

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera Civil

TRABAJO DE TITULACIÓN

Título del proyecto:

**DISEÑO DE UN MORTERO CON CEMENTO PORTLAND TIPO I Y HE
INCLUIDA CAL HIDRÁULICA PARA SU USO EN IMPRESORAS 3D.**

Autor:

Carmen Elizabeth Mariño Salguero

Tutor:

Ing. Javier Palacios

Riobamba – Ecuador

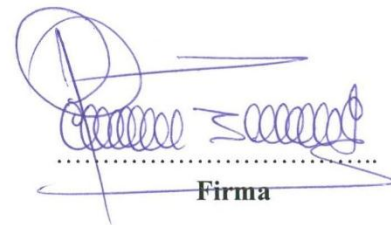
Año 2018

REVISIÓN

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título: “DISEÑO DE UN MORTERO CON CEMENTO PORTLAND TIPO I Y HE INCLUIDA CAL HIDRÁULICA PARA USO EN IMPRESORAS 3D” presentado por Carmen Elizabeth Mariño Salguero y dirigida por: Ing. Javier Palacios. Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha conestado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para la constancia de lo expuesto firman:

Ing. Javier Palacios
Tutor del Proyecto



Firma

Ing. Diego Hidalgo
Miembro del Tribunal



Firma

Dr. Víctor García
Miembro del Tribunal

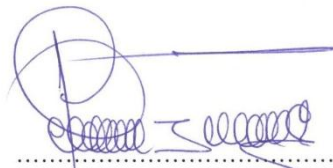


Firma

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Yo, Ing. Javier Palacios, en calidad de Tutor de Tesis, cuyo tema es: “DISEÑO DE UN MORTERO CON CEMENTO PORTLAND TIPO I Y HE INCLUIDA CAL HIDRÁULICA PARA USO EN IMPRESORAS 3D”, CERTIFICO; que el informe final del trabajo investigativo, ha sido revisado y corregido, razón por la cual autorizo a la señorita Carmen Elizabeth Mariño Salguero, para que se presente ante el tribunal de defensa respectivo para que se lleve a cabo la sustentación de su Tesis.

Atentamente,



Ing. Javier Palacios.
TUTOR DE TESIS

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, corresponde exclusivamente a: Carmen Elizabeth Mariño Salguero e Ing. Javier Palacios; y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



.....
Srta. Carmen Elizabeth Mariño Salguero
C.I.: 0604778746

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por el esfuerzo y sacrificio que hacen día a día, por ser el pilar fundamental en mi vida y estar presentes en cada paso que doy.

A mis hermanos Jesy y Fercho por estar a mi lado y alentarme a seguir adelante, gracias por permitirme crecer junto a ustedes compartiendo alegrías y tristezas.

Gracias a Dios por regalarme una hermosa familia a la cual respeto y amo con todo mi corazón.

A mi tutor Ing. Javier Palacios por guiarme y compartir su conocimiento durante el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a mis amigas Jennyffer, Jesy, Joha, Marce, “Las Mamis” por caminar junto a mi durante esta etapa maravillosa de mi vida, llenándome de risas y ocurrencias y a los “Shuritos” Gaby, Pol y Víctor por su gran apoyo y amistad incondicional.

Por último, pero no menos importante quiero agradecer a esa personita especial que ha llenado de amor mi vida y ha sabido darme calma cuando más lo he necesitado.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mami Pilar Salguero por ser la fuerza que impulsa mi vida y alienta mi corazón, a mi papicho Luis Mariño por el amor y cuidado que me ha brindado desde pequeña.

A mi hermana Jesy por guiarme y con su ejemplo demostrar que con trabajo y esfuerzo los sueños se pueden cumplir. A mi hermanito Fercho por ser ese amigo incondicional que siempre me escucha y ha sido parte de muchas de mis alegrías.

A mi mami Loly por ser ese ángel que dios me regalo y por la dicha que tengo al disfrutar su infinito amor.

A toda mi familia por el amor que me brindan y la felicidad que compartimos a cada momento.

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. MARCO TEÓRICO.....	5
3.1 Hormigón, una visión general.....	5
3.2 Concepto de hormigón y mortero.....	5
3.2.1 Descripción de los materiales que conforman el mortero.....	6
3.2.2. Relación agua-cemento.....	8
3.3 Impresión en 3D.....	8
3.3.1 Propiedades de los materiales imprimibles.....	8
3.4 Cal Hidráulica	9
3.4.1 Tipos de cal hidráulica.....	10
3.5 Análisis estadístico.....	10
4. METODOLOGÍA.....	11
4.1. Dosificación de muestras.....	12
4.2. Materiales.....	12
4.3. Determinación de propiedades físicas del material.....	15
4.3.1. Contenido de Humedad.....	15
4.3.2. Granulometría.....	15
4.3.3. Densidad y porcentaje de absorción.....	16
4.4. Caracterización mecánica del material.....	16
4.4.1. Ensayo de resistencia a la compresión a corto plazo.....	17
4.4.2. Ensayo de resistencia a la compresión a largo plazo	17
4.4.3. Inicio de fraguado.....	17
4.4.4. Trabajabilidad.....	18
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19

5.1 Diseño de la dosificación de un mortero para impresoras 3D.....	19
5.1.1 Resultados parciales del agregado fino.....	19
5.1.2 Dosificaciones de prueba para la elaboración de morteros.....	20
5.1.3 Dosificaciones finales para la elaboración de morteros.....	24
5.2 Caracterización de las mezclas.....	25
5.2.1 Resistencia a la compresión a corto plazo.....	25
5.2.2 Resistencia a la compresión a largo plazo.....	27
5.2.3 Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat.....	28
5.2.4 Trabajabilidad.....	29
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	32
6.1. Conclusiones.....	32
6.2. Recomendaciones.....	32
7. BIBLIOGRAFÍA.....	33
8. ANEXOS.....	35
Anexo 1: Contenido de humedad.....	35
Anexo 2: Ensayo Granulométrico.....	36
Anexo 3: Ensayo de Densidad y porcentaje de absorción.....	37
Anexo 4: Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas prueba.....	38
Anexo 5: Ensayo a la compresión en tiempos cortos.....	40
Anexo 6: Ensayo a la compresión a largo plazo.....	42
Anexo 7: Ensayo determinación del tiempo de fraguado.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Compuestos de Bogue del cemento portland _____	7
Tabla 2 Composición química del cemento tipo HE _____	7
Tabla 3 Dosificación utilizada para un saco de cemento _____	12
Tabla 4 Características físicas del cemento portland tipo I _____	13
Tabla 5 Características químicas y mineralógicas del cemento portland tipo I _____	13
Tabla 6 Características físicas del cemento portland tipo HE _____	14
Tabla 7 Propiedades químicas y físicas de la cal hidráulica _____	14
Tabla 8 Composición e información sobre los componentes de Sika Plastocrete 161 HE _____	15
Tabla 9 Resultados de ensayo granulométrico del árido fino (Arena de río) _____	19
Tabla 10 Propiedades físicas del árido fino (Arena de río) _____	20
Tabla 11 Dosificaciones de prueba para un saco de cemento de 50 kg _____	21
Tabla 12 Análisis estadístico de probetas prueba _____	24
Tabla 13 Nomenclatura para los 4 tipos de mezclas _____	25
Tabla 14 Dosificaciones para los 4 tipos de mezclas _____	25
Tabla 15 Análisis estadístico de probetas ensayadas a corto plazo _____	26
Tabla 16 Análisis estadístico de probetas ensayadas a largo plazo _____	28
Tabla 17 Resumen de resultados de tiempos de fraguado _____	29
Tabla 18. Diámetros establecidos para evaluar la trabajabilidad _____	29
Tabla 19 Resumen de resultados y discusión _____	30

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Desarrollo de la metodología. _____	11
Figura 2: Evolución de las resistencia a la compresión _____	23
Figura 3: Evolución de la resistencia a la compresión a corto plazo. _____	26
Figura 4: Evolución de la resistencia a la compresión a largo plazo. _____	27

RESUMEN

Una aplicación de la impresión 3D es la fabricación directa de edificaciones mediante la adición de material, a pesar de que esto agilizaría el proceso constructivo desde la fase de proyecto, disminuyendo el tiempo de producción, materiales, y costos laborales hasta en un 70 %, este novedoso método todavía no responde a las expectativas impuestas debido a la falta de especificaciones técnicas de los materiales utilizados.

Considerando su importancia y buscando aportar a la solución del problema, este trabajo se enfocó en caracterizar 4 mezclas de mortero imprimible elaboradas con cemento portland tipo I y HE más arena de río y cal hidráulica. A fin de evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los nuevos morteros, se realizó ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días.

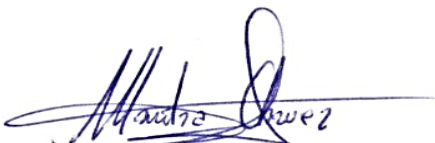
Los morteros hechos con cemento tipo I y HE sin añadidura de cal, mostraron una resistencia de 41,11 y 63.82 MPa, respectivamente. Mientras que, los morteros con cemento tipo I y HE más la adición de cal hidráulica en un 7%, obtuvieron una resistencia de 30.49 y 57.75 MPa respectivamente. Por consiguiente, los 4 morteros, al presentar alta resistencia, podrían ser aptos para utilizarse en impresoras 3D, generando una alternativa económica y rápida para la construcción de viviendas.

Palabras clave: impresión 3D, mortero imprimible, cal hidráulica, resistencia, compresión

ABSTRACT

An application of 3D printing is the direct manufacturing of buildings by means of the addition of material, due to this would streamline the construction process from the project phase, decreasing the production's time and materials, and cost's labor by up to 70%, This new method does not still response the expectations imposed due to the lack of technical specifications of the materials used. Considering its importance and seeking in order to contribute to the solution of the problem, this work focused on characterizing 4 printable mortar mixtures made with Portland type I and HE cement plus river sand and hydraulic lime. In order to evaluate the physical and mechanical properties of the new mortars, compression resistance tests were carried out at 7, 14, 21 and 28 days. Mortars made with type I and HE cement without addition of lime, showed a resistance of 41.11 and 63.82 MPa, respectively. While mortars with cement type I and HE plus the addition of hydraulic lime in 7%, obtained strength of 30.49 and 57.75 MPa respectively. Therefore, the 4 mortars, when presenting high resistance, could be suitable for use in 3D printers, generating an economic and fast alternative for the construction of houses.

Keywords: 3D printing, printable mortar, hydraulic lime, resistance, compression.



Reviewed by: Chávez, Maritza

Language Center Teacher



1. INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza, las industrias necesitan renovar la estructura de la producción para crecer. En el campo de la construcción se requiere optimizar el proceso mejorando costos y tiempo, innovando cada día las técnicas de edificación. Una alternativa es la impresión 3D del hormigón, el cual es un método de edificación que crea elementos de construcción prediseñados, permitiendo realizar construcciones pequeñas en pocas horas y hasta edificios solamente con el ensamblaje de piezas impresas. (Khalil, Aouad, & Cheikh, 2017)

La impresión 3D en concreto en sí es un sistema que podría brindar múltiples ventajas como la rapidez, la automatización y por consiguiente la optimización del proceso. Igualmente, la independencia de la mano de obra humana durante la ejecución reduciría los costes y riesgos laborales.

