, debido a que se requiere que la mezcla se encuentre en un nivel que permita una estabilidad adecuada de la capa impresa y minimizar las deformaciones. Se requiere caracterizar la trabajabilidad antes de realizar el ensayo.

Utilizando el aparato de paletas de corte se puede determinar el valor mínimo para que se acepte la calidad de extrusión, valores de corte por debajo de este, podrían indicar que el material es demasiado fluido o húmedo, causando la deformación de las capas y el rechazo de estas.

## 4.4. Tiempo abierto

El tiempo abierto se definió anteriormente como el cambio de la trabajabilidad en el tiempo y por tal razón es importante para caracterizar la trabajabilidad en diferentes momentos del proceso.

Como ya se ha señalado, existen variados métodos para medir la trabajabilidad, y por ende, el tiempo abierto. Algunos por ejemplo utilizan mini conos de asentamiento en diferentes tiempos u otros como Zeina et al [23] que caracterizan el tiempo abierto utilizando la prueba de flujo para obtener la fluidez en intervalos de tiempo específicos. En esta ocasión, como se viene mencionando reiteradas veces, caracterizar la trabajabilidad mediante la reología de la mezcla es más informativo.

El ensayo consiste en caracterizar la trabajabilidad de la mezcla en variados intervalos de tiempo, por ejemplo, cada 10 minutos, y obtener con una adecuada interpolación, un gráfico de la trabajabilidad vs tiempo, el cual será muy útil para caracterizar la mezcla y entregar información para las demás propiedades. Además, con estos datos y con los valores de los límites de extrudabilidad y calidad de impresión, se puede entonces determinar el tiempo abierto óptimo, el cual se había definido como el tiempo en que la trabajabilidad se encuentra en un nivel en que se mantiene la extrudabilidad y calidad de extrusión.

Utilizando el aparato de paletas de corte para caracterizar la trabajabilidad, se puede medir la resistencia al corte en diferentes tiempos y obtener un gráfico de la resistencia al corte vs tiempo tal como lo hace T.T.Le [21], en el cual se puede determinar el tiempo abierto óptimo.

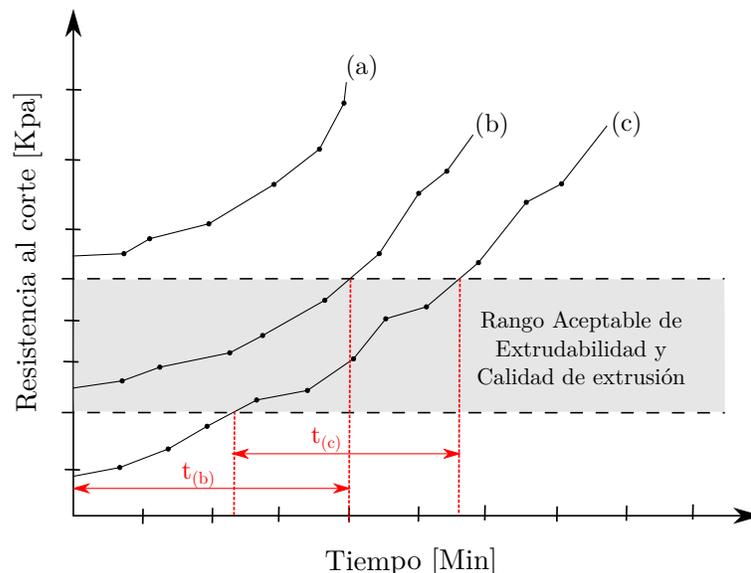


Figura 4.6: Gráfico de resistencia al corte vs tiempo.

En la figura 4.6, se puede observar una mezcla con diferentes dosificaciones de superplastificantes (a), (b) y (c) y por lo tanto distinta trabajabilidad, la cual es caracterizada con la resistencia al corte, donde generalmente comienzan a aumentar en el tiempo debido a que la

mezcla comienza a ganar resistencia. Se observa que la mezcla con una dosificación ( $a$ ) tiene una resistencia al corte inicial por sobre el rango determinado, por lo que no se podrá calcular el tiempo abierto óptimo según la definición entregada, esta mezcla podría experimentar bloqueos en el sistema de extrusión. La mezcla con una dosificación ( $c$ ), tiene una resistencia al corte inicial por debajo del rango óptimo, es decir, una mezcla demasiado fluida que puede generar bloqueo en el sistema de extrusión o principalmente no tener una buena calidad de extrusión, donde se pueden encontrar secciones transversales deformadas, aun así, se puede calcular el tiempo abierto óptimo  $t_{(c)}$  que es el tiempo que se demora en pasar por el rango óptimo. Finalmente, la mezcla con una dosificación ( $b$ ), cumple en que la resistencia al corte inicial esta en el rango aceptable, donde el tiempo abierto óptimo es  $t_{(b)}$ .

## 4.5. Edificabilidad

Para el ensayo de la edificabilidad, nos preocuparemos principalmente en la primera limitante de la edificabilidad, que se refiere a la resistencia de la capa impresa para soportar el peso de las capas posteriores sin deformaciones y se pondrá como objetivo, reducir el intervalo de tiempo entre capas consecutivas para una mejor adherencia, pero que permita la rigidez adecuada de la capa.

