



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

**Transformación del hormigón convencional a hormigón
autocompactante, utilizando un superplastificante**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL CON MENCIÓN EN GERENCIAS DE CONSTRUCCIONES

Nombre de los autores:

JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO

KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO

Nombre del director:

ROLANDO ARMAS NOVOA

CUENCA, ECUADOR

2021

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres Cornelio y Martha; a mis hermanos José y Dania; a mis abuelitos que aún están conmigo y a mi querido abuelito en el cielo Daniel Brito, quienes siempre me apoyaron para continuar mis estudios y más que nada crecer como una persona de bien. Me enseñaron a ser perseverante, indagador y humilde, ya que gracias a la inspiración y afecto que me han dado he logrado culminar con mis estudios y cumplir una de mis metas.
(Jhoan Sebastian Ruiz)

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Elvia y Enrique, a mis hermanos Madelyne y Josué, por su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos que siempre me han ayudado a enfrentarme a cualquier adversidad, por inculcarme valores de vida mediante el ejemplo, pero en especial por el esfuerzo y sacrificio que han tenido que realizar para que yo haya podido llegar hasta aquí. A mi mamita Olivia y a mis tíos Rocío y Freddy, por siempre estar ahí brindando ayuda y apoyo a toda mi familia. Este triunfo no es solo mío sino también de las personas que siempre estuvieron conmigo y creyeron en mí.
(Kevin Ismael Suárez Ortuño)

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a nuestro tutor, Rolando Armas Novoa, quien ha demostrado ser un excelente profesor y un buen amigo, a lo largo de la carrera universitaria, guiando a sus estudiantes y compartiendo su vasta experiencia. Gracias a su apoyo hemos conseguido realizar nuestro trabajo de titulación con éxito. (Jhoan Sebastian Ruiz Brito & Kevin Ismael Suárez Ortuño)

“Transformación del hormigón convencional a hormigón autocompactante, utilizando un superplastificante”

RESUMEN

El hormigón autocompactante (HAC) se introdujo a partir de la búsqueda de la mejora de la trabajabilidad en la construcción. El principal problema es el desconocimiento de esta nueva tecnología en nuestro entorno. El objetivo es analizar y comparar las propiedades de dos tipos de mezclas en estado fresco y endurecido, variando únicamente la cantidad de superplastificante. La metodología es pragmática y analítica. Como resultado del trabajo de investigación, se obtuvo un hormigón autocompactante a partir de un hormigón convencional no sólo con un notable aumento de su trabajabilidad, sino que también su resistencia a la compresión no se modificó de manera significativa.

Palabras clave: construcción, hormigón autocompactante, superplastificante, trabajabilidad.

Ing. Rolando Armas Novoa
Director de Trabajo de Titulación

JOSE
FERNANDO
VAZQUEZ
CALERO

Firmado digitalmente por
JOSE FERNANDO
VAZQUEZ CALERO
Fecha: 2021.09.23
10:24:52 -05'00'

Ing. José Fernando Vázquez Calero
Director de Trabajo de Titulación

Jhoan Sebastian Ruiz Brito
Autor

Kevin Ismael Suárez Ortuño
Autor

"Transformation of conventional concrete to self-compacting concrete using a superplasticizer"

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) was introduced to improve workability in construction. The main problem was the lack of knowledge of this new technology in our environment. Thus, the objective was to analyze and compare the properties of two types of mixtures in both fresh and hardened state, varying only the amount of superplasticizer. The methodology was pragmatic and analytical. As a result of the investigation work, self-compacting concrete was obtained from a conventional concrete not only with a noticeable increase in its workability and without influencing on its compressive strength in a significantly manner.

Keywords: construction, self-compacting concrete, superplasticizer, workability.



Ing. Rolando Armas Novoa
Director

JOSE
FERNANDO
VAZQUEZ
CALERO

Firmado digitalmente por
JOSE FERNANDO
VAZQUEZ CALERO
Fecha: 2021.09.23
10:25:15 -05'00'

Ing. José Fernando Vázquez Calero
School Director



Jhoan Sebastian Ruiz Brito
Author



Kevin Ismael Suárez Ortuño
Author



Translated by

Jhoan Ruiz and Kevin Suárez

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Motivación de la investigación.....	1
1.2	Problemática	1
1.3	Estado del Arte	2
1.4	Objetivos	2
1.4.1	Objetivo general	2
1.4.2	Objetivos específicos	2
2	Marco teórico	3
2.1	Introducción.....	3
2.1.1	Hormigón convencional (HC)	3
2.1.2	Hormigón autocompactante (HAC).....	3
2.2	Componentes	3
2.2.1	Cemento.....	4
2.2.2	Áridos	6
2.2.3	Agua.....	6
2.2.4	Aditivos	7
2.3	Dosificación.....	9
2.4	Propiedades del hormigón convencional en estado fresco.....	11
2.4.1	Trabajabilidad	11
2.5	Propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco	13
2.5.1	Ensayo de capacidad de llenado y escurrimiento	14
2.5.2	Ensayo del embudo en V	15
2.5.3	Ensayo de la caja en L	15
2.6	Propiedades del hormigón en estado endurecido	16
2.6.1	Resistencia del hormigón.....	16
3	Metodología	17
3.1	Metodología general.....	17
3.2	Medición de materiales	19
3.3	Mezclado	22
3.4	Medición de la trabajabilidad	23

3.4.1	Ensayo de asentamiento (Cono de Abrams).....	23
3.4.2	Ensayo de capacidad de llenado y escurrimiento	24
3.5	Elaboración de probetas de hormigón	25
3.6	Ensayo de compresión simple	27
4	Resultados	29
4.1	Medición de la trabajabilidad	29
4.2	Ensayo de compresión simple	31
4.3	Análisis de costos	33
5	Conclusiones y recomendaciones	34
5.1	Conclusiones	34
5.2	Recomendaciones	34
6	Bibliografía	35
7	Anexos	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: (a) asentamiento uniforme, (b) asentamiento por cizallamiento (c) colapso. Fuente: (Neville, 2011)	12
Figura 2.2: Cono de Abrams. Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)	15
Figura 2.3: Embudo en V. Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)	15
Figura 2.4: Caja en L. Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)	16
Figura 2.5: Relación entre la resistencia y la relación agua/cemento del hormigón. Fuente: (Neville, 2011)	17
Figura 3.1: Diagrama de flujo del método general a aplicar. Fuente: Autores	18
Figura 3.2: Cribado de material. Fuente: Autores.....	19
Figura 3.3: Recipientes para medición de áridos. Fuente: Autores.....	20
Figura 3.4: Medición de cemento Portland tipo I. Fuentes: Autores	20
Figura 3.5: Probetas para medición de agua. Fuente: Autores.....	21
Figura 3.6: Medición de superplastificante. Fuente: Autores	21
Figura 3.7: Medición de áridos. Fuente: Autores.....	22
Figura 3.8: Mezclado de materiales sólidos. Fuente: Autores	22
Figura 3.9: Agregado de agua a la mezcla. Fuente: Autores	23
Figura 3.10: Colocado de superplastificante. Fuente: Autores	23
Figura 3.11: Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. Fuente: Autores	24
Figura 3.12: Medición de diámetro de escurrimiento. Fuente: Autores	25
Figura 3.13: Toma de probetas de hormigón. Fuente: Autores	26
Figura 3.14: Elaboración de probetas de HAC. Fuente: Autores.....	26
Figura 3.15: Curado en inmersión. Fuente: Autores	27
Figura 3.16: Ensayo a compresión. Fuente: Autores	28
Figura 4.1: Clasificación de la trabajabilidad con respecto a la cantidad de aditivo, según el asentamiento. Fuente: Autores.....	29
Figura 4.2: Clasificación del tipo de hormigón según el diámetro de escurrimiento. Fuente: Autores	30
Figura 4.3: Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de edad. Fuente: Autores. 31	
Figura 4.4: Comparación entre la resistencia y trabajabilidad del hormigón variando la cantidad de aditivo. Fuente: Autores.....	32
Figura 4.5: Relación del costo de hormigón por m ³ y la cantidad de superplastificante utilizada. Fuente: Autores	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Dosificación del hormigón a utilizar, para una resistencia aproximada de 240 kg/cm ² . Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2015)	11
Tabla 2.2: Clasificación del nivel de trabajabilidad según el asentamiento. Fuente: (Neville, 2011)	13
Tabla 2.3: Criterios para la clasificación del HAC de acuerdo al diámetro de escurrimiento. Fuente: (EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS (EFNARC), 2006)	14
Tabla 4.1: Resultados del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. Fuente: Autores	29
Tabla 4.2: Resultados del ensayo de escurrimiento. Fuente: Autores	30
Tabla 4.3: Resultados de ensayo a la compresión a los 7 y 28 días. Fuente: Autores	31
Tabla 4.4: Costo de hormigón por m ³ según la cantidad de superplastificante. Fuentes: Autores	33

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1: Relación entre la resistencia a la compresión del hormigón y la relación agua/cemento. Fuente: (Neville, 2011)	16
--	----

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 6.1: Resultados de las propiedades en estado fresco del hormigón. Fuente: Autores	37
Anexo 6.2: Resultados de ensayos de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de muestras de hormigón con y sin superplastificante. Fuente: Autores	38
Anexo 6.3: Ensayo de escurrimiento con 2.5% de superplastificante. Fuente: Autores	39
Anexo 6.4:Análisis de precios unitarios para HC/m3. Fuente: Autores	40
Anexo 6.5: Análisis de precios unitarios para HC con 0.5% superplastificante/m3. Fuente: Autores	41
Anexo 6.6: Análisis de precios unitarios para HC con 1% superplastificante/m3. Fuente: Autores	42
Anexo 6.7:Análisis de precios unitarios para HC con 1.5% superplastificante/m3. Fuente: Autores	43

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación de la investigación

El hormigón autocompactante (HAC) es un material de construcción, que se originó en Japón a partir de la búsqueda de mejorar la productividad en la construcción con respecto al hormigón convencional, generando hormigones de altas prestaciones. Este material de construcción, a diferencia del hormigón común, posee mayor trabajabilidad, además que presenta un terminado con menos imperfecciones debido a que es capaz de densificarse por gravedad propia. Es así que se ha ido implementando en distintas obras civiles, pues se adapta a la forma del encofrado aun si éste presentase una cuantía de acero elevada.