En la actualidad existen varias empresas que se han insertado en el mundo de la impresión 3D. Apis Cor es una compañía rusa que realizó una vivienda de 38 m² con todos los servicios básicos en un solo día gracias a la impresión completa de sus muros portantes, utilizando como materia prima, hormigón reforzado con fibras y aditivos (Campillo, 2017).

Otro ejemplo es la empresa China Winsun Decoration Design Engineering, quienes rompieron un record mundial en el 2014 al realizar 10 viviendas modulares en tan solo 24 horas, realizadas a partir de paneles prefabricados que se ensamblan en obra, utilizando para ello una impresora de 10 x 6.6m. El material utilizado fue una combinación de hormigón, fibra de vidrio y material de demolición (Campillo, 2017). Por otro lado las empresas D-Shape fundada por Enrico Dini en Reino Unido y Contour-Crafting fundada por el Dr. Behrokh Khoshnevis en Estados Unidos, desarrollan elementos de hormigón a gran escala (Torres, 2016).

Sin embargo, cada entidad elabora sus mezclas con diferente materia prima sin llegar a una estandarización ni a definir las propiedades requeridas de los materiales para esta nueva tecnología (Wu, Wang, & Wang, 2016), lo cual impide su aplicación de forma masiva. Consecuentemente, en virtud de los beneficios que esta técnica podría brindar, la comunidad científica ha comenzado a poner interés en el tema. Así, diferentes mezclas de morteros y hormigones que usan cemento Portland junto con otros materiales han sido probados a lo largo de este tiempo.

Malaeb et al. (2016) imprimió una pared que consta de dos líneas paralelas. La mezcla fue acelerada por una combinación de retardadores y aceleradores agregados en diferentes etapas para extruir el mortero desde una boquilla de 2cm de diámetro. Los autores obtuvieron una resistencia a la compresión de 42 MPa en 28 días.

Le et al. (2012) estudió las propiedades de un hormigón elaborado con cenizas volantes, humo de sílice y fibras, desarrollando un mortero imprimible, con flujo constante. La resistencia a la compresión del material fue de 91-102 MPa para muestras impresas, siendo esta un 5-10% más bajo que la de las probetas realizadas en molde.

En cambio, Khalil et al. (2017) se enfocaron en analizar la variación de las propiedades físicas y mecánicas del mortero en función del tipo de cemento utilizado. Ellos elaboran un mortero con una mezcla hecha de dos tipos: cemento Portland ordinario (OPC) y cemento de Sulfoaluminato de Calcio (CSA), alcanzando una resistencia a la compresión de 88 MPa después de 28 días para muestras no impresas y 79 MPa para muestras impresas, logrando además sobreponer 25 capas manualmente. Sin embargo, la muestra impresa exhibió una compresión más baja en diferentes puntos, debido a la porosidad adicional relacionada con la trabajabilidad de la mezcla.

Considerando este efecto secundario esta investigación pretende formular y caracterizar una mezcla basada a la expuesta por Khalil et al. (2017) pero con cemento Portland tipo I y HE más la adición de cal, cuyas propiedades podrían aumentar la trabajabilidad del mortero y evitar los problemas expuestos por este autor. Debido a que la cal por su gran capacidad para retener agua aumenta la moldeabilidad del mortero incluso al contacto con unidades porosas y muy absorbentes. Esta característica se debe a su mayor área superficial y la forma aplanada de las partículas, permitiendo que exista más lubricación en la mezcla y por lo tanto mayor manejo disminuyendo así la porosidad en las muestras, lo que podría ayudar con el objetivo planteado.

Finalmente, tomando en cuenta estos aspectos se formula la siguiente pregunta de investigación ¿Cómo diseñar un mortero con cemento portland tipo I y HE más arena de río y cal hidráulica, apropiado para su uso en impresoras 3D?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General.

Diseñar un mortero con cemento portland tipo I y HE más arena de río y cal hidráulica que sea apto para ser utilizado en impresoras 3D.

2.2 Objetivos específicos.

- Diseñar una dosificación adecuada que permita obtener una mezcla con características apropiadas para su uso en impresoras 3D.
- Caracterizar los morteros con las dosificaciones diseñadas y probar sus propiedades mecánicas.

3. MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se presenta una breve introducción teórica del hormigón y su uso en impresoras 3D, seguido se describe las propiedades y dosificaciones que deben cumplir los materiales para ser considerados imprimibles. Como también se introduce el concepto y tipos de cal hidráulica.

3.1 Hormigón, una visión general.

El hormigón ha sido, es y posiblemente continuara siendo el material por excelencia utilizado en la industria de la construcción ya que presenta múltiples ventajas frente a otros materiales, entre las cuales destacan la versatilidad en su forma, resistencia y durabilidad.

Durante el último siglo y sobre todo durante las últimas décadas, la visión tradicional del hormigón ha cambiado debido al desarrollo de nuevas técnicas y diferentes tecnologías (Torres, 2016).

La proyección de hormigón ha supuesto un gran avance en la puesta en obra del material, evolucionando de forma muy significativa, por el desarrollo de los aceleradores de fraguado y súper plastificantes y por la mejora de la maquinaria necesaria para llevar a cabo este método. La unión de varias técnicas y tecnologías ha hecho que la industria de la construcción avance de forma significativa, hasta llegar a desarrollar en la actualidad, técnicas de fabricación aditiva, como es la impresión de hormigón en 3D (Torres, 2016).

3.2 Concepto de hormigón y mortero.

El Hormigón es una mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. Mientras que el mortero comparte los mismos componentes a excepción del agregado grueso (NEC, 2001).

3.2.1 Descripción de los materiales que conforman el mortero.

Áridos: El árido fino para mortero debe ser limpio, duro, sano y durable, con una distribución granulométrica que se mantenga razonablemente uniforme durante toda la producción (NEC, 2001). Además, deberá cumplir con la especificación NTE INEN 872 ó ASTM C330.

Agua: Si el agua es apta para el consumo humano es buena para hacer mortero (NEC, 2001).

Cemento: El cemento es un material adhesivo y cohesivo capaz de pegar (enlazar, unir, juntar) partículas de un material sólido en una masa compacta. Los cementos usados en la industria de la construcción se pueden clasificar en:

- Cemento hidráulico: Se consolida y endurece en agua (cemento portland).
- Cemento no hidráulico: No se consolida ni endurece en el agua debido a que es inestable en el agua (yeso calcinado).

Los constituyentes principales del cemento hidráulico son: cal, sílice y alúmina, los mismos que al combinarse durante la cocción, forman el clinker de cemento. Los compuestos que se forman tienen la propiedad de consolidarse y endurecer cuando se exponen al agua y se les conoce con el nombre de compuestos de Bogue los cuales son: Alita (C_3S), Belita (C_2S), Celita (C_3A) y Felita (C_4AF), detallados a continuación en la tabla 1, (García, 2018).

Tabla 1*Compuestos de Bogue del cemento portland.*

Compuesto	Fórmula	Nombre	Nomenclatura usada en la química del cemento	Propiedades
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Alita	C_3S	*Se puede encontrar en una cantidad del 25 al 50% *Hace que el clinker sea fácil de moler *Se endurece rápidamente y aporta resistencia temprana
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	Belita	C_2S	*Se encuentra en cantidades del 25 al 40%. *Aporta resistencia a agentes químicos. *Incrementar la cantidad de C_2S hace al clinker difícil de moler, reduce la resistencia temprana y disminuye el calor de hidratación
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Celita	C_3A	*Se encuentra en cantidades de 5 a 11 %. *Reacciona rápidamente con el agua y es responsable del fraguado rápido del clinker finamente molido.
Ferro-aluminio tetra-cálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Felita	C_4AF	*Se encuentra en cantidades de 8 al 14 % . *Es responsable del fraguado rápido, pero su hidrólisis genera menos calor. *Incrementar el contenido de C_4AF reduce ligeramente la resistencia.

Fuente: Adaptado de García (2018).

Las propiedades del cemento portland varían significativamente con las proporciones de estos cuatro compuestos. Es así que se puede elaborar cementos de alta resistencia como es el tipo HE. Un ejemplo de este tipo de cemento se presenta en la tabla 2.

Tabla 2*Composición química del cemento tipo HE.*

Requisitos químicos	Composición (wt%)	Fases mineralógicas	Composición (wt%)
CaO	64.40	Silicato tricálcico (C_3S)	59.40
SiO_2	19.50	Silicato dicálcico (C_2S)	11.20
Fe_2O_3	3.70	Aluminato tricálcico (C_3A)	9.60
SO_3	2.80	Ferro-aluminio tetra-cálcico (C_4AF)	11.50
Al_2O_3	6.00		
MgO	1.30		

Fuente: García (2018). Comunicación privada.

3.2.2. Relación agua-cemento.

Un aspecto importante a considerar es la relación agua/cemento, que suele ser baja, entre 0.15 y 0.25, para reducir el número de poros capilares y evitar el transporte de gases y líquidos que ataquen al hormigón (Mella Stappung, 2004)

3.3 Impresión en 3D.

La impresión en 3D es un proceso de unión de materiales para realizar objetos desde un modelo de datos 3D, generalmente capa a capa, como oposición a los métodos de fabricación por sustracciones tradicionales (ASTM Internacional, 2012). El material utilizado en la impresora está compuesto por una pasta de cemento y otros aglutinantes, estos pueden ser naturales o artificiales (Campillo, 2017).

3.3.1 Propiedades de los materiales imprimibles.

Los materiales considerados como materiales imprimibles mediante la técnica de extrucción en impresión 3D, deben cumplir con una serie de propiedades discutidas por Gardiner (2011). Estas son:

1. Capacidad de ser bombeado. - El material debe tener una consistencia que le permita moverse por el sistema hasta el cabezal de impresión produciendo una masa densa y homogénea sobre la superficie. Un estudio de Torres (2016) clasifica las mezclas proyectadas en hormigón proyectado cuyo tamaño de árido es superior a 8 mm, y mortero proyectado con un tamaño máximo de 8mm.
2. Capacidad de ser impreso. - El material debe ser extruido por la boquilla de impresión y esto dependerá de la trabajabilidad de la mezcla, la misma que para morteros imprimibles es de 150 ± 10 mm medida por el ensayo de consistencia en la mesa de sacudidas (Echeverría, 2014).
3. Constructibilidad. - Es una propiedad definida como la resistencia del material depositado para aguantar su propio peso y el de capas superiores sin ser deformado. Esto dependerá del tiempo de

fraguado y endurecimiento del material, así como de la resistencia a la compresión que presente la mezcla asegurando la firmeza del elemento conforme va aumentando en tamaño (Gil, 2015). Según Avendaño (2012), el tiempo de fraguado de la mezcla para impresoras 3D, es de 15 a 25 minutos, quien además explica la diferencia entre fraguado y endurecimiento de las mezclas. El fraguado puede definirse como la condición alcanzada por una pasta cementicia, mortero u hormigón, que ha perdido plasticidad, medido en términos de resistencia a la penetración, mientras que, el endurecimiento consiste en la ganancia de resistencias de una pasta fraguada. De forma concreta, el tiempo de fraguado es el periodo durante el cual, el cemento y el agua reaccionan químicamente, generando y desprendiendo calor para dar origen a nuevos compuestos, los cuales provocan el posterior endurecimiento y adquisición de las resistencias en la pasta.