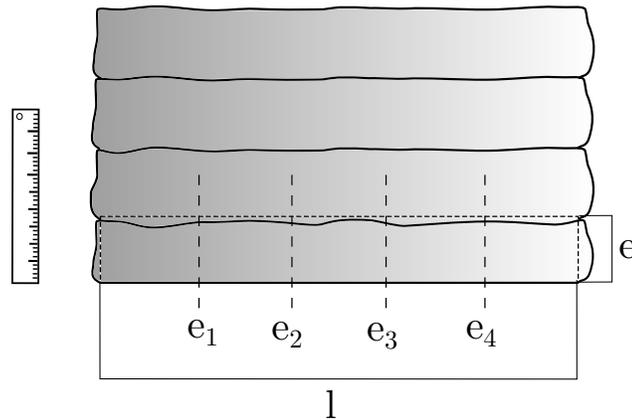


Figura 4.7: Esquema del ensayo de edificabilidad.

El ensayo consiste en extruir una capa lineal de largo  $l$  (figura 4.7) que se encuentre en el rango aceptable de extrudabilidad y calidad de extrusión y luego de un intervalo de tiempo  $T$ , se extruye la siguiente capa y se registra la deformación de la primera en términos de espesor, debido a que es la que recibe la mayor carga, y así consecutivamente capa a capa hasta lograr el máximo número posible sin que se sobrepase la deformación máxima permitida (determinada a partir de una gran cantidad de ensayos) o que se genere el colapso. Para determinar la deformación de la primera capa, se utilizará una cámara y el programa ImageJ tal como se hizo en el ensayo de calidad de extrusión y se medirá la deformación en diferentes secciones de la capa. Además, el intervalo de tiempo  $T$  se debe ir variando desde el menor tiempo ( $T = 0$ ) a un mayor tiempo a medida que se requiera.

# Capítulo 5

## Mezcla de impresión

Luego de que se conocen las propiedades críticas y más importantes del estado fresco de una mezcla, junto con los ensayos propuestos para un correcto funcionamiento del proceso de impresión 3D, se debe proceder a diseñar una mezcla que sea capaz de cumplir con todos los requisitos establecidos.

Si bien, en este capítulo no se entregará el diseño de una mezcla óptima para el sistema de impresión 3D, se entregarán una serie de antecedentes en cuanto a los componentes principales y más utilizados en una mezcla de hormigón, junto con sus características, dosificaciones, relación con las propiedades críticas, entre otros. Estos fueron seleccionados de la revisión bibliográfica de investigaciones de hormigones de impresión, al menos para tener un diseño de mezcla inicial (punto de partida) para la posterior optimización del diseño de mezcla.

Finalmente, se propondrá un protocolo de ensayo para encontrar el diseño de mezcla óptima, utilizando las propiedades y ensayos mencionados en esta investigación. Según los alcances de este trabajo de título, el material a utilizar es el hormigón, pero el protocolo propuesto podrá ser utilizado y replicado para otro tipo de materiales.

### 5.1. Diseño de mezcla

En este capítulo, el diseño de mezcla estará limitado a componentes conocidos de las mezclas de hormigón, pero esto no quiere decir que sean los únicos componentes que se pueden utilizar en el proceso de impresión, en diversos estudios ya se están evaluando otro tipo de materiales con otras características y propiedades, que podrían ser aún más beneficiosos para este tipo de tecnologías.

Antes de comenzar, es importante mencionar que, para el diseño de mezcla, el estudio se basó en gran parte de los hormigones autocompactantes y proyectados, que son los que más se acercan a un hormigón de impresión, los cuales nos entregarán los primeros indicios para obtener un adecuado diseño de mezcla.

El cumplimiento de las propiedades críticas en estado fresco, están fuertemente influenciadas por los componentes, proporciones y aditivos de una mezcla. Por tal razón, la elección de estos y las correctas dosificaciones, son de suma relevancia e importancia.

A continuación, se proponen y presentan los principales materiales constituyentes que pueden ser utilizados en una mezcla de hormigón para la impresión 3D:

**Cemento:** Principalmente utilizan cementos de alta resistencia, que por lo general son más finos. Estos cementos de gran finura reducen la trabajabilidad y por ende necesitan mayor demanda de agua, pero se hidratan con mayor rapidez.

El cemento Portland es la opción más viable en métodos de impresión 3D, tal como lo hicieron diversas investigaciones [20, 21, 50].

Es recomendable que la mezcla óptima tenga la relación agua/cemento (a/c) más baja y que pueda cumplir con todos los estándares requeridos.

**Áridos:** Es importante seleccionar un tamaño de árido menor a los hormigones convencionales debido a la propiedad de extrudabilidad, por lo que es recomendable seleccionar áridos de un tamaño máximo cercano a 2 o 3 mm para que no ocurra bloqueo u obstrucción. Además, es importante determinar una cantidad adecuada de áridos, una elevada cantidad podría causar segregación de la mezcla, provocando una mala extrudabilidad.