Sin embargo, en cuanto a su elaboración existen ciertos inconvenientes tales como, la falta de conocimiento de este material y déficit en su control de calidad. De esta manera su campo de estudio es abierto y proyectable a futuras investigaciones, ya sean en el caso de rendimientos de producción con diferentes diseños de mezclas (dosificaciones, agregados y aditivos), como de normalización en los procesos de evaluación de sus propiedades en laboratorio e “in situ”.

1.2 Problemática

Uno de los principales inconvenientes es el desconocimiento de la comunidad constructora acerca del HAC, tanto en su elaboración como los beneficios que se pueden obtener del mismo. En países en vías de desarrollo los avances y/o investigaciones han sido limitadas en su mayoría a ensayos de laboratorio, por lo que fabricar este tipo de hormigón en obra (mayor escala), tiende a ser complicado, ya que existen varios factores que pueden comprometer su resistencia a la compresión (mano de obra no cualificada, relación agua/cemento, granulometría, uso incorrecto de superplastificantes, modificadores de viscosidad u otros aditivos, así como la carencia de metodologías normalizadas para su realización), incluso a nivel de laboratorio. Considerando la dificultad e incertidumbre de los materiales necesarios para la elaboración de HAC, se propone realizar un análisis de la variabilidad de las propiedades en estado fresco y endurecido a partir de una mezcla de hormigón convencional en la cual se variará la cantidad de superplastificante respecto al peso del cemento, hasta obtener un hormigón autocompactante.

1.3 Estado del arte

El Hormigón Autocompactante se originó en Japón a finales de la década de los 80 's del siglo pasado, por un grupo de investigadores de la Universidad de Tokio, liderados por el profesor Hajime Okamura, quienes en ese entonces realizaban análisis para dar solución a problemas de durabilidad del hormigón, debido a la ineficiencia, de los trabajadores, específicamente al momento de compactar el hormigón. Una de sus primeras aplicaciones en obra fue, para 1988, en Japón, donde se utilizaron materiales de la zona y se obtuvieron resultados acordes con los límites de resistencia esperados.

En el Ecuador, se han realizado trabajos de investigación, en su mayoría de ensayos de laboratorio, que han tenido como finalidad realizar el diseño de mezclas para resistencias específicas, considerando la variabilidad de las características de los materiales presentes en el entorno y que permitan replicar las propiedades del hormigón autocompactante.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar y comparar las propiedades en estado fresco y endurecido de dos tipos de mezclas de hormigón con la misma dosificación y relación agua/cemento, variando la cantidad de superplastificante hasta obtener un hormigón autocompactante.

1.4.2 Objetivos específicos

- Fijar una misma relación agua/cemento para los dos tipos de mezclas hormigón a analizar, sin y con superplastificante.
- Determinar las propiedades en estado fresco (trabajabilidad) de los dos tipos de mezclas, mediante el Cono de Abrams.
- Realizar ensayos de resistencia a la compresión del hormigón endurecido a los 7 y 28 días.
- Determinar la relación que existe entre la cantidad utilizada de superplastificante y las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

2.1.1 Hormigón convencional (HC)

El hormigón es un material de construcción artificial conformado por una mezcla de cemento, agua, áridos y, dependiendo del uso, de aditivos. Es el material más usado en el mundo debido a que tiene facilidad de adaptarse a cualquier forma de encofrado, además de que presenta un amplio rango de resistencias que son vitales al momento de diseñar una estructura.

Además de su resistencia, una de las características más importantes del hormigón es la trabajabilidad, la cual hace referencia a la facilidad para ser manejado adecuadamente y dependiendo de los fines a los que vaya a ser utilizado, sea capaz de llenar de manera fluida el encofrado, evitando segregación y garantizando una resistencia que cumpla con las solicitaciones del diseño.

2.1.2 Hormigón autocompactante (HAC)

El HAC es aquel que tiene la capacidad de consolidarse sin la necesidad de energía externa (únicamente acción de la gravedad), evitando la segregación de los materiales. Debido a su alta trabajabilidad en estado fresco, es capaz de llenar los encofrados sin problema alguno, aun si estos presentaran grandes cuantías de acero.

2.2 Componentes

Los materiales que se utilizan para la generación de hormigones autocompactantes son similares en su mayoría a los que se necesitan para elaborar hormigones convencionales, siendo los primordiales el agua, cemento, áridos y aditivos. No obstante, se debe tener en cuenta que las proporciones de los componentes que se utilizan para los dos tipos de hormigones son diferentes. Fundamentalmente el HAC requiere un mayor contenido de áridos finos para disminuir el volumen de vacíos de aire, lo cual hace más denso al hormigón, por lo tanto, aumenta la resistencia a la compresión del hormigón. Por último, en este tipo de hormigón es primordial el uso de aditivos, como lo es el superplastificante y en algunos casos los agentes modificadores de viscosidad (Cañizares, 2012).

2.2.1 Cemento

El cemento y demás materiales cementantes tales como las cales, los asfaltos, y los alquitranes, son materiales aglomerantes que poseen la capacidad de juntar fragmentos minerales, debido a sus propiedades adhesivas y cohesivas. Para generar elementos estructurales de hormigón, se debe utilizar los cementos hidráulicos, los cuales tienen como característica principal la necesidad de agua para adquirir sus propiedades cementantes mediante una reacción química. Los cementos hidráulicos están constituidos principalmente por silicatos y aluminatos de cal. Estos se clasifican en: cementos naturales, cementos con alto contenido de alúmina y cemento portland; este último es el más destacado de entre los mencionados, puesto que es el más usado para la elaboración de hormigón estructural (Proaño, 2008).

El nombre de cemento portland viene dado por la semejanza del color grisáceo que posee, con el de las piedras de la región de Portland, en Inglaterra. Para producir este tipo de cemento, principalmente se debe triturar los materiales crudos, los cuáles consisten en calizas y arcillas, estos posteriormente se deben mezclar en proporciones adecuadas. Además, en el proceso hay la etapa de calcinación, la cual debe realizarse a una temperatura aproximada de 1400°C, en un cilindro rotativo para obtener una fusión parcial del material, y de esta manera formar bolas conocidas como clinker. Finalmente, para obtener el cemento portland el clinker debe ser enfriado y posteriormente molido conjuntamente con yeso hasta obtener un polvo fino (Proaño, 2008).

En el mercado existen diversos tipos de cemento portland, puesto que en algunas ocasiones se necesita adoptar ciertas propiedades especiales, las cuales van a ser definidas por el tipo de construcción.

- Tipo I.- Es el cemento que se utiliza de manera general en la construcción; sin embargo, hay que tener en cuenta que estos hormigones no deben estar expuestos a sulfatos, ya sea en el ambiente, suelo o el agua que se puede encontrar en el subsuelo. Además, se debe considerar que posee un alto calor de hidratación, por lo que no es apropiado utilizarlo en circunstancias en las que el clima tenga una temperatura considerablemente alta (Proaño, 2008).

- Tipo IA.- Este tipo de cemento tiene las mismas características que el mencionado anteriormente (tipo I), con la única diferencia que este inserta burbujas de aire en el hormigón.
- Tipo IP.- Contiene entre 15 a 40% de puzolana, provocando que la curva de resistencia cambie con mayor rapidez la pendiente en comparación del cemento portland tipo I.
- Tipo II.- Su característica principal es que en la presencia de sulfatos no es perjudicado considerablemente; esto resulta ventajoso al momento de realizar obras civiles marinas y obras en las que se encuentre elementos de hormigón enterrados (Proaño, 2008).
 - Tipo IIA.- Este cemento es similar al anterior (tipo II), no obstante produce la introducción de burbujas de aire en el hormigón
- Tipo III.- Generalmente este tipo de cemento se lo utiliza para obras en las que el hormigón se puede inestabilizar durante la construcción, como puede ser el caso en el que estuviese expuesto al contacto con el agua. Sin embargo, hay que tener presente que emite mayor calor de fraguado en comparación con el cemento portland tipo I, por lo que es necesario tener un control especial con el curado (Proaño, 2008).
 - Tipo IIIA.- Este cemento es similar al anterior (tipo III), con la única diferencia que este produce la introducción de aire en el hormigón.
- Tipo IV.- Se lo utiliza en las construcciones que necesitan grandes cantidades de hormigón, puesto que se produce poco calor de hidratación; de esta manera se puede controlar de manera eficiente, alargando el lapso de tiempo necesario para generar la resistencia a la que el hormigón está diseñado (Proaño, 2008).
- Tipo V.- Este tipo de cemento tiene la misma característica principal de la resistencia a los sulfatos del cemento Tipo II, con la diferencia que de éste es mayor, con lo cual es menos probable a la desintegración progresiva del hormigón (Proaño, 2008).

En la elaboración de HAC se puede utilizar cualquier tipo de cemento, debido a que no se necesita requisitos específicos en cuanto a tipo o características. El cemento a utilizar dependerá de la construcción y sus respectivas necesidades (Flores, 2015).

2.2.2 Áridos

Por lo general en la composición del hormigón hidráulico, los áridos representan las tres cuartas partes del volumen total. Entonces se puede deducir que estos radican de manera significativa en las propiedades del hormigón tanto es su estado fresco, como endurecido; por tal razón es crucial el cuidado de la granulometría, además, de que las propiedades mecánicas deben ser las adecuadas y que los mismos deben estar libres de impurezas. Estos se dividen en áridos finos (pasan tamiz #4) y gruesos (retenidos en tamiz #4). Los áridos gruesos o ripio presentan mejor adherencia con la pasta de cemento cuando son triturados, mientras que si fuesen redondeados presentarían una mejor resistencia interna, sin embargo, la adherencia sería mínima (Proaño, 2008).

Es importante tener definido el trabajo a realizar y a las condiciones que va a estar expuesto, para sugerir que tipo de árido, granulometría o cualquier otra característica seleccionar, para que el hormigón esté en condiciones favorables para las actividades a realizar. Como ejemplo, el tamaño máximo del árido debe ser seleccionado según la distancia mínima que hay en las armaduras de acero o el espacio mínimo que hubiere en el encofrado, según sea el caso (Flores, 2015).

Los áridos que se utilizan para los HAC tienen la limitación del tamaño máximo el cual tiene como término medio veinte milímetros o tres cuartos de pulgada. Hay que tener en cuenta que los áridos redondeados aportan en la trabajabilidad del hormigón, puesto que las trituradas aumentan la fricción interna (Cañizares, 2012).