4. Tiempo de trabajo. - Es el periodo en el cual las propiedades anteriormente descritas se mantienen constantes. Las propiedades del material una vez endurecido dependerán también del proceso de elaboración de la mezcla y de los materiales que la componen. La resistencia a la compresión del hormigón extruido se encuentra entre un 80 y un 90% de la del hormigón encofrado tradicional. (Campillo, 2017).

3.4 Cal Hidráulica

La cal hidráulica fue creada en Francia en 1821. La cocción de una roca caliza con un contenido entre un 8 y un 20% de arcillas da lugar a la cal hidráulica natural. Esta cal se caracteriza por su capacidad para fraguar en ambientes aéreos, así como en lugares con escasez de CO_2 , como por ejemplo debajo del agua. A dicha propiedad de fraguado sin CO_2 se la denomina hidraulicidad. La cal hidráulica natural está compuesta por una parte de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido cálcico) que carbonata en presencia de CO_2 . Su hidraulicidad se debe a su composición ya que contiene

silicatos cálcicos y aluminatos cálcicos que, al hidratarse, forman sustancias insolubles, muy estables químicamente (Veiga & Santos, 2015).

3.4.1 Tipos de cal hidráulica.

Existen 3 tipos de cal hidráulica: Cal hidráulica natural (NHL), formuladas (FL) y artificiales (HL). La NHL contienen de 5 a 25% de arcilla. Esta se obtiene de una roca caliza sin aditivos añadidos ni durante la cocción ni a posteriori a comparación de las cales hidráulicas formuladas y artificiales, que si los contienen. Su comportamiento en la construcción es como un cemento portland blanco, pero con resistencias más bajas, sin embargo, desempeña un buen papel en la bioconstrucción, ya que no contiene ningún tipo de sulfato, sales, etc., en comparación al cemento portland (Veiga & Santos, 2015).

Un estudio realizado por Dopico et al. (2008) muestra que la adición de hasta un 10 % de cal en relación al porcentaje de cemento portland ordinario produce un incremento en los valores de resistencia a la compresión por encima de los expresados en la mezcla que no contiene cal. En cambio, al añadir más del 30 % existe una caída brusca de la resistencia. La mezcla preparada con el 30% de sustitución de cemento no ofrece cambios significativos en los valores de resistencia a los 28 días. Considerando este aspecto, en este estudio se hará una prueba de mezclas con diferentes porcentajes de cal hidráulica más cemento, arena y agua.

3.5 Análisis estadístico.

Prueba de Tukey: este método sirve para comparar las medias de los tratamientos, dos a dos, y así evaluar las hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \text{ (Las medias son iguales)}$$

$$H_0: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \text{ (Las medias son diferentes)}$$

4. METODOLOGÍA.

Esta investigación tiene un alcance explicativo puesto que se experimentó con diferentes dosificaciones utilizando insumos locales para así producir un nuevo material cementante útil para la impresora 3D. La variable independiente de este estudio fue el porcentaje de cal hidráulica añadida a la mezcla, lo cual influencia su resistencia a la compresión. Consecuentemente, la resistencia a la compresión fue la variable dependiente.

La metodología desarrollada en el estudio se ilustra a continuación en la Figura 1.

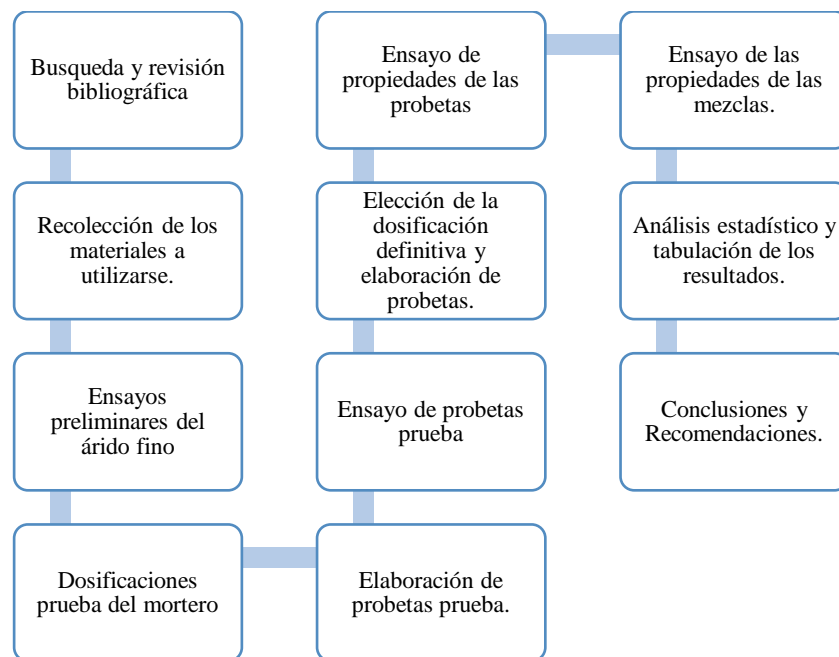


Figura 1: Desarrollo de la metodología.
Elaborado por: Elizabeth Mariño

La metodología descrita en el diagrama de la figura 1 se centra en la dosificación y caracterización de 4 tipos de mortero para impresoras 3D.

4.1. Dosificación de muestras.

Este trabajo investigativo inicio con la búsqueda de las dosificaciones adecuadas que acorde a la literatura permite diseñar un mortero imprimible. Concretamente se tomó como referencia la dosificación utilizada por Khalil et al. (2017), detallada en la tabla 3.

Tabla 3
Dosificación utilizada para un saco de cemento.

Arena (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Plastificante (kg)
62.25	50.00	17.30	0.13

Fuente: Khalil et al. (2017)

En base a la dosificación señalada, utilizando los materiales especificados en la siguiente sección y con la adición de diferentes porcentajes de cal hidráulica se procedió a realizar 7 dosificaciones prueba que nos sirvieron de punto de partida para la elaboración de las probetas definitivas. Las 7 dosificaciones fueron ensayadas a compresión bajo la norma INEN 1573 (INEN, 2010).

Posteriormente, de las 7 opciones se escogieron 4 dosificaciones definitivas, las cuales obtuvieron el mayor valor de resistencia a la compresión. Estas 4 dosificaciones se presentan en la tabla 15 y se identifican de acuerdo al tipo de cemento utilizado y al porcentaje de cal añadido. De aquí en adelante la metodología hace referencia a estas 4 dosificaciones.

4.2. Materiales.

1) **Cemento:** Se usaron dos tipos de cemento, el cemento utilizado tradicionalmente tipo I que de ahora en adelante lo nombraremos con las siglas (CPI) y un cemento de alta resistencia HE denominado de aquí en adelante como (CPHE) para facilidad de entendimiento. CPI y CPHE

fueron proveídos por la empresa UCEM. Las características químicas, físicas y mineralógicas se resumen en las tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4

Características físicas del cemento portland tipo I.

REQUISITOS FÍSICOS	CEMENTO CHIMBORAZO SUPERIOR PORTLAND PUZÓLANICO TIPO IP		NORMA NTE INEN 490 ASTM C-595	
Peso específico (gr/cm ³)	2.85		-	
Expansión en autoclave (%)	0.0013		0,80 máx.	
Fraguado Vicat Inicial (minuto)	160		45 min.	
Fraguado Vicat Final (minuto)	240		420 máx.	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	Kg/cm ³	MPa	Kg/cm ³	MPa
3 días	184	18	133 min.	13
7 días	265	26	204 min.	20
28 días	377	37	255 min.	25
RESISTENCIA A LOS SULFATOS	CEMENTO IP		REQUISITOS NORMA NTE INEN 490	
% Expansión a los 14 días	0.018		0,02 máx.	

Fuente: Adaptado de UCEM.

Tabla 5

Características químicas y mineralógicas del cemento portland tipo I.

REQUISITOS QUÍMICOS	COMPOSICIÓN (wt%)	FASES MINERALÓGICAS	COMPOSICIÓN (wt%)
CaO	66.96	Silicato tricálcicos (C ₃ S)	60.07
SiO ₂	22.64	Silicato dicálcico (C ₂ S)	18.99
Fe ₂ O ₃	3.69	Aluminato tricálcico (C ₃ A)	5.06
SO ₃	0.55	Ferro-aluminio tetra-cálcico (C ₄ AF)	11.22
Al ₂ O ₃	4.27		
MgO	1.29		

Fuente: Adaptado de Rivadeneira (2014).

Tabla 6*Características físicas del cemento portland tipo HE.*

REQUISITOS FÍSICOS	CEMENTO CHIMBORAZO SUPERIOR PORTLAND PUZÓLANICO TIPO HE	
Peso específico (gr/cm ³)	9.92	
Expansión en autoclave (%)	0.0013	
Fraguado Vicat Inicial (minuto)	150	
Fraguado Vicat Final (minuto)	240	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	Kg/cm ³	MPa
1 día	184	18
3 días	255	25
7 días	337	33
28 días	459	45
RESISTENCIA A LOS SULFATOS	CEMENTO TIPO HE	
% Expansión a los 14 días	0,04 máx.	

Fuente: Adaptado de UCEM.

- 2) **Cal hidráulica:** Suministrada por la empresa Polycal. Cuyas propiedades químicas proporcionadas por el fabricante se resumen en la tabla 7.

Tabla 7*Propiedades químicas y físicas de la cal hidráulica.*

Químicos (en masa)	Cal Hidráulica
SiO ₂	0.88
Fe ₂ O ₃	0.29
Al ₂ O ₃	0.34
CaO	97.42
MgO	0.59
SO ₃	0.47
Físicos	
Peso específico	2.46

Fuente: Adaptado de Empresa Polycal.

- 3) **Agregado fino:** Arena de río de la mina de Penipe ubicada en la provincia de Chimborazo. Coordenadas (9828330.58 , 773730.71).
- 4) **Sika Plastocrete 161 HE:** Es un aditivo químico de cloruro de calcio reductor de agua y acelerante de resistencias, ideal para la construcción con hormigón. Permite un pronto

desenfofrado de la estructura y un rápido uso de las edificaciones, cuya composición química se presenta en la tabla 8.

Tabla 8

Composición e información sobre los componentes de Sika Plastocrete 161 HE.

Nombre Químico	Fórmula Lineal	Concentración (% w/w)
Cloruro de calcio	CaCl₂	>=10 -<20
2, 2', 2'' - nitrilotrietanol	(HOCH₂CH₂)₃N	>=1 -<10
5-cloro-2-metil-2H-isotiazol-3-ona	C₄H₄CINOS	<0.1

Fuente: Adaptado de Sika Ecuador S.A.

5) **Agua:** Potable y libre de impurezas.

4.3. Determinación de propiedades físicas del material.

Primero, las muestras de arena de río fueron ensayadas en el laboratorio de ensayo de materiales, donde se realizaron los análisis físicos y mecánicos con el fin de determinar sus propiedades: granulometría, porcentaje de absorción, densidad y contenido de humedad.

4.3.1. Contenido de Humedad.

La norma INEN 690 (INEN, 2011), sugiere el procedimiento para obtener el contenido de humedad de un suelo. Una porción representativa de la arena de río fue colocada en un recipiente previamente pesado, después, procedimos a pesar el conjunto y lo introducimos al horno de secado, manteniendo una temperatura de 110°C por 24 h. Transcurrido este tiempo, el recipiente con la arena fueron pesados nuevamente con el fin de determinar el contenido de humedad.