**Adiciones:** Podrían ser de gran ayuda la inclusión de algunos aditivos como el humo de sílice y las cenizas volantes.

-Humo de sílice: adición especialmente utilizada para hormigones de alta resistencia, es un material de alta reactividad, extremada finura y alto contenido de dióxido de silicio, lo que permite la eliminación de porosidad (mejora en la calidad de extrusión), mejora la cohesión del hormigón fresco, aumenta la resistencia, mejora la impermeabilidad del hormigón endurecido y aumenta la durabilidad.

-Cenizas volantes: adición utilizada por razones económicas debido a que se reduce el contenido de cemento y por los cambios microestructurales, que generan un hormigón más compacto y una reducción del tamaño medio del poro (calidad de extrusión).

**Fibras de polipropileno:** Las fibras de polipropileno para el uso en morteros y hormigones se recomiendan en aplicaciones horizontales y verticales, las cuales principalmente reducen las fisuras por retracción plástica y por secado durante el periodo de fraguado y otorgan un refuerzo tridimensional, reduciendo la deformación en estado plástico (mejora en la edificabilidad y calidad de extrusión). Esto es muy importante para la impresión de hormigón, ya que se anticipa una mayor tasa de evaporación de agua para un elemento impreso, dado que no hay encofrado que cubra la superficie de los elementos recién impresos.

**Agua:** El contenido de agua debe tratar de ser el mínimo para que la mezcla tenga una mayor resistencia. El uso de superplastificantes podría ser beneficioso.

**Aditivos:** El rol de los aditivos en una mezcla de impresión es fundamental, ya que gracias a ellos se podrán hacer los ajustes pertinentes para responder a las propiedades críticas del hormigón de impresión.

-Superplastificante: utilizado principalmente para aumentar la trabajabilidad o reducir el contenido de agua de la mezcla y aumentar la resistencia. Su uso es fundamental para responder a la propiedad de extrudabilidad, sin embargo, su uso excesivo podría afectar la propiedad de edificabilidad y calidad de extrusión.

T.T.Le et al [21] en su experimentación determinó un decaimiento exponencial de la resistencia al corte (trabajabilidad) de una mezcla en función de la dosificación de superplastificante.

-Retardante: utilizado para retrasar el inicio del fraguado. En términos de trabajabilidad, el retardante es utilizado para mantener su nivel en un mayor tiempo. Su uso es fundamental para aumentar el tiempo abierto óptimo de la mezcla y aumentar el tiempo en que se logra una buena adherencia entre capas.

El comportamiento de la trabajabilidad en términos de resistencia al corte en función de la dosificación de retardante muestra una disminución lineal [21].

-Acelerante: utilizado para acortar el inicio del fraguado. Su uso podría ser útil para regular la edificabilidad de la mezcla, debido a que podría acelerar el proceso de ganancia de resistencia. Algunas investigaciones proponen utilizar este aditivo justo antes de extruir una capa.

El comportamiento de la resistencia al corte (trabajabilidad) presenta un aumento cuadrático en función de la dosificación de acelerante [21].

A continuación, la tabla 5.1 muestra diferentes diseños de mezcla recopilados de la revisión bibliográfica, que pueden ser utilizados para el diseño de mezcla inicial para la posterior optimización, además se agrega el diseño de muestra de un hormigón convencional.

Tabla 5.1: Revisión bibliográfica de mezclas de impresión.

Diseño de Mezcla	Hormigón Convencional	T.T.Le et al [21]	Contour Crafting	Ali Kazemian et al [20]	Zeina Malaeb [23]
<b>Cemento</b>	~10-15 % de la mezcla	Cemento CEM tipo I 52,5 ~25 % de la mezcla ~70 % en peso de aglutinante	Cemento Portland tipo II ~30 % de la mezcla	Cemento Portland ASTM C150 tipo II ~25-28 % de la mezcla	Cemento tipo I ~30 % de la mezcla
<b>Humo de Sílice</b>	-	Humo de Sílice no densificado ~10 % del peso de aglutinante	-	Humo de Sílice densificado ~2-3 % de la mezcla	-
<b>Cenizas volantes</b>	-	~20 % del peso de aglutinante	-	-	-
<b>Áridos</b>	~65-75 % de la mezcla	Arena de tamaño máximo 2 mm ~54 % de la mezcla	Arena ~41 % de mezcla	Arena de tamaño máximo 2,36 mm ~59 % de la mezcla	Agregado de tamaño máximo 2 mm ~58 % de la mezcla
<b>Agua</b>	~15-20 % de la mezcla	~10 % del peso de la mezcla	~19 % de la mezcla	~10-12 % de la mezcla	~11 % de la mezcla
<b>Superplastificante</b>	-	~1 % en peso de aglutinante	~3 % de la mezcla	Superplastificante a base de policarboxilato (HRWRA) ~0,05-0,16 % en peso de aglutinante	Superplastificante Viscocrete ~0,8 % del peso de cemento
<b>Retardante</b>	-	~0,5 % en peso de aglutinante	-	-	~0,5 % del peso de cemento
<b>Acelerador</b>	-	-	-	Acelerador basado en Cloruro de calcio ~1-3 % en peso de cemento	~0,8 % del peso de cemento
<b>Modificador de viscosidad</b>	-	-	-	Modificador de viscosidad (VMA) ~0,1 % del peso de aglutinante	-
<b>Fibras de polipropileno</b>	-	Fibras de 12 mm de longitud y 0,18 de diámetro ~1,2 kg/m <sup>3</sup>	-	Fibras de 6 mm de longitud y resistencia a la tracción de 415 MPa ~1,18 kg/m <sup>3</sup>	-
<b>Arcilla</b>	-	-	-	Arcilla de atapulgita (en caso de no utilizar fibras) ~0,3 % del peso de aglutinante	-
<b>Proporciones</b>	agua/cemento =~0,5	agua/aglutinante ~0,26	agua/cemento =~0,5	agua/aglutinante =~0,43	agua/cemento =~0,39
<b>Resistencia a compresión</b>	~30 MPa para un hormigón H30	~110 MPa a 28 días	~18,9 MPa	~45-50 MPa a 28 días	~42 MPa
<b>Resistencia a flexión</b>	~4 MPa para un hormigón HF4	~12 MPa a los 28 días (Resistencia objetivo)	-	-	-