2.2.3 Agua

El agua cumple con un papel importante en la elaboración de hormigones; ésta sirve primordialmente para que el cemento reaccione químicamente, aportando a la trabajabilidad, además que se lo utiliza para el curado de los elementos estructurales. El agua no debe contener sustancias o impurezas (sales, materias orgánicas) que puedan afectar de manera negativa las propiedades del hormigón (durabilidad y resistencia) o de ser el caso afectar el acero que lleve. No obstante, hay que tener sumo cuidado con su proporción en relación a la cantidad de cemento, debido a que este modifica considerablemente la resistencia final que va a poseer el hormigón (Flores, 2015).

2.2.4 Aditivos

Los aditivos son compuestos químicos que tienen la capacidad de modificar las propiedades del hormigón en estado fresco o endurecido. En el mercado se tiene una gran variedad de este material, puesto que se han ido generando según las necesidades que han surgido en la construcción a través del tiempo. Los aditivos que se utilizan con mayor frecuencia son los plastificantes, acelerantes y retardantes (Flores, 2015).

Al momento de generar el HAC es de suma importancia la utilización de aditivos; este componente, de entre los otros previamente observados, es el que requiere de mayor control y calidad en su producción. Los aditivos más utilizados para la elaboración de HAC son los superplastificantes y los agentes cohesionantes; no obstante, existen otros tipos de aditivos que se pueden introducir en la mezcla, lo cual se debe realizar en función de las propiedades requeridas al hormigón.

2.2.4.1 Superplastificantes

Los superplastificantes son también conocidos como reductores de agua, estos tienen como característica principal la capacidad de aumentar la trabajabilidad, permitiendo disminuir el contenido de agua de la mezcla del hormigón. Esta clase de aditivo, es indispensable para generar HAC, siendo más exacto, los superplastificantes de última generación (basados en policarboxilatos), los cuáles pueden llegar hasta un 40% en su capacidad como reductores de agua (Domínguez, 2003).

El superplastificante a utilizarse en este trabajo de titulación es el Sikament HE 200, el cual, es un aditivo líquido, que a más de ser un reductor de agua de alto poder tiene características de acelerante, por tanto, promueve una alta ganancia de resistencia a temprana edad. También, en la ficha técnica del producto se recomienda emplear proporciones entre 0.5% y el 2.5% del peso del cemento (Sika, 2014).



Figura 2.1: Superplastificante Sikament HE-200.

Fuente: Autores

2.2.4.2 Evolución de los aditivos como reductores de agua

1. Plastificantes

a. Lignosulfanatos

- i. Son a consecuencia secundaria de la extracción de la celulosa de madera para la industria de papel.
- ii. Su capacidad máxima como reductores de agua es del 10%.
- iii. En grandes dosificaciones, suele generar retrasos al momento de fraguar el hormigón.

2. Superplastificantes

a. Naftalenos / Sulfonatos

- i. Generados a partir del proceso de refinado del carbón.
- ii. Su capacidad máxima como reductores de agua es del 20%.
- iii. Se puede generar obstrucción de aire en el hormigón.

b. Melaminas / Sulfonatos

- i. Se basan en polímeros sintéticos.
- ii. Su capacidad máxima como reductores de agua es del 20%.
- iii. Su trabajabilidad tiende a disminuir en un lapso de tiempo corto.

c. Copolímeros de Vinilo

- i. Como en el anterior, son a base de polímeros sintéticos; sin embargo, éstos poseen moléculas de mayor tamaño.

- ii. Su capacidad máxima como reductores de agua es del 30%.
 - iii. Presenta un mayor lapso de tiempo en su trabajabilidad que los anteriores superplastificantes.
- d. Policarboxilatos
- i. Este aditivo se basa en éteres policarboxílicos.
 - ii. Su capacidad máxima como reductores de agua es del 40%.
 - iii. El tiempo en que la trabajabilidad es considerada buena, supera el de los tiempos que poseen los superplastificantes convencionales.

2.2.4.3 Agentes modificadores de viscosidad

En el momento de elaborar el hormigón autocompactante, si no se tiene el debido cuidado con su dosificación, es posible que presente inconvenientes, no solo en la propiedad de densificarse por peso propio, sino también en presentar segregación de los materiales; por tal motivo se han desarrollado los agentes modificadores de viscosidad. Sin embargo, estos aditivos son prescindibles para la mezcla del HAC.

Estos aditivos son compuestos químicos (polímeros) que tienen la característica principal de modificar la cohesión de la mezcla de hormigón para aumentar la resistencia a la segregación y a la exudación del agua, además, que aporta a la estabilidad de la mezcla, aun si ésta se aumente de manera errónea la cantidad de agua o si se colocare el hormigón con una gran altura de caída (Fernández, 2009).

2.3 Dosificación

Hasta la actualidad se han generado diversas metodologías de dosificación para la obtención de HAC, a consecuencia de los distintos materiales que se pueden encontrar en el mercado de cada país, además de tener en cuenta de que variables primordiales según las necesidades de la obra, van a influir en la dosificación; por tal motivo es que tener una dosificación única para el HAC se ha vuelto dificultoso (Fernández, 2009).

La principal característica del HAC es la alta trabajabilidad que posee, el cual se genera por disminuir la fricción entre las partículas, mediante superplastificantes, y una adecuada cantidad de finos para que ayude a dar cohesión a la mezcla; también se

puede utilizar modificadores de viscosidad, pero su uso no es imprescindible en la elaboración del hormigón (Crespo & Fernández, 2003).

Se debe seleccionar el tamaño máximo del árido grueso del hormigón según un análisis de la forma del encofrado y de la armadura de hierro, si es el caso; para que de tal manera el árido grueso no obstruya el paso, y al mismo tiempo mejorar la deformabilidad del hormigón. Usualmente el tamaño máximo utilizado es de 20 mm (3/4"). Hay que tener en cuenta que los agregados angulosos presentan una mayor fricción entre partículas, en comparación con los agregados redondeados (Flores, 2015). Los áridos gruesos por lo general su dosificación varía de 750 a 1000 kg/m³. Teniendo en cuenta que el HAC es muy sensible con la variación de la cantidad de agua presente en la mezcla, su dosificación con respecto a los áridos finos suele ser en mayor porcentaje en relación con la del hormigón convencional. La dosificación de los áridos finos usualmente fluctúa entre 45 a 55% del peso total de los áridos (Cañizares, 2012).

Al agregar grandes cantidades de agua en la mezcla, a pesar de que aumente la fluidez en estado fresco, va a generar una disminución en la viscosidad, además de que la mezcla puede presentar segregación o exudación. El agua tiene una dosificación entre 160 y 200 kg/m³, además que el rango de la relación agua/cemento en peso es a partir de 0.5 a 1 (Flores, 2015).

Para la elaboración de HAC se puede utilizar todos los cementos comunes, aunque el más habitual es el cemento Portland tipo I. Este compuesto, a mayor finura necesitará mayor cantidad de agua; por lo tanto, también aumentará la viscosidad del hormigón. No obstante, aumentará la posibilidad de presentar retracciones. El rango de la dosificación de cemento fluctúa entre 350 y 500 kg/m³. Si se utilizare valores menores a 350 kg/m³ hay que hacer uso de otro material fino (puzolana, filler, humo de sílice, entre otros) (Flores, 2015).

Usualmente en lo que respecta a los aditivos, no sobrepasa el 5% del peso de cemento. En el mercado se puede encontrar una gran variedad, pero en lo que respecta al HAC los más utilizados son los reductores de agua y los agentes modificadores de viscosidad. Si se utiliza más de un aditivo se deben realizar ensayos para analizar la compatibilidad entre estos.

En la presente investigación se procederá a utilizar la dosificación sugerida por la empresa hormigonera Holcim Ecuador S.A para losas, vigas y columnas; cantidades detalladas por volumen como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Dosificación del hormigón a utilizar, para una resistencia aproximada de 240 kg/cm²

<i>Componentes</i>	<i>Cantidad</i>
<i>Cemento Portland Tipo I</i>	50 kg
<i>Agua</i>	25 lt
<i>Árido fino</i>	64 dm ³
<i>Árido grueso</i>	80 dm ³

Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2015)

2.4 Propiedades del hormigón convencional en estado fresco

Es importante denotar que la resistencia de una mezcla, dada una determinada dosificación se ve seriamente afectada por su grado de compactación, por lo cual es de suma importancia que la trabajabilidad de la mezcla sea tal que el hormigón pueda ser transportado, colocado y curado lo suficientemente fácil y sin segregación.

2.4.1 Trabajabilidad

El hormigón fresco se considera trabajable cuando es fácil de manejar y puede adaptarse al encofrado. Esta propiedad es cuantificada mediante el asentamiento del Cono de Abrams o el diámetro de dispersión. Cuando los asentamientos son superiores a los 15 centímetros, el hormigón elaborado posee alta trabajabilidad (Proaño, 2008).

Es importante destacar que la trabajabilidad del hormigón depende de los fines para los cuales este vaya a ser utilizado, es decir una trabajabilidad adecuada para un hormigonado de elementos grandes y espaciosos no sería suficiente para elementos de secciones delgadas o de difícil acceso causado por cuantías altas de acero (Neville, 2011).

2.4.1.1 Medición de la trabajabilidad

El uso del Cono de Abrams es un ensayo utilizado con gran frecuencia en el sitio de trabajo en todo el mundo; el ACI 116R-904.46 lo describe como un método para la determinación de la consistencia, que puede ser traducida como trabajabilidad del hormigón, pues es de gran ayuda para detectar variaciones en la uniformidad de una mezcla de una determinada dosificación (Neville, 2011).

El ensayo del Cono de Abrams está prescrito por la ASTM C 143-10 (ASTM INTERNATIONAL, 2014) y BS 1881: 103: 1993 (British Standard, 1993). El molde para la prueba de asentamiento es un tronco de cono, de 300 mm de altura. Se coloca sobre una superficie lisa con la abertura más pequeña en la parte superior y se rellena con hormigón en tres capas. Cada capa se apisona 25 veces con una varilla de acero estándar de 16 mm de diámetro y una longitud de 60 cm, redondeada en el extremo. El molde debe sujetarse firmemente contra su base durante toda la operación.