4.3.2. Granulometría.

La norma ASTM D-422 (ASTM, 2000), propone el procedimiento para la obtención de la granulometría del árido. El procedimiento del ensayo empezó secando la muestra hasta obtener

una masa constante a una temperatura de 110°C, después de haber transcurrido el tiempo de secado, tomamos 1000 g de la muestra y la colocamos en una serie de tamices seleccionados y ubicados descendientemente: N° 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200. Posteriormente, los tamices fueron ubicados en la máquina tamizadora por 5 minutos, una vez tamizada retiramos cuidadosamente y procedemos a registrar los pesos acumulados en cada uno de los tamices, por último, se calcula y tabula los datos obtenidos.

4.3.3. Densidad y porcentaje de absorción.

La norma INEN 856 (INEN, 2010), recomienda los pasos para obtener la densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino. Seleccionamos el material en condiciones SSS aproximadamente 2.5 kg. Para comprobar que el árido se encuentre en estado SSS, se compacta la arena en el cono con la ayuda de un pinzón con 25 golpes, enrazamos, retiramos el molde y verificamos que el material al momento de extraer el molde permanezca en forma de pirámide. Posteriormente se pesa dos muestras de arena en SSS. Llenamos el picnómetro con agua, eliminando las burbujas existentes y pesamos. Colocamos una muestra de arena SSS en el picnómetro y mediante la placa de vidrio eliminamos la mayor cantidad de burbujas y pesamos. La segunda muestra de arena la colocamos en el horno por 24 horas, transcurrido este tiempo volvemos a pesar la muestra. Finalmente tabulamos los resultados obtenidos.

4.4. Caracterización mecánica del material.

Se realizaron ensayos a los 4 tipos de mezclas sugeridas, para establecer el tiempo de fraguado, trabajabilidad y resistencia a compresión, según procedimientos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana (INEN, 2009), (INEN, 2010), (INEN, 2011), American Standard of Testing Materials (ASTM, 2000).

4.4.1. Ensayo de resistencia a la compresión a corto plazo.

Se fabricaron 64 probetas cúbicas de 50 x 50 mm, 16 por cada tipo de mezcla de mortero en forma de cubos de 50 x 50 mm, las mismos que fueron ensayados a compresión a tempranas edades, como son a 6,9,12 y 24 horas, siguiendo la norma INEN 488 (INEN, 2009). Cada muestra fue, colocada cuidadosamente en la máquina de ensayo, bajo el centro del cabezal de apoyo superior, de manera que la carga se aplique a dos caras del cubo previamente medidas y que estaban en contacto con la superficie plana del molde. Aplicados carga hasta llegar al punto de ruptura del material. Repetimos el procedimiento para las 64 probetas, a las diferentes edades de elaboración.

4.4.2. Ensayo de resistencia a la compresión a largo plazo

Se elaboraron 64 probetas, 16 por cada tipo de mezcla en forma de cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, según lo sugiere la norma INEN 1573 (INEN, 2010) para ser ensayados a compresión a largo plazo. Las muestras fueron primero colocadas en la piscina de curado, segundo tomamos sus dimensiones y el área para ser ensayados, tercero, con la ayuda de unas placas metálicas, se situó el espécimen en el eje donde fue aplicada la carga hasta obtener su resistencia a compresión a la edad de 7, 14, 21 y 28 días. El procedimiento fue repetido para las 64 probetas realizadas.

4.4.3. Inicio de fraguado.

Según lo recomendado por la norma INEN 158 (INEN, 2009), el procedimiento a seguir para determinar el inicio de fraguado de cada mezcla, consiste en elaborar 2 morteros por cada una, posteriormente se vierte la mezcla en el molde troncocónico normalizado y se lo sitúa inmediatamente en el equipo de Vicat. Mediante la Aguja de Vicat, se determinó el tiempo de inicio de fraguado de la mezcla, el cual es el tiempo que demora la aguja en penetrar 2.5 cm la

mezcla al dejarla caer libremente. De igual manera el final de fraguado será cuando la mezcla esté endurecida totalmente y no exista penetración de la aguja.

4.4.4. Trabajabilidad.

Para medir la trabajabilidad de las mezclas, se usó como referencia la norma INEN 157 (INEN, 2009), el ensayo determina la consistencia del mortero en estado fresco. La evolución de la trabajabilidad consiste en medir el diámetro de la mezcla estabilizada al levantar el cono normalizado, de cada uno de los morteros. Por ello, es importante definir el tiempo exacto en el que se levanta el molde cónico para que se produzca el escurrimiento. Dicho tiempo, es una variable definida previamente, que consiste en el periodo desde que cesa el amasado, hasta el momento exacto del levantamiento del molde cónico, transcurrido este tiempo se mide el diámetro de la mezcla estabilizada en centímetros. Todo ello con el objetivo de observar la disminución o aumento del diámetro de la mezcla estabilizada conforme se incrementa el tiempo.

Finalmente, luego de realizar los ensayos descritos se hicieron análisis estadísticos utilizando el software Minitab 16 (MiniTab Inc. PA, USA), con el fin de validar la información encontrada y así obtener las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 Diseño de la dosificación de un mortero para impresoras 3D.

5.1.1 Resultados parciales del agregado fino.

Contenido de humedad: El porcentaje de humedad medido fue de 5.73, lo cual no es muy significativo, más adelante se tomará en cuenta para la corrección del agua utilizada en las dosificaciones formuladas.

Granulometría: La tabla 9, indica los resultados del ensayo en donde se puede observar que la muestra posee un módulo de finura de 2.66 el mismo que se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma ASTM-C33 (ASTM, 2000), no inferiores a 2.3 ni superiores a 3.1. Por lo tanto, se puede esperar que el material presenta buena trabajabilidad y textura.

Tabla 9

Resultados de ensayo granulométrico del árido fino (Arena de río)

GRANULOMETRÍA			
TAMICES	% Retenido parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
Nº 4	3.70	3.70	96.30
Nº 8	3.90	7.60	92.40
Nº 16	6.80	14.40	85.60
Nº 30	11.30	25.70	74.30
Nº 50	21.20	46.90	53.10
Nº 100	26.60	73.50	26.50
Nº 200	20.60	94.10	5.90
Módulo de Finura		2.66	

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Densidad y Porcentaje de absorción: Los resultados del ensayo se resumen en la tabla 10.

Tabla 10*Propiedades físicas del árido fino (Arena de río)*

Propiedad	Valor
Densidad SH (kg/m ³)	2434.03
Densidad en SSS (kg/m ³)	2479.22
Densidad Aparente (kg/m ³)	2549.54
Porcentaje de Absorción	1.86

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

En la tabla 10 se observa que el valor de la densidad del árido en estado seco es menor al valor de la densidad en estado saturado superficialmente seco (SSS), lo cual se debe a que la densidad en SSS toma en cuenta los poros llenos de agua de la arena, mientras que en la densidad de la arena seca solo se encuentran los poros con aire.

El porcentaje de absorción de agua fue de 1.86 %, consecuentemente, es considerado un agregado con baja absorción, es decir no mayor al 5% según la norma técnica ecuatoriana. Así, el peligro de deterioro del hormigón debido al congelamiento del agua absorbida por el agregado es bajo.

5.1.2 Dosificaciones de prueba para la elaboración de morteros.

Para obtener las dosificaciones finales, se realizaron 7 dosificaciones de prueba basadas en la dosificación de Khalil et al. (2017). La dosificación fue modificada en tres aspectos: cantidad de cal, tipo de cemento, y cantidad de plastificante, con la finalidad de observar su influencia en la resistencia del mortero. Las 7 dosificaciones se detallan en la tabla 11.

Tabla 11*Dosificaciones de prueba para un saco de cemento de 50 kg.*

N°	Descripción	Arena (kg)	Cemento (kg)	Cal (kg)	Agua (kg)	Sika161 (kg)
1	Dosificación para CPI con corrección del porcentaje de agua.	62.25	50.00	0.00	25.44	0.14
2	Dosificación 1 más 10% de cal en relación al porcentaje de cemento.	69.72	50.00	5.00	28.27	0.15
3	Dosificación 1 más 7% de cal en relación al porcentaje de cemento.	67.19	50.00	3.50	27.36	0.15
4	Dosificación 1 más 12% de cal en relación al porcentaje de cemento.	71.55	50.00	6.00	28.91	0.16
5	Dosificación para CPI con corrección del porcentaje de plastificante y agua.	62.25	50.00	0.00	21.00	1.00
6	Dosificación para CPHE con corrección del porcentaje de plastificante y agua.	62.25	50.00	0.00	20.75	1.00
7	Dosificación para CPI con corrección del porcentaje de plastificante y agua.	62.25	50.00	0.00	24.05	0.50

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

La dosificación N° 1, fue exactamente igual a la dosificación de Khalil et al. (2017), pero al mostrarse como una mezcla parcialmente seca se evidenció la falta de trabajabilidad, cabe recalcar que el material utilizado como árido fino se encontraba en estado seco, y a su vez desconocíamos las características del agregado fino utilizado por Khalil et al. (2017), por esta razón se decidió aumentar el porcentaje de agua en un 47 %. Al ser un estudio exploratorio el porcentaje de agua añadido se lo realizó gradualmente hasta alcanzar una trabajabilidad visualmente aceptable.

Las dosificaciones N°2, N°3 y N°4 fueron formuladas en base a la dosificación N° 1, es decir con cemento portland tipo I (CPI), pero con la adición de cal hidráulica a la mezcla, el valor añadido fue de 7,10 y 12 % en relación al cemento utilizado.

Para las dosificaciones N°5, N°6 y N°7 se experimentó con el porcentaje de plastificante añadido, en base a las especificaciones dadas por el fabricante.

La N°5 y N°6 se realizó con 1 y ½ kg de aditivo por saco de cemento respectivamente, los mismos que permitieron reducir el agua hasta en un 17% para la dosificación N° 5 y 6 % en la dosificación N°6, en relación a la dosificación base N°1.

La dosificación N° 6, tiene el mismo porcentaje de aditivo que la N° 5, pero fue formulada para el cemento portland tipo HE (CPHE), al ser un cemento de alta resistencia la reducción de agua puede aumentar, lo cual disminuyó un 18% respecto al porcentaje de agua de la dosificación base N° 1.

La resistencia a la compresión de cada una de las probetas elaboradas con las dosificaciones anteriormente expuestas, se muestra en la figura 2.