## 5.2. Protocolo de Ensayo Propuesto

Este protocolo propuesto comprende los procedimientos para encontrar la mezcla óptima para ser usada en un proceso de impresión 3D, utilizando la información entregada en esta investigación y la máquina de ensayos construida en paralelo a este trabajo de título.

Se dejarán sugeridas una serie de mezclas a ensayar, pero como mencionamos anteriormente, se pueden probar diferentes mezclas, con otros componentes y dosificaciones.

### 5.2.1. Equipos y materiales

Los equipos y materiales utilizados en este procedimiento son:

- **Equipo para determinar la trabajabilidad de una mezcla:** se pueden utilizar dos de los métodos mencionados en el capítulo 4, pero en esta ocasión se utilizará el método modificado de paletas de corte, en el cual, la trabajabilidad es caracterizada en términos de la resistencia al corte.
- **Máquina de ensayos:** utilizada para realizar los ensayos de extrudabilidad, calidad de extrusión y edificabilidad. Esta máquina fue construida en paralelo a este trabajo de título.
- **Mezcladora de material:** utilizada para mezclar los componentes y homogeneizar la mezcla. En lo posible una betonera de hormigón, en caso contrario, utilizar otro instrumento para mezclar.
- **Pala o cuchara cilíndrica:** utilizada para introducir la mezcla en el extrusor de la máquina de ensayos.

### 5.2.2. Mezclas de prueba

Antes de comenzar a realizar cualquier procedimiento, es necesario definir y diseñar una serie de mezclas iniciales. Estas mezclas serán el punto de partida para la posterior optimización y ajuste.

**Componentes:** Seleccionar los componentes de la mezcla con sus respectivas características y especificaciones. Indicarlos en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Componentes seleccionados.

Componente		Especificaciones
<b>Aglutinantes</b>	<i>Cemento</i>	<i>Cemento BIO BIO, Portland Puzolánico, grado Alta Resistencia.</i>
<b>Áridos</b>	<i>Arena</i>	<i>ARENEX, Agregado pétreo de tamaño entre 1,2 y 0,6 mm.</i>
<b>Aditivos</b>	<i>Superplastificante</i>	<i>BAXI-FLUID 800, aditivo superplastificante de alto rango.</i>
	<i>Acelerante</i>	<i>SIKA ACELERANTE, acelerante de endurecimiento exento de cloruros.</i>
<b>Otros</b>	<i>Fibras</i>	<i>BAXI-FIBER P100, fibras de polipropileno monofilamento.</i>
<b>Agua</b>		

**Dosificaciones:** Con los componentes seleccionados se procede a definir las dosificaciones de la mezcla. Es recomendable generar al menos 5 mezclas con diferentes dosificaciones, para esto es necesario utilizar algún criterio (a elección propia) para variar las mezclas.

Por ejemplo, se podría mantener constante el contenido total de aglutinante y la relación agua/aglutinante [20] para variar el contenido de un nuevo componente e investigar su comportamiento, o para encontrar dosificaciones óptimas de algunos aditivos.

En esta ocasión, el criterio utilizado es dejar constante la proporción agua/aglutinante y variar las proporciones de arena y aglutinante. Además, los aditivos y otros componentes no se agregarán en las mezclas iniciales, ya que se utilizarán como ajuste para la posterior optimización.

Las dosificaciones de cada mezcla y la proporción agua/aglutinante deben ser registrados en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Dosificaciones de mezclas iniciales.

Componente	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
<i>Cemento</i>	<i>20 %</i>	<i>25 %</i>	<i>30 %</i>	<i>35 %</i>	<i>40 %</i>
<i>Arena</i>	<i>68 %</i>	<i>63 %</i>	<i>58 %</i>	<i>53 %</i>	<i>48 %</i>
<i>Agua</i>	<i>8 %</i>	<i>10 %</i>	<i>12 %</i>	<i>14 %</i>	<i>16 %</i>
<b>Proporción agua/aglutinante =</b>					<i>0,4</i>

### 5.2.3. Procedimiento

A continuación, se describe el procedimiento a realizar:

1. Se debe seleccionar una de las mezclas definidas en la tabla 5.3.
2. Agregar en una bentonera o mezcladora, los componentes con sus respectivas dosificaciones y mezclarlos aproximadamente entre 8 a 10 minutos para generar una mezcla homogénea.
3. Caracterizar el material, es decir, medir la **trabajabilidad** y el **tiempo abierto** de la mezcla. Para esto se selecciona una parte de la mezcla y se utiliza el equipo para medir la trabajabilidad. Los resultados son registrados en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Trabajabilidad y tiempo abierto de la mezcla.