Inmediatamente después del llenado, el cono se levanta lentamente para que el hormigón sin soporte actúe por gravedad. La disminución de la altura del hormigón se denomina asentamiento y se mide con una precisión de 5 mm; esta disminución se mide del punto más alto según BS EN 12350-2: 2009 (British Standard, 2009), pero al “centro original desplazado” según ASTM C 143-10.

Para reducir la influencia en el asentamiento por la variación de la fricción superficial, el interior del molde y su base deben humedecerse al comienzo de cada prueba. Además, debe limpiarse cualquier resto de hormigón que pueda haberse caído accidentalmente fuera del cono.

Si en lugar de asentarse uniformemente en todo el perímetro, la mitad del cono se desliza hacia abajo en un plano inclinado, se dice que ha tenido lugar un asentamiento por cizallamiento, y la prueba debe repetirse. Si el asentamiento por cizallamiento persiste, es una indicación de falta de cohesión en la mezcla (Neville, 2011).

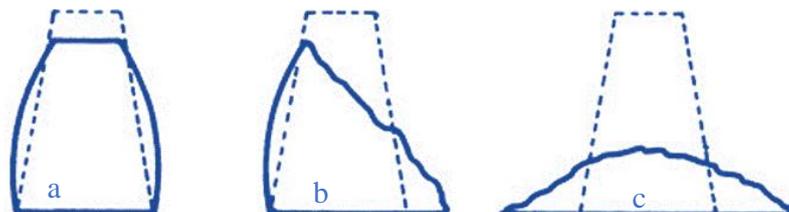


Figura 2.2: (a) asentamiento uniforme, (b) asentamiento por cizallamiento (c) colapso.

Fuente: (Neville, 2011)

Una manera indirecta de clasificar el nivel de “trabajabilidad” que tiene una mezcla es mediante el asentamiento obtenido al realizar el ensayo del cono de Abrams, a mayor asentamiento mayor nivel de trabajabilidad, como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Clasificación del nivel de trabajabilidad según el asentamiento.

<i>Nivel de trabajabilidad</i>	<i>Asentamiento [cm]</i>
<i>Muy bajo</i>	0 – 1
<i>Bajo</i>	1 – 3
<i>Medio</i>	3 -7.5
<i>Alto</i>	7.5 -16
<i>Muy alto</i>	Más de 16

Fuente: (Neville, 2011)

2.5 Propiedades del hormigón autocompactante en estado fresco

Las propiedades de los hormigones autocompactantes y las de los hormigones convencionales son distintas en su estado fresco, por lo tanto, en función de controlar apropiadamente sus características y ser denominado como un hormigón autocompactante, es necesario que cumpla con ciertos requisitos, los cuales se detallan a continuación.

- **Capacidad de paso**

Describe la capacidad que tiene la mezcla para fluir a través del encofrado y el acero de refuerzo sin presentar bloqueos o estancamiento; para esto se debe considerar la forma del encofrado, el tamaño de las partículas del árido grueso y la densidad de la armadura de refuerzo en el caso de que sea utilizado en hormigón armado (Cañizares, 2012).

- **Capacidad de llenado**

Describe la capacidad de la mezcla de llenar todas las superficies del encofrado y al mismo tiempo garantizar la correcta adherencia con la armadura del elemento estructural. Mientras mayor sea la capacidad de llenado, el elemento presentará menor cantidad de imperfecciones en su acabado (Cañizares, 2012).

- **Resistencia a la segregación**

La segregación puede ser definida como la separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea, es decir que su distribución ya no será uniforme. Para el caso

del hormigón, los diferentes tamaños de las partículas y sus diferencias en peso específico, son los principales causantes de la segregación. Por tanto, se puede anotar que, esta propiedad está relacionada con la estabilidad del hormigón y su capacidad para mantenerse de forma homogénea a escala macro, durante el mezclado y el vertido, sin que se produzcan separaciones de los áridos (Neville, 2011).

Los ensayos más utilizados para caracterizar a los hormigones autocompactantes en estado fresco son:

2.5.1 Ensayo de capacidad de llenado y escurrimiento

El ensayo de escurrimiento y tiempo T_{500} son métodos por los cuales se determina la fluidez y el ritmo de flujo en la ausencia de obstáculos, por tanto, indica la capacidad de llenado, mientras tanto, el tiempo T_{500} es una medida de la velocidad de flujo y como consiguiente de la viscosidad (Cañizares, 2012).

El procedimiento del ensayo consiste en colocar el Cono de Abrams sobre una placa de superficie horizontal lisa, con una marca en el centro y un círculo de 500 mm de diámetro. Se llena el cono con la mezcla sin compactar, posteriormente se levanta el cono, dejando fluir la mezcla y se mide el tiempo en segundos que se tarda en alcanzar los 500 mm de diámetro (T_{500}). Este tiempo no debe superar los ocho segundos. Luego se mide el diámetro mayor y su perpendicular a éste; dicha medida representa el escurrimiento (EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS (EFNARC), 2006). Dentro de las directrices europeas (EFNARC), se exponen las clases de HAC según el diámetro de escurrimiento.

Tabla 2.3: Criterios clasificación del HAC de acuerdo al diámetro de escurrimiento.

<i>Clase</i>	<i>Criterio [mm]</i>
<i>SF1</i>	520-700
<i>SF2</i>	640-800
<i>SF3</i>	740-900

Fuente: (EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS (EFNARC), 2006)

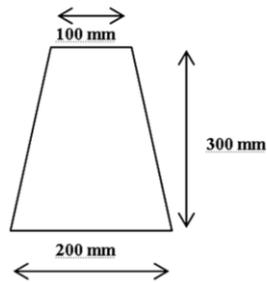


Figura 2.3: Cono de Abrams.

Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)

2.5.2 Ensayo del embudo en V

Este ensayo es utilizado para evaluar la capacidad que tienen el hormigón para pasar por espacios estrechos (sin obstáculos) y su resistencia a la segregación.

Se llena con la mezcla el embudo, sin compactar, se abre la compuerta localizada en la parte inferior del embudo, se mide el tiempo (T_v) en segundos, desde que se abre la compuerta hasta que se vea la primera entrada de luz en la parte baja del embudo (Cañizares, 2012).

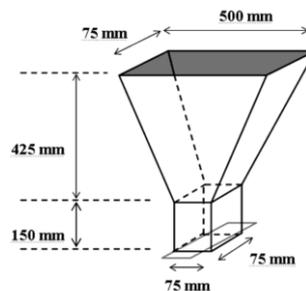


Figura 2.4: Embudo en V.

Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)

2.5.3 Ensayo de la caja en L

Este ensayo se utiliza para evaluar la capacidad de paso del hormigón autocompactante a través de aberturas pequeñas incluyéndose el espacio que se tendría entre el acero de refuerzo, a su vez, se mide la capacidad de llenado y la resistencia a la segregación.

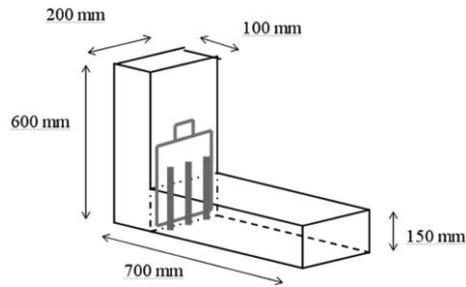


Figura 2.5: Caja en L.

Fuente: (Vargas & Sciaraffia, 2006)

2.6 Propiedades del hormigón en estado endurecido

2.6.1 Resistencia del hormigón

La resistencia del hormigón, es comúnmente considerada como su propiedad más valiosa, aunque, en algunos casos prácticos, otras características tales como la durabilidad y permeabilidad podrían ser más importantes. A pesar de todo, la resistencia del hormigón es considerada usualmente como el indicador principal de la calidad del mismo, pues su resistencia está directamente relacionada con su estructura y composición.

2.6.1.1 Relación agua/cemento

En el ámbito empírico de la ingeniería, se ha llegado a determinar que la resistencia del hormigón a una determinada edad y curado en inmersión a una temperatura determinada, depende principalmente de dos factores: la relación agua/cemento y el grado de compactación.

En 1919, Duff Abrams estableció que el hormigón cuando es completamente compactado, su resistencia es inversamente proporcional a la relación agua cemento, definiendo la resistencia del hormigón mediante la Ecuación 2.1 (Neville, 2011).

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}}$$

Ecuación 2.1: Relación entre la resistencia a la compresión del hormigón y la relación agua/cemento.

Fuente: (Neville, 2011)

Donde, w/c representan la relación agua/cemento de la mezcla, y K_1 y K_2 son constantes empíricas. La forma general de la curva de relación agua/cemento, se muestra en la Figura 2.6.

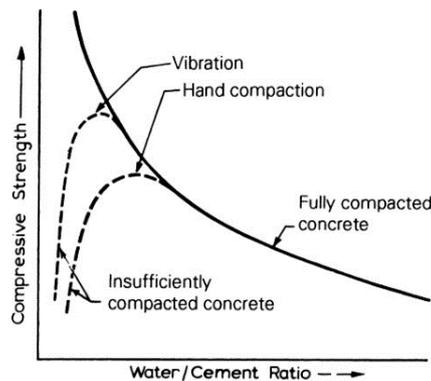


Figura 2.6: Relación entre la resistencia y la relación agua/cemento del hormigón.

Fuente: (Neville, 2011)

2.6.1.2 Resistencia a la compresión simple

La resistencia es una medida de la cantidad de esfuerzo necesario para hacer que falle el material. Para el caso del hormigón, éste presenta una resistencia a la compresión mucho mayor con relación a cortante o flexión; a esto se debe, su peculiar clasificación en función de su resistencia a la compresión. Debido a que la resistencia del hormigón está en función del proceso de hidratación del cemento, que es relativamente lento, tradicionalmente las especificaciones y pruebas de resistencia se basan en especímenes curados en condiciones estándar de temperatura y humedad en un periodo de 28 días. Normalmente, la resistencia a tensión y corte representan entre un 10% y 15% de la resistencia a la compresión y la razón de esto, se debe a la heterogeneidad de la compleja micro estructura del hormigón.