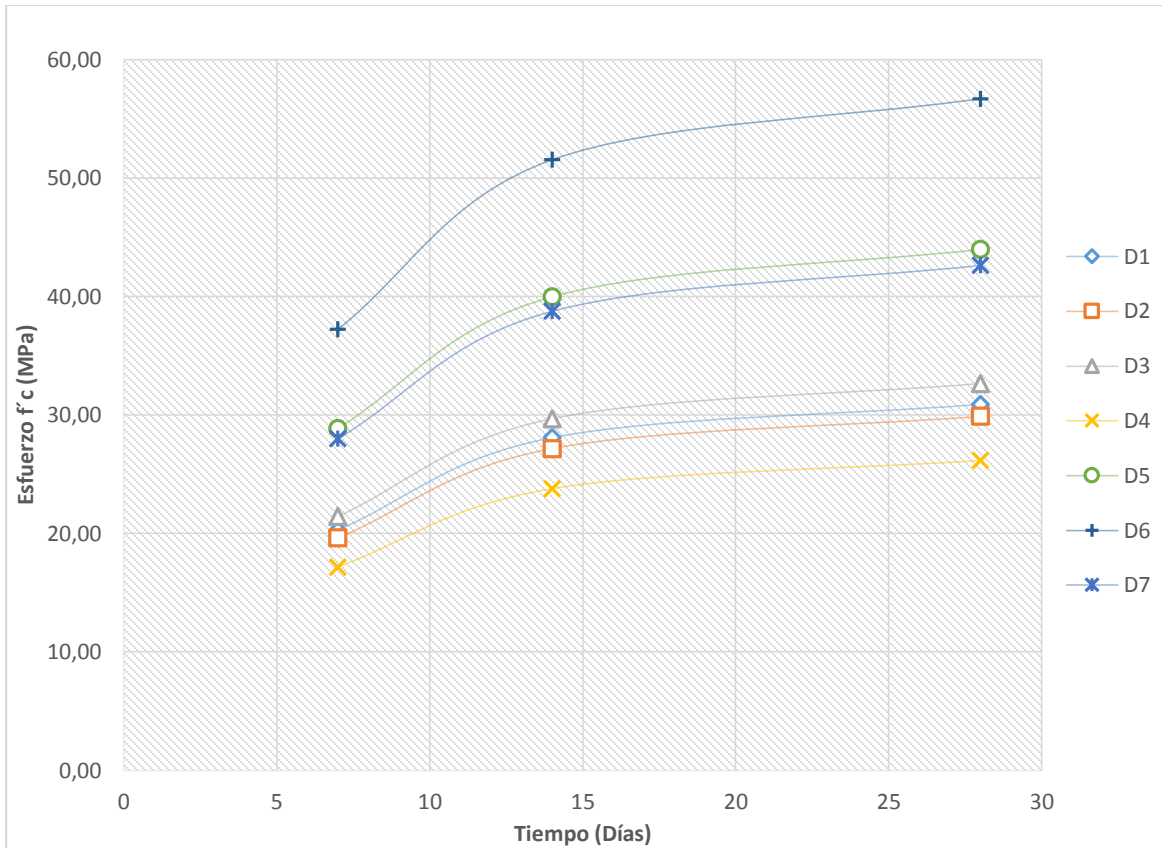


Figura 2: Evolución de las resistencia a la compresión
Elaborado por: Elizabeth Mariño

En la figura 2 podemos evidenciar que las probetas elaboradas con la dosificación N° 6 en base a CPHE tiene una resistencia a la compresión notablemente superior al resto de dosificaciones durante todos los periodos, esto pudo ser por los compuestos que forman al cemento CPHE. Por el resultado obtenido, la dosificación N°6 fue escogida como dosificación final para el cemento tipo HE.

Para la dosificación final con el cemento tipo I se escogió la N° 5, la cual presenta una resistencia ligeramente a la N°7.

Con respecto al porcentaje de cal hidráulica a añadido se escogió la N° 3 (7 % de cal) ya que, en comparación con los 3 porcentajes establecidos, fue la que demostró un mejor resultado.

Podemos inducir a partir de este resultado que la adición de cal a la mezcla baja la resistencia lo cual contradice lo dicho por Dopico et al. (2008), ya que, al ser las partículas de la cal hidráulica más grandes, en comparación a las del cemento absorben más agua, por lo tanto, al momento de realizar la mezcla el porcentaje de agua añadido es superior, tomando en cuenta que a mayor agua incluida en el mortero más baja es la resistencia. La tabla 12 presenta los resultados del análisis estadístico del ensayo.

Tabla 12

Análisis estadístico de probetas prueba.

Días	Medida	Dosificaciones						
		1	2	3	4	5	6	7
7	Media (MPa)	20.28	19.62	21.44	17.17	28.87	37.72	27.99
	Desviación E.	0.65	0.15	0.67	1.29	0.40	1.54	0.49
	Letra	CD	CD	C	D	B	A	B
14	Media (MPa)	28.08	27.16	29.68	23.77	39.98	52.54	38.75
	Desviación E.	0.91	0.21	0.93	0.37	0.54	1.70	0.67
	Letra	CD	CD	C	D	B	A	B
28	Media (MPa)	30.89	29.88	32.65	26.66	43.98	58.17	42.62
	Desviación E.	0.99	0.23	1.03	1.25	0.60	1.33	0.74
	Letra	CD	CD	C	D	B	A	B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

5.1.3 Dosificaciones finales para la elaboración de morteros.

La tabla 13 resume las dosificaciones finalmente escogidas: N°3, N°6, N°5 y la nueva nomenclatura que se utilizará de aquí en adelante, las mismas que se identifican por el tipo de cemento que contienen y el porcentaje de cal añadido. Además, en la tabla 14 se describe las dosificaciones de las 4 mezclas.

Tabla 13*Nomenclatura para los 4 tipos de mezclas.*

Nomenclatura	Tipo de Cemento	Porcentaje de Cal
M-0-I	Cemento Portland tipo I	0
M-7-I	Cemento Portland tipo I	7
M-0-HE	Cemento Portland tipo HE	0
M-7-HE	Cemento Portland tipo HE	7

Elaborado por: Mariño Elizabeth.**Tabla 14***Dosificaciones para los 4 tipos de mezclas.*

	M-0-I	M-7-I	M-0-HE	M-7-HE
Arena (kg)	62.25	67.2	62.25	67.2
Cemento (kg)	50.00	50.00	50.00	50.00
Cal (kg)	0.00	3.50	0.00	3.50
Agua (kg)	21.00	25.45	20.75	22.45
Plastificante (kg)	1.00	1.00	1.00	1.00

Nota: La dosificación está hecha para un saco de cemento de 50 kg.**Elaborado por:** Mariño Elizabeth.

5.2 Caracterización de las mezclas.

5.2.1 Resistencia a la compresión a corto plazo.

Los resultados del ensayo a compresión de las probetas cúbicas elaboradas con los 4 tipos de mezcla se presentan en la figura 3, y el análisis estadístico se exhibe en la tabla 15.

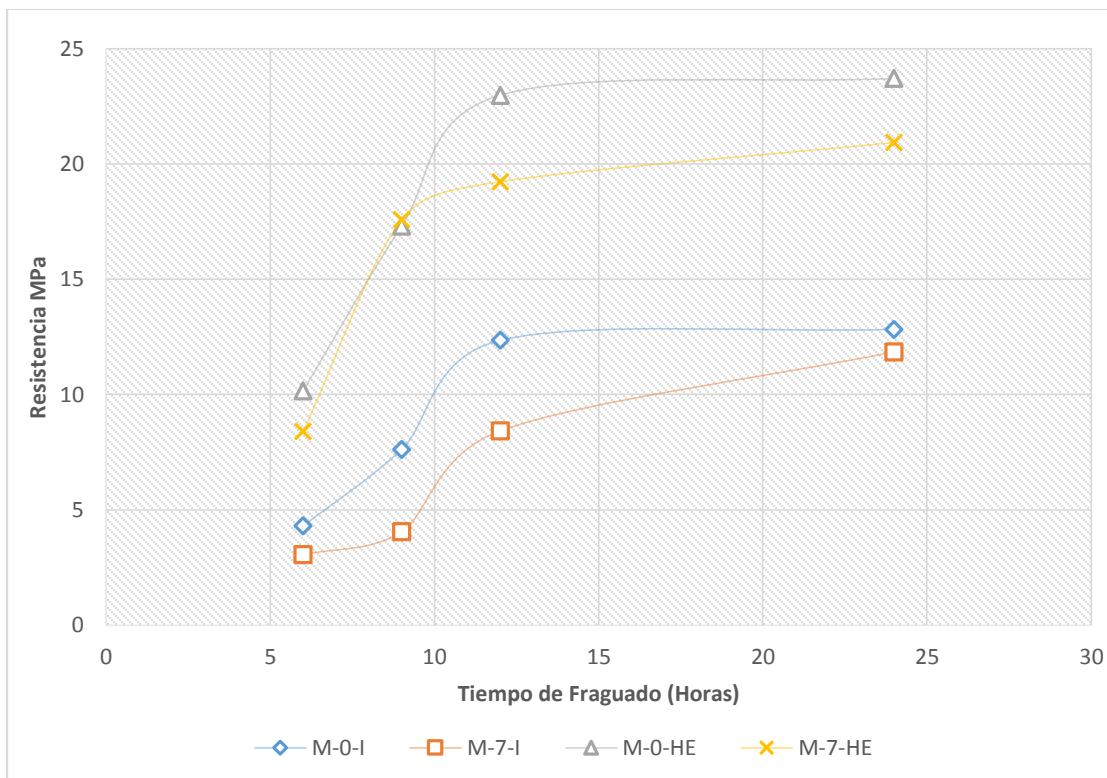


Figura 3: Evolución de la resistencia a la compresión a corto plazo.
Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Tabla 15

Análisis estadístico de probetas ensayadas a corto plazo.

Horas	Medida	Dosificaciones			
		M-0-I	M-7-I	M-0-HE	M-7-HE
6	Media (MPa)	4.30	3.05	10.16	8.40
	Desviación E.	0.23	0.33	0.22	0.39
	Letra	C	D	A	B
9	Media (MPa)	7.63	4.05	17.30	17.58
	Desviación E.	0.30	0.27	0.84	0.39
	Letra	B	C	A	A
12	Media (MPa)	12.35	8.43	22.98	19.23
	Desviación E.	1.34	0.75	0.25	0.87
	Letra	C	D	A	B
24	Media (MPa)	12.83	11.85	23.70	20.93
	Desviación E.	0.39	0.58	0.80	1.06
	Letra	C	C	A	B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Observamos en la tabla 15 que la mezcla M-0-HE presentó el mejor resultado a compresión y es superior a las demás, mientras que los morteros M-0-I y M-7-I son parcialmente iguales a las 24 horas de fraguado.

5.2.2 Resistencia a la compresión a largo plazo.

Los resultados del ensayo a compresión a largo plazo se presentan en la figura 4 y el análisis estadístico se exhibe en la tabla 16.