Mezcla	Trabajabilidad		Proporción agua/aglutinante	Tiempo [min]				
	Aditivos	Otros		0	5	10	15	20
<i>1</i>	-	-	<i>0,4</i>					
<i>1.a</i>								
<i>1.b</i>								
<i>1.c</i>								

4. Encender y ajustar la máquina de ensayos para las pruebas que se describen a continuación:

**4.1 Extrudabilidad:** Se realiza el ensayo de extrudabilidad y se registra el comportamiento en términos de aceptación o rechazo (si/no) en la tabla 5.5.

En caso de que la mezcla es rechazada (posible obstrucción o bloqueo), se procede al ajuste, que puede ser mediante aditivos (p.ej. superplastificante) o modificando la cantidad de agua para que la mezcla sea más fluida. Cada ajuste debe ser registrado en la tabla 5.4 (*1.a, 1.b, 1.c, etc.*), indicando el aditivo, adición o cambio en la proporción agua/aglutinante, además de medir nuevamente la trabajabilidad y tiempo abierto. En el caso en que no se logre aceptar la mezcla con los ajustes, se elige otra mezcla de la tabla 5.3 y se vuelve al punto 1 del procedimiento.

Tabla 5.5: Ensayo de extrudabilidad.

Mezcla	Extrudabilidad (si/no)	Observaciones
<i>1</i>		
<i>1.a</i>		
<i>1.b</i>		
<i>1.c</i>		

Es recomendable encontrar el nivel de trabajabilidad en que la mezcla es rechazada (utilizando el aparato de paletas: resistencia al corte máxima permitida) para definir uno de los límites que determinan el tiempo abierto óptimo. Este valor puede ser determinado ajustando la mezcla mediante los aditivos.

**4.2 Calidad de extrusión:** En caso de que la mezcla es aceptada en el ensayo de extrudabilidad, se procede a realizar el ensayo de calidad de extrusión utilizando la misma capa del ensayo anterior. Se registra el comportamiento en términos de calidad superficial, conformidad y estabilidad dimensional.

Como se especificó en el capítulo 4, la calidad superficial se evalúa indicando posibles agrietamientos, segregación, huecos, etc., y la conformidad y estabilidad dimensional se evalúa según el ancho y espesor de la capa mediante el % de error permitido. Las dimensiones de la capa de diseño, el número de divisiones de la capa impresa y el % de error permitido, se registran en la tabla 5.6 y los datos del ensayo se registran en la tabla 5.7.

Tabla 5.6: Datos para el ensayo de calidad de extrusión.

<b>Ancho de diseño (a) [mm]</b>	<i>30</i>
<b>Espesor de diseño (e) [mm]</b>	<i>30</i>
<b>N° de divisiones</b>	<i>4</i>
<b>Error permitido [%]</b>	<i>10</i>

Tabla 5.7: Ensayo de calidad de extrusión.

Mezcla	Calidad superficial	Conformidad y estabilidad dimensional [mm]								Calidad de extrusión (si/no)
		$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	
<i>1</i>										
<i>1.a</i>										
<i>1.b</i>										
<i>1.c</i>										

En caso de que la mezcla es rechazada (mezcla muy fluida o segregable) se procede al ajuste, que puede ser mediante aditivos (p.ej. modificadores de viscosidad) o fibras, para ayudar a dar más cohesión o estabilidad tridimensional. Cada ajuste debe ser registrado en la tabla 5.4 (*1.a*, *1.b*, *1.c*, etc.), indicando el aditivo, adición o cambio en la proporción agua/aglutinante, además de medir nuevamente la trabajabilidad y tiempo abierto. En el caso en que no se logre aceptar la mezcla con los ajustes, se elige otra mezcla de la tabla 5.3 y se vuelve al punto 1 del procedimiento.

Es recomendable encontrar el nivel de trabajabilidad en que la mezcla es rechazada (utilizando el aparato de paletas: resistencia al corte mínima permitida) para definir uno de los límites que determinan el tiempo abierto óptimo. Este valor puede ser determinado ajustando la mezcla mediante los aditivos.

**4.3 Tiempo abierto óptimo:** En el caso de que se hayan determinado los límites de extrudabilidad y calidad de extrusión, entonces es posible determinar el tiempo abierto óptimo de la mezcla. Los resultados tienen que ser registrados en la tabla 5.8.

Este tiempo puede ser mayor utilizando retardantes, en el caso de que se tenga un tiempo muy corto.

Tabla 5.8: Tiempo abierto óptimo.