3 METODOLOGÍA

3.1 Metodología general

Para obtener un hormigón autocompactante a partir de un hormigón convencional se añadirá a la dosificación, cualquiera que esta sea, un superplastificante. Para determinar la cantidad de superplastificante a añadir a la dosificación de un hormigón convencional es necesario tener fijas las demás variables que intervienen en la elaboración del hormigón convencional y el autocompactante como son: granulometría y calidad de áridos, tipo de cemento, relación agua/cemento

y dosificación. Por ello realizaremos dos tipos de mezclas de hormigón: con superplastificante y sin superplastificante; con el objetivo de obtener la cantidad de superplastificante en peso con relación al contenido de cemento de la dosificación en peso, con la cual se obtiene la condición de HAC, se harán mezclas de hormigón con relaciones en peso de superplastificantes para peso de cemento de 0.5; 1 y 1.5%, Figura 3.1.

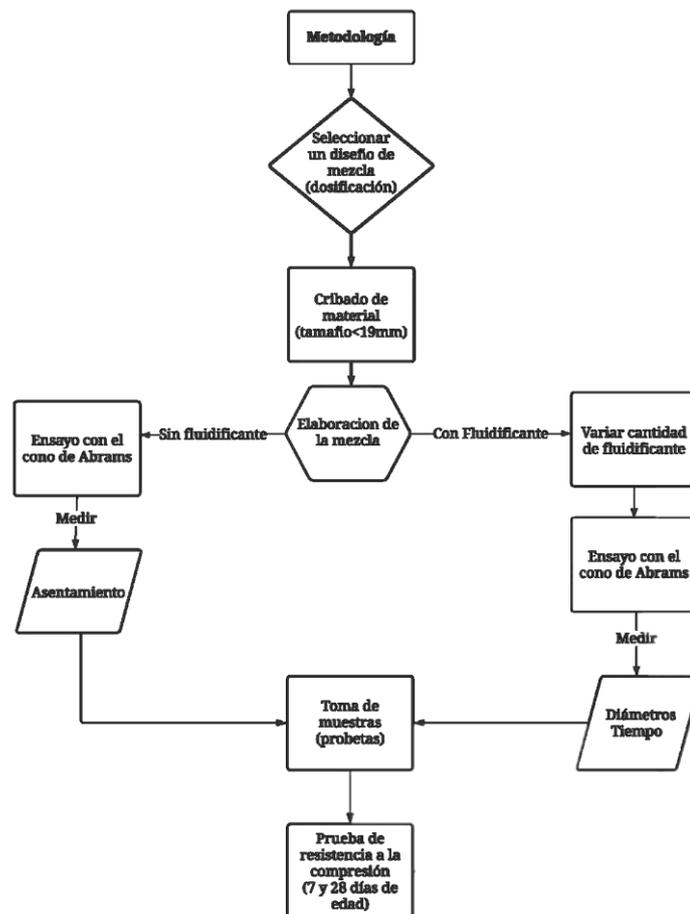


Figura 3.1: Diagrama de flujo del método general a aplicar.

Fuente: Autores

- Realizar dos tipos de mezclas (hormigón convencional y hormigón convencional con superplastificante), manteniendo la dosificación, granulométrica de los agregados y la relación agua cemento, como constantes para cada uno de los ensayos; la variable controlada a utilizar será la cantidad de superplastificante que se le atribuya a la mezcla para pasar de un HC a un HAC.

- Determinación de la trabajabilidad en estado fresco.
- Medir la resistencia a la compresión a los 7 y a los 28 días de edad de los dos tipos de mezclas, curados en inmersión.
- Análisis de la variación de la trabajabilidad, resistencia a la compresión y costos respecto a la cantidad de superplastificante a utilizar.

3.2 Medición de materiales

- Sabiendo que el tamaño máximo del agregado no debía superar los 20 mm (3/4 in) como se mencionó en el apartado [2.3] de Dosificación, se realizó un cribado del material, para descartar las partículas cuyo tamaño superaban el establecido (Ver Figura 3.2).



Figura 3.2: Cribado de material.

Fuente: Autores

- Para medir los materiales se utilizaron recipientes con una capacidad volumétrica de 5 dm³ y 2 dm³, los cuales fueron combinados para cumplir con las cantidades de áridos estipuladas en la dosificación (Ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Recipientes para medición de áridos.

Fuente: Autores

- En cuanto al cemento, se utilizó una balanza con precisión de 1g para medir la cantidad congruente con una fracción de la dosificación sugerida por la HOLCIM (Compañía de materiales de construcción y agregados) (Ver Figura 3.4).



Figura 3.4: Medición de cemento Portland tipo I.

Fuentes: Autores

- Para medir el agua se utilizaron probetas con capacidad de 1000 ml y 500 ml, los cuales fueron combinados hasta obtener la cantidad solicitada (Ver Figura 3.5).



Figura 3.5: Probetas para medición de agua.

Fuente: Autores

- Para el peso del superplastificante, se utilizó una balanza con precisión de 0.01 g (Ver Figura 3.6).



Figura 3.6: Medición de superplastificante.

Fuente: Autores

3.3 Mezclado

- Primeramente, se midieron 21 dm^3 y 27 dm^3 de árido fino y grueso respectivamente, a fin de mantener la dosificación por volumen dada por Holcim; los cuales se depositaron en una bandeja de acero de $1.20 \text{ m} \times 1.20 \text{ m}$ (Ver Figura 3.7).



Figura 3.7: Medición de áridos.

Fuente: Autores

- Se mezclaron los áridos de manera manual utilizando una pala hasta que se observó homogeneidad (Ver Figura 3.8). Simultáneamente se pesaron 17 kg de cemento, y fueron agregados a la masa “homogénea” de áridos, para ser nuevamente mezclados.



Figura 3.8: Mezclado de materiales sólidos.

Fuente: Autores

- Una vez mezclado los materiales sólidos, se le agregó la cantidad respectiva de agua (Ver Figura 3.9).



Figura 3.9: Agregado de agua a la mezcla.

Fuente: Autores

- Para el caso de las mezclas con superplastificante, este fue añadido de forma simultánea con el agua, (Ver Figura 3.10), y se procedió a mezclar la masa de hormigón por aproximadamente 5 min.



Figura 3.10: Colocado de superplastificante.

Fuente: Autores

3.4 Medición de la trabajabilidad

3.4.1 Ensayo de asentamiento (Cono de Abrams)

Con la muestra de hormigón recién mezclada, se realizó el ensayo del Cono de Abrams, siguiendo el procedimiento estándar, se llenó el cono en tres capas iguales, en cada capa se dieron 25 golpes con una varilla lisa de 16 mm de diámetro, distribuidos uniformemente sobre la superficie de cada capa; se enrasó y limpió los

excesos de material. Finalmente se levantó de forma vertical el molde y se midió la diferencia de altura entre el molde y el centro de la masa de hormigón (Ver Figura 3.11).



Figura 3.11: Ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.

Fuente: Autores

3.4.2 Ensayo de capacidad de llenado y escurrimiento

Además de medir el asentamiento del HC utilizando el cono de Abrams, en el HAC se midió el diámetro mayor y el perpendicular a este, adicionalmente se tomó el tiempo T_{500} (tiempo en el que el hormigón alcanza un diámetro de 500 mm) (Ver Figura 3.12).



Figura 3.12: Medición de diámetro de escurrimiento.

Fuente: Autores

3.5 Elaboración de probetas de hormigón

Una vez realizadas las pruebas con el cono de Abrams, específicamente del ensayo de capacidad de llenado y escurrimiento; en el supuesto de que la mezcla cumpliera con los rangos establecidos en las Directrices Europeas para el HAC, se lo catalogó y trató al mismo como un HAC.

En la obtención de las muestras de hormigón se utilizaron cilindros metálicos normados, los cuales tienen una dimensión de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. En el caso de las mezclas cuyo diámetro de escurrimiento no alcanzó los 52 cm como sugiere la EFNARC, se prosiguió con el procedimiento estándar que consiste en llenar la probeta, dividida en tres capas iguales, donde a cada una se le aplican veinticinco golpes con una varilla de 16 mm de diámetro y 60 cm de longitud, a su vez se le dieron 15 golpes con un mazo de goma de 0.8 kg para cada capa de manera uniforme, para eliminar las burbujas de aire que quedan atrapadas (Ver Figura 3.13).



Figura 3.13: Toma de probetas de hormigón.

Fuente: Autores

Para las mezclas que se consideraron como HAC, se les vertió el hormigón en tres capas, donde en cada una recibe energía externa (cinco golpes con el mazo de goma) para nivelar su superficie y así colocar las demás capas (Ver Figura 3.14).



Figura 3.14: Elaboración de probetas de HAC.

Fuente: Autores.

Las probetas cilíndricas se retiraron de los moldes después de 24 horas de ser moldeadas, fueron codificadas, con fecha, tipo de mezcla y edad para su rotura, para

posteriormente sumergirlas en agua durante 7 y 28 días para su curado (Ver Figura 3.15).



Figura 3.15: Curado en inmersión.

Fuente: Autores

3.6 Ensayo de compresión simple

Para el ensayo de compresión, cada probeta será colocada en las mordazas de la máquina de ensayo y se procederá a aplicar cargas hasta producir la rotura del elemento (Ver Figura 3.16). Se toma lectura de la carga del panel de la prensa, se procede a dividir para el área cilíndrica de la cara de la probeta y finalmente se obtiene la resistencia a la compresión simple del hormigón ensayado. En la figura de la izquierda se observa la muestra cilíndrica en la cámara de ensayo y en la de la derecha se observa la muestra cilíndrica después de la falla por compresión



Figura 3.16: Ensayo a compresión.

Fuente: Autores

4 RESULTADOS

4.1 Medición de la trabajabilidad

Tabla 4.1: Resultados del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams.