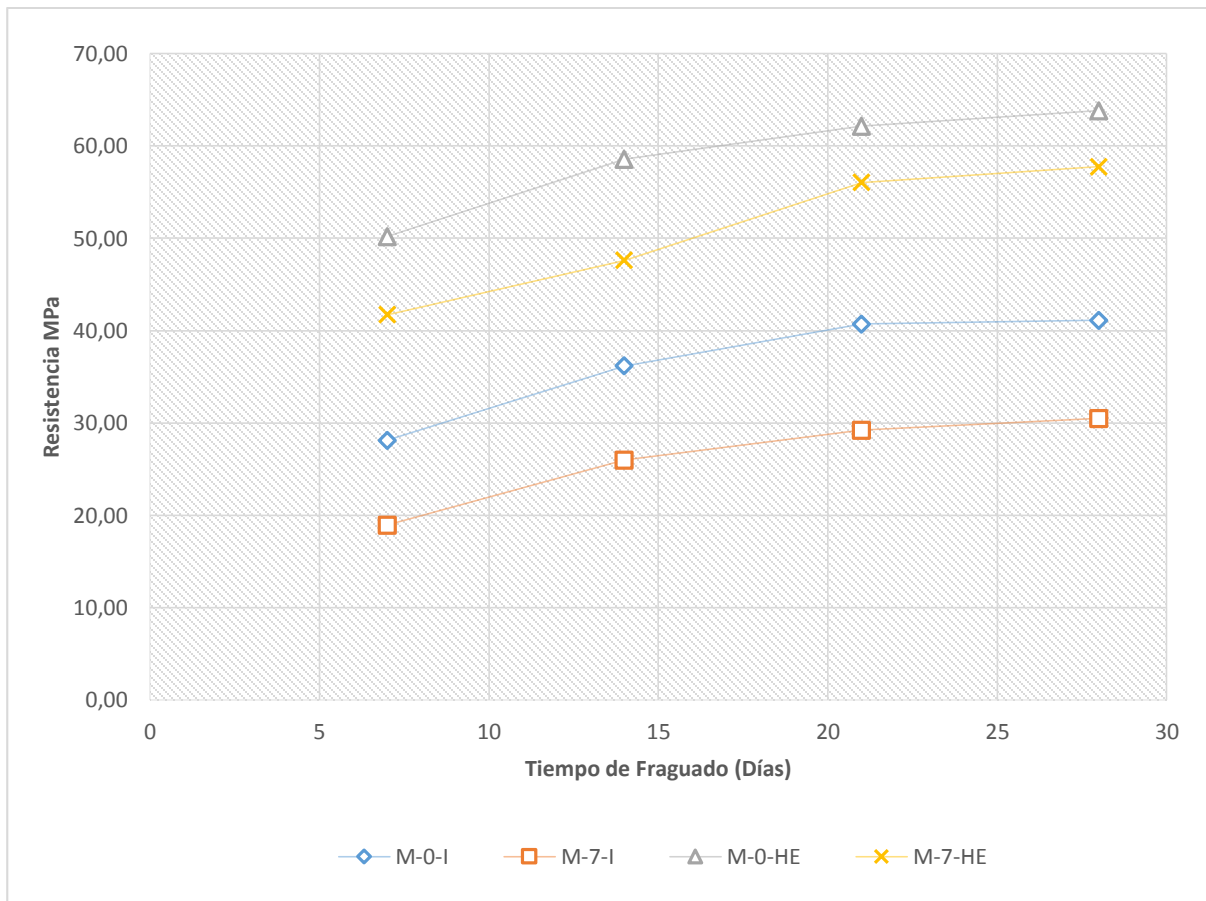


Figura 4: Evolución de la resistencia a la compresión a largo plazo.
Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Tabla 16*Análisis estadístico de probetas ensayadas a largo plazo.*

Días	Medida	Dosificaciones			
		M-0-I	M-7-I	M-0-HE	M-7-HE
7	Media	28.13	18.94	50.18	41.72
	Desviación E.	1.63	1.25	0.82	2.30
	Letra	C	D	A	B
14	Media	36.17	25.99	58.57	47.62
	Desviación E.	1.64	0.89	0.43	1.04
	Letra	C	D	A	B
21	Media	40.71	29.23	62.14	56.05
	Desviación E.	1.22	1.94	0.92	2.36
	Letra	C	D	A	B
28	Media	41.11	30.49	63.82	57.75
	Desviación E.	1.17	1.05	0.98	2.40
	Letra	C	D	A	B

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Como se aprecia en la figura 4, los 4 tipos de mezclas evidencian resultados diferentes durante el periodo analizado, siendo la resistencia más alta la del mortero M-0-HE. Por lo tanto, podemos decir que el mortero que presenta mayor resistencia a la compresión tanto a corto como a largo plazo es el mortero M-0-HE, debido al tipo de cemento utilizado (Cemento tipo HE), el mismo que al poseer menor cantidad de Belita (C_2S) en comparación al cemento tipo I, hace que las resistencias a tempranas y avanzadas edades aumente, afirmando así lo expuesto en la literatura.

Sin embargo, todos los resultados alcanzados superan el valor mínimo de un hormigón normal que es de 21 MPa, sugerido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2011)

5.2.3 Determinación del tiempo de fraguado por el método de Vicat.

Los tiempos de inicio y final de fraguado se presentan en la tabla 17 y son el resultado de la media de dos probetas elaboradas por cada tipo de mezcla.

Tabla 17*Resumen de resultados de tiempos de fraguado.*

Muestras	Tiempo Inicio de Fraguado (min)	Tiempo Final de Fraguado (min)
M-0-I	63	233
M-7-I	91	271
M-0-HE	49	214
M-7-HE	55	220

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Como se puede observar en la Tabla 17, la muestra M-0-HE tiene un menor inicio de fraguado, y es el más cercano al rango establecido en la literatura el cual es de 15-25 min, esto se debe a la mayor cantidad de Celita (C₃A) que contiene el cemento HE en comparación al tipo I, la misma que es responsable del fraguado rápido del clinker por el aumento de calor de hidratación.

5.2.4 Trabajabilidad.

Los resultados se presentan en la tabla 18.

Tabla 18.*Diámetros establecidos para evaluar la trabajabilidad.*

Tiempo (min)	M-0-I Diámetro (cm)	M-7-I Diámetro (cm)	M-0-HE Diámetro (cm)	M-7-HE Diámetro (cm)
1	21	18	22	19
2	19.5	16	19.5	16.5
3	19	15	18	15.5
5	16.5	14.8	16	14.3

Elaborado por: Mariño Elizabeth.

Como ilustra la tabla 18, los diámetros de trabajabilidad medidas en cm, tienen una tendencia decreciente en el tiempo, lo que significa que no hay escurrimiento y las mezclas se estabilizan de forma inmediata.

De esta manera el mortero M-0-HE presenta mejor trabajabilidad iniciando con un diámetro de 22 cm y llegando a uno de 16 cm, cumpliendo con lo establecido que es de 15 cm, el mismo que es considerado como un diámetro mínimo para una buena trabajabilidad.

Además, el tiempo de fraguado del mortero expuesto fue de 49 minutos lo que significa que mientras menor inicio de fraguado existe, mayor estabilidad adquiere la mezcla y por ende el escurrimiento disminuye. Hay que tener en cuenta que la trabajabilidad depende del porcentaje de acelerador de fraguado ya que si poseen mayor cantidad de aditivo plastificante los morteros poseen menor escurrimiento.

Finalmente, en la tabla 19 se presenta el resumen de todos los resultados obtenidos de los 4 tipos de morteros después de su caracterización.

Tabla 19
Resumen de resultados y discusión.

PROPIEDADES	IMPRESORAS 3D	M-0-I	M-7-I	M-0-HE	M-7-HE
Inicio de Fraguado (min)	15 a 25	63	91	49	55
Trabajabilidad (cm)	<15	16.5	14.8	16	14.3
Resistencia a corto plazo (MPa)	-	12.83	11.47	23.80	20.13
Resistencia a largo plazo (MPa)	-	41.11	30.49	63.82	57.75

Elaborado por: Elizabeth Mariño

En la tabla 19 se puede observar que el mortero M-0-HE posee las mejores características para ser considerado como una mezcla imprimible, ya que los valores arrojados mediante los ensayos son los que más se acercan a los requeridos, sin embargo, las demás muestras se aproximan a los estándares por lo que se pueden considerar como imprimibles de igual manera. Esto dependerá del proceso constructivo que tiene cada tecnología.

Además, que se evidencia una alta resistencia a la compresión, superando por mucho a la de un mampuesto común, y llegándose a comparar con la de un hormigón de alta resistencia.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones.

Con los materiales planteados se logró obtener un mortero apto para ser utilizado en impresoras 3D, ya que cumple con los parámetros requeridos que son trabajabilidad, tiempo de fraguado y resistencia.

El mortero que presenta las mejores características mecánicas para ser utilizado en impresoras 3D es la M-0-HE compuesta por cemento portland tipo HE de alta resistencia. Sin embargo, los morteros restantes también pueden ser probados en esta nueva tecnología puesto que sus características están acordes a lo estipulado en la literatura.

El aumento de cal hidráulica a la mezcla bajo la resistencia a la compresión de las probetas elaboradas con CPI en un 25.83 % y 9.51 % para las elaboradas con CPHE.

6.2. Recomendaciones.

Esta investigación, corresponde a una fase inicial de investigación en la que se elaboraron dosificaciones de morteros para impresoras 3D, sin embargo, el número de muestras es pequeña, por lo que hace falta más muestras para confirmar los hallazgos.

Las dosificaciones encontradas están compuestas por un alto contenido de cemento y por consiguiente el costo podría ser elevado, para lo cual se podría añadir más componentes a la mezcla que puedan suplir en parte al cemento y que puedan conservar o mejorar las propiedades de los morteros.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- ASTM. (2000). ASTM D-422 Análisis Granulométrico. American Society of Testing Materials.
- Calderón, A. (2012). Democratización de la impresión 3D con fotopolimeros. (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112106/cfcalderon_aa.pdf?sequence=1
- Campillo, M. (2017). *Prefabricacion en la arquitectura:Impresión 3D en hormigón.*(Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
<http://oa.upm.es/47556/>
- Cemento Chimborazo. (2012). Fichas Técnicas.
<http://www.cementochimborazo.com/>
- Dopico, J., Hernandez, M., Day, L., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martinez, L. (2008). Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Revista Ingenieria de Construccion*, 23(3), 171–178.
<https://doi.org/10.4067/S0718-50732008000300005>
- García, V. (2018). Materiales de Construcción. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Gardiner, J. (2011). Exploring the emerging design territory of construction 3D printing - project led architectural research. RMIT University.
<http://researchbank.rmit.edu.au/view/rmit:160277>
- Echeverria, N. (2014). *Evaluación de diferentes adiciones frente a su capacidad para fijar ión cloruro en mortero.* (Tesis de pregrado). Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona, España.
- INEN. INEN 158 Determinación del tiempo de fraguado, Método VICAT (2009). Quito - Ecuador.
- INEN. INEN 690 Determinación del contenido de agua étodo del secado al horno (2010). Quito - Ecuador.
- INEN. INEN 691 Determinación del Límite Líquido Método de Casa Grande (2010).