Mezcla	Límite extrudabilidad	Límite calidad de extrusión	Tiempo abierto óptimo
1 (1.a, 1.b, etc.)			
2			

**4.4 Edificabilidad:** Si la mezcla que cumple con los ensayos de extrudabilidad y calidad de extrusión, se procede a realizar el ensayo de edificabilidad. En este punto se debe tener en cuenta que el objetivo es construir el mayor número de capas con el menor intervalo de tiempo entre ellas. Los datos necesarios para realizar el ensayo se registran en la tabla 5.9 y los resultados del ensayo de edificabilidad se registran en la tabla 5.10.

Tabla 5.9: Datos para el ensayo de edificabilidad.

<b>Espesor de diseño (e) [mm]</b>	30
<b>N° de divisiones</b>	4
<b>Error permitido [%]</b>	10

Tabla 5.10: Ensayo de edificabilidad.

Mezcla	Intervalo de tiempo (T)	Espesor (e)	Capa							Colapso (si/no)
			1	2	3	4	5	6	7	
1	0	$e_1$								
		$e_2$								
		$e_3$								
		$e_4$								
1	10 [s]	$e_1$								
		$e_2$								
		$e_3$								
		$e_4$								

Finalmente, este procedimiento se repite para las otras mezclas, con el fin de tener una auditoría de mezclas con sus respectivas características y comportamiento en un proceso de impresión 3D.

# Capítulo 6

## Conclusiones

La impresión 3D en el mundo de la ingeniería Civil y Construcción, tiene un potencial enorme debido a la gran cantidad de beneficios. Entre ellos, una construcción de alta velocidad, una gran libertad de diseño, reducción de costos de materiales, reducción de la mano de obra, excelente calidad, disminución de accidentes, construcción eco-amigable, entre otros. Por tal razón, en un futuro próximo, este método de construcción podría reemplazar por completo los métodos convencionales que existen hoy en día. Sin embargo, para que ocurra este hecho, se tiene que enfrentar un cambio de mente para que se adopte, estudie e investigue fuertemente esta revolucionaria tecnología, la cual, aún está en desarrollo.

A pesar de que existen diferentes impresoras 3D en hormigón, de diferentes materiales, piezas, tamaños, etc., el funcionamiento a modo general es similar en la mayoría. Este se realiza en tres etapas principales: preparación de los datos, preparación del hormigón y la impresión del objeto o estructura. Además, finalmente todos se basan en el mismo principio: un modelo digital 3D se convierte en un objeto físico construido capa a capa.

En cuanto a la máquina de impresión, se estableció que esta se puede definir como un conjunto de sistemas principales, que son: sistema de suministro, sistema de extrusión y sistema de movimiento. Esos principales sistemas cumplen roles específicos en un proceso de impresión, pero finalmente responden a un fin común: Imprimir un objeto o estructura de hormigón.

Se determinó que la impresión 3D en hormigón se basa en cinco principales componentes: material, forma, técnica y fuerzas, los cuales están estrechamente relacionados y conectados, pero las relaciones son generalmente desconocidas. Es fundamental investigar detalladamente cada uno de los componentes, para luego estudiar las relaciones de estos de forma inteligente y eficiente, para ser evaluados y optimizados.

El estudio del hormigón convencional que se utiliza en la mayoría de las construcciones de hoy en día es fundamental para tener una idea inicial de las principales características de este material. Si bien, el hormigón de impresión tiene cualidades y características particulares, la mayoría de los componentes, propiedades y comportamiento, son similares.

El proceso de impresión considera que el material tiene que ser transportado por un sistema de suministro, luego tiene que pasar por el sistema de extrusión y finalmente, extruir el material capa a capa hasta completar el elemento diseñado. Para realizar este proceso, se determinaron cinco propiedades críticas y particulares en estado fresco que debe cumplir la mezcla, que son: extrudabilidad, calidad de impresión, trabajabilidad, tiempo abierto y edificabilidad.

La extrudabilidad se determinó como la capacidad que tiene una mezcla de impresión a pasar a través de los sistemas de suministro y extrusión, sin bloqueo u obstrucción, además de mantener una velocidad de flujo constante para extruir una capa continua fuera del sistema.

La calidad de impresión se definió como las propiedades que tiene una capa impresa, en cuanto a los requisitos de calidad superficial, conformidad y estabilidad dimensional.

La trabajabilidad resulto ser la propiedad más influyente, debido a que la mayoría de las propiedades se sustentan en el comportamiento de esta. Para caracterizar la trabajabilidad, fue útil realizar un estudio de la reología del hormigón, que es una gran opción para entregarle un enfoque cada vez más científico al comportamiento en estado fresco del hormigón y caracterizar las propiedades reológicas fundamentales que existen durante los procesos de transporte, mezcla, colocación y compactación. El comportamiento del hormigón se puede modelar como un cuerpo plástico de Bingham, que se define por dos parámetros fundamentales: Límite elástico y viscosidad plástica, que son valores muy importantes de estudiar. El control de la trabajabilidad es fundamental para tener un correcto funcionamiento de la máquina y un correcto comportamiento de la mezcla de hormigón.