[%] Superplastificante	Asentamiento [cm]
0%	7.5
0.50%	10
1%	25.5
1.50%	27.5

Fuente: Autores

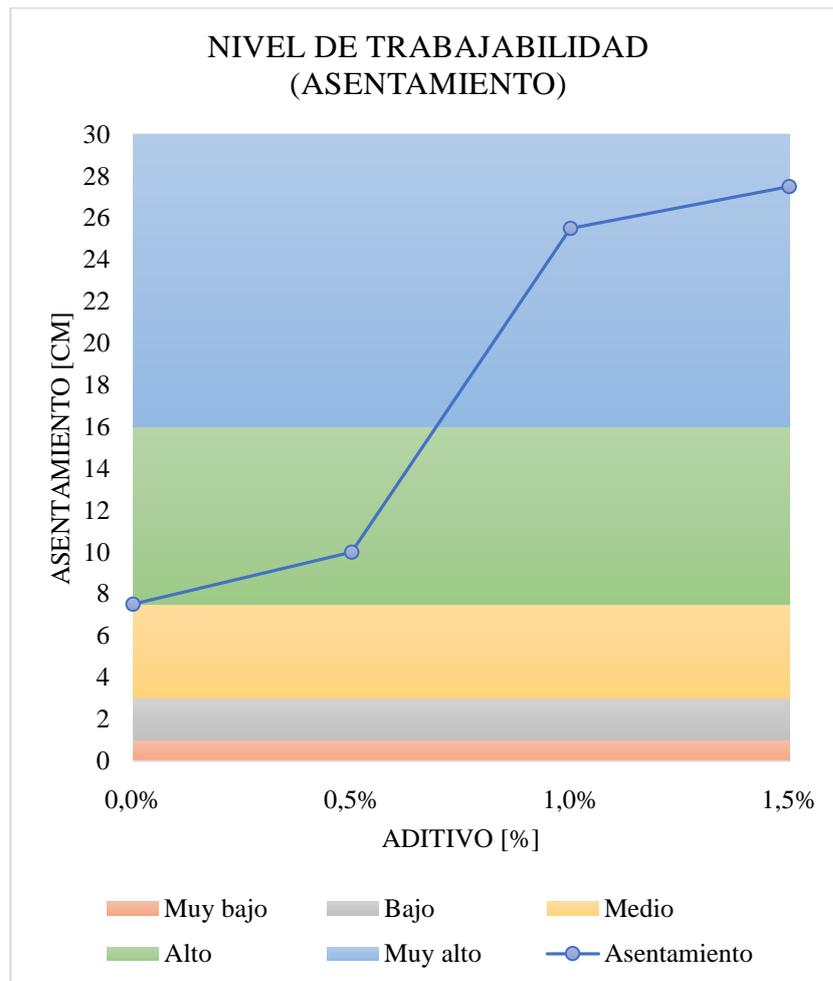


Figura 4.1: Clasificación de la trabajabilidad con respecto a la cantidad de aditivo, según el asentamiento.

Fuente: Autores

Con los diferentes asentamientos obtenidos, se los puede clasificar de acuerdo al nivel de trabajabilidad expuesto en la Tabla 2.2, evidenciándose un incremento en la trabajabilidad según aumenta la cantidad de superplastificante utilizado.

Tabla 4.2: Resultados del ensayo de escurrimiento.

[%] Superplastificante	Diámetro mayor [cm]	Diámetro perpendicular [cm]	Diámetro promedio [cm]
0%	20	20	20
0.50%	20	20	20
1%	47	48	48
1.50%	53	52	53

Fuente: Autores

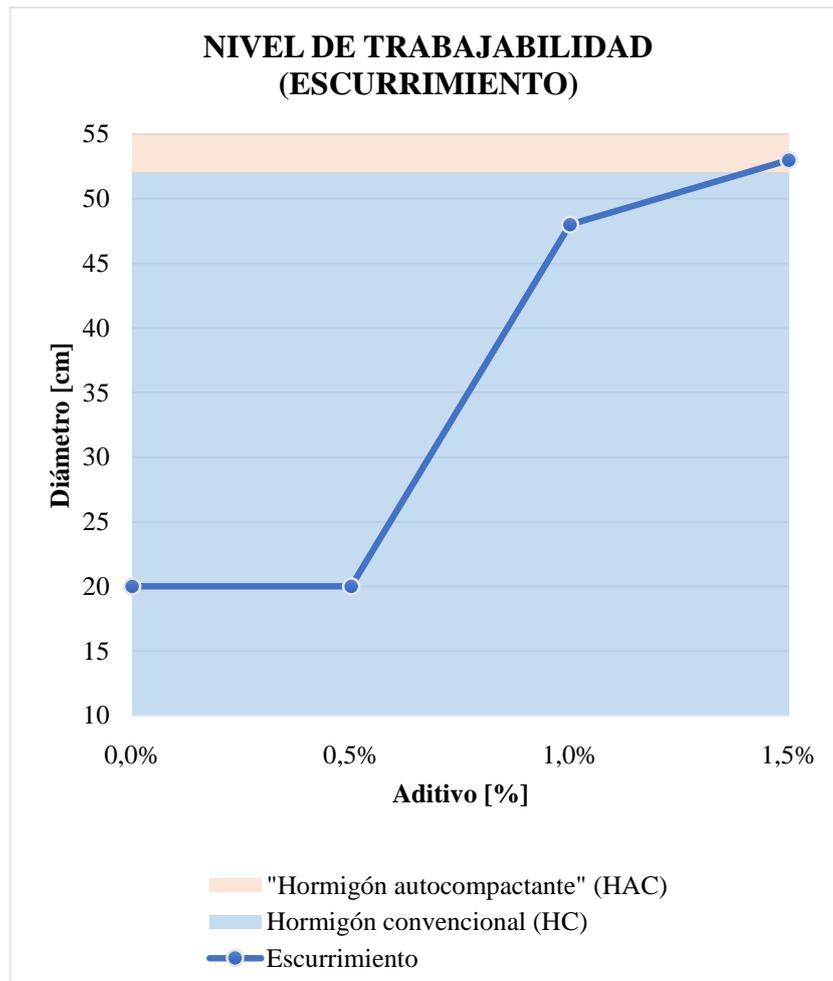


Figura 4.2: Clasificación del tipo de hormigón según el diámetro de escurrimiento.

Fuente: Autores

En la Figura 4.2, dadas las distintas cantidades implementadas de superplastificante, únicamente la correspondiente al 1.5% con relación al peso de cemento, llegó a una “trabajabilidad” similar a la de un HAC (SF1), puesto que el diámetro de escurrimiento cumple con los criterios expuestos en la Tabla 2.3, además que el tiempo T_{500} cumple con la especificación.

4.2 Ensayo de compresión simple

Tabla 4.3: Resultados de ensayo a la compresión a los 7 y 28 días.

Superplastificante [%]	Resistencia a la compresión [kg/cm^2]	
	7 días	28 días
0%	131	243
0.50%	171	254
1%	174	259
1.50%	170	255

Fuente: Autores

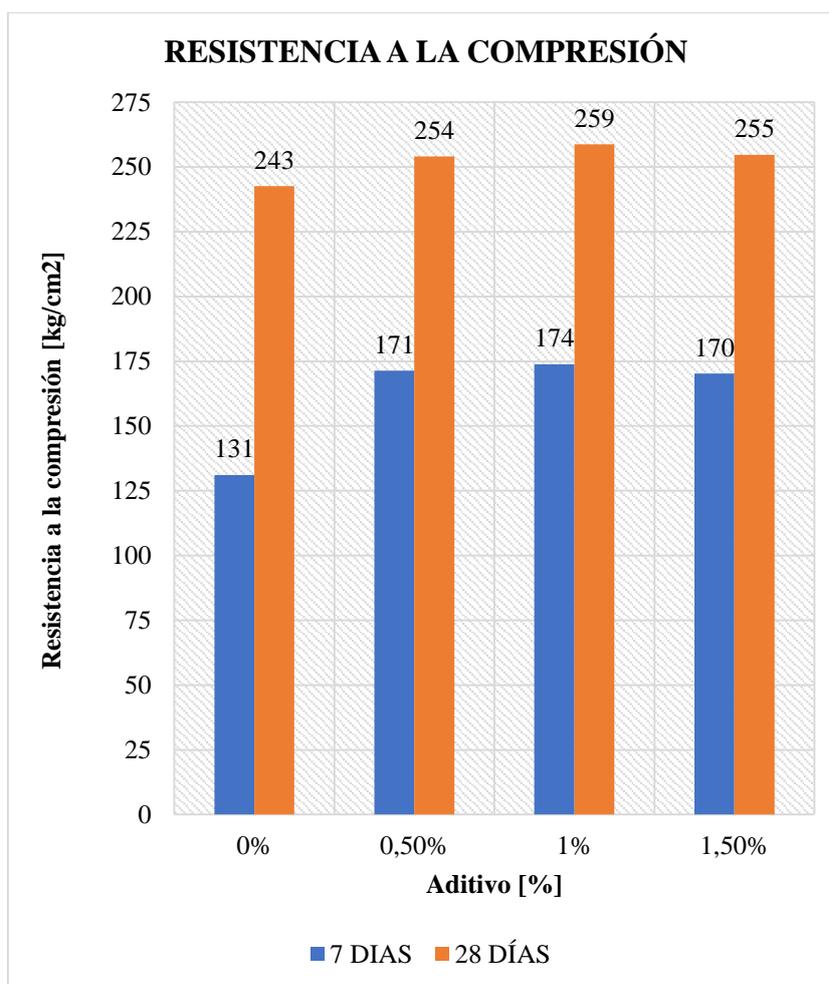


Figura 4.3: Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de edad.

Fuente: Autores

Como se puede ver en la Figura 4.3, la resistencia a la compresión del HC (% Aditivo, 0) a los 7 días de edad alcanza aproximadamente 54% de la resistencia a los 28 días; mientras que, para las muestras de hormigón que contienen aditivo (% Aditivo, 0.5, 1, 1.5) estas alcanzan una resistencia promedio del 67%, similar a la sugerida por la ficha técnica del superplastificante.