- INEN. INEN 692 Determinación del Límite Plástico (2010).
- INEN. INEN 696 Análisis Granulométrico en los áridos, fino y gruesos (2011).
- Khalil, N., Aouad, G., El Cheikh, K., & Rémond, S. (2017). Use of calcium sulfoaluminate cements for setting control of 3D-printing mortars. *Construction and Building Materials*, *157*, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.109>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *45*(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Malaeb, Z., Hachem, H., Tourbah, A., Maalouf, T., El Zarwi, N., & Hamzeh, F. (2016). 3D Concrete Printing : Machine and Mix Design, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, *6*(6), 14-22.
https://www.researchgate.net/profile/Farook_Hamzeh/publication/280488795_3D_Concrete_Printing_Machine_and_Mix_Design/links/55b608c308aec0e5f436d4a1/3D-Concrete-Printing-Machine-and-Mix-Design.pdf
- NEC (2001). Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- Veiga, M., & Santos, A. (2015). As argamassas de cal hidráulica natural na reabilitação. http://www.gecorpa.pt/Upload/Revistas/Rev58_Artigo%2009.pdf
- Rivadeneira, C. (2014). *Mejoramiento de las resistencias iniciales del cemento utilizando aditivos sintéticos en la molienda final para la empresa Cemento Chimborazo S.A* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Torres, R. (2016). *Diseño de hormigón para impresión en 3D*.(Tesis de maestría).Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España. <https://riunet.upv.es/handle/10251/67255>
- Wu, P., Wang, J., & Wang, X. (2016). A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, *68*, 21–31.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>

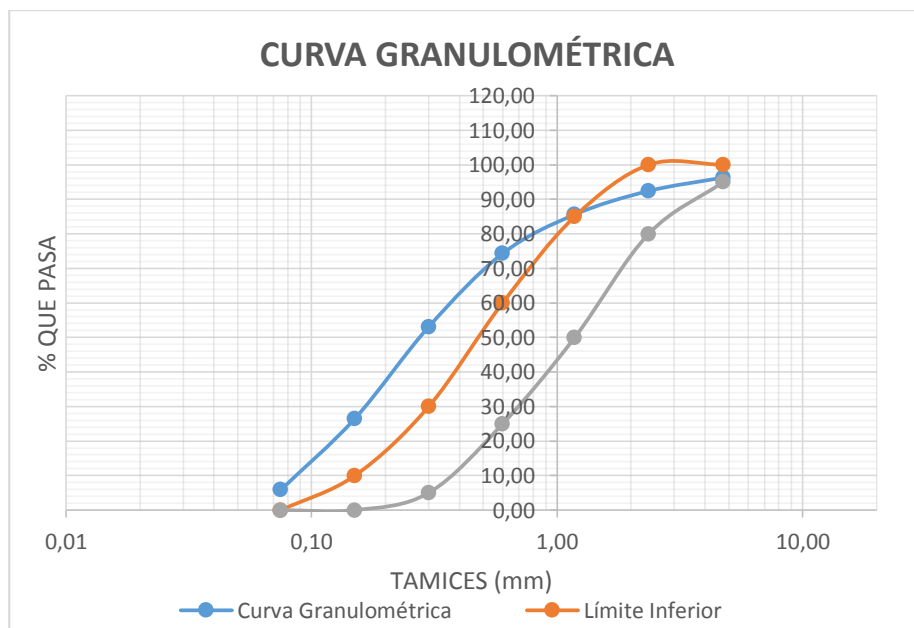
8. ANEXOS

Anexo 1: Contenido de humedad.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
PORCENTAJE DE HUMEDAD						
UBICACIÓN :	Provincia de Chimborazo, Cantón Riobamba, Laboratorios Integral de la construcción			REALIZADO POR: Carmen Elizabeth Mariño Salguero		
MUESTRA 1: Arena de rio de Penipe				DIRECTOR DEL PROYECTO: Ing. Javier Palacios		
Fecha de Muestreo:	11/12/2017	Hora:	10:30			
Fecha de Ensayo:	11/12/2017	Hora:	11:00			
T A B U L A C I Ó N D E D A T O S						
RECIPIENTES	Masa Rec (g)	Masa Rec + Mn (g)	Masa Rec+Ms (g)	Masa Húmeda (g)	Masa Seca (g)	% Humedad
TARA 1	16.69	99.82	95.54	83	78.85	5.43
TARA 2	17.03	106.56	101.46	90	84.43	6.04
% Humedad Promedio	5.73					

Anexo 2: Ensayo Granulométrico.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL							
ENSAYO:	GRANULOMETRÍA						
REALIZADO POR: Carmen Elizabeth Mariño Salguero				MUESTRA Arena de río Penipe			
DIRECTOR DEL PROYECTO: Ing. Javier Palacios				UBICACIÓN :		Provincia de Chimborazo, Cantón Riobamba, Laboratorios Integral de la construcción	
				FECHA DE MUESTREO:		2/1/2018	HORA 14:00
				FECHA DE ENSAYO:		3/1/2018	HORA 10:10
T A B U L A C I Ó N D E D A T O S							
MASA RECIPIENTE (g)		132				MASA INICIAL (g) 1000	
TAMICES	Retenido Parcial + Recipiente (g)	Retenido Parcial - Recipiente (g)	% Retenido parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa	Límites Específicos Serie Finos	
N° 4	169	37	3.7	3.70	96.30	100	95
N° 8	171	39	3.9	7.60	92.40	100	80
N° 16	200	68	6.8	14.40	85.60	85	50
N° 30	245	113	11.3	25.70	74.30	60	25
N° 50	344	212	21.2	46.90	53.10	30	5
N° 100	398	266	26.6	73.50	26.50	10	0
N° 200	338	206	20.6	94.10	5.90	0	0
BANDEJA	191	59	5.9	100.00	0.00		
TOTAL		1000					
MÓDULO DE FINURA		2.66					



Anexo 3: Ensayo de Densidad y porcentaje de absorción.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
PORCENTAJE DE ABSORCIÓN Y DENSIDAD.						
UBICACIÓN :		Provincia de Chimborazo, Cantón Riobamba, Laboratorio Integral de la Construcción		REALIZADO POR: Carmen Elizabeth Mariño Salguero DIRECTOR DEL PROYECTO: Ing. Javier Palacios		
MUESTRA : Arena de río de Penipe						
Fecha de Muestreo:	07/12/2017	Hora:	10:30			
Fecha de Ensayo:	07/12/2017	Hora:	11:00			
T A B U L A C I Ó N D E D A T O S						
Peso bandeja (P)	Peso bandeja + Materia SSS (Q)	Picnómetro + agua (B)	Picnómetro + Agua +materia SSS (C)	Peso bandeja + Arena seca (O)	Peso del material en SSS (S)	Peso del materia seco (A)
0.168	0.936	3.440	3.899	0.922	0.768	0.754
Densidad (kg/m ³)	2434.03					
Densidad en SSS (kg/m ³)	2479.22					
Densidad Aparente (kg/m ³)	2549.54					
% de Absorción	1.86					

Densidad aparente (kg/m^3)

$$densidad\ aparente = \frac{997.5\ kg/m^3 * A}{B + A - C}$$

% de absorción

$$de\ absorción = \frac{S - A}{A} * 100$$

Anexo 4: Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas prueba.

REGISTRO DE DATOS DE ENSAYOS DE CILINDROS												
Dosificación	COD. Cilindro	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura h1 (mm)	Altura h2 (mm)	Altura h3 (mm)	Carga Máxima (kN)	Tipo Falla	Fecha de Toma de Muestras	Fecha de Ensayo del Cilindro	Edad de la probeta (días)	Esfuerzo f'c (MPa)
1	1	100	101	200	200	200	162.70	5	8/2/2018	15/2/2018	7	20.74
	2	100	101	201	201	201	154.70	5	8/2/2018	15/2/2018	7	19.82
	3	101	101	201	200	200	230.09	5	8/2/2018	22/2/2018	14	28.72
	4	100	101	201	201	201	215.51	5	8/2/2018	22/2/2018	14	27.44
	5	100	101	201	200	200	248.10	2	8/2/2018	1/3/2018	21	31.59
	6	100	101	201	201	201	237.11	5	8/2/2018	1/3/2018	21	30.19
2	7	101	100	201	202	201	142.00	2	8/2/2018	15/2/2018	7	19.72
	8	101	100	200	200	200	127.70	5	8/2/2018	15/2/2018	7	19.51
	9	101	100	199	200	200	218.72	2	8/2/2018	22/2/2018	14	27.30
	10	101	100	200	201	200	216.39	2	8/2/2018	22/2/2018	14	27.01
	11	101	100	201	202	201	240.67	5	8/2/2018	1/3/2018	21	30.04
	12	101	100	200	200	200	238.11	5	8/2/2018	1/3/2018	21	29.72
3	13	101	100	199	200	200	164.60	5	14/2/2018	21/2/2018	7	20.96
	14	101	100	200	201	200	172.10	5	14/2/2018	21/2/2018	7	21.91
	15	101	101	201	202	202	232.50	2	14/2/2018	28/2/2018	14	29.02
	16	101	101	202	203	203	243.07	5	14/2/2018	28/2/2018	14	30.34
	17	102	101	201	202	202	260.82	5	14/2/2018	7/3/2018	21	31.92
	18	102	100	203	201	202	272.67	5	14/2/2018	7/3/2018	21	33.37
4	19	102	100	201	202	201	162.90	6	14/2/2018	21/2/2018	7	18.08
	20	102	101	200	202	201	155.70	2	14/2/2018	21/2/2018	7	16.26
	21	102	101	200	202	201	196.35	2	14/2/2018	28/2/2018	14	24.03
	22	101	101	201	202	202	188.35	5	14/2/2018	28/2/2018	14	23.51
	23	102	100	201	202	201	225.03	5	14/2/2018	7/3/2018	21	27.54
	24	102	101	200	202	201	210.57	5	14/2/2018	7/3/2018	21	25.77

5	25	100	101	200	200	200	317.00	2	16/2/2018	23/2/2018	7	29.15
	26	101	101	202	201	201	310.90	5	16/2/2018	23/2/2018	7	28.59
	27	101	101	202	203	203	323.35	2	16/2/2018	2/3/2018	14	40.36
	28	102	101	200	202	201	323.49	5	16/2/2018	2/3/2018	14	39.59
	29	102	100	201	202	201	362.80	5	16/2/2018	9/3/2018	21	44.4
	30	102	101	200	202	201	355.85	5	16/2/2018	9/3/2018	21	43.55
6	31	101	101	201	202	202	422.10	5	16/2/2018	23/2/2018	7	38.81
	32	101	101	202	203	203	387.50	5	16/2/2018	23/2/2018	7	36.63
	33	102	101	200	202	201	439.11	2	16/2/2018	2/3/2018	14	53.74
	34	101	101	201	202	202	411.32	2	16/2/2018	2/3/2018	14	51.34
	35	102	101	200	202	201	482.99	5	16/2/2018	9/3/2018	21	59.11
	36	102	100	201	202	201	467.63	5	16/2/2018	9/3/2018	21	57.23
7	37	102	101	201	202	202	325.40	2	16/2/2018	23/2/2018	7	28.33
	38	102	100	203	201	202	300.60	2	16/2/2018	23/2/2018	7	27.64
	39	100	101	200	200	200	308.03	5	16/2/2018	2/3/2018	14	39.22
	40	101	101	202	201	201	306.61	5	16/2/2018	2/3/2018	14	38.27
	41	102	101	200	202	201	352.50	5	16/2/2018	9/3/2018	21	43.14
	42	102	100	201	202	201	344.00	5	16/2/2018	9/3/2018	21	42.10

Anexo 5: Ensayo a la compresión en tiempos cortos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL				
ENSAYO: COMPRESIÓN DE CUBOS				
UBICACIÓN: Laboratorio integral de la construcción			Probetas M-0-I	
Realizado por: Carmen Elizabeth Mariño Salguero			Fecha Elaboración: 05/04/2018 Hora: 06:00	
Tutor de Proyecto: Ing. Javier Palacios			Fecha Ensayo: 05/04/2018 Hora: 12:00	
ENSAYO : COMPRESION DE CUBOS (50x50)mm				
HORAS	HORAS ENSAYADAS	Área (mm ²)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)
6	12:00	2500	10.20	4.30
9	15:00	2500	19.00	7.63
12	18:00	2500	30.85	12.35
24	6:00	2500	31.88	12.83