El tiempo abierto es un parámetro que se debe considerar en el proceso de impresión, debido principalmente a las características del hormigón en el tiempo. Este se determinó como el cambio de la trabajabilidad en el tiempo. En particular, se definió el tiempo abierto óptimo como el tiempo en que la trabajabilidad se encuentra en un nivel en que se mantiene la extrudabilidad y calidad de extrusión.

La edificabilidad o capacidad de construcción es una propiedad clave de una mezcla de impresión, debido al particular método de construcción, que se realiza capa a capa. Esta se define como la capacidad que tiene el hormigón fresco a ser construido en un número considerable de capas, sin una deformación apreciable debido al peso propio, peso de las capas superiores y presión de la extrusión, además de asegurar una buena adherencia entre ellas para crear componentes monolíticos. El intervalo de tiempo entre las capas, resulto ser un valor crítico, por tal razón, se estableció que este tiempo debe ser el más corto que asegure una adecuada adherencia de capas, pero que permita la mayor cantidad de estas sin una deformación apreciable.

Estas cinco propiedades están relacionadas entre sí, por lo cual, es importante conocerlas y entenderlas para poder optimizar el proceso y mezcla. Es necesario maximizar la fluidez de la mezcla para una adecuada extrudabilidad, pero que asegure la extrusión de una capa continua, que cumpla con los tres requisitos de una calidad de extrusión aceptable. Además, para mantener una buena extrudabilidad en el tiempo, es necesario maximizar el tiempo abierto óptimo, de lo contrario, el material rápidamente se volvería más rígido causando problemas en el sistema de extrusión. En cuanto a la edificabilidad, se debe minimizar el

intervalo de tiempo entre capas o maximizar el tiempo abierto óptimo para una adecuada adherencia y formar componentes monolíticos, pero tratando de maximizar el número de capas con una mínima deformación.

Es fundamental la realización de una gran cantidad de ensayos experimentales para una correcta calibración de la máquina y de la mezcla de impresión. En este trabajo se determinaron y propusieron una serie de ensayos para una realización futura, en los cuales se caracterizan y estudian cada una de las propiedades críticas en estado fresco de una mezcla de impresión. En estos ensayos, resultó fundamental la caracterización de la trabajabilidad, en donde, si bien el ensayo más completo e informativo es el reómetro ICAR, el ensayo modificado de paletas de corte se determinó como un aparato simple, de bajo costo y portátil, que podría dar una lectura instantánea e in situ de la resistencia al corte para caracterizar la trabajabilidad en varios puntos del proceso.

Para encontrar una mezcla óptima capaz de ser usada en una máquina de impresión, se entregaron una serie de antecedentes en cuanto a los principales y más utilizados componentes de una mezcla, junto con sus características, dosificaciones, relación con las propiedades críticas, etc. Para luego, entregar una propuesta metodológica con la que se pueda encontrar el material óptimo. Es importante destacar, que todas las propiedades dependen de este diseño de mezcla, por tal motivo, la elección de los componentes y la correcta dosificación es fundamental.

Finalmente, hay que recalcar, que este trabajo de título es sólo la primera etapa de un gran proyecto e investigación. Debido a que aún se necesita un extenso estudio de los otros componentes de la impresión (p.ej. formas impresas y técnicas) y de algunas propiedades del hormigón de impresión (p.ej. propiedades en estado endurecido). Además de una gran cantidad de ensayos experimentales para corroborar la teoría. Por tal razón, se deja propuesta la continuación de esta investigación, para un desarrollo claro y de peso en este particular método de construcción: la impresión 3D, la cual, algún día podría reemplazar los métodos convencionales de construcción.

# Bibliografía

- [1] Universidad de Eindhoven. Disponible: <https://www.tue.nl>. Diciembre de 2017.
- [2] Apis Cor. Disponible: <http://apis-cor.com>. Diciembre de 2017.
- [3] R.J.M Wolfs. 3d printing of concrete structures. Master's thesis, Eindhoven University of Technology, 2015.
- [4] Contour Crafting. Disponible: <http://contourcrafting.com>. Diciembre de 2017.
- [5] Total Kustom. Disponible: <http://www.totalkustom.com>. Diciembre de 2017.
- [6] WinSun. Disponible: <http://www.winsun3d.com>. Diciembre de 2017.
- [7] D-Shape. Disponible: <https://d-shape.com>. Diciembre de 2017.
- [8] Universidad de Loughborough. 3DCP. Disponible: <http://www.lboro.ac.uk/enterprise/3dcp>. Diciembre de 2017.
- [9] INN. *NCh148.Of68: Cemento- Terminología, clasificación y especificaciones generales.*
- [10] INN. *NCh163.Of79: Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales.*
- [11] INN. *NCh1498.Of82: Hormigón - Agua de amasado - Requisitos.*
- [12] INN. *NCh2182.Of95: Hormigón y mortero - Aditivos - Clasificación y requisitos.*
- [13] INN. *NCh151.Of68: Cemento - Método de determinación de la consistencia normal.*
- [14] INN. *NCh152.Of71: Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado.*
- [15] INN. *Nch1019: Determinación de la docilidad Método del asentamiento del cono de Abrams, 1974.*
- [16] INN. *NCh170.Of85: Hormigón - Requisitos Generales.*
- [17] INN. *NCh1017.Of75: Hormigón - Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.*
- [18] INN. *NCh1037.Of77: Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndri-*

cas.