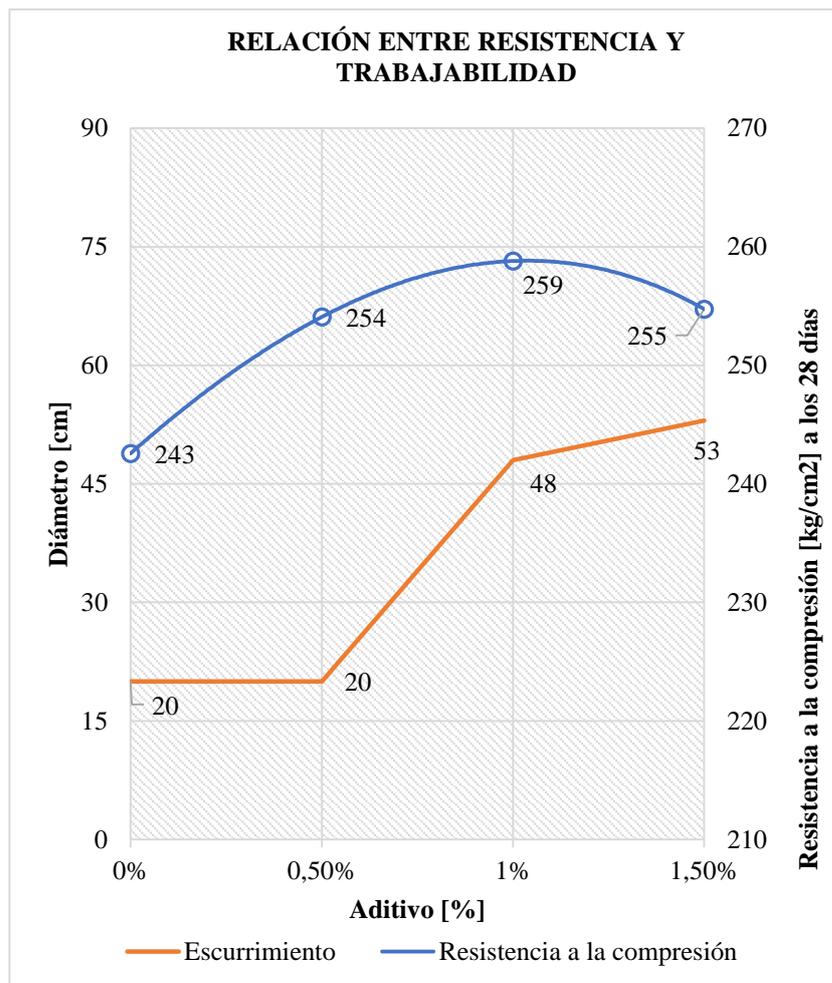


Figura 4.4: Comparación entre la resistencia y trabajabilidad del hormigón variando la cantidad de aditivo.

Fuente: Autores

Con los resultados obtenidos (Ver Tabla 4.2 y Tabla 4.3), tanto la trabajabilidad como resistencia, aumentan a medida que incrementa la cantidad de superplastificante, obteniéndose un hormigón con alta trabajabilidad y una resistencia ligeramente superior al HC.

4.3 Análisis de costos

Tabla 4.4: Costo de hormigón por m³ según la cantidad de superplastificante.

<i>[%] Superplastificante</i>	<i>Costo de hormigón por m³</i>
0%	\$ 113.10
0.50%	\$ 126.06
1%	\$ 139.03
1.50%	\$ 151.99

Fuentes: Autores

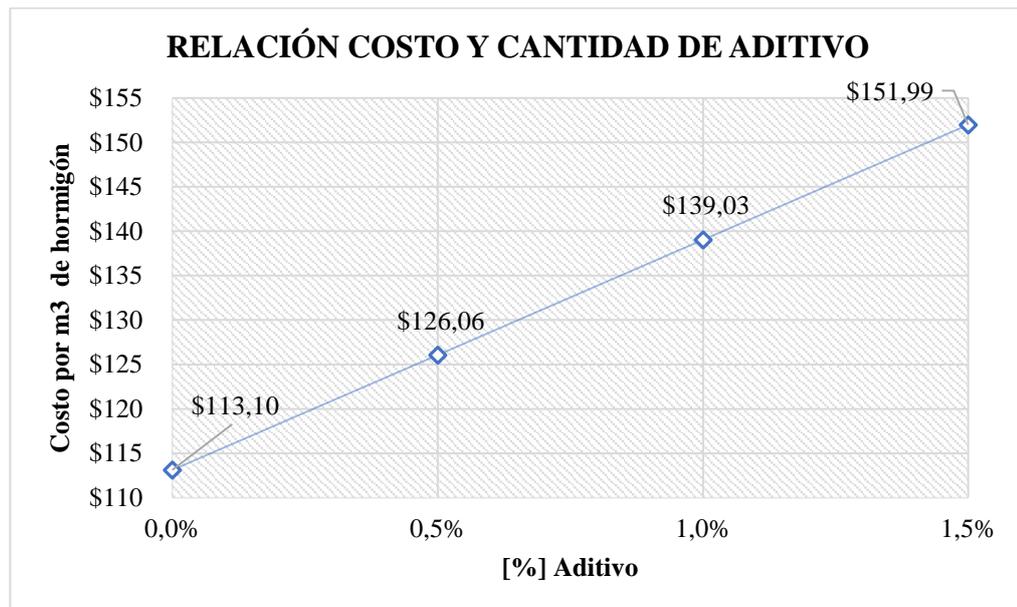


Figura 4.5: Relación del costo de hormigón por m³ y la cantidad de superplastificante utilizada.

Fuente: Autores

Es evidente que el costo para producir un hormigón autocompactante según la metodología empleada en esta investigación para elaborar un HAC a partir de una dosificación de HC, va a aumentar acorde al incremento de la cantidad de superplastificante. Por ende, si se desea tener una mayor trabajabilidad se tendrá un costo mayor.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con referencia a los resultados obtenidos de trabajabilidad, Figura 4.2, y siguiendo los criterios establecidos en la normativa europea EFNARC, Tabla 2.3; se obtiene un hormigón autocompactante, manteniendo la misma dosificación y relación agua/cemento de una mezcla de hormigón convencional, aplicando una proporción de superplastificante del 1.5% con relación al peso del cemento, cumpliendo satisfactoriamente los criterios de trabajabilidad.

- El uso del superplastificante en la mezcla de hormigón convencional siempre aumenta la trabajabilidad del mismo (Ver Figura 4.1) y produce ligeros incrementos en la resistencia a la compresión simple para cualquiera de las proporciones de superplastificante en peso añadidas en relación al peso de cemento en la dosificación
- La resistencia temprana (7 días) alcanzó hasta un 67% de la resistencia final para las muestras que contenían aditivo Figura 4.3; esto se debe a que los superplastificantes de última generación, además de ser utilizados para aumentar la trabajabilidad de una mezcla, tienen la característica de acelerantes de resistencia.

5.2 Recomendaciones

- Considerar además de la capacidad de llenado (escurrimiento y tiempo T_{500}), la capacidad de paso y resistencia a la segregación, para analizar las características del HAC con mayor minuciosidad.
- Durante el proceso investigativo, a más de las mezclas con superplastificante al 0.5%, 1% y 1.5%, se elaboró una mezcla cuya cantidad de superplastificante fue del 2.5% del peso del cemento. La cual cumplía con los criterios de diámetros de escurrimiento y tiempo T_{500} , sin embargo se observó que la misma presentaba segregación (Ver Anexo 7.3) a tal punto que no fue posible tomar muestras para el ensayo a la compresión simple. Por lo tanto, para futuras investigaciones se recomienda realizar un ensayo para determinar el punto de saturación del superplastificante (cono de Marsh¹).

¹ Cono de Marsh. -Procedimiento para determinar la compatibilidad entre cemento y superplastificantes, además de la dosificación máxima que se puede alcanzar y que a partir de esta el superplastificante deja de tener efecto (Fernández, 2009).

6 BIBLIOGRAFÍA

- ASTM INTERNATIONAL. (2014). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete: Vol. C 143-10* (Issue Reapproved).
- British Standard. (1993). Testing Concrete. In © *BSI 12-1998* (Issue 2).
- British Standard. (2009). Testing fresh concrete. Slump-test. In © *BSI 2009* (Issue 1).
<https://www.en-standard.eu/din-en-12350-2-testing-fresh-concrete-part-2-slump-test/>
<https://bsol.bsigroup.com/Home>
- Cañizares, I. (2012). *Diseño De Mezclas De Hormigón Autocompactante Utilizando Materiales De La Zona* [UNIVERSIDAD DE CUENCA].
<https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2510/1/tm4633.pdf>
- Crespo, D., & Fernández, L. (2003). Hormigón autocompactable: Visión general. *Hormigón y Acero*, 54(228), 133–137.
<http://hormigonyacero.com/index.php/ache/article/view/238>
- Domínguez, J. (2003). Utilización de los aditivos en el hormigón autocompactable. *Hormigón y Acero*, 54(228), 139–142.
<http://hormigonyacero.com/index.php/ache/article/view/238>
- EUROPEAN FEDERATION OF CONCRETE ADMIXTURE ASSOCIATIONS (EFNARC). (2006). *Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante, especificaciones*.
- Fernández, A. (2009). *INFLUENCIA DE LA DOSIFICACIÓN Y EMPLEO DE DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y ADICIONES EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE*. [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA]. <http://oa.upm.es/1813/>
- Flores, B. (2015). *Hormigón Autocompactante* [Universidad Central del Ecuador].
<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/4482>
- Holcim Ecuador S.A. (2015). *Elaboración de hormigón con cemento Holcim*.
- Neville, A. (2011). Properties of Concrete. In A. Neville (Ed.), *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification* (5th ed.). Pearson education.
- Proaño, M. R. (2008). Temas de Hormigón Armado. In *Escuela Pólitecnica del*

Ejercito -Ecuador. ESPOL.

[https://ubooks.s3.amazonaws.com/uploads/book/raw/1472358011899-](https://ubooks.s3.amazonaws.com/uploads/book/raw/1472358011899-6fc706f4kox6si2c-ef3d2cef2b7add022a88c2762378b1ac/diseño+en+hormigon+armado+marcelo+romo+proañol.pdf)

[6fc706f4kox6si2c-](https://ubooks.s3.amazonaws.com/uploads/book/raw/1472358011899-6fc706f4kox6si2c-ef3d2cef2b7add022a88c2762378b1ac/diseño+en+hormigon+armado+marcelo+romo+proañol.pdf)

[ef3d2cef2b7add022a88c2762378b1ac/diseño+en+hormigon+armado+marcelo+](https://ubooks.s3.amazonaws.com/uploads/book/raw/1472358011899-6fc706f4kox6si2c-ef3d2cef2b7add022a88c2762378b1ac/diseño+en+hormigon+armado+marcelo+romo+proañol.pdf)

[romo+proañol.pdf](https://ubooks.s3.amazonaws.com/uploads/book/raw/1472358011899-6fc706f4kox6si2c-ef3d2cef2b7add022a88c2762378b1ac/diseño+en+hormigon+armado+marcelo+romo+proañol.pdf)

Sika. (2014). *Sikament HE* 200.

https://ecu.sika.com/content/dam/dms/ec01/e/Sikament_HE_200_PDS.pdf

Vargas, R., & Sciaraffia, R. (2006). Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes (HAC). *Ingeniería de Construcción*, 21(1), 57–70. www.ing.puc.cl/ric

7 ANEXOS

Anexo 7.1: Resultados de las propiedades en estado fresco del hormigón.