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL				
ENSAYO: COMPRESIÓN DE CUBOS				
UBICACIÓN: Laboratorio integral de la construcción			Probetas M-7-I	
Realizado por: Carmen Elizabeth Mariño Salguero			Fecha Elaboración: 05/04/2018 Hora: 06:00	
Tutor de Proyecto: Ing. Javier Palacios			Fecha Ensayo: 05/04/2018 Hora: 12:00	
ENSAYO : COMPRESION DE CUBOS (50x50)mm				
HORAS	HORAS ENSAYADAS	Área (mm ²)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)
6	12:00	2500	7.70	3.05
9	15:00	2500	10.10	4.05
12	18:00	2500	21.03	8.43
24	6:00	2500	29.95	11.85

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL				
ENSAYO: COMPRESIÓN DE CUBOS				
UBICACIÓN: Laboratorio integral de la construcción			Probetas M-0-HE	
Realizado por: Carmen Elizabeth Mariño Salguero			Fecha Elaboración: 05/04/2018 Hora: 06:00	
Tutor de Proyecto: Ing. Javier Palacios			Fecha Ensayo: 05/04/2018 Hora: 12:00	
ENSAYO : COMPRESION DE CUBOS (50x50)mm				
HORAS	HORAS ENSAYADAS	Área (mm ²)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)
6	12:00	2500	25.23	10.16
9	15:00	2500	43.70	17.30
12	18:00	2500	58.93	22.98
24	6:00	2500	59.63	23.70

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL				
ENSAYO: COMPRESIÓN DE CUBOS				
UBICACIÓN: Laboratorio integral de la construcción			Probetas M-7-HE	
Realizado por: Carmen Elizabeth Mariño Salguero			Fecha Elaboración: 05/04/2018 Hora: 06:00	
Tutor de Proyecto: Ing. Javier Palacios			Fecha Ensayo: 05/04/2018 Hora: 12:00	
ENSAYO : COMPRESION DE CUBOS (50x50)mm				
HORAS	HORAS ENSAYADAS	Área (mm ²)	Carga (KN)	Resistencia (MPa)
6	12:00	2500	22.48	8.40
9	15:00	2500	44.02	17.58
12	18:00	2500	47.83	19.23
24	6:00	2500	52.83	20.93

Anexo 6: Ensayo a la compresión a largo plazo.

Mortero: M-0-I

REGISTRO DE DATOS DE ENSAYOS DE CILINDROS											
COD. Cilindro	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura h1 (mm)	Altura h2 (mm)	Altura h3 (mm)	Carga Máxima (kN)	Tipo Falla	Fecha de Toma de Muestras	Fecha de Ensayo del Cilindro	Edad de la probeta (días)	Resistencia MPa
1	101	101	200	200	203	215.40	2	13/3/2018	20/3/2018	7	27.43
2	100	100	201	201	200	237.50	2	13/3/2018	20/3/2018	7	30.24
3	101	101	200	200	199	207.41	5	13/3/2018	20/3/2018	7	26.41
4	100	100	199	199	200	223.40	5	13/3/2018	20/3/2018	7	28.45
5	99	100	200	200	200	281.40	2	13/3/2018	27/3/2018	14	35.83
6	101	101	200	200	200	288.10	5	13/3/2018	27/3/2018	14	36.68
7	101	101	201	201	200	298.80	5	13/3/2018	27/3/2018	14	38.05
8	101	101	200	200	200	268.00	5	13/3/2018	27/3/2018	14	34.12
9	101	100	199	198	199	325.60	5	13/3/2018	3/4/2018	21	41.45
10	101	100	201	201	201	325.00	2	13/3/2018	3/4/2018	21	41.38
11	100	100	201	201	202	322.90	5	13/3/2018	3/4/2018	21	41.11
12	101	101	200	203	201	305.50	2	13/3/2018	3/4/2018	21	38.89
13	101	101	199	200	200	326.60	5	13/3/2018	10/4/2018	28	41.58
14	101	101	200	200	201	329.30	5	13/3/2018	10/4/2018	28	41.93
15	101	101	199	199	199	326.40	5	13/3/2018	10/4/2018	28	41.55
16	101	101	202	203	200	309.20	2	13/3/2018	10/4/2018	28	39.37

Mortero: M-7-I

REGISTRO DE DATOS DE ENSAYOS DE CILINDROS											
COD. Cilindro	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura h1 (mm)	Altura h2 (mm)	Altura h3 (mm)	Carga Máxima (kN)	Tipo Falla	Fecha de Toma de Muestras	Fecha de Ensayo del Cilindro	Edad de la probeta (días)	Resistencia MPa
1	101	102	200	200	200	136.10	6	14/3/2018	21/3/2018	7	17.33
2	102	100	200	200	200	145.90	2	14/3/2018	21/3/2018	7	18.58
3	101	102	200	200	200	157.00	2	14/3/2018	21/3/2018	7	19.99
4	101	101	200	200	200	156.10	5	14/3/2018	21/3/2018	7	19.87
5	101	100	200	200	200	212.10	5	14/3/2018	28/3/2018	14	27.01
6	100	101	200	199	200	198.00	6	14/3/2018	28/3/2018	14	25.22
7	100	100	200	200	200	207.80	5	14/3/2018	28/3/2018	14	26.46
8	101	102	200	200	199	198.40	5	14/3/2018	28/3/2018	14	25.27
9	100	100	200	199	200	246.10	5	14/3/2018	4/4/2018	21	31.33
10	101	100	200	199	200	209.40	5	14/3/2018	4/4/2018	21	26.66
11	100	100	199	200	200	233.40	5	14/3/2018	4/4/2018	21	29.72
12	100	100	200	200	199	229.50	2	14/3/2018	4/4/2018	21	29.22
13	101	101	200	201	201	256.98	5	14/3/2018	11/4/2018	28	31.78
14	101	101	201	201	201	243.20	5	14/3/2018	11/4/2018	28	30.46
15	101	101	199	200	200	229.50	5	14/3/2018	11/4/2018	28	29.22
16	101	101	201	201	199	239.60	5	14/3/2018	11/4/2018	28	30.51

Mortero: M-0-HE

REGISTRO DE DATOS DE ENSAYOS DE CILINDROS											
COD. Cilindro	Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura h1 (mm)	Altura h2 (mm)	Altura h3 (mm)	Carga Máxima (kN)	Tipo Falla	Fecha de Toma de Muestras	Fecha de Ensayo del Cilindro	Edad de la probeta (días)	Resistencia MPa
1	101	101	201	200	200	385.50	2	15/3/2018	22/3/2018	7	49.09
2	101	101	203	203	200	398.00	2	15/3/2018	22/3/2018	7	50.68
3	100	101	201	202	201	392.80	2	15/3/2018	22/3/2018	7	50.01
4	101	101	201	200	201	400.00	2	15/3/2018	22/3/2018	7	50.93
5	101	100	200	200	201	435.62	5	15/3/2018	29/3/2018	14	57.96
6	101	101	202	200	201	462.30	5	15/3/2018	29/3/2018	14	58.86
7	101	102	200	201	200	460.20	5	15/3/2018	29/3/2018	14	58.59
8	101	101	201	201	202	463.46	5	15/3/2018	29/3/2018	14	58.88
9	101	100	201	201	200	495.50	5	15/3/2018	5/4/2018	21	62.57
10	101	101	201	200	201	506.10	5	15/3/2018	5/4/2018	21	60.83
11	101	100	201	201	201	493.90	2	15/3/2018	5/4/2018	21	62.22
12	101	101	202	202	202	509.60	5	15/3/2018	5/4/2018	21	62.94
13	101	100	200	201	200	513.20	5	15/3/2018	12/4/2018	28	63.09
14	100	100	198	201	200	477.70	5	15/3/2018	12/4/2018	28	64.43
15	99	99	201	200	200	488.70	5	15/3/2018	12/4/2018	28	62.89
16	100	100	200	202	201	494.30	5	15/3/2018	12/4/2018	28	64.88

Mortero: M-7-HE

REGISTRO DE DATOS DE ENSAYOS DE CILINDROS											
COD. Cilindro	diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Altura h1 (mm)	Altura h2 (mm)	Altura h3 (mm)	Carga Máxima (kN)	Tipo Falla	Fecha de Toma de Muestras	Fecha de Ensayo del Cilindro	Edad de la probeta (días)	Resistencia MPa
1	101	102	202	202	203	346.30	2	19/3/2018	26/3/2018	7	44.09
2	101	102	201	201	203	337.90	5	19/3/2018	26/3/2018	7	43.02
3	101	101	202	201	203	305.90	5	19/3/2018	26/3/2018	7	38.94
4	101	101	201	202	202	320.50	2	19/3/2018	26/3/2018	7	40.81
5	100	102	201	200	200	377.70	2	19/3/2018	2/4/2018	14	48.09
6	101	101	201	201	200	370.70	5	19/3/2018	2/4/2018	14	47.20
7	102	100	201	202	201	383.20	5	19/3/2018	2/4/2018	14	48.79
8	100	100	202	202	202	364.50	5	19/3/2018	2/4/2018	14	46.40
9	101	102	202	201	201	444.70	2	19/3/2018	9/4/2018	21	56.62
10	101	100	201	202	201	439.30	5	19/3/2018	9/4/2018	21	55.93
11	100	100	201	200	201	416.00	5	19/3/2018	9/4/2018	21	52.97
12	101	101	201	202	202	460.70	5	19/3/2018	9/4/2018	21	58.66
13	100	100	201	201	201	442.20	5	19/3/2018	16/4/2018	28	56.30
14	100	100	200	201	201	433.20	5	19/3/2018	16/4/2018	28	55.16
15	100	100	200	201	201	472.70	5	19/3/2018	16/4/2018	28	60.18
16	100	100	200	202	201	466.20	5	19/3/2018	16/4/2018	28	59.36

Anexo 7: Ensayo determinación del tiempo de fraguado.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL							
ENSAYO: DETERMINACION DEL TIEMPO DE FRAGUADO							
UBICACIÓN: Laboratorios Universidad Nacional de Chimborazo				MUESTRAS			
Realizado por: Carmen Elizabeth Mariño Salguero.				Fecha Ensayo: 28/03/2018			
Tutor de Proyecto: Ing. Javier Palacios				Hora: 14:10			
M-0-I		M-7-I		M-0-HE		M-7-HE	
Hora Elaboración Mortero: 14:10		Hora Elaboración Mortero: 14:35		Hora Elaboración Mortero: 14:55		Hora Elaboración Mortero: 15:15	
Tiempo Inicial(h)	Penetración de la Aguja de Vicat(mm)	Tiempo Inicial(h)	Penetración de la Aguja de Vicat(mm)	Tiempo Inicial(h)	Penetración de la Aguja de Vicat(mm)	Tiempo Inicial(h)	Penetración de la Aguja de Vicat(mm)
15:13	25	16:06	25	15:44	25	16:10	25
15:28	23	16:21	22	15:59	22	16:25	23
15:43	18	16:36	20	16:14	15	16:40	17
15:58	15	16:51	19	16:29	9	16:55	8
16:13	11	17:06	17	16:44	5	17:10	5
16:28	10	17:21	16	16:59	4	17:25	4
16:43	7	17:36	11	17:14	3	17:40	3
16:58	4	17:51	7	17:29	1	17:55	2
17:13	2	18:06	5	18:29	0	18:10	1
17:28	2	18:21	3			18:25	1
17:43	1	18:36	1			18:40	0.5
17:58	0.5	18:51	0.5			18:55	0
18:13	0	19:06	0				