- [19] INN. *NCh1038.Of77: Hormigón - Ensayo de tracción por flexión.*
- [20] Evan Cochran Behrokh Khoshnevis Ali Kazemian, Xiao Yuan. Cementitious materials for construction-scale 3d printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 145:639–647, 2017.
- [21] S.Lim R.A.Buswell A.G.F.Gibb T.Thorpe T.T.Le, S.A.Austin. Mix design and fresh properties for high performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45:1221–1232, 2012.
- [22] Lars Henrik Anell. Concrete 3d printer. Master’s thesis, Lund University, 2015.
- [23] Adel Tourbah Toufic Maalouf Nader ELZarwi Farook Hamzeh Zeina Malaeb, Hussein Hachem. 3d concrete printing: Machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 6:14–22, 2015.
- [24] Robins P.J Austin S.A, Goodier C.I. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. *Magazine of Concrete Research*, 51:341–352, 1999.
- [25] Robins P.J Austin S.A, Goodier C.I. Low volume wet-process sprayed concrete: pumping and spraying. *Materials and Structures*, 38:229–237, 2005.
- [26] Dawson O. Pumping concrete-friction between concrete and pipeline. *Magazine of Concrete Research*, pages 135–146, 1949.
- [27] Ede A.N. The resistance of concrete pumped through pipelines. *Magazine of Concrete Research*, pages 129–140, 1957.
- [28] Gary J.E. Laboratory procedure for comparing the pumpability of concrete mixtures. *Proceedings ASTM*, 62:129–140, 1962.
- [29] Loadwick F. Some factors affecting the flow of concrete through pipelines. *Proceedings of 1st Int. Conf. Hydraulic Transport of Solids in Pipes*, 1970.
- [30] Jacobsen S. Flow conditions of fresh mortar and concrete in different pipes. *Cement and Concrete Research*, 39:997–1006, 2009.
- [31] Jun Penga Bin Mu Zongjin, Lia Stanley N.C. Chuia. Cementitious composite manufactured by extrusion technique. *Cement and Concrete Research*, 29:237–240, 1999.
- [32] Surendra PShah Yixin Shao, Jun Qiu. Microstructure of extruded cement-bonded fibre-board. *Cement and Concrete Research*, 31:1153–1161, 1999.
- [33] J.L.Halary H.Van Damme H.Lombois-Burger, P.Colombet. Kneading and extrusion of dense polymer–cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 36:2086–2097, 2006.
- [34] Banfill P.F.G Tattersall G.H. The rheology of fresh concrete. *Pitman Advanced Publishing Program*, page 356, 1983.

- [35] P.G.F. Banfill. The rheology of fresh cement and concrete. *Rheology Reviews*, pages 61–130, 2006.
- [36] J.Wallevik. Thixotropic investigation on cement paste: experimental and numerical approach. *J. Non newton fluid Mech*, 132:86–99, 2005.
- [37] J.Wallevik. Rheological properties of cement paste: thixotropic behavior and structural breakdown. *Cement and Concrete research*, 39:14–29, 2009.
- [38] G. Heirman. Modelling and quantification of the effect of mineral additions on the rheology of fresh powder tupe self-compacting concrete. *Arenberg Doctoral School of Science, Engineering and Technology*, 2011.
- [39] A. Pierre A. Perrot, D. Rangeard. Structural built-up of cement-based materials used for 3d-printing extrusion techniques 7. *Mater. Struct*, 49:1213–1220, 2016.
- [40] F.D. Larrard L. Josserand, O. Coussy. Bleeding of concrete as an ageing consolidation process. *Cement and Concrete Research*, 36:1603–1608, 2006.
- [41] S. Garrault C. Brumaud N. Roussel, G. Ovarlez. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 42:148–157, 2012.
- [42] N. Roussel. A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, 36:1797–1806, 2006.
- [43] S.Lim R.A.Buswell R.Law A.G.F.Gibb T.Thorpe T.T.Le, S.A.Austin. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42:558–566, 2012.
- [44] ASTM International. *C1611/C1611M-14: Standard test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*, 2003.
- [45] Banfill P.F.G. Workability of flowing concrete. *Magazine of Concrete Research*, 32:17–27, 1908.
- [46] Banfill P.F.G. Rheological methods for assessing the flow properties of mortar and related materials. *Construction and Building Materials*, 8:43–50, 1994.
- [47] British Standars Institution. *BS 1377:Specification for soils for civil engineering purposes, Part 9, In-situ test*, 1990.
- [48] Germann Instruments. ICAR Rheometer. Disponible: <http://germann.org/products-by-application/rheology-of-concrete/icar-rheometer>. Diciembre de 2017.
- [49] ImageJ. Disponible: <https://imagej.nih.gov/ij/index.html>. Diciembre de 2017.
- [50] A. Pierre A. Perrot, D. Rangeard. Structural built-up of cement-based materials used for 3d-printing extrusion techniques. *Mater. Struct*, 49:1213–1220, 2016.