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY		FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL					
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO REALIZADO POR: JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE							
MEZCLA	FECHA ELABORACIÓN	ADITIVO	ENSAYO CON EL CONO DE ABRAMS				
		%	ASENTAMIENTO O [cm]	DIÁMETRO MAYOR [cm]	DIÁMETRO PERPENDICULAR [cm]	DIÁMETRO PROMEDIO [cm]	T ₅₀₀ [s]
1	08/06/2021	0.0%	7.5	20	20	20	-
2	10/06/2021	0.5%	10	20	20	20	-
3	08/06/2021	1.0%	25.5	47	48	48	-
4	11/06/2021	1.5%	27.5	53	52	53	2.5

NOTA

ADITIVO UTILIZADO: SIKAMENT HE-200

OBSERVACIÓN

Las mezclas 1, 2 y 3 no alcanzaron el diámetro necesario para medir el tiempo T500

Fuente: Autores

Anexo 7.2: Resultados de ensayos de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de muestras de hormigón con y sin superplastificante.

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY		FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL							
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO REALIZADO POR: JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE									
MEZCLA	CÓDIGO	FECHA DE ENSAYO	DÍAS DE CURADO	PESO DE ESPÉCIMEN [Kg]	TIPO DE ESPÉCIMEN	ÁREA [cm ²]	CARGA TOTAL [kgf]	CARGA UNITARIA [kgf/cm ²]	CARGA UNITARIA PROMEDIO [kgf/cm ²]
1	M0107-CI	14/06/2021	7	12.497	15 x30 [cm]	176.715	23799	134.675	131.119
	M0107-CI	14/06/2021	7	12.921	15 x30 [cm]	176.715	24165	136.746	
	M0107-CI	14/06/2021	7	12.585	15 x30 [cm]	176.715	21548	121.937	
	M0128-CI	05/07/2021	28	12.612	15 x30 [cm]	176.715	44028	249.148	242.572
	M0128-CI	05/07/2021	28	12.668	15 x30 [cm]	176.715	44705	252.979	
M0128-CI	05/07/2021	28	12.582	15 x30 [cm]	176.715	39865	225.590		
2	M0207-CI	16/06/2021	7	12.724	15 x30 [cm]	176.715	30507	172.634	171.435
	M0207-CI	16/06/2021	7	12.940	15 x30 [cm]	176.715	29965	169.567	
	M0207-CI	16/06/2021	7	12.833	15 x30 [cm]	176.715	30413	172.102	
	M0228-CI	07/07/2021	28	13.010	15 x30 [cm]	176.715	46044	255.616	254.080
	M0228-CI	07/07/2021	28	12.714	15 x30 [cm]	176.715	46257	251.072	
M0228-CI	07/07/2021	28	12.916	15 x30 [cm]	176.715	44899	255.553		
3	M0307-CI	14/06/2021	7	12.718	15 x30 [cm]	176.715	30937	175.068	173.889
	M0307-CI	14/06/2021	7	12.439	15 x30 [cm]	176.715	31081	175.882	
	M0307-CI	14/06/2021	7	12.566	15 x30 [cm]	176.715	30168	170.716	
	M0328-CI	05/07/2021	28	12.291	15 x30 [cm]	176.715	46044	260.556	258.798
	M0328-CI	05/07/2021	28	12.446	15 x30 [cm]	176.715	46257	261.761	
M0328-CI	05/07/2021	28	12.503	15 x30 [cm]	176.715	44899	254.076		
4	M0407-CI	17/06/2021	7	12.907	15 x30 [cm]	176.715	31661	179.165	170.276
	M0407-CI	17/06/2021	7	12.824	15 x30 [cm]	176.715	30091	170.280	
	M0407-CI	17/06/2021	7	12.781	15 x30 [cm]	176.715	28519	161.385	
	M0428-CI	08/07/2021	28	12.888	15 x30 [cm]	176.715	47366	268.037	254.740
	M0428-CI	08/07/2021	28	13.183	15 x30 [cm]	176.715	45017	254.744	
M0428-CI	08/07/2021	28	12.920	15 x30 [cm]	176.715	42666	241.440		

NOTA El curado de los especímenes se realizó en inmersión

Fuente: Autores

Anexo 7.3: Ensayo de escurrimiento con 2.5% de superplastificante.



Nota: La mezcla con 2.5% de superplastificante en relación al peso del cemento, presenta segregación.

Fuente: Autores

Anexo 7.4: Análisis de precios unitarios para HC/m3.

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL				
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO					
REALIZADO POR:		JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO			
TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
RUBRO:		HORMIGÓN, f_c=240 kg/cm²			UNIDAD: m³
DETALLE:		0.00% DE SUPERPLASTIFICANTE			
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
SUBTOTAL M					0.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD A	JORNAL /HR B	COSTO HORA C = A x B	RENDIMIENTO R	COSTO D = C x R
Maestro mayor de ejecución de obra (estr.oc c1)	1.00	4.07	4.07	0.0500	0.20
Peón de albañil (estr.oc e2)	4.00	3.62	14.48	0.0500	0.72
SUBTOTAL N					0.93
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD A	P. UNITARIO B	COSTO C = A x B
Cemento		Kg	428.70	0.16	68.59
Arena para hormigón		m ³	0.55	21.47	11.81
Ripio para hormigón		m ³	0.69	23.73	16.37
Agua		m ³	0.21	3.00	0.64
SUBTOTAL O					97.42
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
SUBTOTAL P					0.00
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					98.34
COSTO INDIRECTO					15%
OTROS INDIRECTOS:					14.75
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					113.10
VALOR OFERTADO:					113.10
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA					
SON:		CIENTO TRECE DÓLARES Y 10 CENTAVOS			

Fuente: Autores

Anexo 7.5: Análisis de precios unitarios para HC con 0.5% superplastificante/m3.

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY		FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL			
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO					
REALIZADO POR:		JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO			
TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
RUBRO:	HORMIGÓN, $f_c=240$ kg/cm ²				UNIDAD: m ³
DETALLE:	0.50% DE SUPERPLASTIFICANTE				
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M					0.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Maestro mayor de ejecución de obra (estr.oc c1)	1.00	4.07	4.07	0.0500	0.20
Peón de albañil (estr.oc e2)	4.00	3.62	14.48	0.0500	0.72
SUBTOTAL N					0.93
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Cemento	Kg	428.70	0.16	68.59	
Arena para hormigón	m ³	0.55	21.47	11.81	
Ripio para hormigón	m ³	0.69	23.73	16.37	
Agua	m ³	0.21	3.00	0.64	
Superplastificante Sikament HE 200	Kg	2.1435	5.26	11.27	
SUBTOTAL O					108.69
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
SUBTOTAL P					0.00
			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		109.62
				COSTO INDIRECTO	16.44
				0.15	
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA					
				OTROS INDIRECTOS:	
				COSTO TOTAL DEL RUBRO:	126.06
				VALOR OFERTADO:	126.06
SON:	CIENTO VEINTE Y SEIS DÓLARES Y 6 CENTAVOS				

Fuente: Autores

Anexo 7.6: Análisis de precios unitarios para HC con 1% superplastificante/m³.
Fuente: Autores

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL				
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO					
REALIZADO POR:		JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO			
TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
RUBRO:	HORMIGÓN, f _c =240 kg/cm ²				
DETALLE:	1.00% DE SUPERPLASTIFICANTE				UNIDAD: m ³
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M					0.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Maestro mayor de ejecución de obra (estr.oc c1)	1.00	4.07	4.07	0.0500	0.20
Peón de albañil (estr.oc e2)	4.00	3.62	14.48	0.0500	0.72
SUBTOTAL N					0.93
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Cemento	Kg	428.70	0.16	68.59	
Arena para hormigón	m ³	0.55	21.47	11.81	
Ripio para hormigón	m ³	0.69	23.73	16.37	
Agua	m ³	0.21	3.00	0.64	
Superplastificante Sikament HE 200	Kg	4.287	5.26	22.55	
SUBTOTAL O					119.97
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
SUBTOTAL P					0.00
			TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)		120.89
				COSTO INDIRECTO	0.15
				OTROS INDIRECTOS:	
				COSTO TOTAL DEL RUBRO:	139.03
				VALOR OFERTADO:	139.03
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA					
	SON:	CIENTO TREINTA Y NUEVE DÓLARES Y 3 CENTAVOS			

Fuente: Autores

Anexo 7.7: Análisis de precios unitarios para HC con 1.5% superplastificante/m³.
Fuente: Autores

 UNIVERSIDAD DEL AZUAY		FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL			
TRABAJO DE TITULACIÓN DE GRADO					
REALIZADO POR:		JHOAN SEBASTIAN RUIZ BRITO KEVIN ISMAEL SUÁREZ ORTUÑO			
TRANSFORMACIÓN DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL A HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE, UTILIZANDO UN SUPERPLASTIFICANTE					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
RUBRO:	HORMIGÓN, $f_c=240$ kg/cm ²				
DETALLE:	1.50% DE SUPERPLASTIFICANTE	UNIDAD: m ³			
EQUIPOS					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
SUBTOTAL M	0				
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
	A	B	C = A x B	R	D = C x R
Maestro mayor de ejecución de obra (estr.oc e1)	1.00	4.07	4.07	0.0500	0.20
Peón de albañil (estr.oc e2)	4.00	3.62	14.48	0.0500	0.72
SUBTOTAL N	0.93				
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	COSTO	
		A	B	C = A x B	
Cemento	Kg	428.7	0.16	68.592	
Arena para hormigón	m ³	0.55	21.47	11.81	
Ripio para hormigón	m ³	0.69	23.73	16.37	
Agua	m ³	0.21	3.00	0.64	
Superplastificante Sikament HE 200	Kg	6.43	5.26	33.82	
SUBTOTAL O	131.24				
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	DISTANCIA	CANTIDAD	TARIFA	COSTO
SUBTOTAL P	0.00				
TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P)					132.17
COSTO INDIRECTO					15%
OTROS INDIRECTOS:					
COSTO TOTAL DEL RUBRO:					151.99
VALOR OFERTADO:					151.99
SON:					CIENTO CINCUENTA Y UN DÓLARES Y 99 CENTAVOS
ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA					